

تبخیر - تعرق گیاهان

(دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان)

ترجمه و تدوین:

گروه کار استفاده پایدار از منابع آب برای تولید محصولات کشاورزی

کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران



شماره انتشار: ۱۲۲
۱۳۸۷



تبخیر – تعرق گیاهان

(دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان)

ترجمه و تدوین:

گروه کار استفاده پایدار از منابع آب برای تولید محصولات کشاورزی
کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

علیرضا سلامت	ژاله وزیری
محمود مسچی	محمد رضا انتصاری
حسین دهقانی سانیچ	نادر حیدری

ویراستار:

داریوش تمدنی

این اثر با هماهنگی فائو و توسط کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران منتشر شده است.



عنوان و نام پدیدآور: تبخیر - تعرق گیاهان: دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان/اریک جی الن... [و دیگران]؛ ترجمه ژاله وزیری ... [و دیگران]؛ ویراستار داریوش تمدنی.

مشخصات نشر: تهران: کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳۸۷.

مشخصات ظاهری: ی، ۳۵۵ص: مصور، جدول، نمودار؛ ۲۱×۲۸سم.

شابک: 978-964-6668-69-0

وضعیت فهرست نویسی: فیبا

یادداشت: عنوان اصلی: Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements), 1998

یادداشت: ترجمه ژاله وزیری، علیرضا سلامت، محمدرضا انتصاری، محمود مسچی، نادر حیدری و حسین دهقانی سانچ.

یادداشت: کتابنامه: ص. ۳۵۵-۳۳۴.

موضوع: تبخیر و تعرق

موضوع: فرآورده‌های زراعی -- نیاز آبی

شناسه افزوده: آلن، ریک جی.

شناسه افزوده: Allen, R. G. (Rick G.)

شناسه افزوده: وزیری، ژاله، ۱۳۳۵ - مترجم

شناسه افزوده: تمدنی، داریوش، ویراستار

شناسه افزوده: ایران. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

شناسه افزوده: Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID)

رده‌بندی کنگره: ۶۰۰/ت۲-۱۳۸۷

رده‌بندی دیویی: ۶۳۱/۷

شماره کتابشناسی ملی: ۹۶۹۸۶۵۱

نام کتاب: تبخیر - تعرق گیاهان (دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان)

مترجمین: ژاله وزیری، علیرضا سلامت، محمدرضا انتصاری، محمود مسچی، نادر میدری، مسین دهقانی سانچ

ویراستار: داریوش تمدنی

ناشر: کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

حروف چینی و صفحه آرایی: کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

چاپ اول: ۱۳۸۷

تیراژ: ۱۰۰۰ نسخه

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۶۶۶۸-۶۹-۰

نشانی: تهران، خیابان شهید دستگردی (ظفر شرقی)، خیابان شهید کاگزار، خیابان شهید شهرساز، پلاک ۱

کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران تلفن: ۲۲۲۵۷۳۴۸ نمابر: ۲۲۲۷۲۲۸۵

حق چاپ برای کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران محفوظ است.

الف - نسخه اصلی این کتاب به وسیله فائو با عنوان انگلیسی:

Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements), FAO Irrigation and Drainage Paper No.56.

در سال ۱۹۹۸ میلادی منتشر گردید و توسط کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران با عنوان فارسی « تبخیر - تعرق گیاهان (دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان)» از سری گزارشات آبیاری و زهکشی فائو، در سال ۱۳۸۷ چاپ و منتشر شده است.

ب - فائو در رابطه با عناوین و اسامی مورد استفاده و ارائه مطالب این کتاب از نظر جایگاه حقوقی کشورها، سرزمین، شهر یا منطقه، همچنین در مورد تعیین اختیارات، حدود و ثغور مرزها هرگونه ادعائی را از خود سلب می‌نماید.

ذکر اسامی شرکت‌ها و فرآورده‌های تولیدکنندگان که در این کتاب، خواه صاحب امتیاز و یا خواه فاقد امتیاز ساخت باشند، به این مفهوم نیست که مورد تأیید یا توصیه فائو هستند و یا اینکه بر شرکت‌های مشابه دیگر که اسامی آنها در این کتاب ذکر نشده، ارجحیت داشته باشند. نظرات مذکور در این کتاب متعلق به مؤلفین است و الزاماً مبین نظرات فائو نمی‌باشد.

ج - کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران مسئول صحت ترجمه متن این کتاب از انگلیسی به فارسی است و فائو در این رابطه هم مسئولیتی را به عهده نمی‌گیرد.

چ - حق چاپ:

□ کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳۸۷، (نسخه فارسی)

© "IRNCID, 2009 (Farsi edition)

□ سازمان جهانی خواروبار و کشاورزی ملل متحد (فائو)، ۲۰۰۷ (نسخه انگلیسی)

© FAO, 1998 (English edition)

سرآغاز

در فن آبیاری، برآورد دقیق نیاز آبی گیاهان زراعی و محصولات باغی از پایه‌ای‌ترین رکن طراحی و محاسبات مهندسی به شمار می‌روند. از این رو روش‌های محاسباتی تبخیر - تعرق گیاهان، جزو اولویت‌های تحقیقاتی کشورهای جهان بوده است، تا اینکه در سال ۱۹۷۷ نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو با موضوع برآورد نیاز آبی گیاهان انتشار یافت. این کتاب سال‌های متمادی به عنوان کتاب مرجع در برآورد تبخیر - تعرق گیاهان و به دنبال آن در برآورد نیاز آبی گیاه ملاک محاسبه‌ها بوده است. با گذشت زمان و به دنبال پیشرفت علوم، مشخص شد که روش‌های توصیه شده در نشریه مذکور، اغلب بیش از واقعیت برآورد می‌شده است.

تحقیقات برای یافتن روش‌های محاسباتی که بر پارامترهای اقلیمی و گیاهی بیشتری استوار باشد ادامه یافت، و سرانجام در سال ۱۹۹۰ گروهی از کارشناسان از فائو، کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی و سازمان جهانی هواشناسی طی نشست، روش ترکیبی پنمن - مونتیت را به عنوان یک روش استاندارد جدید برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع پیشنهاد کردند. و در نهایت ۲۰ سال پس از انتشار نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو، در سال ۱۹۹۸ نشریه فنی شماره ۵۶ فائو، با موضوع محاسبه تبخیر - تعرق با تأکید بر روش پنمن - مونتیت انتشار یافت.

پس از چاپ نشریه فنی شماره ۵۶ فائو، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران اقدامات لازم برای ترجمه این کتاب به فارسی را در دستور کار خود قرار داد. هر چند بسیار علاقمند بودیم تا این کتاب در فاصله کوتاهی از چاپ نسخه انگلیسی آن انتشار یابد، ولی بواسطه مشکلات پیش آمده طی فرآیند ترجمه و ویراستاری، و بعلاوه تغییرات پی‌درپی در گروه ویراستاران، آماده سازی کتاب برای چاپ به طول انجامید.

در ترجمه، ویراستاری و آماده سازی این کتاب افراد زیادی همکاری کردند که از کلیه این عزیزان قدردانی می‌گردد. از آقایان مهندس علیرضا سلامت، مهندس محمود مسچی، مهندس محمدرضا انتصاری که ترجمه اولیه را به عهده داشتند، و از خانم مهندس ژاله وزیری که سهم زیادی در ترجمه، ویراستاری و بازخوانی کتاب در مراحل بعدی داشته‌اند تشکر بعمل می‌آید.

همچنین از آقایان دکتر علی‌اصغر صباغ‌فرشی، دکتر امین علیزاده و دکتر مجید میرلطیفی که در بازبینی کتاب همکاری کردند سپاسگزاری می‌نمایم. امور تایپ و ماشین‌نویسی این کتاب نیز به عهده خانم‌ها زهره آقاییک و مرجان مظاهری بوده است. از صبر و حوصله‌ای که خانم‌های همکارم در تایپ و اصلاح متن داشته‌اند قدردانی می‌گردد.

در پایان از تلاش همکاران گروه کار استفاده پایدار از منابع آب برای تولید محصولات کشاورزی این کمیته ملی که طی چند سال هدایت و نظارت بر ترجمه و ویراستاری کتاب را برعهده داشتند قدردانی بعمل می‌آید.

سیداسداله اسدالهی

دبیر کل کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

صفحه	فهرست مطالب
۱	فصل اول- مقدمه‌ای بر تبخیر - تعرق
۱	فرآیند تبخیر - تعرق
۱	تبخیر
۳	تعرق
۳	تبخیر - تعرق
۳	واحدها
۵	عوامل مؤثر بر تبخیر - تعرق
۵	پارامترهای هواشناسی
۵	عوامل گیاهی
۶	عوامل مدیریت زراعی و محیطی
۶	مفاهیم تبخیر - تعرق
۸	تبخیر - تعرق گیاه مرجع
۸	تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط استاندارد
۱۱	تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط غیراستاندارد
۱۱	تعیین تبخیر - تعرق
۱۱	اندازه‌گیری تبخیر - تعرق
۱۵	محاسبه تبخیر - تعرق با استفاده از داده‌های هواشناسی
۱۵	برآورد تبخیر - تعرق با استفاده از تشت تبخیر
۱۷	بخش الف- تبخیر - تعرق مرجع
۱۹	فصل دوم- معادله پنمن- مونتیت فائو
۱۹	روش استاندارد تعیین تبخیر - تعرق مرجع
۲۱	استخراج معادله پنمن- مونتیت
۲۱	معادله پنمن- مونتیت
۲۳	مقاومت آئرو دینامیک
۲۴	مقاومت سطحی (ظاهری)
۲۵	سطح مرجع
۲۷	معادله پنمن- مونتیت فائو
۲۷	معادله
۲۹	داده‌ها
۳۲	داده‌های اقلیمی غیرموجود

صفحه	فهرست مطالب
۳۳	فصل سوم- داده‌های هواشناسی
۳۳	عوامل هواشناسی مؤثر بر تبخیر - تعرق
۳۳	تابش خورشیدی
۳۴	دمای هوا
۳۴	رطوبت هوا
۳۵	سرعت باد
۳۵	پارامترهای آتمسفری
۳۵	فشار آتمسفر
۳۶	گرمای نهان تبخیر
۳۶	ضریب ثابت سایکرومتری
۳۷	دمای هوا
۳۸	رطوبت هوا
۳۸	مفاهیم
۴۰	اندازه‌گیری
۴۱	روش‌های محاسبه
۴۵	تابش
۴۵	مفاهیم
۵۰	واحدها
۵۲	اندازه‌گیری
۵۳	روش‌های محاسبه
۶۶	سرعت باد
۶۶	اندازه‌گیری
۶۶	نیمرخ باد
۶۷	تهیه داده‌های هواشناسی
۶۷	ایستگاه‌های هواشناسی
۶۸	پایگاه‌ها داده‌های اقلیمی - زراعی ماهانه
۶۹	برآورد داده‌های هواشناسی غیرموجود
۷۰	برآورد داده‌های رطوبت غیرموجود
۷۰	برآورد داده‌های تابش غیرموجود
۷۶	داده‌های سرعت باد غیرموجود

صفحه	فهرست مطالب
۷۷	حداقل داده‌های مورد نیاز
۷۷	معادله جایگزین برای تبخیر - تعرق مرجع هنگام غیرموجود بودن داده‌های هواشناسی
۷۹	فصل چهارم - تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع
۷۹	معادله پنمن - مونتیت
۸۰	روش محاسبه
۸۱	محاسبه تبخیر - تعرق برای دوره‌های مختلف
۹۳	روش محاسبه هنگام غیرموجود بودن داده‌ها
۹۶	روش تشت تبخیر
۹۶	تشت تبخیر
۹۶	ضریب تشت
۱۰۷	بخش ب - تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط استاندارد
۱۰۹	فصل پنجم - مقدمه‌ای بر تبخیر - تعرق گیاهان
۱۰۹	روش‌های محاسبه
۱۰۹	محاسبه مستقیم
۱۱۰	روش ضریب گیاهی
۱۱۱	عوامل مؤثر بر ضریب گیاهی
۱۱۱	نوع گیاه
۱۱۲	اقلیم
۱۱۴	تبخیر از سطح خاک
۱۱۴	مراحل رشد گیاه
۱۱۸	تبخیر - تعرق گیاهان
۱۱۹	روش ضریب گیاهی یک جزیی و دو جزیی
۱۲۰	منحنی ضریب گیاهی
۱۲۳	نمودار گردشی محاسبه‌ها
۱۲۵	فصل ششم - تبخیر - تعرق گیاهان و ضریب گیاهی یک جزیی
۱۲۵	طول مراحل رشد
۱۳۳	ضرایب گیاهی

صفحه	فهرست مطالب
۱۳۴	مقادیر ضرایب گیاهی
۱۳۴	ضریب گیاهی در مرحله اولیه رشد
۱۴۸	ضریب گیاهی در مرحله میانی رشد
۱۵۳	ضریب گیاهی در مرحله پایانی رشد
۱۵۵	ترسیم منحنی ضریب گیاهی
۱۵۵	گیاهان سالانه
۱۵۵	گیاهان علوفه‌ای
۱۵۶	درختان میوه
۱۵۷	محاسبه تبخیر - تعرق گیاه
۱۵۷	تعیین ضریب گیاهی به روش نمودار
۱۶۰	تعیین ضریب گیاهی به روش عددی
۱۶۱	ضرایب گیاهی بر مبنای سطح مرجع یونجه
۱۶۲	قابلیت اعتبار مقادیر ضرایب گیاهی پیشین
۱۶۵	فصل هفتم - تبخیر - تعرق گیاهان و ضریب گیاهی دو جزی
۱۶۵	جزء تعرق
۱۶۵	ضریب گیاهی پایه
۱۶۶	تعیین ضریب گیاهی پایه روزانه
۱۷۵	جزء تبخیر
۱۷۵	روش محاسبه
۱۷۶	کران بالای ضریب گیاهی
۱۷۶	ضریب کاهش تبخیر از خاک
۱۷۹	کسر سطح خاک خیس و در معرض هوا
۱۸۶	محاسبه ضریب تبخیر روزانه
۱۸۸	مراحل محاسبه
۱۸۸	محاسبه تبخیر - تعرق گیاهان
۱۹۵	بخش پ - تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط غیراستاندارد
۱۹۷	فصل هشتم - تبخیر - تعرق گیاهان تحت تنش آبی
۱۹۷	قابلیت استفاده آب خاک

صفحه	فهرست مطالب
۱۹۷	کل آب قابل استفاده
۱۹۸	آب سهل الوصول
۲۰۵	ضریب تنش آبی
۲۰۶	موازنه آب خاک
۲۰۹	پیش‌بینی و تخصیص آبیاری
۲۱۲	اثر شوری خاک
۲۱۴	رابطه عملکرد- شوری
۲۱۵	رابطه عملکرد - تنش آبی
۲۱۵	ترکیب رابطه شوری با تبخیر - تعرق
۲۱۵	بدون تنش آبی
۲۱۶	با تنش آبی
۲۱۶	محدودیت‌ها
۲۲۱	کاربرد
۲۲۵	فصل نهم- تبخیر - تعرق پوشش‌های گیاهی طبیعی، محصولات غیرمتداول و گیاهان کم‌پشت
۲۲۵	روش محاسبات
۲۲۵	مرحله اولیه رشد
۲۲۵	مراحل میانی و پایانی رشد
۲۲۶	تنش آبی
۲۲۷	اصلاح مرحله میانی رشد برای پوشش گیاهی کم پشت
۲۲۷	اصلاح از روی مشاهدات ساده مزرعه‌ای
۲۲۷	برآورد $K_{cb\ mid}$ از روی نمایه سطح برگ
۲۲۸	برآورد $K_{cb\ mid}$ از روی پوشش مؤثر زمین
۲۳۲	برآورد $K_{cb\ full}$
۲۳۳	نتیجه‌گیری
۲۳۵	اصلاح مرحله میانی رشد برای کنترل روزه‌ای
۲۳۸	مرحله پایانی رشد
۲۳۸	برآورد تبخیر - تعرق تحت شرایط غیراستاندارد با استفاده از عملکرد محصول

صفحه	فهرست مطالب
۲۴۱	فصل دهم- تبخیر - تعرق گیاهان تحت انواع عملیات مدیریت زراعی
۲۴۱	اثر مالچ‌های سطحی
۲۴۱	مالچ‌های پلاستیک
۲۴۳	مالچ‌های آلی
۲۴۴	کشت مخلوط
۲۴۵	پوشش گیاهی پیوسته
۲۴۶	پوشش گیاهی هم‌پوشان
۲۴۷	پوشش گیاهی نواری
۲۴۷	سطوح پوشش گیاهی کم وسعت
۲۴۷	سطوح پوشش گیاهی محصور در گیاهان با زبری و رطوبت مشابه
۲۴۹	اثر کلاس لاین و واحه
۲۵۲	مدیریت تشدید تنش محیطی
۲۵۲	یونجه بذری
۲۵۲	پنبه
۲۵۲	چغندر قند
۲۵۳	قهوه
۲۵۳	چای
۲۵۳	زیتون
۲۵۵	فصل یازدهم- تبخیر - تعرق گیاهان در دوره‌های غیررشد
۲۵۵	انواع شرایط سطح زمین
۲۵۵	خاک بدون پوشش
۲۵۶	خاک با پوشش گیاهی غیرزنده
۲۵۶	خاک با پوشش گیاهی زنده
۲۵۷	خاک یخ‌زده یا پوشیده از برف
۲۶۱	پیوست یک- واحدها و علامتها
۲۶۳	پیوست دو- جدول‌های هواشناسی
۲۷۱	پیوست سه- محاسبه پارامترهای فیزیکی مورد نیاز تعیین تبخیر - تعرق گیاهان

صفحه	فهرست مطالب
۲۷۷	پیوست چهار- تحلیل آماری داده‌های هواشناسی
۲۹۳	پیوست پنج- اندازه‌گیری و ارزیابی صحت داده‌های هواشناسی
۳۰۵	پیوست شش- اصلاح داده‌های هواشناسی ایستگاه غیر مرجع
۳۱۳	پیوست هفت- محاسبه ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد
۳۲۱	پیوست هشت- کاربرد روش ضریب گیاهی دو جزیی در برنامه‌ریزی آبیاری
۳۳۱	منابع مورد استفاده
۳۵۷	لیست انتشارات

صفحه	فهرست شکل‌ها
۲	۱- طرحی از یک روزنه برگ
۲	۲- جزءبندی تبخیر - تعرق یک گیاه زراعی سالانه در طول دوره رشد
۵	۳- عوامل مؤثر بر تبخیر - تعرق بر پایه مفاهیم مرتبط با آن
۷	۴- تبخیر - تعرق مرجع (ET_o)، تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد (ET_c) و غیر استاندارد ($ET_{c\ adj}$)
۱۲	۵- تغییر اجزای موازنه انرژی در بالای یک سطح در حال تعرق دارای آب کافی در یک روز صاف
۱۴	۶- موازنه آب خاک محدوده توسعه ریشه گیاه
۲۲	۷- طرحی از مقاومت‌های سطحی (ظاهری) و آئروپدینامیک در مقابل جریان بخار آب
۲۶	۸- تغییر معمول نمایه سطح برگ (سبز) ذرت در دوره رشد
۲۸	۹- ویژگی‌های گیاه مرجع فرضی
۳۴	۱۰- اثر سرعت باد بر تبخیر - تعرق در دو اقلیم گرم - خشک و مرطوب - گرم
۳۹	۱۱- رابطه فشار بخار اشباع و دمای هوا: منحنی $e^o(T)$
۳۹	۱۲- تغییر رطوبت نسبی در ۲۴ ساعت برای فشار بخار واقعی ثابت ۲/۴ کیلو پاسکال
۴۹	۱۳- تغییر تابش فرازمینی (R_a) در خط استوا و مدارهای ۲۰ و ۴۰ درجه شمالی و جنوبی
۴۹	۱۴- تغییر ساعات آفتابی (N) در خط استوا و مدارهای ۲۰ و ۴۰ درجه شمالی و جنوبی
۵۱	۱۵- اجزای مختلف تابش خورشیدی
۶۷	۱۶- ضریب تبدیل اندازه‌گیری سرعت باد در یک ارتفاع مشخص بالای سطح زمین به ارتفاع استاندارد دو متری
	۱۷- رابطه کسر تابش فرازمینی ورودی به سطح زمین ($\frac{R_s}{R_a}$) با تفاوت دمای حداکثر و حداقل هوا ($T_{max} - T_{min}$) برای مناطق؛ غیر ساحلی ($k_{Rs}=0/16$) و ساحلی ($k_{Rs}=0/19$)
۸۳	۱۸- محاسبه تبخیر - تعرق مرجع با نرم‌افزار CROPWAT
۹۷	۱۹- دو حالت استقرار تشت
۱۱۲	۲۰- ضرایب گیاهی معمول برخی محصولات با رشد کامل
۱۱۳	۲۱- حدهای مورد انتظار ضریب گیاهی برای گیاهان با رشد کامل در اقلیم متفاوت
۱۱۵	۲۲- اثر تبخیر بر ضریب گیاهی (K_c)
۱۱۶	۲۳- مراحل رشد انواع محصولات
۱۱۸	۲۴- حدهای معمول ضریب گیاهی مورد انتظار در چهار مرحله رشد

فهرست شکل‌ها

صفحه

- ۲۵- نمونه یک منحنی ضریب گیاهی در روش یک جزیی ۱۲۲
- ۲۶- منحنی‌های ضریب گیاهی ۱۲۲
- ۲۷- محاسبه تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد ۱۲۴
- ۲۸- تغییرات طول فصل رشد برنج (گونه Jaya) در تاریخ کشت و مناطق مختلف ساحلی رودخانه سنگال (آفریقا) ۱۳۳
- ۲۹- میانگین ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد به صورت تابع تبخیر - تعرق گیاه مرجع و فواصل خیس شدن برای بافت مختلف خاک مقدار آب نفوذ یافته کم تا متوسط (حدود ۱۰ میلی‌متر) ۱۴۳
- ۳۰- میانگین ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد به صورت تابعی از تبخیر - تعرق گیاه مرجع و فاصله آبیاری با عمق ۴۰ میلی‌متر و بیشتر ۱۴۵
- ۳۱- خیس شدن کسری از سطح خاک با آبیاری ۱۴۶
- ۳۲- تعدیل (افزایش) مقادیر K_c ارائه شده در جدول ۱۲ برای ارتفاع گیاه، میانگین سرعت باد روزانه (u_2) مختلف در شرایط متفاوت رطوبت هوا ۱۴۹
- ۳۳- حدهای مورد انتظار ضریب گیاهی در مرحله پایانی رشد ۱۵۴
- ۳۴- منحنی ضریب گیاهی ۱۵۴
- ۳۵- ترسیم منحنی ضریب گیاهی یونجه علوفه‌ای در جنوب آیداهو (ایالات متحده آمریکا) ۱۵۵
- ۳۶- منحنی و مقادیر ضریب گیاهی و ETC استخراج شده از منحنی برای لوبیا (دانه‌ای) ۱۶۰
- مثال کادر ۱۵ در دوره‌های ده روزه ۱۶۰
- ۳۷- منحنی ضریب گیاهی پایه لوبیا دانه‌ای در چهار مرحله رشد (مثال ۲۹) ۱۷۴
- ۳۸- ضریب کاهش تبخیر از خاک (K_r) ۱۷۸
- ۳۹- تعیین کسر خاک خیس بدون پوشش (f_{ew}) بر مبنای کسر پوشش گیاهی (f_c) و کسر خاک خیس شده (f_w) ۱۸۲
- ۴۰- موازنه آب در لایه خاک سطحی ۱۸۶
- ۴۱- ضریب تخلیه آب برای سطوح مختلف تبخیر - تعرق ۱۹۹
- ۴۲- ضریب تنش آبی (K_s) ۲۰۵
- ۴۳- موازنه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه ۲۰۶
- ۴۴- اثر شوری خاک بر K_s ۲۲۱
- ۴۵- انواع مختلف کشت مخلوط ۲۴۵
- ۴۶- منحنی ضریب گیاهی برای سطوح کشت کم وسعت تحت اثر واحه ۲۵۱
- ۴۷- میانگین تبخیر - تعرق در دوره‌های غیر رشد (زمستان) در کیمبرلی - آیداهو ۲۵۹

صفحه	فهرست جدول‌ها
۴	۱- واحدهای تبخیر - تعرق و ضرایب تبدیل
	۲- میانگین تبخیر - تعرق مرجع در مناطق اقلیمی - زراعی مختلف
۹	بر حسب میلی‌متر بر روز
۵۲	۳- ضرایب تبدیل واحدهای تابش خورشیدی
۷۶	۴- گروه‌بندی کلی بادهای
	۵- ضریب تشش (K_p) کلاس A در دو حالت استقرار تشش و برای سطوح مختلف
۹۹	رطوبت نسبی و سرعت باد
	۶- ضریب تشش (K_p) کلرادو فرو رفته در خاک در دو حالت استقرار تشش برای سطوح
۱۰۰	مختلف رطوبت نسبی و سرعت باد
۱۰۱	۷- ضریب تشش (K_p): معادله‌های رگرسیون استخراج شده از جدول‌های ۵ و ۶
	۸- نسبت بین تبخیر از انواع تشش‌های فرو رفته در خاک و تشش کلرادو
۱۰۲	در شرایط اقلیمی و محیطی مختلف
	۹- مقادیر تقریبی ضریب گیاهی در مرحله اولیه رشد برای بارندگی
۱۱۵	و آبیاری متوسط (۱۰ تا ۴۰ میلی‌متر) و بافت خاک متوسط
۱۱۹	۱۰- معیارهای کلی برای انتخاب روش‌های ضریب گیاهی یک جزیی و دو جزیی
۱۲۶	۱۱- طول مراحل رشد انواع گیاهان برای تاریخ کشت و اقلیم متفاوت (روز)
	۱۲- میانگین ضریب گیاهی (یک جزیی) و حداکثر ارتفاع گیاه تحت شرایط بدون تنش، مدیریت
	زراعی مطلوب در اقلیم نیمه مرطوب ($RH_{min} = 45$ درصد و $u_2 = 2$ متر بر ثانیه)
۱۳۶	برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع به روش پنمن - مونتیت فائو
۱۴۲	۱۳- طبقه‌بندی بارندگی
۱۴۸	۱۴- ضریب گیاهی برنج در مرحله اولیه رشد برای رطوبت هوا و سرعت باد مختلف
۱۵۱	۱۵- برآورد سرعت باد ماهانه بر پایه داده‌های تجربی
۱۵۱	۱۶- مقادیر معمول حداقل و میانگین رطوبت نسبی در اقلیم‌های مختلف
	۱۷- ضرایب گیاهی پایه در مراحل مختلف رشد محصولات در شرایط بدون تنش و تحت
	مدیریت زراعی مطلوب و اقلیم نیمه مرطوب ($RH_{min} = 45$ درصد و $u_2 = 2$ متر بر ثانیه)
۱۶۷	برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع به روش پنمن - مونتیت فائو
۱۷۳	۱۸- راهنمای کلی تعیین ضریب گیاهی پایه از روی ضرایب گیاهی جدول ۱۲
	۱۹- مقادیر معمول ظرفیت زراعی (θ_{FC})، نقطه پژمردگی (θ_{WP}) و آب قابل تبخیر خاک
۱۷۸	در انواع متفاوت بافت

صفحه	فهرست جدول‌ها
۱۸۳	۲۰- مقادیر معمول کسر خاک خیس شده با آبیاری و یا بارندگی (f_w)
۱۸۳	۲۱- مقادیر معمول کسر پوشش گیاهی (f_c) و کسر سطح خاک در معرض تابش ($1-f_c$)
	۲۲- حداکثر عمق مؤثر توسعه ریشه (Z_r) و ضریب تخلیه آب خاک (p)
۲۰۰	برای محصولات متداول تحت شرایط بدون تنش آبی
	۲۳- آستانه تحمل شوری ($EC_e \text{ threshold}$) محصولات متداول بر حسب
۲۱۷	هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک
۲۲۳	۲۴- میانگین K_y در دوره رشد گیاهان تحت تنش آبی
	۲۵- مقادیر تقریبی کاهش ضریب گیاهی و تبخیر از سطح خاک و افزایش تعرق
۲۴۲	برای چند نوع سبزی و صیفی تحت آبیاری قطره‌ای

صفحه	فهرست کادرها
۹	۱- فصل‌های مرتبط با محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع (ET_0)
۱۰	۲- فصل‌های مرتبط با محاسبه تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط استاندارد (ET_c)
۱۱	۳- فصل‌های مرتبط با محاسبه تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط غیر استاندارد ($ET_{c\ adj}$)
۲۵	۴- مقاومت آئروдинаمیک سطح مرجع چمن
۲۶	۵- مقاومت سطحی (ظاهری) گیاه مرجع چمن
۳۱	۶- استخراج معادله پنمن - مونتیث فائو برای گیاه مرجع چمن فرضی
۴۶	۷- راهنمای محاسبه کمبود فشار بخار واقعی ($e_s - e_a$)
۵۱	۸- تبدیل انرژی به تبخیر معادل
۵۸	۹- محاسبه تابش فرازمینی (R_a) و حداکثر ساعات آفتابی (N)
۶۳	۱۰- صفحه گسترده محاسبه تابش خالص (R_n)
۸۱	۱۱- صفحه گسترده محاسبه تبخیر - تعرق مرجع
۱۰۳	۱۲- مشخصات تشتت کلاس A
۱۰۴	۱۳- مشخصات تشتت کلرادو فرو رفته در خاک
۱۵۰	۱۴- اثر اقلیم بر ضریب گیاهی مرحله میانی رشد گندم تحت شرایط مزرعه‌ای
	۱۵- ضریب گیاهی لوبیا (دانه‌ای) به روش یک جزیی
۱۵۸	(مطالعه موردی در کیمبرلی - آیداهو، ایالات متحده آمریکا)
	۱۶- محاسبه ضریب گیاهی لوبیا (دانه‌ای) به روش دو جزیی
۱۹۳	(مطالعه موردی در کیمبرلی - آیداهو، ایالات متحده آمریکا)
۲۳۰	۱۷- اندازه‌گیری و برآورد نمایه سطح برگ
۲۳۰	۱۸- اندازه‌گیری و برآورد کسر پوشش گیاهی مؤثر

صفحه	فهرست مثال‌ها
۴	۱- تبدیل واحدهای تبخیر
۳۷	۲- تعیین پارامترهای آتمسفری
۴۱	۳- تعیین میانگین فشار بخار اشباع
۴۳	۴- تعیین فشار بخار واقعی با استفاده از داده‌های سایکرومتر
۴۵	۵- تعیین فشار بخار واقعی با استفاده از رطوبت نسبی
۴۵	۶- تعیین کمبود فشار بخار
۵۴	۷- تبدیل عرض جغرافیایی از درجه و دقیقه به رادیان
۵۵	۸- تعیین تابش فرازمینی
۵۷	۹- تعیین حداکثر ساعات آفتابی
۵۹	۱۰- تعیین تابش خورشیدی با استفاده از اندازه‌گیری ساعات آفتابی
۶۲	۱۱- تعیین تابش طول موج بلند خالص
۶۲	۱۲- تعیین تابش خالص
۶۵	۱۳- تعیین شار گرمای ماهانه خاک
۶۷	۱۴- تبدیل سرعت باد اندازه‌گیری شده در ارتفاع Z به ارتفاع استاندارد دو متری
۷۴	۱۵- تعیین تابش خورشیدی با استفاده از داده‌های دما
۷۴	۱۶- تعیین تابش خالص در شرایط غیرموجود بودن داده‌های تابش
۸۴	۱۷- تعیین تبخیر - تعرق مرجع برای میانگین داده‌های ماهانه
۸۷	۱۸- تعیین تبخیر - تعرق مرجع برای داده‌های روزانه
۹۱	۱۹- تعیین تبخیر - تعرق مرجع برای داده‌های ساعتی
۹۳	۲۰- تعیین تبخیر - تعرق مرجع در شرایط غیرموجود بودن داده‌ها
۱۰۲	۲۱- تعیین تبخیر - تعرق مرجع از تشت تبخیر با استفاده از جدول‌ها
۱۰۵	۲۲- تعیین تبخیر- تعرق مرجع از روی تبخیر از تشت با استفاده از معادله‌ها
۱۴۲	۲۳- برآورد فواصل بارندگی
۱۴۳	۲۴- تعیین ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد به روش نموداری
۱۴۴	۲۵- میان‌یابی بین فواصل خیس شدن سبک و سنگین خاک
	۲۶- تعیین ضریب گیاهی در مرحله اولیه رشد هنگامی که کسری از سطح خاک خیس می‌شود.
۱۴۷	
۱۵۲	۲۷- تعیین ضریب گیاهی در مرحله میانی رشد
۱۶۱	۲۸- تعیین ضریب گیاهی به روش عددی

صفحه

فهرست مثال‌ها

۱۷۳	۲۹- انتخاب و اصلاح ضریب گیاهی پایه (K_{cb})
۱۷۴	۳۰- تعیین ضریب گیاهی پایه روزانه
۱۸۰	۳۱- تعیین تبخیر - تعرق از سطح خاک بدون پوشش
۱۸۴	۳۲- محاسبه ضریب گیاهی به روش دو جزئی ($K_{cb} + K_e$) در روش آبیاری بارانی
۱۸۵	۳۳- محاسبه ضریب گیاهی به روش دو جزئی ($K_{cb} + K_e$) در روش آبیاری نهرچه‌ای
۱۸۵	۳۴- محاسبه ضریب گیاهی به روش دو جزئی ($K_{cb} + K_e$) در روش آبیاری قطره‌ای
۱۹۰	۳۵- برآورد تبخیر - تعرق گیاه با روش ضریب گیاهی دو جزئی
۲۰۴	۳۶- تعیین مقدار آب سهل‌الوصول خاک برای انواع بافت و گیاهان مختلف
۲۰۷	۳۷- اثر تنش آبی بر تبخیر - تعرق گیاه
۲۱۰	۳۸- برنامه‌ریزی آبیاری برای پرهیز از تنش آبی
۲۲۲	۳۹- اثر شوری خاک بر تبخیر - تعرق گیاه
۲۲۹	۴۰- تقریب اولیه ضریب گیاهی در مرحله میانی رشد برای پوشش گیاهی کمپشت
۲۳۴	۴۱- برآورد ضریب گیاهی در مرحله میانی رشد
۲۳۵	۴۲- برآورد ضریب گیاهی در مرحله میانی رشد برای پوشش گیاهی کمپشت
	۴۳- برآورد ضریب گیاهی پایه در مرحله میانی رشد ($K_{cb\ mid}$) از روی پوشش گیاهی
۲۳۶	سطح زمین با کاهش آن برای کنترل روزه‌ای
۲۴۰	۴۴- برآورد تقریبی ضریب تنش (K_s) از روی عملکرد محصول
۲۴۳	۴۵- اثر مالچ سطحی
۲۴۷	۴۶- کشت مخلوط ذرت و کدو
۲۴۸	۴۷- گیاهان هم‌پوشان

صفحه	فهرست معادله‌ها
۱۲	۱- معادله موازنه انرژی
۱۴	۲- موازنه آب خاک
۲۲	۳- معادله ترکیبی پنمن- مونتیت
۲۳	۴- مقاومت آئرو دینامیک (r_a)
۲۴	۵- مقاومت (سطحی) ظاهری (r_s)
۲۸	۶- معادله پنمن- مونتیت فائو برای دوره‌های روزانه، ده روز و ماهانه
۳۵	۷- فشار آتمسفر (P)
۳۶	۸- ضریب ثابت سایکرومتری (γ)
۳۸	۹- میانگین دمای هوا (T_{mean})
۴۰	۱۰- رطوبت نسبی (RH)
۴۱	۱۱- تابع فشار بخار اشباع بر حسب دما ($e^0(T)$)
۴۱	۱۲- فشار بخار اشباع (e_s)
۴۲	۱۳- شیب منحنی تابع فشار بخار اشباع بر حسب دما (Δ)
۴۲	۱۴- تابع فشار بخار واقعی بر حسب دمای نقطه شبنم (e_a)
۴۲	۱۵- فشار بخار واقعی بر حسب داده‌های سایکرومتری (e_a)
۴۳	۱۶- ضریب ثابت دستگاه سایکرومتر (γ_{psy})
۴۳	۱۷- فشار بخار واقعی (e_a) بر حسب RH_{min} و RH_{max}
۴۴	۱۸- فشار بخار واقعی (e_a) بر حسب R_{max}
۴۴	۱۹- فشار بخار واقعی (e_a) بر حسب R_{mean}
۵۰	۲۰- تبدیل انرژی به تبخیر معادل
۵۳	۲۱- تابش فرازمینی روزانه (R_a)
۵۳	۲۲- تبدیل درجه به رادیان
۵۴	۲۳- فاصله نسبی زمین - خورشید (d_r)
۵۴	۲۴- زاویه میل خورشید (δ)
۵۴	۲۵- زاویه زمان غروب با استفاده از تابع $\arccos$
۵۴	۲۶- زاویه زمان غروب با استفاده از تابع $\arctan$
۵۴	۲۷- پارامتر X در معادله ۲۶
۵۶	۲۸- تابش فرازمینی برای دوره‌های ساعتی و کوتا‌تر
۵۶	۲۹- زاویه زمان خورشید در شروع دوره (ω_1)

صفحه	فهرست معادله‌ها
۵۶	۳۰- زاویه زمان خورشید در انتهای دوره (ω_2)
۵۶	۳۱- زاویه زمان خورشید در نیمه دوره (ω)
۵۷	۳۲- ضریب اصلاح فصل برای زمان خورشید (S_c)
۵۷	۳۳- پارامتر b در معادله ۳۲
۵۷	۳۴- ساعات آفتابی (N)
۵۹	۳۵- تابش خورشیدی (R_s)
۶۰	۳۶- تابش در آسمان صاف در سطح دریا (R_{so})
۶۰	۳۷- تابش در آسمان صاف در ارتفاعات (R_{so})
۶۰	۳۸- تابش موج کوتاه خالص (R_{ns})
۶۱	۳۹- تابش موج بلند خالص (R_{nl})
۶۲	۴۰- تابش خالص (R_n)
۶۴	۴۱- شار گرمای خاک (G)
۶۴	۴۲- شار گرمای خاک برای دوره‌های یک و ده روزه (G_{day})
۶۴	۴۳- شار گرمای خاک برای دوره‌های ماهانه (E_{month})
۶۵	۴۴- شار گرمای خاک برای دوره‌های ماهانه اگر $T_{month, i+1}$ معلوم نباشد (G_{month})
۶۵	۴۵- شار گرمای خاک برای دوره‌های ساعتی و کوتاه‌تر در روز (G_{hr})
۶۵	۴۶- شار گرمای خاک برای دوره‌های ساعتی و کوتاه‌تر در شب (G_{hr})
۶۶	۴۷- اصلاح سرعت باد به ارتفاع استاندارد (u_2)
۷۰	۴۸- برآورد فشار بخار واقعی در دمای حداقل (e_a)
۷۱	۴۹- تابش خورشیدی ورودی در یک ایستگاه هواشناسی مجاور (R_s)
۷۲	۵۰- برآورد تابش خورشیدی از روی تفاوت دما (معادله هارگریوز)
۷۵	۵۱- برآورد تابش خورشیدی در جزیره‌ها
۷۷	۵۲- معادله تبخیر - تعرق مرجع هارگریوز ۱۹۸۵
۸۹	۵۳- معادله پنمن - مونتیت فائو برای دوره‌های ساعتی
۹۰	۵۴- فشار بخار واقعی برای دوره‌های ساعتی
۹۶	۵۵- تعیین ET_0 از روی تبخیر از تشت
۱۱۰	۵۶- تبخیر - تعرق گیاه (ET_c)
۱۲۰	۵۷- ضریب گیاهی دو جزیی
۱۲۵	۵۸- تبخیر - تعرق گیاه با ضریب گیاهی یک جزیی (ET_c)

صفحة

فهرست معادله‌ها

- ۱۴۴ ۵۹- میان‌یابی برای تعیین عمق نفوذ بین ۱۰ و ۴۰ میلی‌متر
- ۱۴۶ ۶۰- اصلاح $K_{c\ ini}$ هنگامی که کسری از خاک با آبیاری خیس شده
- ۱۴۶ ۶۱- عمق آبیاری در کسر خاک خیس (I_w)
- ۱۴۸ ۶۲- اصلاح $K_{c\ mid}$ برای اقلیم
- ۱۵۱ ۶۳- حداقل رطوبت نسبی برآورد شده با استفاده از $e^0(T_{dew})$
- ۱۵۱ ۶۴- حداقل رطوبت نسبی برآورد شده با استفاده از $e^0(T_{min})$
- ۱۵۳ ۶۵- اصلاح $K_{c\ end}$ برای اقلیم
- ۱۶۰ ۶۶- میان‌یابی K_c برای مراحل توسعه و پایانی رشد
- ۱۶۲ ۶۷- رابطه میان ضرایب گیاهی بر پایه سطح مرجع چمن و یونجه
- ۱۶۲ ۶۸- رابطه میان K_c بر پایه سطح مرجع چمن و یونجه در کیمبرلی-آیداهو
- ۱۶۵ ۶۹- تبخیر - تعرق گیاه به روش ضریب گیاهی دو جزئی (ET_c)
- ۱۶۶ ۷۰- اصلاح K_{cb} برای اقلیم
- ۱۷۵ ۷۱- ضریب تبخیر از خاک (K_c)
- ۱۷۶ ۷۲- کران بالای تبخیر - تعرق ($K_{c\ max}$)
- ۱۷۷ ۷۳- حداکثر عمق آب قابل تبخیر از خاک سطحی (TEW)
- ۱۷۹ ۷۴- ضریب کاهش تبخیر (K_r)
- ۱۸۱ ۷۵- کسر خاک خیس شده و بدون پوشش (f_{ew})
- ۱۸۳ ۷۶- کسر پوشش گیاهی مؤثر (f_c)
- ۱۸۶ ۷۷- موازنه روزانه آب در کسر خاک خیس و در معرض هوا
- ۱۸۷ ۷۸- کران‌های تخلیه آب خاک به صورت تبخیر
- ۱۸۸ ۷۹- مقدار زهاب خروجی از لایه خاک سطحی (DP_e)
- ۱۹۷ ۸۰- اصلاح تبخیر - تعرق گیاه تحت تنش آبی - روش ضریب گیاهی دو جزئی
- ۱۹۷ ۸۱- اصلاح تبخیر - تعرق گیاه تحت تنش آبی - روش ضریب گیاهی یک جزئی
- ۱۹۸ ۸۲- کل آب قابل استفاده خاک عمق توسعه ریشه گیاه (TAW)
- ۱۹۹ ۸۳- آب سهل‌الوصول خاک عمق توسعه ریشه گیاه (RAW)
- ۲۰۵ ۸۴- ضریب تنش آبی (K_s)
- ۲۰۶ ۸۵- موازنه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه
- ۲۰۸ ۸۶- حدود تخلیه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه به صورت تبخیر - تعرق
- ۲۰۸ ۸۷- تخلیه اولیه ($D_{r,i-1}$)

صفحه	فهرست معادله‌ها
۲۰۹	۸۸- نفوذ عمقی (DP)
۲۱۴	۸۹- تعیین عملکرد نسبی ($\frac{Y_a}{Y_m}$) از روی شوری خاک (EC_e) و آستانه تحمل شوری گیاه
۲۱۵	۹۰- تابع حساسیت عملکرد - آب (نشریه فنی شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو)
۲۱۵	۹۱- ضریب تنش آبی تحت شوری
۲۱۶	۹۲- ضریب تنش آبی تحت شوری و تنش آبی
۲۲۱	۹۳- پیش‌بینی شوری خاک (EC_e) از روی کسر آبشویی (LF) و کیفیت آب آبیاری (EC_{iw})
۲۲۷	۹۴- $K_{c\ adj}$ برای پوشش گیاهی با رشد غیر کامل
۲۲۷	۹۵- ضریب اصلاح (از روی LAI)
۲۲۷	۹۶- ضریب اصلاح (از روی f_c)
۲۲۸	۹۷- $K_{(cb\ mid)adj}$ از روی نمایه سطح برگ
۲۲۸	۹۸- $K_{(cb\ mid)adj}$ از روی پوشش گیاهی مؤثر
۲۳۲	۹۹- $K_{cb\ full}$ محصولات
۲۳۲	۱۰۰- $K_{cb\ full}$ پوشش گیاهی گیاهان طبیعی
۲۳۳	۱۰۱- $K_{cb\ h}$ پوشش گیاهی کامل
۲۳۵	۱۰۲- اصلاح ضریب گیاهی برای کنترل روزنه‌ای (F_r)
۲۳۹	۱۰۳- برآورد ضریب تنش آبی (K_s) از روی تابع حساسیت عملکرد به آب
۲۴۶	۱۰۴- برآورد ضریب گیاهی کشت مخلوط ($K_{c\ field}$)
۲۵۱	۱۰۵- برآورد ضریب گیاهی (K_c) بادشکن‌ها

فهرست علامتها و واحدها

ضریب سایکرومتری [درجه سلسیوس]	a_{psy}
جزء تابش ورودی به سطح زمین در یک روز ابری [-] ^۱	a_s
جزء تابش فرازمینی ورودی به سطح زمین در یک روز صاف غیر ابری [-]	$a_s + b_s$
گرمای ویژه [مگاژول بر مترمکعب بر درجه سلسیوس]	c_p
ظرفیت گرمای خاک [مگاژول بر مترمکعب بر درجه سلسیوس]	c_s
صعود مویینه‌ای آب در خاک [میلی‌متر بر روز]	CR
عمق تبخیر (تخلیه) تجمعی از لایه خاک سطحی [میلی‌متر]	D_e
عمق تبخیر - تعرق (تخلیه) تجمعی از خاک عمق توسعه ریشه گیاه [میلی‌متر]	D_r
ارتفاع صفحه جابجایی صفر [متر]	d
عکس فاصله نسبی زمین - خورشید [-]	d_r
نفوذ عمقی [میلی‌متر]	DP
نفوذ عمقی به پایین لایه تبخیر [میلی‌متر]	DP_e
تبخیر [میلی‌متر بر روز]	E
تبخیر از تشت [میلی‌متر بر روز]	E_{pan}
فشار بخار اشباع در T درجه [کیلو پاسکال]	$e^o(T)$
فشار بخار اشباع در یک دوره زمانی مشخص [کیلو پاسکال]	e_s
فشار بخار واقعی [کیلو پاسکال]	e_a
کمبود فشار بخار اشباع [کیلو پاسکال]	$e_s - e_a$
هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک [دسی زیمنس بر متر]	EC_e
هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در آستانه کاهش عملکرد محصول [دسی زیمنس بر متر]	$EC_{e, threshold}$
تبخیر - تعرق [میلی‌متر بر روز]	ET
تبخیر - تعرق گیاه مرجع [میلی‌متر بر روز]	ET_o
تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد [میلی‌متر بر روز]	ET_c
تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط غیر استاندارد [میلی‌متر بر روز]	$ET_{c adj}$
عدد $2/7183$ (پایه لگاریتم طبیعی) به توان x	$\exp(x)$
ضریب اصلاح مقاومت [-]	F_r
کسری از سطح خاک که دارای پوشش گیاهی است [-]	f_c
کسری از سطح خاک که دارای پوشش گیاهی مؤثر است [-]	$f_{c eff}$
کسری از سطح خاک که بدون پوشش است [-]	$1 - f_c$

۱- نماد [-] به معنای بدون بُعد است.

فهرست علامتها و واحدها

کسری از سطح خاک که با بارندگی و یا آبیاری خیس شده است [-]	f_w
کسری از سطح خاک که بدون پوشش لیکن، خیس (و بخش عمده تبخیر در آن انجام) شده است [-]	f_{ew}
شار گرمای خاک [مگاژول بر مترمربع بر روز]	G
شار گرمای خاک در دوره‌های یک و ده روزه [مگاژول بر مترمربع بر روز]	G_{day}
شار گرمای خاک در دوره‌های یک ساعتی یا کمتر [مگاژول بر مترمربع بر روز]	G_{hr}
شار گرمای خاک در دوره‌های ماهانه [مگاژول بر مترمربع بر روز]	G_{month}
ثابت خورشیدی [۰/۰۸۲۰ مگاژول بر مترمربع بر دقیقه]	G_{sc}
گرمای محسوس [مگاژول بر مترمربع بر روز]	H
نسبت ارتفاع گیاه به پهنای کشت [-]	HWR
ارتفاع گیاه [متر]	h
عمق آبیاری [میلی‌متر]	I
عمق آبیاری در کسر خاک خیس شده [میلی‌متر]	I_w
شماره روز از سال [-]	J
ضریب گیاهی [-]	K_c
ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد [-]	$K_{c\ ini}$
ضریب گیاهی مرحله میانی رشد [-]	$K_{c\ mid}$
ضریب گیاهی مرحله پایانی رشد [-]	$K_{c\ end}$
بیشترین مقدار ضریب گیاهی (پس از بارندگی یا آبیاری) [-]	$K_{c\ max}$
کمترین مقدار ضریب گیاهی (خاک خشک بدون پوشش) [-]	$K_{c\ min}$
ضریب گیاهی پایه [-]	K_{cb}
ضریب گیاهی پایه در نیمه دوره رشد گیاه با مشخصات حداکثر اندازه یا ارتفاع و پوشش گیاهی کامل یعنی $LAI > 3$ [-]	$K_{cb\ full}$
ضریب گیاهی پایه مرحله اولیه رشد [-]	$K_{cb\ ini}$
ضریب گیاهی پایه مرحله میانی رشد [-]	$K_{cb\ mid}$
ضریب گیاهی پایه مرحله پایانی رشد [-]	$K_{cb\ end}$
ضریب تبخیر خاک [-]	K_e
ضریب تنش [-]	K_p
ضریب کاهش تبخیر [-]	K_r
ضریب تنش آبی [-]	K_s
ضریب حساسیت عملکرد محصول	K_y
ضریب ون کارمن [مساوی با ۰/۴۱] [-]	K

فهرست علامتها و واحدها

K_{RS}	ضریب اصلاح برای معادله تابش هارگریوز [$^{\circ}C^{-0.5}$]
L_{ini}	طول مرحله اولیه رشد [روز]
L_{mid}	طول مرحله میانی رشد [روز]
L_{late}	طول مرحله پایانی رشد [روز]
L_z	طول جغرافیایی مرکز یک منطقه دارای یک ساعت محلی مشترک [درجه از غرب گرینویچ]
L_m	طول جغرافیایی [درجه از غرب گرینویچ]
LAI	نمایه سطح برگ [مترمربع سطح برگ در هر مترمربع سطح خاک]
LAI_{active}	نمایه سطح برگ فعال (بخش رو به خورشید) [-]
N	حداکثر طول دوره روشنایی، حداکثر ساعات آفتابی [ساعت]
n	ساعات آفتابی واقعی [ساعت]
$\frac{n}{N}$	نسبت بین ساعات آفتابی واقعی و حداکثر ساعات آفتابی [-]
P	بارندگی [میلی‌متر] یا فشار آتمسفر [کیلوپاسکال]
p	ضریب کاهش تبخیر - تعرق [-]
R	ثابت ویژه گازها [مساوی با 0.287 کیلوژول بر کیلوگرم بر کلوین]
R_a	تابش فرازمینی [مگاژول بر مترمربع بر روز]
R_e	تابش طول موج بلند [مگاژول بر مترمربع بر روز]
R_n	تابش طول موج کوتاه خالص [مگاژول بر مترمربع بر روز]
R_{nl}	تابش طول موج بلند خالص [مگاژول بر مترمربع بر روز]
R_{ns}	تابش خورشیدی یا موج کوتاه خالص [مگاژول بر مترمربع بر روز]
R_s	تابش خورشیدی یا موج کوتاه [مگاژول بر مترمربع بر روز]
R_{so}	تابش خورشیدی یا موج کوتاه در آسمان صاف غیر ابری [مگاژول بر مترمربع بر روز]
r_a	مقاومت آئروپینامیک [ثانیه بر متر]
R_l	مقاومت روزنه‌ای ظاهری برگ سالم [ثانیه بر متر]
r_s	مقاومت سطحی (ظاهری) پوشش (آسمانه) گیاهی [ثانیه بر متر]
R_s/R_{so}	نسبت تابش خورشیدی یا موج کوتاه
RAW	آب سهل‌الوصول خاک عمق توسعه ریشه گیاه [میلی‌متر]
REW	آب قابل تبخیر سهل‌الوصول (حداکثر عمق قابل تبخیر در مرحله اولیه رشد گیاه بدون محدودیت آبی) [میلی‌متر]
RH	رطوبت نسبی [درصد]
RH_{hr}	میانگین ساعتی رطوبت نسبی [درصد]

فهرست علامتها و واحدها

حداکثر روزانه رطوبت نسبی [درصد]	RH_{max}
میانگین روزانه رطوبت نسبی [درصد]	RH_{mean}
حداقل روزانه رطوبت نسبی [درصد]	RH_{min}
رواناب سطحی [میلی متر]	R_o
ضریب اصلاح زمان خورشیدی برای فصل سال [ساعت]	S_c
جریان آب زیرزمینی [میلی متر]	SF
دمای هوا [درجه سلسیوس]	T
دمای هوا [کلوین]	T_k
دمای پتانسیل هوا [کلوین]	T_{kv}
دمای نقطه شبنم [درجه سلسیوس]	T_{dew}
دمای خشک [درجه سلسیوس]	T_{dry}
حداکثر روزانه دمای هوا [درجه سلسیوس]	T_{max}
حداکثر روزانه دمای هوا [کلوین]	K, T_{max}
میانگین دمای روزانه هوا [درجه سلسیوس]	T_{mean}
حداقل دمای روزانه هوا [درجه سلسیوس]	T_{min}
حداقل دمای روزانه هوا [کلوین]	K, T_{min}
دمای تر [درجه سلسیوس]	T_{wet}
کل آب قابل استفاده خاک عمق توسعه ریشه گیاه [میلی متر]	TAW
کل آب قابل تبخیر (برای مثال، حداکثر عمق آب قابل تبخیر در لایه خاک سطحی) [میلی متر]	TEW
زمان [ساعت]	t
سرعت باد در ارتفاع استاندارد دو متری [متر بر ثانیه]	u_2
سرعت باد در ارتفاع z [متر بر ثانیه]	u_z
مقدار آب خاک [میلی متر]	W
عملکرد واقعی گیاه [کیلوگرم بر هکتار]	Y_a
حداکثر (قابل انتظار) عملکرد محصول گیاه بدون تنش محیطی یا آبی [کیلوگرم بر هکتار]	Y_m
عمق لایه خاک سطحی که انتظار می رود با تبخیر خشک شود [میلی متر]	Z_e
عمق توسعه ریشه گیاه [متر]	Z_r
ارتفاع از سطح دریا [متر]	Z
ارتفاع اندازه گیری رطوبت [متر]	Z_h
ارتفاع اندازه گیری باد [متر]	Z_m
طول زبری سطح انتقال گشتاور [متر]	Z_{om}

فہرست علامت‌ها و واحدها

طول زبری سطح انتقال گرما و بخار [متر]	Z_{oh}
آلبدو یا ضریب بازتابش [-]	α
ضریب ثابت سایکرومتری [کیلو پاسکال بر درجہ سلسیوس]	γ
ثابت دستگاه سایکرومتر [کیلو پاسکال بر درجہ سلسیوس]	γ_{psy}
شیب منحنی بخار اشباع فشار [کیلو پاسکال بر درجہ سلسیوس]	Δ
فاصلہ زمانی (روز)	Δt
عمق خاک مؤثر [متر]	Δz
زاویہ خورشیدی [رادیان]	δ
نسبت وزن مولکولی بخار آب بہ وزن مولکولی هوای خشک [مساوی با ۰/۶۲۲]	ε
میانگین زاویہ خورشیدی بالای سطح افق	η
مقدار آب خاک [مترمکعب آب بر مترمکعب خاک]	θ
مقدار آب خاک در نقطہ ظرفیت زراعی [مترمکعب آب بر مترمکعب خاک]	θ_{FC}
مقدار آب خاک در آستانہ تنش کہ پس از آن تعرق کاهش می‌یابد [مترمکعب آب بر مترمکعب خاک]	θ_t
مقدار آب خاک در نقطہ پژمردگی [مترمکعب آب بر مترمکعب خاک]	θ_{WP}
گرمای نہان تبخیر [مگاژول بر کیلوگرم]	λ
شار گرمای نہان [مگاژول بر مترمربع بر روز]	λET
میانگین جرم مخصوص هوا [کیلوگرم بر مترمکعب]	ρ_a
جرم مخصوص هوا [کیلوگرم بر مترمکعب]	ρ_w
ثابت استفان-بولتزمن، $4/90.3 \times 10^9$ مگاژول بر توان چہارم کلوین بر متر مربع بر روز، $[MJK^{-4}m^2day^{-1}]$	σ
عرض جغرافیای [رادیان]	φ
زاویہ ساعتی خورشید در نیمہ دورہ یک ساعتی یا کوتاہتر [رادیان]	ω
زاویہ ساعتی خورشید در ابتدای دورہ یک ساعتی یا کوتاہتر [رادیان]	ω_1
زاویہ ساعتی خورشید در انتہای دورہ یک ساعتی یا کوتاہتر [رادیان]	ω_2
زاویہ ساعتی خورشید در هنگام غروب [رادیان]	ω_s

پیشگفتار

در این نشریه، یک روش روزآمد برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع و تبخیر - تعرق گیاهان با استفاده از داده‌های هواشناسی و ضرایب گیاهی معرفی می‌گردد. روش تعیین تبخیر - تعرق گیاهان ارائه شده در نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی سازمان خواروبار و کشاورزی (فائو) با عنوان "نیازهای آبی گیاهان" روش دو مرحله‌ای ($K_c \cdot ET_0$) نامیده می‌شود. در این روش، اثر عوامل اقلیمی بر نیاز آبی گیاهان در تبخیر - تعرق مرجع (ET_0) و اثر عامل گیاهی در ضریب گیاهی (K_c) گنجانده شده است. سایر روش‌ها، از جمله برآورد بارندگی مؤثر، محاسبه نیاز آبیاری که در نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو توصیف شده، در این نشریه بیان نشده است لیکن، در مجموعه نشریه‌های آینده فائو بررسی خواهد شد.

پس از انتشار نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو در سال ۱۹۷۷، پیشرفت‌های حاصل از تحقیقات و ارزیابی دقیق‌تر آب مصرفی گیاه بر لزوم روزآمد شدن روش فائو برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع تأکید کرده است. در موارد بسیار ثابت شده که روش پنمن فائو مقدار ET_0 را بیشتر از واقع برآورد می‌کند. همچنین، سایر معادله‌های پیشنهادی فائو، از جمله روش تابش، بلانی-کریدل و تبخیر از تشت، مقدار تبخیر - تعرق گیاه مرجع چمن را با درجه‌های متفاوت دقت، محاسبه می‌کنند.

در ماه مه سال ۱۹۹۰، به پیشنهاد فائو، هیأتی از کارشناسان و محققان با همکاری کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی و سازمان جهانی هواشناسی تشکیل گردید تا ضمن بازنگری روش‌های فائو در برآورد نیاز آبی گیاهان، نظرات مشورتی خود را برای تجدیدنظر و روزآمد کردن روش‌ها ارائه کنند.

هیأت کارشناسان معادله ترکیبی پنمن-مونتیث را به عنوان یک روش استاندارد جدید برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع توصیه و روش‌هایی برای محاسبه پارامترهای مورد نیاز معادله فوق ارائه کرد. روش پنمن-مونتیث فائو بر پایه تعریف گیاه مرجع به عنوان یک گیاه فرضی با ارتفاع ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتابش (آلبیدو) ۰/۲۳ توسعه یافته است، که تبخیر از این سطح، به طور دقیق، مشابه تبخیر از سطح وسیع چمن سبز با ارتفاع یکنواخت، رشد فعال و آبیاری مناسب می‌باشد. با این روش کاستی‌های روش پیش معروف به روش پنمن بر طرف و همخوانی بیشتری با داده‌های واقعی نیاز آبی گیاهان در نقاط مختلف جهان بدست آمده است. به علاوه، پیشنهادهایی نیز، برای استفاده از معادله پنمن-مونتیث فائو بر پایه داده‌های اقلیمی محدود بیان شده است. در نتیجه، معادله پنمن-مونتیث فائو به عنوان یک روش استاندارد و معتبر جهانی برای محاسبه نیاز آبی گیاهان در نقاط مختلف قابل بکارگیری می‌باشد.

در روش پنمن-مونتیث فائو از داده‌های استاندارد اقلیمی که به سادگی قابل اندازه‌گیری بوده و یا از روی سایر داده‌های اندازه‌گیری شده، قابل محاسبه بوده، استفاده می‌شود. روش‌های محاسباتی و همچنین، روش‌های برآورد داده‌های اقلیمی غیر موجود در این نشریه بیان شده است.

در روش دو مرحله‌ای ضریب گیاهی، تفاوت در پوشش (آسمانه) گیاهی و مقاومت آئرودینامیک گیاه و سطح مرجع در ضریب گیاهی گنجانده شده است. ضریب گیاهی تفاوت فیزیکی و فیزیولوژیکی گیاهان را

نشان می‌دهد. دو روش محاسباتی برای تعیین تبخیر - تعرق گیاه با استفاده از ET_0 ارائه شده است. در روش اول تفاوت‌های بین تبخیر - تعرق گیاه و سطح مرجع در یک ضریب گیاهی یک جزیی ترکیب می‌شود. در روش دوم، ضریب گیاهی به دو جزء تفکیک شده که بیانگر اجزای تبخیر (K_e) و تعرق (K_{cb}) به طور جداگانه است. انتخاب روش ضریب گیاهی، به هدف و دوره محاسبه‌ها بستگی دارد.

در فصل‌های آخر، روش‌های تعدیل ضریب گیاهی در شرایط غیر استاندارد نظیر تنش آبی و شوری، تراکم کشت پایین (گیاهان کم پشت)، عوامل محیطی و مدیریت زراعی متفاوت از استاندارد بیان شده است. مثال‌های ارائه شده، کاربرد روش‌های محاسباتی مختلف را توصیف می‌کنند. اغلب این محاسبه‌ها با استفاده از ماشین حساب، صفحه گسترده و جدول‌های بسیار که در این نشریه ارائه شده، قابل انجام است. همچنین، با استفاده از صفحه گسترده یا زبان برنامه‌نویسی می‌توان الگوریتم‌های رایانه‌ای مناسب برای انجام محاسبه‌ها را تهیه و تنظیم کرد.

هدف این رهنمودها ارائه روش‌های محاسبه تبخیر - تعرق سطح مرجع و تبخیر - تعرق گیاه برای مدیران طرح‌ها، مشاوران، مهندسين آبیاری، کارشناسان هیدرولوژی، مهندسان زراعت، هواشناسان و دانشجویان است. این روش‌ها برای محاسبه نیاز آبی گیاه در هر دو شرایط کشت آبی و دیم و نیز، محاسبه آب مصرفی محصولات و پوشش‌های گیاهی طبیعی قابل بکارگیری می‌باشد.

سپاسگزاری

رهنمودهای این نشریه حاصل هشت سال تلاش مؤلفان آن در پیگیری نظرهای کارشناسان مشاور گروه کاری فائو است که در ماه مه سال ۱۹۹۰ در رم برای بازنگری دستورالعمل "تعیین نیاز آبی گیاهان" تألیف دورنباس و پروت^۱ ارائه شده در نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی سازمان خواروبار و کشاورزی در سال ۱۹۷۷ (فائو ۲۴)، تشکیل گردید. چارچوب مفهومی ارائه شده برای بازنگری روش‌ها در نشریه حاضر نتیجه مشاوره و تبادل نظر گروهی از کارشناسان برجسته شرکت کننده در گردهمایی سال ۱۹۹۰ است که به طور مؤثر در پیشبرد بررسی‌های بعدی منجر به ارائه این نشریه سهیم هستند. اعضای هیأت کارشناسان مشاور فائو در سال ۱۹۹۰ شامل: دکتر فلمینگ^۲ از استرالیا، دکتر پریر^۳ از فرانسه، دکتر کاوازا^۴ و دکتر تومبسی^۵ از ایتالیا، دکتر فیدز^۶ و دکتر دورنباس از هلند، دکتر پریر^۷ از پرتغال، دکتر مونتیت^۸ و دکتر گنستن^۹ از انگلستان، دکتر آلن^{۱۰}، دکتر جنسن^{۱۱} و دکتر پروت از ایالات متحده آمریکا، دکتر ریکس^{۱۲} از سازمان جهانی هواشناسی و سایر کارشناسان فائو می‌باشند. کارشناسان و شخصیت‌های بسیاری، نیز، از سازمان‌ها و مؤسسه‌های مختلف در درجه‌ها و مراحل علمی متفاوت، مشاوره و همکاری‌های مهم را ارائه کرده‌اند. از پروفسور پروت استاد (بازنشسته) دانشگاه دیویس-کالیفرنیا و از دکتر دورنباس کارشناس (بازنشسته) فائو برای ارائه روش استاندارد فائو ۲۴ و از پروفسور مونتیت برای ارائه روش تجدید نظر شده بر پایه نظریه‌های علمی سپاسگزاری می‌گردد. پروفسور پروت، علیرغم آنکه به افتخار بازنشستگی نائل آمده، در تلفیق داده‌های اصلی و ارائه مفاهیم پایه‌ای به طور هماهنگ و مؤثر همکاری داشته است. به علاوه، دکتر رایت^{۱۳}، کارشناس وزارت کشاورزی ایالات متحده آمریکا در کیمبرلی-آیداهو با ارائه داده‌های لایسمتری دقیق برای انواع گیاهان، تشریک مساعی کرده است. نظرها و بازنگری‌های مهم در مراحل انتشار نشریه توسط دکتر جنسن، دکتر هارگریوز^{۱۴} و دکتر استوکل^{۱۵} از ایالات متحده آمریکا، دکتر اتیر^{۱۶} از فرانسه و دیگر اعضای گروه‌های فنی کاری از کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی (ICID) و انجمن مهندسان سویل و انجمن مهندسان کشاورزی ایالات متحده ارائه گردیده است.

نویسندگان از سازمان‌ها، دانشگاه یوتا، مؤسسه زراعت لیسبون^{۱۷}، دانشگاه کاتولیک لون^{۱۸} و سازمان خواربار و کشاورزی برای مساعدت‌های اعضای هیأت علمی، کارشناسان و کارمندان در مراحل مختلف تهیه و انتشار نشریه تشکر می‌کنند.

مؤلفان از آقای ولتر^{۱۹} رئیس بخش توسعه اراضی و آب برای حمایت از تهیه این دستورالعمل و همچنین، از همکاران فائو و شخصیت‌های دیگر برای بازخوانی متن و ارائه رهنمودهای با ارزش، قدردانی می‌کنند. از خانم ردفرن^{۲۰} برای شکیبایی و مساعدت‌های با ارزش در تهیه و پیکربندی متن تشکر می‌گردد. آقای پلامر^{۲۱} در ویرایش متن نهایی همکاری داشته است.

1- J. Doorenbos

2- W. Pruitt

3- P. Fleming

4- Dr A. Perrier

5- Drs L. Cavazza

6- L. Tombesi

7- Drs R. Feddes

8- Dr L.S. Pereira

9- Drs J.L. Monteith

10- H. Gunston

11- Drs R. Allen

12- M. Jensen

13- Dr D. Rijks

14- Dr James L. Wright

15- G. Hargreaves

16- Dr B. Itier

17- Instituto Superior de Agronomia of Lisbon

18- Katholieke Universiteit Leuven H. Wolter

19- H. Wolter

20- Chrissi Redfern

21- Julian Plummer

فصل اول

مقدمه‌ای بر تبخیر - تفرق

در این فصل، مفاهیم و تفاوت‌های تبخیر - تفرق گیاه مرجع (ET_0) ، تبخیر - تفرق گیاه تحت شرایط استاندارد (ET_c) و انواع مدیریت زراعی و محیطی $(ET_{c\ adj})$ شرح داده می‌شود. همچنین، عوامل مؤثر بر تبخیر - تفرق، واحدهای اندازه‌گیری و روش‌های تعیین آن بیان می‌شود.

فرآیند تبخیر - تفرق

ترکیب دو فرآیند جداگانه که آب به وسیله آن از سطح خاک به صورت تبخیر و از گیاه به صورت تفرق تلف شده، تبخیر-تفرق نامیده می‌شود.

تبخیر

تبخیر فرآیندی است که با آن، آب از مایع به بخار تبدیل می‌شود. پس از آن، بخار آب از سطح تبخیر انتقال می‌یابد. آب از سطوح مختلف نظیر دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، پیاده‌روها، خاک و گیاهان مرطوب، تبخیر می‌شود.

تغییر حالت مولکول‌های آب از مایع به بخار نیازمند انرژی است. تابش مستقیم خورشیدی و به مقدار کمتر، گرمای هوای محیط این انرژی را تأمین می‌کنند. اختلاف فشار بخار در سطح تبخیر و هوای مجاور، نیروی محرک لازم برای انتقال بخار به اتمسفر را تأمین می‌کند. با انجام تبخیر، به تدریج، هوای مجاور سطح تبخیر اشباع شده و در شرایط انتقال نیافتن هوای مرطوب به اتمسفر، سرعت تبخیر کاهش یافته و ممکن است، به طور کامل، متوقف شود. جایگزینی هوای اشباع با هوای خشک‌تر در سطح تبخیر، به طور عمده، به سرعت باد بستگی دارد. بنابراین، در برآورد تبخیر باید پارامترهای اقلیمی نظیر تابش خورشیدی، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد در نظر گرفته شوند.

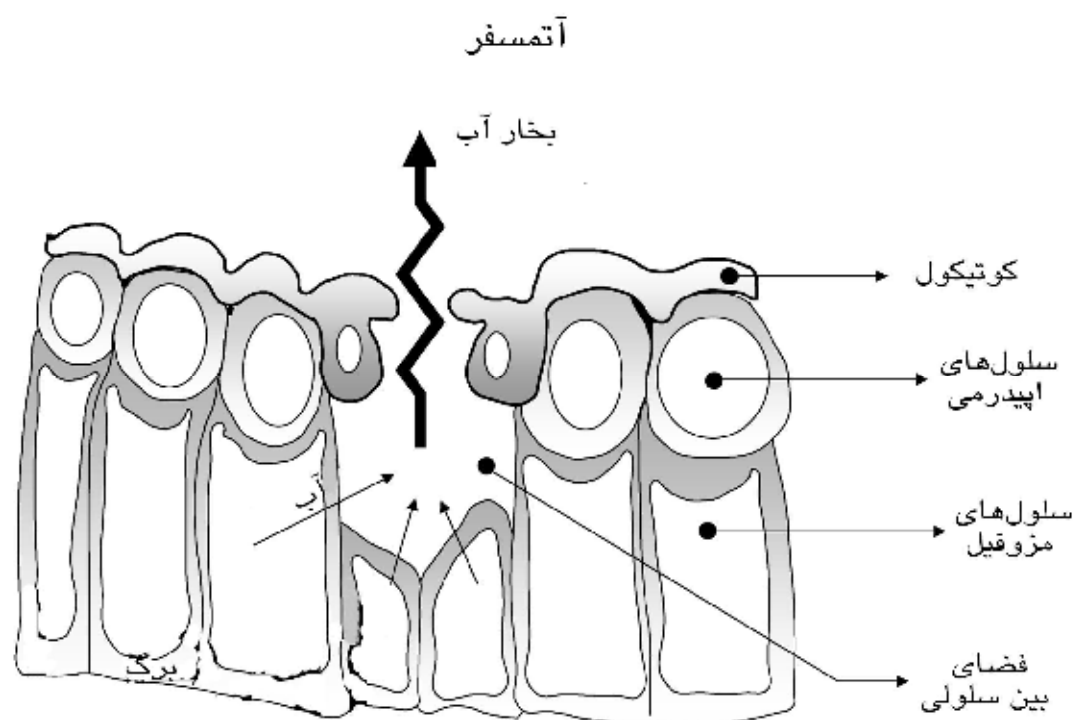
تبخیر از خاک سطحی به سایه‌اندازی پوشش (آسمانه) گیاهی^۱ و مقدار آب در دسترس نیز بستگی دارد. خاک تحت آبیاری و یا بارندگی متوالی و یا صعود مویینه‌ای^۲ از سطح ایستابی بالا، مرطوب می‌شود. در شرایطی که آب مورد نیاز تبخیر با سرعت کافی تأمین شود، تبخیر از خاک سطحی، تنها، تابع وضعیت اقلیمی است. هرگاه فاصله خیس شدن خاک سطحی طولانی و قابلیت هدایت آب در این لایه پایین باشد، مقدار آب در دسترس کاهش می‌یابد و سطح خاک به خشکی می‌گراید. در این شرایط، شدت تبخیر تابع آب خاک است. در شرایط تأمین نشدن آب، تبخیر به سرعت کاهش یافته و ممکن است، در طول چند روز، به طور کامل، متوقف شود.

1- Reference crop evapotranspiration

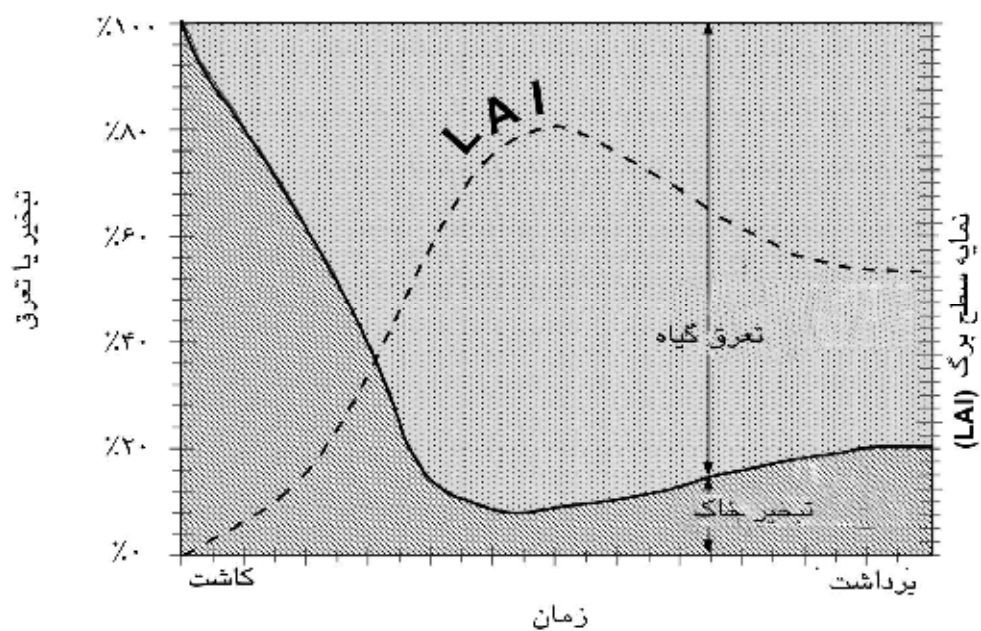
2- Crop evapotranspiration under standard conditions

3- Canopy

4- Capillary rise



شکل ۱- طرحی از یک روزنه برگ



شکل ۲- جزءبندی تبخیر - تعرق یک گیاه زراعی سالانه در طول دوره رشد

تعرق

تبخیر آب (مایع) در درون بافت گیاه و انتقال بخار حاصل به آتمسفر را تعرق می‌نامند. آب در گیاهان، به طور عمده، از درون روزنه‌ها خارج می‌شود. روزنه‌ها، منافذ کوچک در سطح برگ‌ها هستند که گازها و بخار آب از درون این منافذ عبور می‌کند (شکل ۱). آب به همراه برخی مواد غذایی، از طریق ریشه‌ها جذب و به بخش‌های مختلف گیاه انتقال می‌یابد. تبخیر در فضای بین سلولی برگ‌ها انجام شده و انتقال بخار به آتمسفر به وسیله روزنه‌ها کنترل می‌شود. بخش عمده آب جذب شده توسط گیاه به صورت تعرق تلف می‌شود و تنها، مقدار بسیار کم آن به مصرف گیاه می‌رسد.

مشابه تبخیر مستقیم، فرآیند تعرق به عواملی از جمله ذخیره انرژی، شیب فشار بخار و باد بستگی دارد. بنابراین، در برآورد تعرق باید عواملی نظیر تابش، دمای هوا، رطوبت هوا و باد در نظر گرفته شوند. مقدار آب خاک و قابلیت هدایت آن به سمت ریشه گیاهان و همچنین، شرایط ماندابی و شوری، شدت تعرق را کنترل می‌کنند. تعرق، تحت اثر ویژگی‌های گیاه، شرایط محیطی و عملیات کشت نیز می‌باشد. گیاهان گوناگون دارای شدت تعرق متفاوت هستند. نه تنها نوع گیاه، بلکه مراحل رشد و نیز عوامل محیطی و مدیریت زراعی نیز، باید در برآورد تعرق در نظر گرفته شوند.

تبخیر - تعرق

تبخیر - تعرق به طور هم زمان صورت گرفته و روش ساده‌ای برای تفکیک این دو فرآیند وجود ندارد. علاوه بر آب در دسترس، تبخیر از سطح خاک تحت کشت، به طور عمده، تابع بخش (کسر) تابش ورودی به خاک است. با افزایش رشد و سایه‌اندازی پوشش گیاهی، مقدار تابش کاهش می‌یابد. در آغاز رشد گیاه، آب به طور عمده، به صورت تبخیر از خاک تلف می‌شود. لیکن، با کامل شدن پوشش گیاهی، تعرق جزء اصلی فرآیند اتلاف آب است. رابطه اجزای تبخیر - تعرق و نمایه سطح برگ^۱ در شکل ۲ نشان داده شده است. در هنگام کشت، جزء تبخیر نزدیک به ۱۰۰ درصد فرآیند تبخیر - تعرق را تشکیل می‌دهد. لیکن، با رشد گیاه و کامل شدن پوشش گیاهی، تعرق بیشتر از ۹۰ درصد آن می‌باشد.

واحدها

به طور معمول، شدت تبخیر - تعرق به صورت میلی‌متر بر زمان بیان شده که معادل آب تلف شده از یک سطح کشت بر حسب واحد عمق بر واحد زمان است. واحد زمان می‌تواند ساعت، روز، دهه، ماه و یا حتی یک دوره رشد کامل یا یک سال باشد.

1- Leaf Area Index (LAI)

از آنجا که، یک هکتار ۱۰۰۰۰ مترمربع و یک میلی‌متر ۰/۰۰۱ متر می‌باشد، کاهش یک میلی‌متر آب معادل از دست دادن ۱۰ متر مکعب آب در هر هکتار است. به عبارت دیگر، یک میلی‌متر تبخیر - تعرق بر روز معادل ۱۰ متر مکعب بر هکتار بر روز می‌باشد.

عمق آب را می‌توان بر حسب مقدار انرژی ورودی بر واحد سطح بیان کرد. این همان انرژی یا گرمای مورد نیاز برای تبخیر از سطح آب آزاد بوده و گرمای نهان تبخیر^۱ نامیده شده که تابع دمای آب است. برای مثال، مقدار گرمای نهان تبخیر در دمای ۲۰ درجه سلسیوس، حدود ۲/۴۵ مگاژول بر کیلوگرم می‌باشد. یعنی، انرژی مورد نیاز برای تبخیر یک کیلوگرم یا ۰/۰۰۱ متر مکعب آب، ۲/۴۵ مگاژول است و به عبارت دیگر، ۲/۴۵ مگاژول انرژی ورودی بر هر مترمربع، می‌تواند موجب تبخیر ۰/۰۰۱ متر یا یک میلی‌متر آب گردد. توصیف شدت تبخیر - تعرق بر حسب واحد مگاژول بر مترمربع بر روز، شار گرمای نهان^۲ را نشان می‌دهد. واحدهای تبخیر - تعرق و ضرایب تبدیل آن، به طور خلاصه، در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- واحدهای تبخیر - تعرق و ضرایب تبدیل

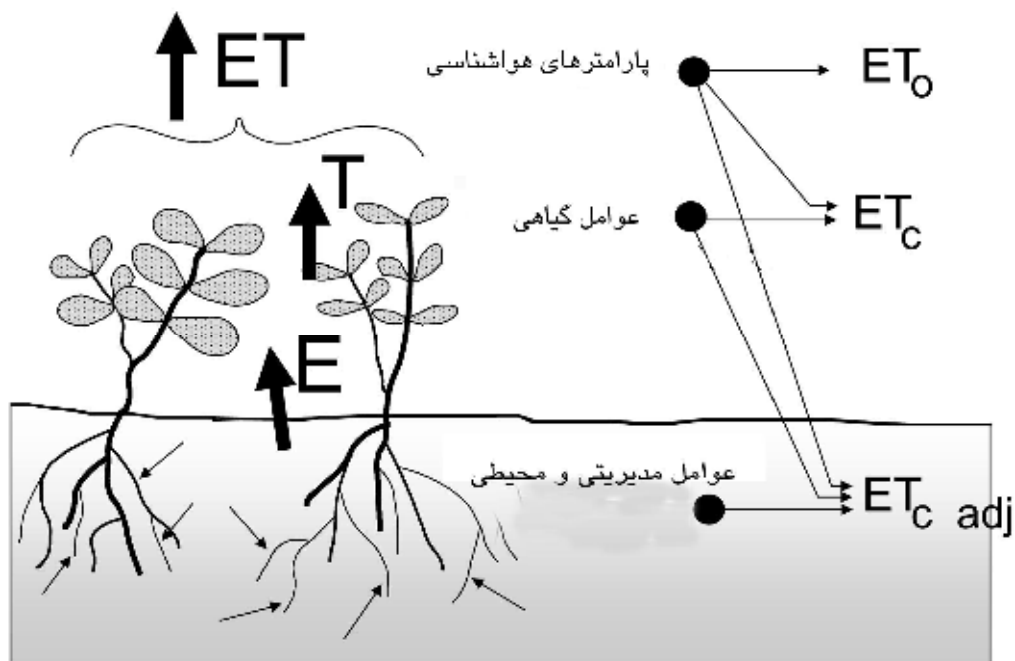
واحد	عمق	حجم بر واحد سطح		انرژی بر واحد سطح*
		مترمکعب بر هکتار بر روز (m ³ ha ⁻¹ day ⁻¹)	لیتر بر هکتار بر ثانیه (lha ⁻¹ s ⁻¹)	
یک میلی‌متر بر روز	۱	۱۰	۰/۱۱۶	۲/۴۵ (MJm ⁻² day ⁻¹)
یک مترمکعب بر هکتار بر روز	۰/۱	۱	۰/۰۱۲	۰/۲۴۵
یک لیتر بر ثانیه بر هکتار	۸/۶۴	۸۶/۴	۱	۲۱/۱۷
یک مگاژول بر مترمربع بر روز	۰/۴۰۸	۴/۰۸۲	۰/۰۴۷	۱

* برای آب با جرم مخصوص (دانسیته) ۱۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و دمای ۲۰ درجه سلسیوس

مثال ۱- تبدیل واحدهای تبخیر	
در یک روز تابستان، انرژی خالص خورشیدی ورودی به سطح یک دریاچه ۱۵ مگاژول بر مترمربع بر روز است. اگر ۸۰ درصد این انرژی صرف تبخیر آب شود، عمق آب تبخیر شده چه مقدار خواهد بود؟	
از جدول ۱:	$1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1} = 0.408 \text{ mm day}^{-1}$
بنابراین:	$0.8 \times 15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1} = 0.8 \times 15 \times 0.408 \text{ mm day}^{-1} = 4.9 \text{ mm day}^{-1}$
عمق تبخیر ۴/۹ میلی‌متر بر روز است.	

1- Latent heat of vaporization(λ)

2- Latent heat flux (λET)



شکل ۳- عوامل مؤثر بر تبخیر - تعرق بر مبنای مفاهیم مرتبط با آن

عوامل مؤثر بر تبخیر - تعرق

پارامترهای هواشناسی، عوامل گیاهی، مدیریت زراعی و محیطی از جمله عوامل مؤثر بر هر یک از اجزای تبخیر - تعرق می‌باشند. اجزای مرتبط با تبخیر - تعرق که در شکل ۳ نشان داده شده‌اند، در بخش مفاهیم تبخیر - تعرق بحث می‌شوند.

پارامترهای هواشناسی

پارامترهای اصلی هواشناسی مؤثر بر تبخیر - تعرق شامل تابش، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد است. روش‌های بسیاری برای برآورد شدت تبخیر با استفاده از این پارامترها ارائه شده‌اند. توان تبخیرکنندگی آتمسفر با تبخیر - تعرق گیاه مرجع (ET_0) بیان می‌شود. تبخیر - تعرق گیاه مرجع معرف تبخیر - تعرق یک سطح کشت استاندارد است. مفاهیم تبخیر - تعرق گیاه مرجع، در این فصل و در فصل‌های دوم و چهارم ارائه شده است.

عوامل گیاهی

در برآورد تبخیر - تعرق گیاهان کشت شده در مزارع وسیع و تحت مدیریت زراعی مطلوب، باید عواملی از جمله نوع، واریته و مرحله رشد گیاه در نظر گرفته شوند. تفاوت‌های مقاومت در مقابل تعرق، ارتفاع و زبری گیاه، انعکاس نور، پوشش سطح زمین و ویژگی‌های ریشه‌دوانی گیاه موجب می‌شود که تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط مشابه، متفاوت باشند.

تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد، به تقاضای تبخیر از گیاهان اشاره دارد که در مزارع وسیع با آب کافی در خاک و تحت شرایط مدیریت زراعی و محیطی مطلوب رشد کرده و حداکثر محصول در شرایط اقلیمی مشخص را تولید کنند.

عوامل مدیریت زراعی و محیطی

عواملی بسیاری از جمله شوری، حاصلخیزی پایین خاک، کاربرد محدود کود، وجود سخت لایه غیرقابل نفوذ در خاک، عدم کنترل بیماری‌ها و آفت‌های گیاهی، همچنین، مدیریت ضعیف عملیات زراعی، موجب محدود شدن رشد گیاه و کاهش تبخیر - تعرق می‌شود. سایر عوامل که باید در برآورد شدت تبخیر - تعرق در نظر گرفته شوند، پوشش سطح زمین، پوشش گیاهی و مقدار آب خاک است. اثر آب خاک بر فرآیند تبخیر - تعرق به مقدار کمبود آب و نوع خاک بستگی دارد. آب فراوان و اضافی نیز با ایجاد شرایط ماندابی می‌تواند با مختل کردن تنفس ریشه گیاه، موجب آسیب رساندن به آن و محدود شدن روند جذب آب و مواد غذایی شود.

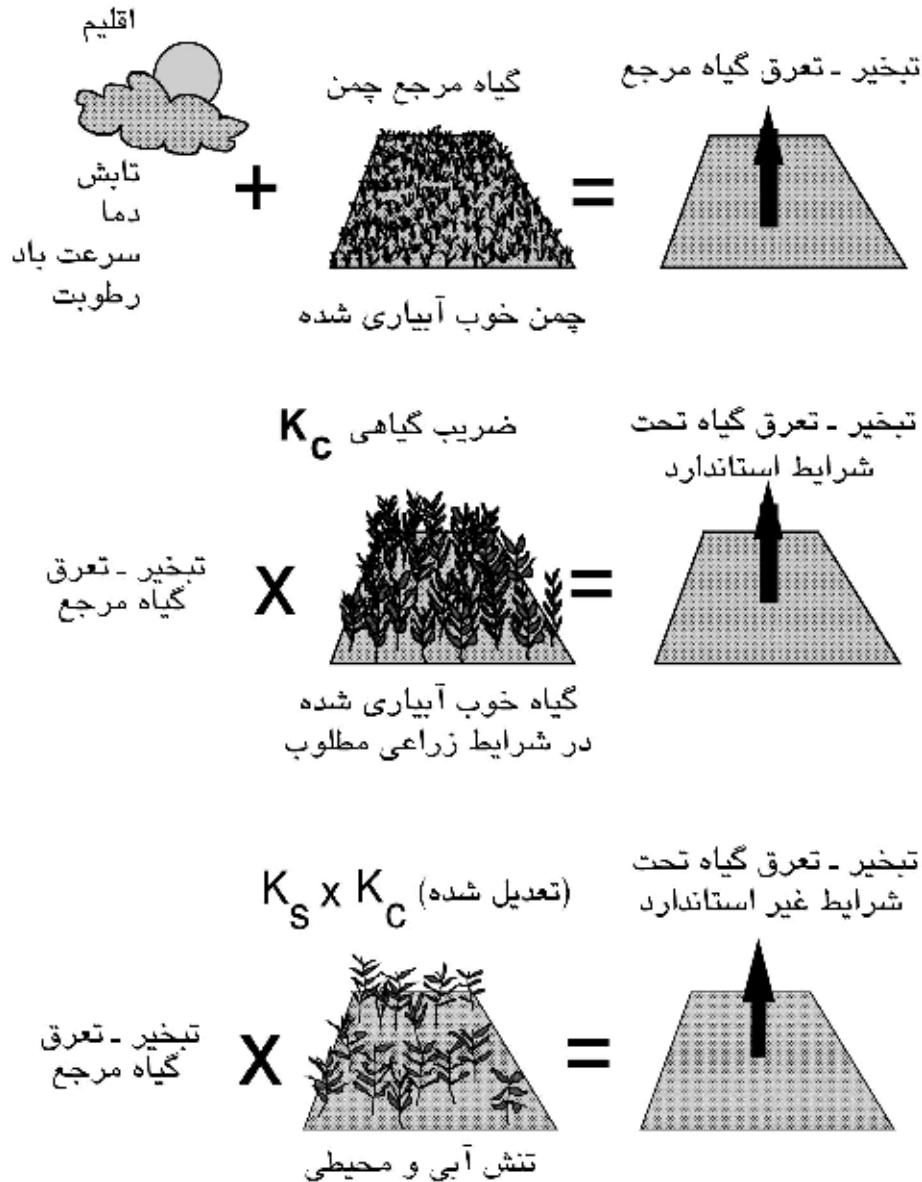
در برآورد تبخیر - تعرق، تغییر عملیات مدیریت زراعی که می‌تواند بر عوامل اقلیمی و گیاهی مؤثر بر فرآیند تبخیر - تعرق تأثیرگذار باشد، باید در نظر گرفته شود. عملیات زراعی و روش آبیاری با تغییر اقلیم خرد مقیاس^۱ می‌توانند بر ویژگی‌های گیاه یا مرطوب شدن خاک و گیاه مؤثر باشند. بادشکن‌ها، سرعت باد و در نتیجه تبخیر - تعرق مزارع پایین‌دست را کاهش می‌دهند. این تأثیر، به ویژه، در مناطق بادخیز گرم و خشک معنی‌دار می‌باشد. هر چند، ممکن است تبخیر - تعرق درختان، کاهش ناشی از تأثیر بادشکن‌ها در مزارع را جبران کند. تبخیر از خاک سطحی در یک باغ تازه احداث با فاصله کشت زیاد را می‌توان با استفاده از یک سامانه آبیاری قطره‌ای با طراحی مطلوب کاهش داد. گسیلنده‌ها آب را، به طور مستقیم، در خاک نزدیک درختان پخش می‌کنند و بدین ترتیب، بخش عمده سطح خاک خشک مانده و تلفات آب به صورت تبخیر محدود می‌شود. روش دیگر برای کاهش قابل ملاحظه تبخیر از سطح خاک، کاربرد مالچ، به ویژه، در مراحل اولیه رشد گیاهان است. مواد ضد تعرق نظیر مواد مسدودکننده روزنه‌ها، مواد پوشاننده برگ یا منعکس‌کننده نور، تلفات آب به صورت تعرق را کاهش می‌دهند.

مفاهیم تبخیر - تعرق

تفاوت‌های بین تبخیر - تعرق گیاه مرجع، تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد و غیر استاندارد در این فصل ارائه شده است (شکل ۴). تبخیر - تعرق گیاه مرجع یک نمایه اقلیمی و بیانگر تقاضای تبخیر در آتمسفر است. تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد، به تبخیر - تعرق سطوح کشت وسیع تحت مدیریت زراعی بسیار مطلوب و آبیاری کافی اشاره دارد که بیشترین عملکرد محصول را تحت شرایط اقلیمی مشخص تولید می‌کنند. تبخیر - تعرق گیاه تحت مدیریت زراعی نامناسب و محدودیت‌های محیطی مؤثر بر

1- Microclimate

رشد گیاه، کاهش یافته و تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط غیر استاندارد نامیده می‌شود و به طور کلی، مقدار آن نسبت به شرایط استاندارد باید اصلاح گردد.



شکل ۴- تبخیر - تعرق مرجع (ET_0)، تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد (ET_c) و غیر استاندارد ($ET_{c\ adj}$)

چنانچه، شرایط مزرعه متفاوت از شرایط استاندارد باشد، مقدار تبخیر - تعرق گیاه استاندارد باید با استفاده از ضرایب اصلاحی (کاهشی) تعدیل شود. این تعدیل، اثر شرایط محیطی و مدیریت زراعی محلی بر تبخیر - تعرق گیاه را منعکس می‌کند.

تبخیر - تعرق گیاه مرجع

تبخیر - تعرق یک سطح بدون کمبود آب، تبخیر - تعرق گیاه (سطح) مرجع یا تبخیر - تعرق مرجع نامیده شده و با ET_0 نشان داده می‌شود. سطح مرجع، یک گیاه مرجع چمن فرضی با ویژگی‌های مشخص می‌باشد. در این نشریه، از به کارگیری نام‌هایی نظیر تبخیر - تعرق پتانسیل به دلیل وجود پاره‌ای ابهامات در مفاهیم آن، پرهیز شده است.

مفهوم تبخیر - تعرق مرجع برای بررسی تقاضای تبخیر در آتمسفر صرف نظر از نوع گیاه، مرحله رشد آن و عملیات مدیریت زراعی توصیف شد. هنگام کافی بودن آب خاک، تبخیر - تعرق مرجع به عوامل مرتبط با خاک بستگی ندارد. مرتبط کردن تبخیر - تعرق به یک سطح مرجع، مبنایی را فراهم می‌کند که تبخیر - تعرق سطوح مختلف را نیز، بتوان به یکدیگر ارتباط داد. مفهوم سطح مرجع، نیاز به تعریف یک سطح جداگانه تبخیر - تعرق برای هر گیاه و هر مرحله رشد را غیر ضروری می‌کند. مقادیر اندازه‌گیری یا محاسبه شده تبخیر - تعرق گیاه مرجع در مناطق و دوره (فصل)‌های رشد مختلف، چنانچه به تبخیر - تعرق سطح مرجع اشاره داشته باشد، قابل مقایسه است.

پارامترهای هواشناسی تنها عوامل مؤثر بر تبخیر - تعرق گیاه مرجع می‌باشند. بنابراین، تبخیر - تعرق گیاه مرجع یک نمایه وابسته به اقلیم است و می‌توان آن را بر مبنای داده‌های هواشناسی محاسبه کرد. تبخیر - تعرق گیاه مرجع، بیانگر تقاضای تبخیر در آتمسفر در یک مکان و زمان مشخص سال است و ویژگی‌های گیاه و عوامل مربوط به خاک را در نظر نمی‌گیرد. روش پنمن - مونتیت سازمان خواربار و کشاورزی یا به اختصار فائو به عنوان تنها روش استاندارد برای تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع چمن توصیه می‌شود. دلیل انتخاب این روش آن است که، برآورد دقیق از تبخیر - تعرق گیاه مرجع در مکان تحت بررسی ارائه داده، مبنای فیزیکی داشته و عوامل فیزیولوژیک و آئرودینامیک را، به طور صریح، با یکدیگر ترکیب کرده است و به علاوه، روش‌هایی نیز برای برآورد پارامترهای غیرموجود هواشناسی^۱ ارائه می‌کند.

برخی مقادیر تبخیر - تعرق گیاه مرجع در مناطق اقلیمی - زراعی^۲ مختلف در جدول ۲ ارائه شده است. این ارقام برای آشنایی کاربران با حدود تبخیر - تعرق مرجع می‌باشد و استفاده از آنها بدون تعدیل و اصلاح توصیه نمی‌شود. محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع در بخش الف این نشریه بحث و بررسی شده است (کادر ۱).

تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط استاندارد

تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط استاندارد که با ET_c نشان داده شده، تبخیر - تعرق گیاهان بدون بیماری است که کود کافی دریافت کرده و در سطح وسیع دارای رطوبت مطلوب کشت شده و بیشترین عملکرد محصول را در شرایط اقلیمی مشخص تولید کرده است.

1- Missing climatic parameters

2- Agro climatic regions

جدول ۲- میانگین تبخیر - تعرق مرجع در مناطق اقلیمی - زراعی مختلف
بر حسب میلی‌متر بر روز

مناطق	میانگین دمای روزانه (درجه سلسیوس)		
	سرد (حدود ۱۰)	معتدل (۲۰)	گرم (بیشتر از ۳۰)
استوایی و نیمه استوایی	۲-۳	۳-۵	۵-۷
	۲-۴	۴-۶	۶-۸
معتدل	۱-۲	۲-۴	۴-۷
	۱-۳	۴-۷	۶-۹

کادر ۱- فصل‌های مرتبط با محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع (ET_0)

بخش الف

فصل دوم - معادله پنمن - مونتیث فائو :

این فصل، کاربر را با لزوم معرفی یک روش استاندارد برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی آشنا می‌کند. روش پنمن - مونتیث فائو (سازمان خواربار و کشاورزی)، به عنوان تنها روش تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع توصیه شده است. مفهوم سطح مرجع و روش تعیین آن نیز شرح داده شده است.

فصل سوم - داده‌های هواشناسی:

روش پنمن - مونتیث فائو به داده‌های تابش، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد وابسته می‌باشد. در این فصل، روش‌های محاسبه و تعیین پارامترهای اقلیمی با استفاده از داده‌های هواشناسی معرفی و روش‌هایی نیز برای برآورد داده‌های غیرموجود هواشناسی مورد نیاز محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع ارائه شده است. بنابراین، برآورد تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن - مونتیث فائو تحت شرایط مختلف حتی هنگام در دسترس نبودن (غیرموجود بودن) داده‌های هواشناسی نیز، امکان‌پذیر می‌باشد.

فصل چهارم - تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع:

در این فصل، محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از معادله پنمن - مونتیث فائو برای دوره‌های زمانی مختلف با بکارگیری پارامترهای اصلی اقلیمی یا در شرایط غیرموجود بودن داده‌های هواشناسی، شرح داده شده است. روش تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از تبخیر تشت نیز بیان شده است.

کادر ۲- فصل‌های مرتبط با محاسبه تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط استاندارد (ET_c)

بخش ب

فصل پنجم - مقدمه‌ای بر تبخیر - تعرق گیاهان:

این فصل کاربر را با روش ضریب گیاهی ($K_c \times ET_0$) برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاهان آشنا می‌کند. اثر ویژگی‌های محصولات (گیاهان کشاورزی) متمایز از گیاه مرجع چمن، در ضریب گیاهی گنجانده شده است. بر مبنای هدف محاسبه، دقت مورد نیاز، داده‌های اقلیمی در دسترس و دوره زمانی مورد نظر، دو روش متفاوت محاسبه ارائه می‌شود.

فصل ششم - تبخیر - تعرق گیاهان و ضریب گیاهی یک جزئی:

در این فصل، روش محاسبه تبخیر - تعرق گیاه، که در آن تفاوت‌های تبخیر - تعرق سطح کشت و سطح مرجع چمن در یک ضریب گیاهی یک جزئی (K_c) گنجانده شده، ارائه می‌شود.

فصل هفتم - تبخیر - تعرق گیاهان و ضریب گیاهی دو جزئی:

در این فصل، روش دیگری برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه توصیف می‌شود. ضریب گیاهی (K_c) به دو ضریب جداگانه: تعرق گیاه (یعنی، ضریب گیاهی پایه K_{cb}) و تبخیر از سطح خاک (K_e) تفکیک می‌گردد.

آب مورد نیاز برای جبران تلفات تبخیر - تعرق گیاهان یک مزرعه تحت کشت، نیاز آبی نامیده می‌شود. هرچه، مقادیر تبخیر - تعرق گیاه و نیاز آبی گیاه یکسان می‌باشند، لیکن، نیاز آبی گیاه به مقدار آبی که باید در اختیار گیاه قرار گیرد، اشاره دارد و تبخیر - تعرق گیاه مقدار آب تلف شده به صورت تبخیر - تعرق را بیان می‌کند. آب مورد نیاز آبیاری نمایانگر تفاوت بین نیاز آبی گیاه و بارندگی مؤثر است. نیاز آبیاری، همچنین، شامل آب مورد نیاز برای آبشویی نمک‌های محلول و افزایش یکنواختی کاربرد آب در مزرعه می‌باشد. محاسبه آب مورد نیاز آبیاری، در این نشریه بحث و بررسی نمی‌شود لیکن، می‌تواند از جمله بحث‌های نشریه آبیاری و زهکشی آینده باشد.

تبخیر - تعرق گیاهان با استفاده از داده‌های هواشناسی و گنجاندن عوامل مربوط به مقاومت گیاه، ضریب بازتابش^۱ (آلبیدو) و مقاومت هوا به طور مستقیم در روش پنمن - مونتیث قابل محاسبه است. از آنجا که هنوز کمبود قابل ملاحظه اطلاعات برای انواع گیاهان وجود دارد، از روش پنمن - مونتیث با تعریف مفهوم گیاه مرجع، برای تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع استفاده می‌شود. نسبت تجربی تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد (ET_c) به تبخیر - تعرق گیاه مرجع (ET_c) که ضریب گیاهی (K_c) نامیده شده، برای مرتبط کردن تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط استاندارد به تبخیر - تعرق مرجع استفاده می‌شود (یعنی: $ET_0 = K_c \times ET_c$). تفاوت‌ها در شکل (آناتومی) برگ، ویژگی‌های روزنه‌ها، مشخصات آئرودینامیک و حتی ضریب بازتابش موجب تفاوت ET_c و ET_0 حتی تحت شرایط اقلیمی مشابه است. ضریب گیاهی یک گیاه مشخص، در طول دوره رشد (از زمان کشت تا برداشت) تغییر می‌کند. روش محاسبه تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد در بخش ب بررسی شده است (کادر ۲).

1- Albedo

تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط غیر استاندارد

تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط غیر استاندارد ($ET_{c\ adj}$)، همان تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط مدیریت زراعی و محیطی متفاوت از استاندارد است. در شرایط محلی، ممکن است، تبخیر - تعرق واقعی گیاهان به دلیل انواع شرایط نامطلوب نظیر وجود آفت‌ها و بیماری‌ها، شوری، حاصلخیزی پایین خاک، تنش آبی و یا ماندابی، متفاوت با تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد گردد. این تفاوت، می‌تواند به کاهش رشد گیاه و پوشش گیاهی منجر و موجب کاهش تبخیر - تعرق واقعی نسبت به شرایط استاندارد شود.

تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط غیر استاندارد، با استفاده از ضریب تنش آبی (K_s) یا اصلاح ضریب گیاهی (K_c) برای انواع تنش‌های و محدودیت‌های محیطی مؤثر بر تبخیر - تعرق، محاسبه می‌شود. روش اصلاح تبخیر - تعرق استاندارد برای تنش آبی و محدودیت‌های مدیریت زراعی و محیطی در بخش پ این نشریه بحث شده است (کادر ۳).

تعیین تبخیر - تعرق

اندازه‌گیری تبخیر - تعرق

اندازه‌گیری تبخیر - تعرق ساده نمی‌باشد و برای تعیین آن، تجهیزات خاص و اندازه‌گیری دقیق عوامل فیزیکی یا موازنه آب خاک در لایسمترها (جعبه‌های کشت)^۱ مورد نیاز است. این گونه روش‌ها، اغلب، پرهزینه بوده و نیازمند دقت است و تنها، توسط محققان آموزش دیده و مجرب، به طور کامل، قابل اجرا می‌باشد. هر چند، این روش‌ها در اندازه‌گیری‌های عادی کمتر قابل بکارگیری هستند لیکن، در ارزیابی روش‌های غیر مستقیم برآورد تبخیر - تعرق اهمیت دارند.

کادر ۳- فصل‌های مرتبط با محاسبه تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط غیر استاندارد ($ET_{c\ adj}$):

بخش پ.....

فصل هشتم - تبخیر - تعرق گیاهان تحت تنش آبی:

در این فصل، کاهش تعرق در اثر تنش آبی یا شوری بررسی می‌شود. تبخیر - تعرق در این شرایط، با تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد متفاوت است. تبخیر - تعرق با استفاده از ضریب تنش آبی که اثر تنش بر تعرق گیاه را نشان می‌دهد، محاسبه می‌شود.

فصل نهم - تبخیر - تعرق پوشش‌های گیاهی طبیعی، محصولات غیر متداول و گیاهان کم رشد:

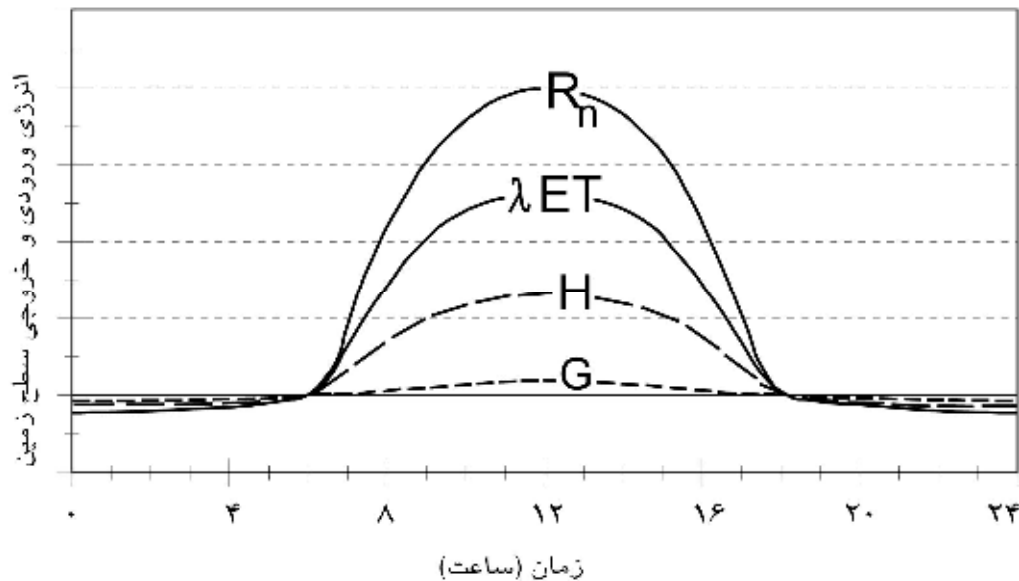
در این فصل، روش‌های اصلاح ضریب گیاهی (K_c) به منظور گنجاندن اثر نامناسب بودن شرایط رشد با تعداد بوته در واحد سطح در تبخیر - تعرق، بررسی می‌شود. این روش‌ها، برای تعیین ضریب گیاهی محصولاتی که در جداول بخش ب ارائه نشده، نیز قابل استفاده است.

فصل دهم - تبخیر - تعرق گیاهان تحت انواع عملیات مدیریت زراعی:

در این فصل، انواع عملیات مدیریت زراعی که می‌تواند موجب تفاوت ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق گیاهان با مقادیر ارائه شده در بخش ب برای شرایط استاندارد شود، بررسی می‌گردد. روش‌های اصلاح ضریب گیاهی برای در نظر گرفتن اثر مالچ‌های سطحی، کشت مخلوط، پوشش گیاهی کم وسعت و تنش‌های (عمدی) مدیریتی نیز ارائه شده است.

فصل یازدهم - تبخیر - تعرق گیاهان در دوره‌های غیر رشد:

در این فصل، روش‌های برآورد تبخیر - تعرق گیاهان در دوره‌های غیر رشد تحت شرایط مختلف سطح خاک بیان شده است.



شکل ۵- تغییر اجزای موازنه انرژی در بالای یک سطح در حال تعرق دارای آب کافی در یک روز صاف

(روش‌های موازنه انرژی و روش‌های وابسته به اقلیم مُرد مقیاس)

فرآیند تبخیر آب به انرژی زیاد به صورت گرمای محسوس و یا انرژی تابشی نیازمند است. بنابراین، تبخیر - تعرق تابع مقدار انرژی در دسترس پوشش گیاهی و تبادل آن می‌باشد. به دلیل این وابستگی، تبخیر - تعرق با استفاده از اصل بقای انرژی قابل برآورد است. بنابراین، در یک دوره مشخص، انرژی ورودی و خروجی در یک سطح مساوی می‌باشد.

در تعیین رابطه موازنه انرژی باید تمامی شارهای^۱ انرژی در نظر گرفته شوند. این رابطه برای یک سطح تبخیر به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، R_n تابش ورودی خالص به سطح مورد نظر، H گرمای محسوس، G شار گرمای خاک و λET شار گرمای نهان تبخیر است. اجزای رابطه (۱) می‌توانند با علامت مثبت یا منفی باشند. مقدار R_n با علامت مثبت، ورود انرژی به سطح مورد نظر و مقادیر ET ، G و H با علامت مثبت، خروج انرژی از سطح مورد نظر را نشان می‌دهد (شکل ۵).

در رابطه (۱) تنها شارهای قائم در نظر گرفته و از جابجایی افقی انرژی گرمایی (پدیده همرفت)^۲ صرف نظر شده است. بنابراین، رابطه فوق باید، تنها، برای سطوح گسترده و دارای پوشش گیاهی کامل یکنواخت استفاده شود. در این رابطه، موازنه انرژی به چهار جزء انرژی، یعنی به: R_n ، λET ، H و G محدود شده

1- Fluxes

2- Advection

و از صورتهای دیگر انرژی نظیر گرمای ذخیره یا آزاد شده به وسیله گیاه و انرژی مصرفی در فعالیت‌های سوخت و ساز صرف نظر شده است. اجزای اخیر، تنها، بخش کوچک از تابش خالص روزانه بوده و در مقایسه با چهار جزء دیگر انرژی، قابل اغماض هستند.

شار گرمای نهان (λET) که نمایانگر جزء تبخیر - تعرق می‌باشد، می‌تواند در صورت معلوم بودن سایر اجزا، از رابطه موازنه انرژی تعیین شود. تابش خالص و شار گرمای خاک را می‌توان با استفاده از پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری یا برآورد کرد. با این حال، اندازه‌گیری گرمای محسوس، اغلب، پیچیده می‌باشد. برای تعیین گرمای محسوس، اندازه‌گیری دقیق شیب دمای هوای بالای سطح مورد نیاز است.

یک روش دیگر برآورد تبخیر - تعرق، روش انتقال جرم می‌باشد. این روش حرکت عمودی توده‌های کوچک هوا (گردبادهای کوچک^۱) در بالای یک سطح همگن را در نظر می‌گیرد. گردبادهای کوچک مواد (بخار آب) و انرژی (گرما، گشتاور^۲) را به سمت سطح در حال تبخیر یا از آن انتقال می‌دهند. با فرض حالت ماندگار^۳ و این که در توده‌های کوچک هوا، ضرایب انتقال بخار آب، گرما و گشتاور متناسب با یکدیگر هستند، تبخیر - تعرق با استفاده از شیب عمودی دمای هوا و بخار آب و بر مبنای نسبت بون^۴ قابل محاسبه است. سایر روش‌های اندازه‌گیری مستقیم از شیب سرعت باد و بخار آب استفاده می‌کنند. در این روش‌ها و شیوه‌های دیگر، نظیر کوریانس توده کوچک هوا^۵، اندازه‌گیری دقیق فشار بخار و دمای هوا یا سرعت باد در سطوح مختلف بالای زمین مورد نیاز می‌باشد. بنابراین، کاربرد این روش‌ها، تنها، به موارد تحقیقات محدود می‌شود.

موازنه آب خاک

تبخیر - تعرق می‌تواند با اندازه‌گیری اجزای متفاوت رابطه موازنه آب خاک، نیز، تعیین گردد. این روش، شامل بررسی جریان آب ورودی و خروجی به محدوده توسعه ریشه گیاه در طول یک دوره مشخص می‌باشد (شکل ۶).

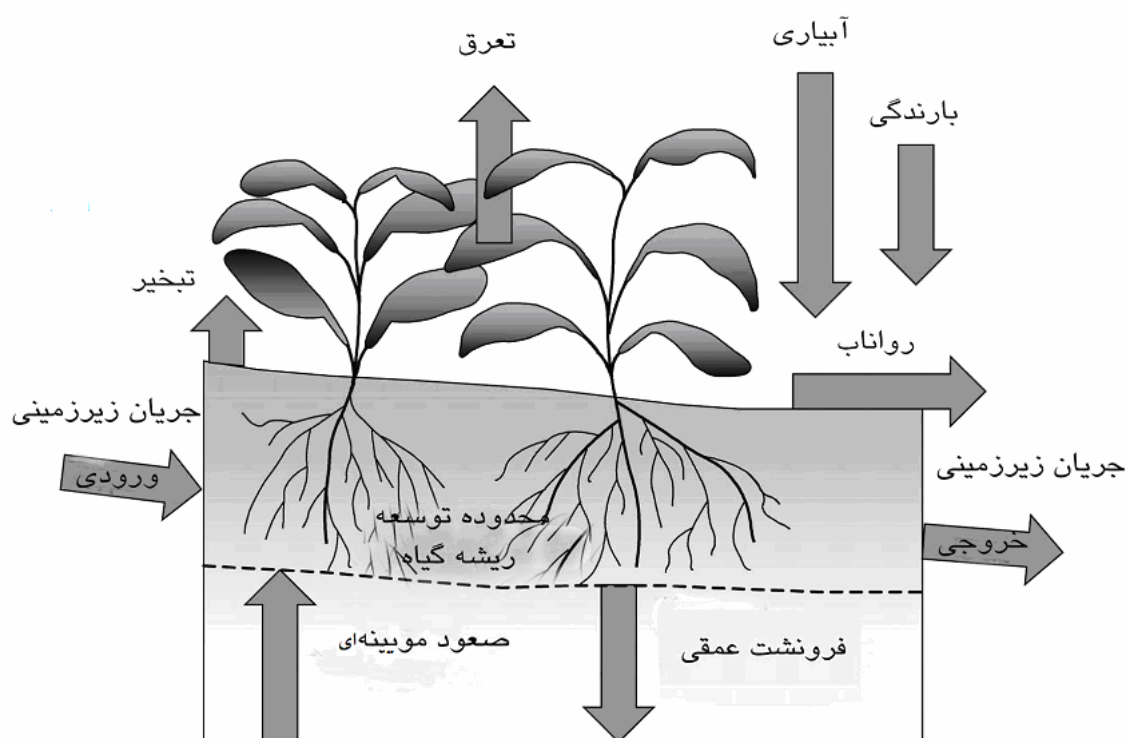
آبیاری (I) و بارندگی (P)، منابع آب ورودی به محدوده توسعه ریشه گیاه محسوب می‌شوند. بخشی از آب آبیاری و بارندگی ممکن است به صورت رواناب سطحی^۶ (RO) و فرونشست (نفوذ) عمقی^۷ (DP) تلف شده که موجب تغذیه سطح ایستابی می‌شود. همچنین، ممکن است، آب تحت صعود مویینه‌ای (CR) از یک سطح ایستابی بالا به محدوده (عمق) توسعه ریشه گیاه انتقال یابد و یا حتی، در جهت افقی، به صورت جریان زیرزمینی به محدوده توسعه ریشه گیاه وارد (SF_{in}) یا از آن خارج (SF_{out}) گردد. با این همه، در بسیاری از شرایط، به جزء وجود شیب‌های هیدرولیکی بالا، مقادیر SF_{in} و SF_{out} ناچیز بوده و قابل صرف نظر است. تبخیر از خاک و تعرق از گیاه موجب تخلیه آب خاک محدوده توسعه ریشه گیاه

-
- 1- Eddies
 - 2- Momentum
 - 3- Steady state
 - 4- Bowen ratio
 - 5- Eddy covariance
 - 6- Surface runoff
 - 7- Deep percolation

می‌شوند. چنانچه، به جزء تبخیر - تعرق، تمامی جریان‌ها قابل برآورد باشند، تبخیر - تعرق می‌تواند بر مبنای تغییر مقدار آب خاک (ΔSW) در طول یک دوره مشخص به صورت رابطه زیر محاسبه گردد:

$$ET = I + P - RO - DP + CR \pm \Delta SF \pm \Delta SW \quad (2)$$

برآورد برخی جریان‌ها نظیر آب زیرزمینی، فرونشست عمقی و صعود مویینه‌ای از سطح ایستابی بالا به ویژه در دوره‌های کوتاه مدت، ساده نمی‌باشد. به طور معمول، روش موازنه آب خاک می‌تواند شدت تبخیر - تعرق را تنها، در دوره‌های طولانی (هفته‌ای یا ده روزه) برآورد کند.



شکل ۶- موازنه آب خاک محدوده توسعه ریشه گیاه

لایسیمترها

با محصور کردن محدوده توسعه ریشه گیاه و کنترل فرآیندهایی که اندازه‌گیری آنها ساده نمی‌باشد، می‌توان اجزای متفاوت رابطه موازنه آب خاک را با دقت بیشتر اندازه‌گیری کرد. این کار، در لایسیمترها پر شده با خاک دست خورده یا دست نخورده، انجام می‌شود. در لایسیمترهای وزنی دقیق که تلفات آب، به طور مستقیم، با ثبت تغییر جرم اندازه‌گیری شده، تبخیر - تعرق با دقت چند صدم میلی‌متر و برای دوره‌های کوتاه نظیر یک ساعت قابل تعیین است. در لایسیمترهای غیر وزنی، تبخیر - تعرق برای یک دوره

مشخص با منها کردن مقدار زه آب جمع آوری شده در کف لایسیمترها از کل آب ورودی، محاسبه و تعیین است.

از جمله شرایط استفاده از لایسیمترها، یکنواختی کامل وضعیت پوشش گیاهی (ارتفاع و نمایه سطح برگ یکسان) در داخل و خارج از لایسیمتر می باشد. این شرایط در بسیاری از مطالعات لایسیمتری، به صورت دائم، رعایت نشده و منجر به ثبت داده های بسیار اشتباه و غیر واقعی تبخیر - تعرق گیاه و ضریب گیاهی شده است.

از آنجا که، ساخت لایسیمترها مشکل و پر هزینه بوده و بهره برداری و نگهداری آنها نیازمند دقت ویژه ای بوده، استفاده از آن تنها، به موارد تحقیقاتی خاص محدود شده است.

محاسبه تبخیر - تعرق با استفاده از داده های هواشناسی

با توجه به دشواری اندازه گیری دقیق در مزرعه، تبخیر - تعرق، به طور معمول، با استفاده از داده های هواشناسی محاسبه می شود. معادله های تجربی و نیمه تجربی بسیاری برای برآورد تبخیر - تعرق گیاهان یا تبخیر - تعرق سطح مرجع از روی داده های هواشناسی معرفی شده است. برخی روش ها، تنها، تحت شرایط اقلیمی و زراعی خاص اعتبار دارند و توسعه آن به شرایط متفاوت امکان پذیر نیست.

مطالعات بسیاری در زمینه استفاده از روش های متفاوت محاسبه تبخیر - تعرق در مناطق مختلف انجام شده است. در حال حاضر، روش پنمن - مونتیت فائو به عنوان نتیجه اجلاس مشاوره کارشناسی برگزار شده در ماه مه سال ۱۹۹۰ میلادی، روشی استاندارد برای تعریف و محاسبه تبخیر - تعرق مرجع توصیه می شود. تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط استاندارد با بکارگیری ضریب گیاهی به تبخیر - تعرق گیاه مرجع مرتبط و تعیین می شود. تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط غیر استاندارد نیز، با استفاده از ضریب تنش و یا تعدیل ضریب گیاهی اصلاح می شوند.

برآورد تبخیر - تعرق با استفاده از تشت تبخیر

تبخیر از سطح آب آزاد یک نمایه از تلفیق اثر تابش، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد بر روی تبخیر - تعرق است. هر چند، تفاوت های سطح آب و سطح کشت، موجب اختلاف معنی دار تبخیر از سطح آب آزاد و تبخیر - تعرق گیاه می شود. کارایی استفاده از تشت برای برآورد تبخیر - تعرق مرجع به طور تجربی ثابت شده است. در این روش، تبخیر از سطح آب اندازه گیری و با استفاده از یک ضریب تجربی، تبخیر تشت به تبخیر - تعرق گیاه مرجع مرتبط می شود. مشروح این روش در فصل سوم ارائه می گردد.

بخش الف

تبخیر - تعرق مرجع

در بخش الف، مفهوم تبخیر - تعرق سطح مرجع (ET_0) که، تبخیر - تعرق گیاه مرجع یا تبخیر - تعرق مرجع نیز نامیده شده، بیان می‌شود. سطح مرجع عبارت از گیاه مرجع چمن فرضی با ارتفاع ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی ثابت ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتابش (آلبیدو) ۰/۲۳ است. سطح مرجع مشابه یک سطح چمن سبز وسیع با ارتفاع یکنواخت، رشد فعال و سایه‌اندازی کامل و تحت آبیاری مطلوب می‌باشد. مقاومت سطحی ثابت ۷۰ ثانیه بر متر به مفهوم سطح خاک، به طور نسبی، خشک اشاره دارد که به طور هفتگی آبیاری می‌شود.

تبخیر - تعرق مرجع را می‌توان از روی داده‌های هواشناسی محاسبه کرد. بر مبنای نتایج حاصل از اجلاس مشاوره کارشناسی در ماه مه سال ۱۹۹۰ میلادی، در حال حاضر، روش پنمن - مانتیث فائو به عنوان تنها روش استاندارد برای محاسبه و تعیین تبخیر - تعرق مرجع توصیه شده است. این روش به داده‌های تابش، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد نیازمند است. روش‌های محاسباتی برای استخراج پارامترهای اقلیمی از روی داده‌های هواشناسی و برآورد متغیرهای هواشناسی غیر موجود مورد نیاز محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع، در این بخش (فصل سوم) ارائه شده است. روش‌های محاسباتی ارائه شده در این نشریه، امکان برآورد تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش پنمن - مانتیث فائو در تمامی شرایط، حتی در صورت عدم وجود (غیرموجود بودن) داده‌های هواشناسی را فراهم می‌آورد.

تبخیر - تعرق گیاه مرجع، همچنین، می‌تواند بر مبنای تبخیر اندازه‌گیری شده از تشت برآورد شود. کارایی بکارگیری تشت در برآورد تبخیر - تعرق گیاه مرجع به طور تجربی ثابت شده است. در این روش با اندازه‌گیری تبخیر از تشت و گنجاندن ضرایب تجربی (تشت) در آن، تبخیر به تبخیر - تعرق گیاه مرجع مرتبط می‌شود. هر چند، در استفاده از این روش باید احتیاط شده و مدیریت خاص اعمال شود.

فصل دوم

معادله پنمن - مونتیت فائو

در این فصل، لزوم ارائه یک روش استاندارد برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی بیان می‌شود. روش پنمن - مونتیت فائو، به عنوان تنها روش برآورد تبخیر - تعرق مرجع توصیه شده است. به علاوه، نحوه استخراج معادله پنمن - مونتیت، تهیه داده‌های هواشناسی مورد نیاز و مفهوم سطح مرجع در این فصل بیان شده است.

روش استاندارد تعیین تبخیر - تعرق مرجع

در ۵۰ سال اخیر، دانشمندان و متخصصان جهان روش‌های بیش و کم تجربی بسیاری برای برآورد تبخیر - تعرق با استفاده از متغیرهای اقلیمی مختلف معرفی کرده‌اند. این روش‌ها، اغلب، به واسنجی‌های محلی بسیار دقیق نیازمند هستند و در شرایط مختلف اعتبار محدودی دارند. ارزیابی دقت روش‌ها تحت شرایط جدید، مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار است. در حالی که، داده‌های تبخیر - تعرق، به طور دائم، برای برنامه‌ریزی یا طراحی آبیاری مورد نیاز است و باید در مدت کوتاه قابل جمع‌آوری و در دسترس باشد. برای رفع این نیاز، نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو تحت عنوان "نیاز آبی گیاهان" ارائه و بر اساس دسترس کاربر به داده‌های هواشناسی، چهار روش محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع پیشنهاد شد. روش‌های پیشنهادی شامل؛ بلانی - کریدل^۱، تابش، پنمن اصلاح شده و تبخیر از تشت می‌باشند. روش پنمن اصلاح شده به عنوان روشی که در ارتباط با گیاه مرجع چمن فعال، بهترین نتایج همراه با کمترین خطا را ارائه می‌دهد، معرفی شد و انتظار می‌رفت که روش تشت بر مبنای وضعیت استقرار، تخمین‌های قابل قبول را ارائه کند. روش تابش برای مناطقی که داده‌های دمای هوا، ساعات آفتابی و ابرناکی یا تابش در دسترس است، ولی اطلاعات سرعت باد و رطوبت موجود نیست، پیشنهاد شد. سرانجام، روش بلانی - کریدل برای مناطقی که داده‌های هواشناسی آن، تنها، دمای هوا است، توصیه گردید.

این روش‌ها برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع که وابسته به داده‌های هواشناسی هستند، در دوره‌های ده روزه یا ماهانه واسنجی شده بودند. روش بلانی - کریدل برای دوره‌های ماهانه یا بیشتر و روش تشت برای دوره‌های ده روزه یا بیشتر پیشنهاد شد. ولی، کاربران همیشه به این فرض‌ها توجه نداشته و اغلب، محاسبه را برای دوره‌های روزانه انجام می‌دهند.

با پیشرفت تحقیقات بر مبنای ارزیابی نتایج بدست آمده از برآورد دقیق‌تر آب مصرفی گیاهان، نقاط ضعف روش‌ها آشکار شد. کارآیی چهار روش فوق برای مناطق مختلف، توسط محققان بسیاری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. اگر چه، نتایج این بررسی‌ها ممکن است متأثر از موقعیت جغرافیایی، شرایط اندازه‌گیری یا جمع‌آوری داده‌های هواشناسی باشند لیکن، مشخص گردید که نتایج این روش‌های پیشنهاد شده در مناطق مختلف جهان مشابه نمی‌باشد. انحراف مقادیر محاسبه شده از مشاهده شده، به طور عمده، بیشتر از حد مورد انتظار و پیش‌بینی شده توسط فائو بوده است. روش پنمن اصلاح شده تبخیر - تعرق مرجع را در شرایط تبخیر پایین، حتی تا ۲۰ درصد بیشتر برآورد می‌کرد. نتایج سایر معادله‌های پیشنهادی فائو ارقام متفاوت از تبخیر - تعرق مرجع نسبت به سطح (مرجع) چمن استاندارد را نشان داد.

به منظور ارزیابی کارآیی این روش‌ها و سایر روش‌های برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع تحت شرایط اقلیمی متفاوت، یک مطالعه پایه‌ای تحت نظارت گروه کاری نیازهای آب آبیاری انجمن مهندسان عمران ایالات متحده آمریکا^۱ انجام شد. در مطالعه فوق، برای ارزیابی اعتبار روش‌ها، کارآیی بیست روش مختلف در مقایسه با داده‌های لایسیمتری به دقت انتخاب شده از یازده منطقه با شرایط اقلیمی متغیر، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. این مطالعه، کارآیی بسیار متفاوت این روش‌ها را در شرایط اقلیمی مختلف اثبات کرد. در یک مطالعه موازی دیگر که به توصیه کمیته جامعه اروپایی^۲، انجام شد، کنسرسیومی از مؤسسات تحقیقاتی اروپایی، کارآیی روش‌های گوناگون برآورد تبخیر - تعرق را با استفاده از مطالعات مختلف لایسیمتری مورد ارزیابی قرار داد.

نتایج مطالعات، برآورد بسیار بیشتر از واقع تبخیر - تعرق را با روش پنمن (اصلاح شده) پیشنهادی در نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو و، همچنین، کارآیی متفاوت روش‌های مختلف را به لحاظ مقدار انطباق با شرایط محلی تأیید می‌کند. نتایج این بررسی‌ها را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- روش پنمن و روش‌های استخراج شده از آن برای دستیابی به نتایج قابل قبول، به واسنجی محلی تابع باد نیازمند هستند.
- روش‌های تابش در اقلیم‌های مرطوب که جزء آئروپدینامیک به طور نسبی کوچک است، نتایج مطلوبی را نشان می‌دهند. اما کارآیی این روش‌ها در شرایط اقلیمی خشک همراه با خطا بوده و تبخیر - تعرق را کمتر از واقع برآورد کرده است.
- روش‌های وابسته به دما جنبه تجربی داشته و برای دستیابی به نتایج قابل قبول، به واسنجی محلی نیازمند هستند. روش هارگریوز^۳ (۱۹۸۵) یک استثنا بوده و نتایج قابل قبول از تبخیر - تعرق مرجع را در نقاط مختلف محاسبه می‌کند و اعتبار جهانی دارد.

1- American Society of Civil Engineers (ASCE)
2- European Community
3- Hargreaves' method

- روش‌های برآورد تبخیر - تعرق وابسته به تبخیر از تشت، به وضوح، کاستی‌های برآورد تبخیر - تعرق گیاه بر مبنای تبخیر از سطح آب آزاد را منعکس می‌کند. این روش‌ها، تحت تأثیر شرایط اقلیم خردمقیاس اطراف تشت و نیز دقت در نگهداری ایستگاه هواشناسی می‌باشند. دقت بکارگیری روش‌های استفاده از تشت، غیر قابل پیش‌بینی است.
- کارآیی دقیق و سازگار بودن روش پنمن - مونتیت در اقلیم خشک و مرطوب در هر دو تحقیقات انجمن مهندسان عمران ایالات متحده و کمیته اروپایی مورد تأکید قرار گرفته است.

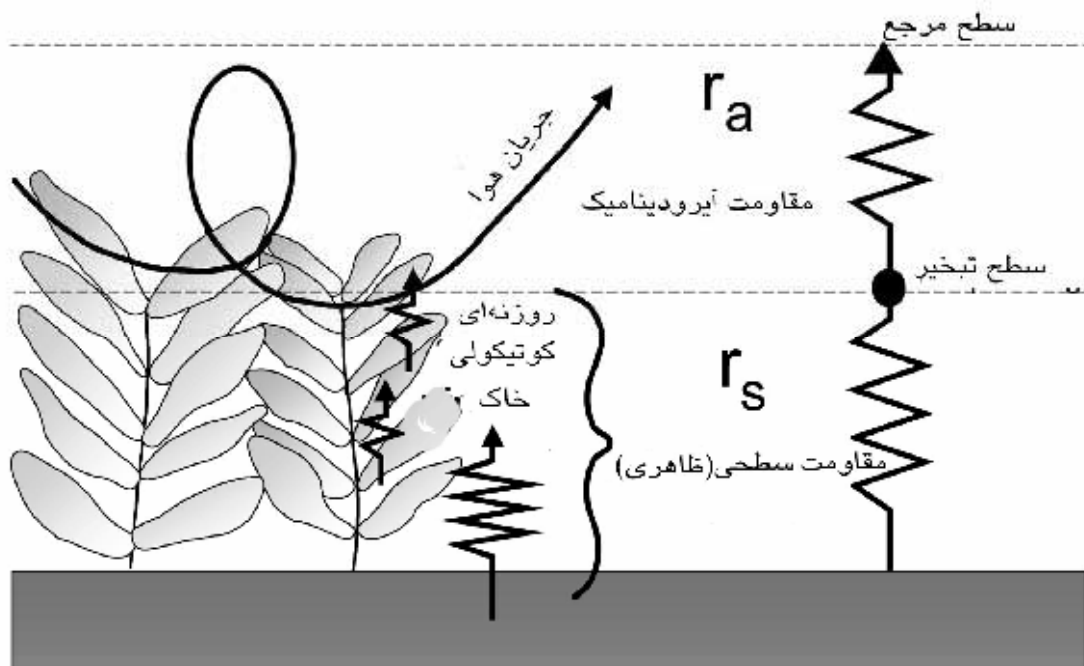
نتایج بررسی و تحلیل کارآیی روش‌های مختلف محاسبه، بر ضرورت تدوین یک روش استاندارد برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع تأکید می‌کند. بنابراین، روش پنمن - مونتیت فائو، به عنوان تنها روش استاندارد پیشنهاد شده است. این روش تخمین صحیح از تبخیر - تعرق مرجع در مناطق و اقلیم‌های مختلف ارائه کرده و در شرایط کافی نبودن داده‌های هواشناسی در دسترس نیز، قابل استفاده است. در حال حاضر، استفاده از روش‌های قدیمی‌تر فائو یا سایر روش‌های تعیین تبخیر - تعرق مرجع توصیه نمی‌شود.

استخراج معادله پنمن - مونتیت

معادله پنمن - مونتیت

در سال ۱۹۴۸، پنمن رابطه موازنه انرژی را با روش انتقال جرم ترکیب و معادله‌ای برای محاسبه تبخیر از سطح آب آزاد با استفاده از داده‌های استاندارد هواشناسی شامل ساعات آفتابی، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد را ارائه کرد. این روش که به نام روش ترکیبی معروف است، توسط محققان بسیاری توسعه داده شد و با معرفی ضرایب مقاومت به سطوح کشت گیاهان تعمیم یافت. عوامل مقاومت آئرودینامیک و مقاومت سطحی متمایز می‌باشند (شکل ۷). عوامل مقاومت سطحی، اغلب، به نام پارامتر مقاومت سطحی (ظاهری)^۱ ترکیب شده و به صورت سری با مقاومت آئرودینامیک عمل می‌کنند. مقاومت سطحی، مقاومت موجود در مقابل انتقال بخار آب از درون روزنه‌ها، کل سطح برگ و سطح خاک به آتمسفر را تشریح می‌کند. مقاومت آئرودینامیک (I_a)، مقاومت پوشش گیاهی در مقابل انتقال بخار به سمت بالا و اصطکاک حاصل از جریان هوا روی سطوح گیاهی را نشان می‌دهد. هر چند، فرآیند تبادل در یک لایه گیاهی پیچیده‌تر از آن است که بتواند، به طور کامل، به وسیله دو ضریب مقاومت فوق توصیف شود. لیکن، بر پایه این مفاهیم، همبستگی مناسب بین تبخیر - تعرق اندازه‌گیری و محاسبه شده، به ویژه برای یک سطح مرجع چمن یکنواخت، مشاهده شده است.

1- Bulk surface resistance



شکل ۷- طرحی از مقاومت‌های سطحی (ظاهری) و آئروودینامیک در مقابل جریان بخار آب

معادله ترکیبی پنمن - مونتیث به صورت زیر می‌باشد:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \quad (۳)$$

که در آن:

R_n = تابش خالص،

G = شار گرمای خاک،

$(e_s - e_a)$ = کمبود فشار بخار هوا،

ρ_a = میانگین جرم مخصوص (دانسیته) هوا در فشار ثابت،

c_p = گرمای ویژه هوا،

Δ = شیب منحنی فشار بخار آب نسبت به دما،

γ = ضریب ثابت سایکرومتری،

r_s = مقاومت سطحی (ظاهری) و

r_a = مقاومت آئروودینامیک می‌باشند.

اجزای معادله در فصل سوم تعریف شده‌اند. معادله پنمن - مونتیث به صورت فوق شامل تمامی عواملی است که تبادل انرژی و شار گرمای نهان متناظر با آن (یعنی تبخیر - تعرق) از سطح یکنواخت پوشش گیاهی را کنترل می‌کنند. اغلب این عوامل قابل اندازه‌گیری بوده و یا، به سادگی، با استفاده از داده‌های هواشناسی قابل محاسبه هستند. از آنجا که، مقاومت‌های سطحی و آئروودینامیک از ویژگی‌های سطح گیاه می‌باشند، می‌توان از این معادله برای محاسبه مستقیم تبخیر - تعرق گیاهان استفاده کرد.

مقاومت آئروودینامیک

مقاومت آئروودینامیک (r_a) در مقابل انتقال گرما و بخار آب از سطح تبخیر به هوای بالای پوشش گیاهی به صورت رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z} \quad (۴)$$

که در آن:

r_a = مقاومت آئروودینامیک [ثانیه بر متر] ،

z_m = ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد [متر]،

z_h = ارتفاع اندازه‌گیری رطوبت [متر]،

d = ارتفاع جابجایی صفحه صفر^۱ [متر]،

z_{om} = طول زبری مؤثر بر انتقال گشتاور^۲ [متر]،

z_{oh} = طول زبری مؤثر بر انتقال گرما و بخار آب [متر]،

k = ضریب ثابت ون کارمن^۳ مساوی با ۰/۴۱ [بدون واحد] و

u_z = سرعت باد در ارتفاع z بالای سطح زمین [متر بر ثانیه] می‌باشند.

این معادله برای شرایطی که هوا بلحاظ پایداری خنثی بوده معتبر است که در آن، توزیع دما، فشار آتمسفر و سرعت باد، به طور تقریبی، تابع شرایط آدیاباتیکی^۴ (بدون تبادل گرما) می‌باشد. کاربرد معادله برای دوره‌های کوتاه مدت (ساعتی یا کمتر)، ممکن است، نیازمند تعدیل برای گنجاندن شرایط پایداری محلی در آن باشد. هر چند، هنگام برآورد تبخیر - تعرق سطح مرجع خوب آبیاری شده از گرمای تبادل یافته که اندک است، صرف‌نظر می‌شود و به طور معمول، تعدیلی برای گنجاندن اثر وضعیت پایداری هوا مورد نیاز نمی‌باشد.

1- Zero plane displacement height

ارتفاعی از سطح زمین که بالاتر از آن تبادل هوا شروع می‌شود و سرعت باد با افزایش ارتفاع به طور نمایی افزایش می‌یابد.

2- Momentum transfer

3- Von Karman

4- Adiabatic

نتایج مطالعات بسیار بر تأثیر پوشش‌های گیاهی بر وضعیت باد تأکید کرده است. در شرایطی که سطح خاک پوشیده از گیاه است، ارتفاع جابجایی صفحه صفر و طول زبری باید در نظر گرفته شوند. این عوامل، به ارتفاع و ساختار گیاه بستگی دارند. معادله‌های تجربی بسیاری برای برآورد d ، Z_{om} و Z_{oh} ارائه شده است. روش تعیین مقاومت آئرودینامیک برای سطح مرجع چمن در کادر ۴ بیان شده است.

مقاومت سطحی (ظاهری)

مقاومت سطحی (ظاهری)، مقاومت در مقابل انتقال بخار آب از سطح گیاه در حال تعرق و سطح خاک در حال تبخیر به آتمسفر را تشریح می‌کند. هنگامی که، پوشش گیاهی سطح خاک را به طور کامل نپوشاند، عامل مقاومت باید تأثیر تبخیر از سطح خاک را نیز شامل شود. چنانچه تعرق گیاه بالا نباشد، مقاومت سطحی به وضعیت آب در دسترس پوشش گیاهی نیز، بستگی دارد. تقریب قابل قبول از عامل بسیار پیچیده مقاومت سطحی پوشش گیاهی کامل، به صورت رابطه زیر است:

$$r_s = \frac{r_1}{LAI_{active}} \quad (5)$$

که در آن:

r_s = مقاومت سطحی (ظاهری) [ثانیه بر متر]

r_1 = مقاومت روزنه‌ای برگ به طور کامل به سمت نور [ثانیه بر متر] و

LAI_{active} = نمایه سطح برگ فعال به سمت نور [متر مربع بر متر مربع] می‌باشند.

نمایه سطح برگ یک نسبت بوده و مساوی با مقدار سطح برگ‌ها (تنها سمت رو به بالا) در هر واحد سطح خاک زیرین است و برحسب مترمربع سطح برگ بر مترمربع سطح خاک بیان می‌شود. نمایه سطح برگ فعال کسری (بخشی) از سطح برگ است که در انتقال گرما و بخار آب به آتمسفر نقش دارد و بخش بالایی و به سمت نور یک پوشش گیاهی کامل را شامل می‌شود. مقادیر نمایه سطح برگ برای گیاهان گوناگون بسیار متغیر است لیکن، رقم بین ۳ تا ۵ برای بسیاری از گیاهان بالغ با رشد کامل کاربرد عمومی دارد. برای یک گیاه مشخص، نمایه سطح برگ سبز در طول دوره رشد تغییر کرده و به طور معمول، پیش یا در هنگام گل‌دهی به بیشترین مقدار می‌رسد (شکل ۸). به علاوه، نمایه سطح برگ به تراکم کشت و نوع گیاه نیز، بستگی دارد.

مقاومت روزنه‌ای، میانگین مقاومت روزنه‌های یک برگ است. این مقاومت، از جمله ویژگی گیاه بوده و مقدار آن بر پایه گونه‌های گیاهی و مدیریت زراعی متفاوت می‌باشد و، به طور معمول، با افزایش عمر گیاه و شروع مرحله رسیدن محصول افزایش می‌یابد. با این وجود، اطلاعات کامل از دامنه تغییر مقدار مقاومت روزنه‌ای گیاهان گوناگون در طول دوره رشد در دست نیست. اطلاعات موجود از هدایت یا مقاومت روزنه‌ای، اغلب، به دنبال بررسی‌های فیزیولوژی یا اکوفیزیولوژی^۱ به دست آمده‌اند.

کادر ۴- مقاومت آئرو دینامیک سطح مرجع چمن

برای بسیاری از گیاهان، ارتفاع جابجایی صفحه صفر (d به متر) و طول زبری مؤثر بر انتقال گشتاور (Z_{om} ، به متر) را می‌توان با استفاده از ارتفاع گیاه (h به متر) و روابط زیر برآورد کرد:

$$d = \frac{2}{3} h$$

$$Z_{om} = 0.123 h$$

طول زبری مؤثر بر انتقال گرما و بخار آب (Z_{oh} به متر) به طور تقریبی، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Z_{oh} = 0.1 Z_{om}$$

با فرض ارتفاع ثابت 0.12 متر برای گیاه و اندازه‌گیری سرعت باد، دمای هوا و رطوبت در ارتفاع استاندارد دو متری از سطح زمین (یعنی؛ $Z_m = Z_h = 2$ متر)، مقاومت آئرو دینامیک (r_a بر حسب ثانیه بر متر) برای سطح مرجع چمن به صورت زیر محاسبه می‌شود (معادله ۴):

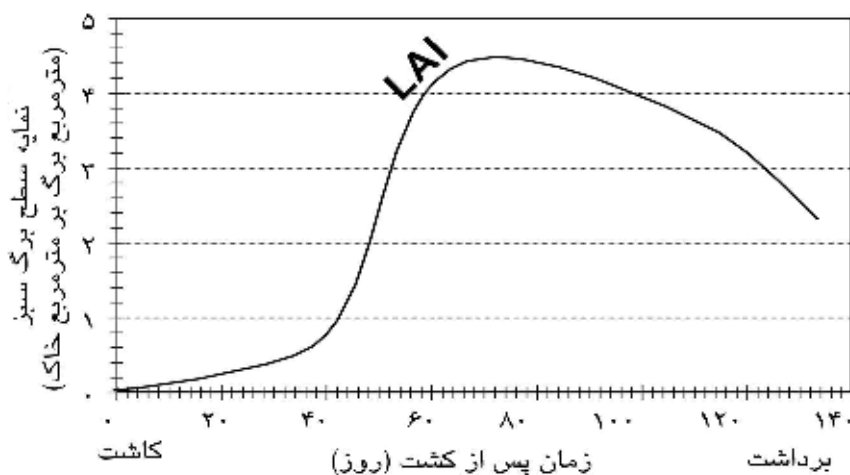
$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{2 - \frac{2}{3} \times (0.12)}{0.123 \times (0.12)} \right] \times \ln \left[\frac{2 - \frac{2}{3} \times (0.12)}{(0.1) \times 0.123 \times (0.12)} \right]}{(0.41)^2 u_p} = \frac{2.8}{u_p}$$

که در آن u_p ، سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه در ارتفاع دو متری می‌باشد.

مقاومت روزنه‌ای، تحت تأثیر اقلیم و آب قابل استفاده خاک قرار دارد. با این حال، انواع گیاهان به طور متفاوت از این عوامل متأثر می‌شوند. هنگامی که گیاه تحت تنش آبی است و آب خاک تبخیر - تعرق گیاه را محدود می‌کند، مقاومت روزنه‌ای افزایش می‌یابد. نتایج برخی بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقاومت روزنه‌ای تا حدی تحت اثر شدت تابش، دما و کمبود فشار بخار قرار دارد. روش استخراج مقاومت سطحی مرجع چمن در کادر ۵ ارائه شده است.

سطح مرجع

مفهوم سطح مرجع، برای پرهیز از نیاز به تعریف جداگانه پارامترهای تبخیر برای هر گیاه و هر مرحله رشد، پیشنهاد شد. تبخیر - تعرق گیاهان مختلف با استفاده از ضرایب گیاهی به تبخیر - تعرق سطح مرجع ارتباط داده می‌شود.



شکل ۸- تغییر معمول نمایه سطح برگ (سبز) ذرت در دوره رشد

کادر ۵- مقاومت سطحی (ظاهری) گیاه مرجع چمن

معادله کلی برای محاسبه نمایه سطح برگ فعال به صورت زیر است :

$$LAI_{active} = 0.5 LAI$$

که در آن فرض شده است که تنها سمت رو به بالای چمن متراکم، به طور فعال، در انتقال گرمای سطحی و بخار آب شرکت دارد. معادله کلی نمایه سطح برگ برای یک چمن با رشد کامل عبارت است از :

$$LAI = 24h$$

که در آن h ارتفاع گیاه (برحسب متر) می باشد.

مقاومت روزنه ای (r_l) یک برگ تحت آبیاری مطلوب در حدود ۱۰۰ ثانیه بر متر است. با فرض این که ارتفاع گیاه ۰/۱۲ متر باشد، مقاومت سطحی (r_s بر حسب ثانیه بر متر) برای سطح مرجع چمن (معادله ۵) عبارت است از:

$$r_s = \frac{100}{0.5 \times (24) \times (0.12)} \approx 70 \text{ ثانیه بر متر}$$

در گذشته، سطح آب آزاد به عنوان سطح مرجع پیشنهاد شده بود. با این حال، تفاوت ویژگی های آئرودینامیک، کنترل پوشش گیاهی و تابش، یک تردید جدی در ارتباط دادن تبخیر - تعرق گیاه به اندازه گیری تبخیر از سطح آب آزاد را ایجاد می کند. ارتباط بین تبخیر - تعرق گیاه مرجع و یک گیاه مشخص، دارای این مزیت است که تلفیق فرآیندهای بیولوژیکی و فیزیکی مؤثر بر تبخیر - تعرق سطوح کشت در نظر گرفته می شود.

گیاهان چمن و یونجه از نظر ویژگی های آئرودینامیک و پوشش گیاهی به طور کامل مطالعه و در سطح جهانی به عنوان سطح مرجع پذیرفته شده اند. از آنجا که، مقاومت در مقابل انتقال بخار آب تابع ارتفاع گیاه، پوشش خاک، نمایه سطح برگ و شرایط رطوبت خاک است، ویژگی های گیاه مرجع باید به طور کامل

تعریف شده و ثابت باشد. زبری و نمایه سطح برگ تابع ارتفاع گیاه است. در نتیجه، پوشش گیاهی و مقاومت آئرودینامیک مربوطه، تا حد بسیار با زمان تغییر می‌کند. به علاوه، تنش آبی و وضعیت پوشش خاک بر روی مقاومت‌ها و همچنین، ضریب آلبیدو مؤثر است.

برای پرهیز از واسنجی محلی که مستلزم انجام مطالعات پرهزینه می‌باشد، سطح مرجع چمن فرضی انتخاب شده است. قید تعریف سطح مرجع به چمن فعال، متأثر از این واقعیت است که گونه چمن و ویژگی‌های ظاهری (مورفولوژی) آن می‌تواند بر تبخیر - تعرق به ویژه در زمان اوج نیاز آبی، اثر قابل ملاحظه داشته باشد. همچنین، ممکن است، انواع چمن فصل گرم و سرد به طور کامل متفاوت باشند. چمن فصل سرد کنترل روزه‌ای کمتری داشته و در نتیجه، تبخیر - تعرق آن بالاتر است. کشت و نگهداری چمن‌های فصل سرد در برخی از اقلیم‌های خشک و گرمسیری ممکن است، دشوار باشد. هیأت مشاوره کارشناسی فائو در بازنگری "روش‌های فائو برای نیاز آبی گیاهان"، تعریف زیر را به عنوان مفهوم سطح مرجع پذیرفته است:

"یک گیاه مرجع فرضی با ارتفاع تقریبی ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی ثابت ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب آلبیدو ۰/۲۳."

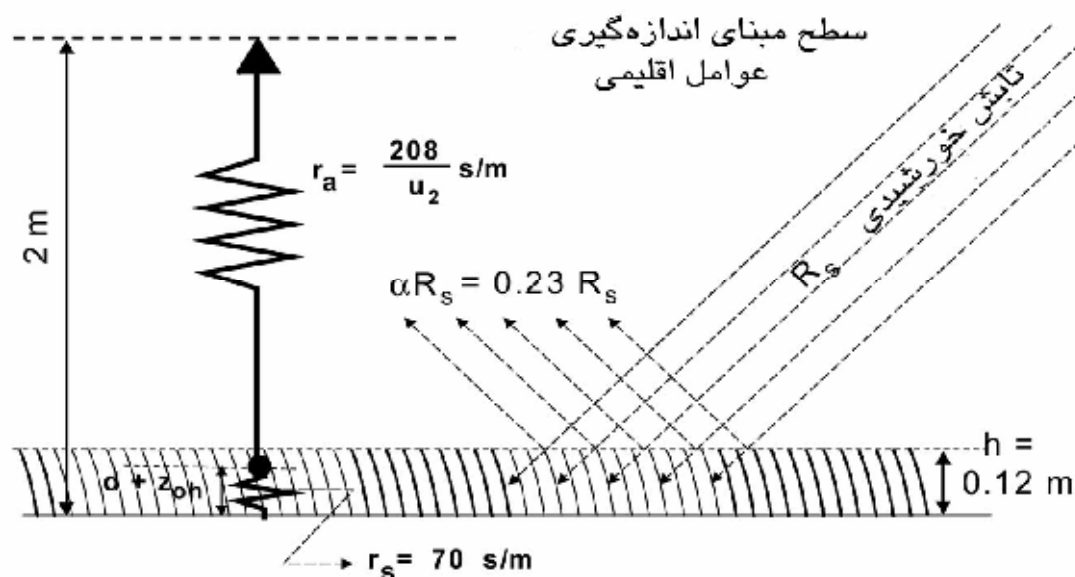
سطح مرجع، بسیار مشابه سطح وسیع چمن سبز با ارتفاع یکنواخت، رشد فعال و سایه‌اندازی کامل بر روی سطح زمین است که آب کافی دریافت می‌کند. این شرایط از جمله آن که، سطح چمن باید وسیع و یکنواخت باشد، متأثر از این فرض است که تمامی شارهای انرژی در یک جهت رو به بالا هستند. معادله پنمن - مونتیث فائو به عنوان روشی که تبخیر - تعرق سطح مرجع را بدون ابهام تعیین و نیز روشی که مقادیر تبخیر - تعرق سطح مرجع در تمامی مناطق و اقلیم‌ها را به طور یکنواخت محاسبه می‌کند، انتخاب شده است.

معادله پنمن - مونتیث فائو

معادله

در ماه مه سال ۱۹۹۰ میلادی، سازمان خواربار و کشاورزی (فائو) هیأت مشورتی از کارشناسان و محققان را با همکاری کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی و سازمان جهانی هواشناسی^۱ تشکیل داد تا ضمن بازنگری روش‌های این سازمان در زمینه نیاز آبی گیاهان، روش‌ها را تجدیدنظر و روزآمد کنند. در گردهمایی کارشناسان، بر استفاده از روش ترکیبی پنمن - مونتیث به عنوان یک روش استاندارد روزآمد برای برآورد تبخیر - تعرق مرجع توافق و روش‌هایی نیز، برای محاسبه پارامترهای مختلف پیشنهاد شد. با تعریف گیاه مرجع به عنوان یک گیاه فرضی با ارتفاع ۰/۱۲ متر و مقاومت سطحی ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتابش (آلبیدو) ۰/۲۳ که تبخیر آن شباهت بسیار به تبخیر از سطح وسیع چمن سبز با ارتفاع یکنواخت، رشد فعال و دسترسی به آب کافی دارد، روش پنمن - مونتیث فائو توسعه یافت (شکل ۹).

این روش، کاستی‌های روش پیشین پنمن فائو را رفع و مقادیر آب مصرفی گیاهان را به داده‌های اندازه‌گیری شده در سطح جهان نزدیکتر کرد.



شکل ۹- ویژگی‌های گیاه مرجع فرضی

با استفاده از معادله اولیه پنمن - مونتیت (معادله ۳) و معادله‌های مقاومت آئروдинаمیک (معادله ۴) و مقاومت سطحی (معادله ۵)، تبخیر - تعرق مرجع با روش پنمن - مونتیت فائو به صورت زیر برآورد می‌شود (به کادر ۶ مراجعه شود):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (۶)$$

که در آن:

ET_o = تبخیر - تعرق مرجع [میلی متر بر روز]،

R_n = تابش خالص ورودی به سطح گیاه [مگاژول بر مترمربع بر روز]،

G = شار گرمای خاک [مگاژول بر مترمربع بر روز]،

T = میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری [درجه سلسیوس]،

u_2 = میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری [متر بر ثانیه]،

e_s = فشار بخار اشباع [کیلوپاسکال]،

e_a = فشار بخار واقعی [کیلوپاسکال]،

$e_s - e_a$ = کمبود فشار بخار اشباع [کیلوپاسکال]،

Δ = شیب منحنی فشار بخار [کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس] و
 γ = ضریب ثابت سایکرومتری [کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس]، می‌باشند.

تبخیر - تعرق مرجع، استاندارد را فراهم می‌کند که:

- تبخیر - تعرق دوره‌های مختلف سال یا مناطق متفاوت بتوانند مقایسه شوند.
- تبخیر - تعرق گیاهان متفاوت بتوانند به یکدیگر ارتباط داده شوند.

این معادله، از داده‌های هواشناسی استاندارد شامل تابش خورشیدی (ساعات آفتابی)، دمای هوا، رطوبت هوا و سرعت باد استفاده می‌کند. به منظور اطمینان از صحت محاسبه‌ها، پارامترهای هواشناسی باید در ارتفاع دو متری بالای چمن سبز که در سطح وسیع کشت شده و زمین را، به طور کامل، پوشانده و کمبود آب نیز نداشته باشد، اندازه‌گیری شوند.

به دلیل اعمال فرض‌های ساده کننده در معادله‌ها و وجود خطای اندازه‌گیری داده‌ها، نمی‌توان انتظار داشت که معادله‌های تعیین تبخیر - تعرق وابسته به داده‌های هواشناسی، بتوانند تبخیر - تعرق را همواره و تحت هر موقعیت اقلیمی مشخص، به طور دقیق برآورد کنند. وسایل دقیق اندازه‌گیری تحت شرایط کنترل شده، به طور احتمال، نشان خواهند داد که تبخیر - تعرق مرجع محاسبه شده با معادله پنمن - مونتیت فائو، گاهی، متفاوت از تبخیر - تعرق مرجع (چمن) اندازه‌گیری شده است. با این وجود، هیأت مشاوره کارشناسی موافقت کرد که هنگام توصیف و تعیین ضرایب گیاهی، از مفهوم سطح مرجع فرضی معادله پنمن - مونتیت فائو به عنوان تعریف استاندارد برای تبخیر - تعرق گیاه مرجع چمن استفاده شود.

تذکر: در هنگام مقایسه نتایج معادله پنمن - مونتیت فائو با مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر - تعرق مرجع، باید معادله کامل پنمن - مونتیت (معادله ۳) و معادله‌های I_a و I_s (معادله‌های ۴ و ۵) استفاده شده تا محاسبه تبخیر - تعرق متأثر از تغییر ارتفاع چمن، ممکن شود. تغییر ارتفاع می‌تواند به طور معنی‌داری Z_{om} , d , L , AI و در نتیجه برآورد تبخیر - تعرق مرجع را تغییر دهد. هنگام ارزیابی نتایج، باید توجه داشت که عوامل مدیریت زراعی و محیطی محلی نظیر فاصله آبیاری نیز، بر تبخیر - تعرق گیاه مرجع اثر دارند.

معادله پنمن - مونتیت فائو یک نمایش دقیق و ساده از عوامل فیزیکی و فیزیولوژیکی مؤثر بر تبخیر - تعرق می‌باشد. با استفاده از تعریف روش پنمن - مونتیت فائو برای تبخیر - تعرق مرجع، می‌توان با ارتباط دادن تبخیر - تعرق اندازه‌گیری شده گیاه (ET_c) به تبخیر - تعرق مرجع محاسبه شده (ET_0) در مراکز تحقیقاتی، ضرایب گیاهی را به صورت رابطه: $K_c = \frac{ET_c}{ET_0}$ ، محاسبه کرد. در روش ضریب گیاهی، تفاوت پوشش

گیاهی و مقاومت آئرودینامیک گیاهان نسبت به گیاه مرجع فرضی، در ضریب گیاهی گنجانده شده است. ضریب گیاهی یک مجموعه از تفاوت‌های فیزیکی و فیزیولوژیکی بین گیاهان و سطح مرجع را بیان می‌کند.

داده‌ها

معادله پنمن - مونتیت فائو برای محاسبه روزانه، هفتگی، ده روزه یا ماهانه تبخیر - تعرق، علاوه بر مختصات محل (بررسی) به داده‌هایی نظیر دمای هوا، رطوبت، تابش و سرعت باد نیازمند است. نحوه

محاسبه تمامی داده‌های مورد نیاز تعیین تبخیر - تعرق مرجع در فصل سوم بیان شده است. مشخص شدن واحدهای اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی، مهم می‌باشد. ضرایب مورد نیاز تبدیل واحدهای متداول به واحدهای SI در پیوست یک ارائه شده است.

مفتصات ممل

ارتفاع از سطح دریا (برحسب متر) و عرض جغرافیایی (درجه شمالی یا جنوبی) محل مورد نظر باید مشخص باشد. این داده‌ها برای اصلاح برخی پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در تعیین میانگین فشار آتمسفر واقعی (که تابع میانگین ارتفاع محل از سطح دریا است) و محاسبه تابش فرازمینی^۱ و در برخی موارد، ساعات آفتابی مورد نیاز می‌باشند. در محاسبه تابش فرازمینی و ساعات آفتابی، عرض جغرافیایی بر حسب رادیان (با ضرب کردن درجه در $\frac{\pi}{180}$) بیان می‌شود. مقادیر مثبت برای نیمکره شمالی و مقادیر منفی برای نیمکره جنوبی استفاده می‌گردد.

دما

میانگین حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا برحسب درجه سلسیوس ($^{\circ}\text{C}$) مورد نیاز است. هنگامی که، تنها، میانگین دمای روزانه در دسترس باشد، مقدار ET_0 هنوز هم قابل محاسبه است. هر چند، به دلیل غیرخطی بودن رابطه فشار بخار اشباع و دما (شکل ۱۱)، به احتمال، برآورد تبخیر - تعرق مرجع با خطا همراه است. در صورت استفاده از میانگین دمای هوا به جای حداکثر و حداقل آن، فشار بخار اشباع (e_s) پایین‌تر محاسبه می‌شود. بنابراین، کمبود فشار بخار اشباع ($e_s - e_a$) کمتر و تبخیر - تعرق مرجع نیز کمتر از واقع برآورد می‌گردد.

رطوبت

میانگین روزانه فشار بخار واقعی هوا برحسب کیلو پاسکال مورد نیاز می‌باشد. هنگام در دسترس نبودن فشار بخار واقعی، مقدار آن از روی حداکثر و حداقل رطوبت نسبی (برحسب درصد)، داده‌های سایکرومتری (دمای خشک و تر برحسب درجه سلسیوس) یا دمای نقطه شبنم (برحسب درجه سلسیوس) با استفاده از روش‌های ارائه شده در فصل سوم، قابل برآورد است.

تابش

میانگین روزانه تابش خالص برحسب مگاژول بر مترمربع بر روز مورد نیاز است. به طور معمول، این داده‌ها در دسترس نمی‌باشند. اما، می‌توانند با استفاده از میانگین روزانه تابش طول موج کوتاه اندازه‌گیری شده با پیرانومتر^۲، یا میانگین ساعات آفتابی اندازه‌گیری شده با دستگاه آفتاب نگار (کمبل - استوکس^۳) تعیین شوند. روش‌های محاسبه در فصل سوم بیان شده است.

1- Extraterrestrial
2- Pyranometer
3- Campbell- Stokes

کادر ۶ - استخراج معادله پنمن - مونیت فائو برای گیاه مرجع چمن فرضی

با فرض اندازه گیری سرعت باد، دما و رطوبت هوا در ارتفاع استاندارد دو متری ($Z_m = Z_h = 2$ متر) و $h = 0.12$ متر، مقاومت های آئرو دینامیک و سطحی (کادرهای ۴ و ۵) عبارتند از:

$$r_a = \frac{2.0 \lambda}{u_p} \text{ sm}^{-1}, \quad (\text{با } u_p \text{ سرعت باد در ارتفاع دو متری})$$

$$r_s = 7.0 \text{ sm}^{-1}$$

$$(1 + \frac{r_s}{r_a}) = (1 + 0.34 u_p)$$

G و R_n اجزای انرژی قابل دسترس در هر واحد سطح است و بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز بیان می شود. برای تبدیل مقدار انرژی (تابش) به عمق معادل تبخیر آب (میلی متر)، از گرمای نهان تبخیر (λ) به عنوان ضریب تبدیل استفاده می شود (فصل اول). روش تبدیل مقادیر انرژی به عمق معادل آب و برعکس با معادله ۲۰ ارائه شده است.

$$\text{Radiation [mm day}^{-1}] \approx \frac{\text{Radiation [MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}]}{2.45} = 0.408 \text{ Radiation [MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}]$$

با حل معادله ۸ برای C_p داریم:

$$C_p = \frac{\gamma \varepsilon \lambda}{P}$$

و با در نظر گرفتن قانون گاز ایده آل برای ρ_a :

$$\rho_a = \frac{P}{T_{kv} R}$$

می توان به جای دمای واقعی هوا (T_{kv}) نوشت:

$$T_{kv} = 1.01(T + 273)$$

در نتیجه:

$$\frac{C_p \rho_a}{r_a} = \frac{\gamma \varepsilon \lambda}{1.01(T + 273)R(208)} u_2 \quad [\text{MJ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ s}^{-1}]$$

که در آن:

C_p = گرمای ویژه در فشار ثابت [مگاژول بر کیلوگرم بر درجه سلسیوس].

ρ_a = میانگین جرم مخصوص هوا در فشار ثابت [کیلوگرم بر مترمکعب].

r_a = مقاومت آئرو دینامیک [ثانیه بر متر]،

γ = ضریب ثابت سایکرومتری [کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس].

ε = نسبت وزن ملکولی بخار آب به هوای خشک مساوی با ۰/۶۲۲،

λ = گرمای نهان تبخیر [مگاژول بر کیلوگرم].

u_2 = سرعت باد در ارتفاع دو متری [متر بر ثانیه].

R = ثابت ویژه گازها [۰/۲۸۷ کیلوژول بر کیلوگرم بر کلون].

T = دمای هوا [درجه سلسیوس].

P = فشار اتمسفر [کیلو پاسکال].

$$= 86400 \cdot \frac{\gamma \times (0.622) \times \lambda}{1.01 \times (T + 273) \times (0.287) \times (2.08)} u_p \quad \text{MJ m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}$$

یا، با تقسیم بر λ (که $\lambda = 2450$ است) داریم:

$$\approx \gamma \frac{900}{T + 273} u_p \quad [\text{mm } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ day}^{-1}]$$

سرعت باد

میانگین روزانه سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه در ارتفاع دو متری بالای سطح زمین مورد نیاز می‌باشد. توجه به ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد مهم می‌باشد. زیرا، سرعت باد به ارتفاع اندازه‌گیری بستگی دارد. در فصل سوم، روش محاسبه تبدیل سرعت باد در یک ارتفاع مشخص به ارتفاع استاندارد دو متری ارائه شده است.

داده‌های اقلیمی غیرموجود

هنگامی که برخی متغیرهای هواشناسی اندازه‌گیری نشده یا داده‌ها در دسترس نباشند، باید از محاسبه تبخیر - تعرق مرجع با بکارگیری روش‌های ساده‌تر و اطلاعات هواشناسی محدودتر پرهیز شود. بنابراین، توصیه می‌شود که پس از محاسبه و برآورد داده‌های غیرموجود، از روش استاندارد پنمن - مونتیت فائو برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع استفاده گردد. روش‌های برآورد داده‌های اقلیمی غیرموجود در فصل سوم توصیف شده است. انتظار می‌رود تفاوت تبخیر - تعرق مرجع بدست آمده از معادله پنمن - مونتیت فائو با بکارگیری داده‌های کامل و غیر کامل، کمتر یا مشابه تفاوت تبخیر - تعرق مرجع بدست آمده از یک معادله جایگزین باشد.

در شرایطی که مجموعه داده‌ها تنها، شامل حداقل و حداکثر دمای هوا باشد، معادله پنمن - مونتیت فائو می‌تواند برآورد قابل قبولی از مقدار تبخیر - تعرق مرجع برای دوره‌های ده روزه یا ماهانه را ارائه دهد. همان طور که در فصل سوم بیان شده است، می‌توان داده‌های تابش را از روی تفاوت دمای هوا تعیین کرد یا آن را به همراه سرعت باد و داده‌های رطوبت از یک ایستگاه هواشناسی مجاور محل مورد نظر بدست آورد. داده‌های رطوبت، همچنین، بر مبنای حداقل دمای روزانه هوا قابل برآورد است. پس از بررسی و تأیید قابل اطمینان بودن داده‌های ایستگاه هواشناسی مجاور، تبخیر - تعرق ده روزه یا ماهانه محاسبه می‌شود.

اعتبار روش‌های برآورد داده‌های غیرموجود، باید در سطح محلی ارزیابی شوند. این ارزیابی می‌تواند در ایستگاه‌های هواشناسی دارای اطلاعات کامل انجام گردد. روش کار بدین ترتیب است که تبخیر - تعرق مرجع برای دو حالت کامل بودن و نبودن (با حذف عمده) داده‌ها محاسبه و مقایسه می‌شود. نسبت تبخیر - تعرق مرجع محاسبه شده در این دو حالت باید حدود یک باشد. اگر این نسبت به طور معنی‌دار متفاوت از عدد یک شود، می‌توان نسبت بدست آمده را به عنوان ضریب اصلاح تبخیر - تعرق برآورد شده از روی داده‌های هواشناسی غیر کامل در همان منطقه بکار برد. چنانچه، خطای استاندارد این روش بیشتر از ۲۰ درصد میانگین تبخیر - تعرق مرجع باشد، باید روش برآورد داده‌های غیرموجود برای یافتن علل و محدودیت‌های آن، به طور دقیق‌تر بررسی و تحلیل شود. تأیید صحت داده‌های هواشناسی برای محاسبه‌های ماهانه به همان اهمیت روزانه می‌باشد.

فصل سوم

داده‌های هواشناسی

روش‌های محاسبه تبخیر - تعرق با استفاده از داده‌های هواشناسی، به پارامترهای مختلف اقلیمی و فیزیکی نیازمند است. برخی از این داده‌ها، به طور مستقیم، در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شوند. سایر عوامل با داده‌های به طور معمول اندازه‌گیری شده، مرتبط هستند و می‌توانند با کمک روابط مستقیم یا تجربی استخراج شوند. در این فصل منبع، نحوه اندازه‌گیری و محاسبه تمامی داده‌های مورد نیاز برآورد تبخیر - تعرق مرجع با استفاده از روش پنمن - مانتیث فائو بررسی می‌شود. با مثال‌های مختلف، تصویری از مراحل محاسبه‌ها و همچنین، روش‌های مناسب برآورد داده‌های غیرموجود بیان می‌شوند.

داده‌های هواشناسی بر حسب واحدهای مختلف بیان می‌گردند. ضرایب تبدیل واحدها به یکدیگر و واحدهای SI در پیوست یک ارائه شده است. پارامترهای اقلیمی محاسبه شده به وسیله معادله‌های این فصل برای شرایط متفاوت اقلیمی، در پیوست دو ارائه و در این فصل، تنها، روابط استاندارد بیان شده است. پیشینه برخی روابط و اطلاعات بیشتر از سایر روش‌ها در پیوست سه ارائه شده است. در پیوست‌های چهار تا شش روش‌های تحلیل آماری، ارزیابی، اصلاح و تکمیل کل یا بخشی از داده‌های هواشناسی غیرموجود بیان شده است.

عوامل هواشناسی مؤثر بر تبخیر - تعرق

پارامترهای اقلیمی که انرژی لازم برای تبخیر و انتقال بخار آب از سطح (تبخیر) را تأمین می‌کنند، عوامل هواشناسی مؤثر بر تبخیر - تعرق هستند. در این فصل، پارامترهای اصلی هواشناسی مورد نیاز، بیان می‌شوند.

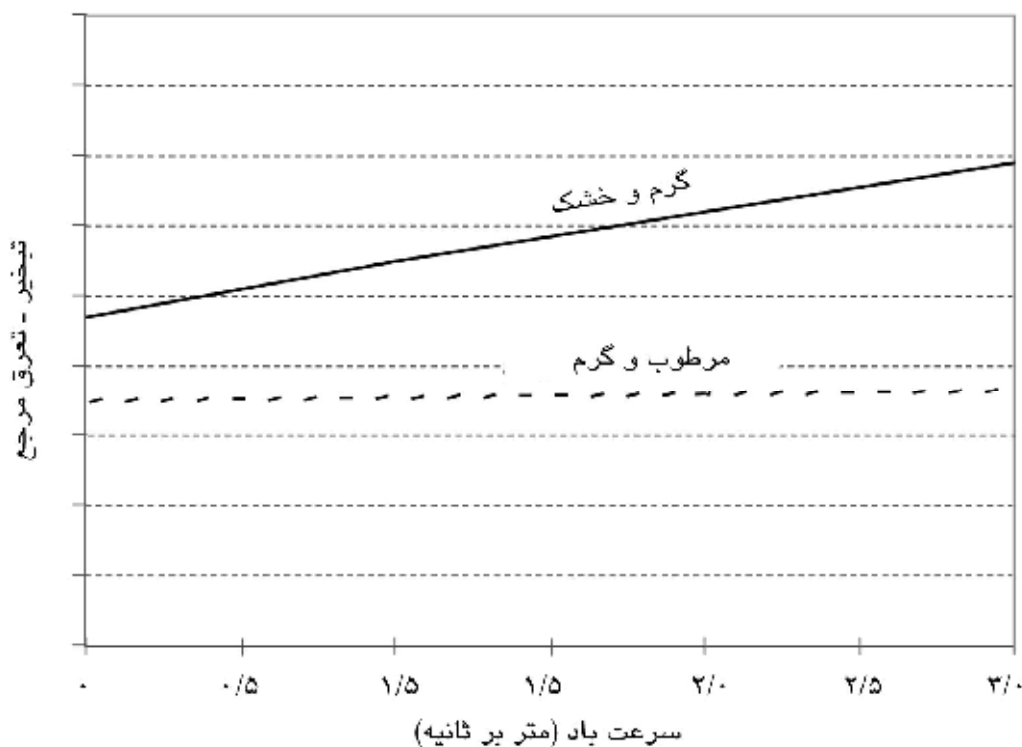
تابش خورشیدی

فرآیند تبخیر - تعرق، به مقدار انرژی در دسترس وابسته می‌باشد. تابش خورشیدی، بزرگترین منبع انرژی است که می‌تواند مقادیر بسیار آب را از حالت مایع به بخار تبدیل کند. تابش پتانسیل ورودی به سطح تبخیر به موقعیت مکانی و زمانی سطح بستگی دارد. به دلیل تفاوت موقعیت خورشید، تابش پتانسیل در عرض‌های جغرافیایی و فصل‌های متفاوت یکسان نمی‌باشد. مقدار تابش ورودی به سطح تبخیر، به کدورت¹ آتمسفر و وجود ابرها بستگی دارد که بخش عمده‌ای از تابش را جذب یا منعکس می‌کنند. هنگام ارزیابی اثر تابش خورشیدی بر تبخیر - تعرق، باید توجه شود که همه انرژی در دسترس، صرف تبخیر آب نمی‌شود و بخشی از آن، آتمسفر و نیمرخ خاک را گرم می‌کند.

1- Turbidity

دمای هوا

تابش خورشیدی جذب شده در اتمسفر و گرمای بازتابش شده از زمین، دمای هوا را افزایش می‌دهند. گرمای محسوس هوای اطراف، انرژی را به گیاه انتقال داده و همچنین، شدت تبخیر - تعرق را کنترل می‌کند. اتلاف آب به شکل تبخیر - تعرق در هوای آفتابی و گرم بیشتر از هوای ابری و خنک است.



شکل ۱۰- اثر سرعت باد بر تبخیر - تعرق در دو اقلیم گرم - خشک و مرطوب - گرم

رطوبت هوا

در حالی که انرژی تأمین شده از خورشید و هوای محیط، عمده‌ترین نیروی محرک فرآیند تبخیر محسوب می‌شود، تفاوت بین فشار بخار آب در سطح تبخیر و هوا، عامل اصلی انتقال بخار آب است. مزارع فاریاب بدون محدودیت آبیاری که در مناطق گرم و خشک واقع هستند، به دلیل فراهمی مقدار متنابهی انرژی در اتمسفر، مقادیر بالایی از آب را مصرف می‌کنند. در مناطق گرمسیری مرطوب، رطوبت بالا در هوا بدون کاهش دادن انرژی ورودی، نیاز تبخیر - تعرق را کاهش می‌دهد. در چنین محیطی، رطوبت هوا نزدیک به اشباع بوده و ظرفیت پذیرش بخار آب پایین می‌باشد. بنابراین، تبخیر - تعرق در این نواحی کمتر از مناطق خشک است.

سرعت باد

فرآیند انتقال بخار آب، به مقدار بسیار، به وزش باد و تلاطم هوا که موجب انتقال مقادیر بیشتر هوای مجاور سطح تبخیر شده، وابسته است. در هنگام تبخیر آب، هوای بالای سطح تبخیر، به تدریج، از بخار آب اشباع می‌شود. در این هوا، چنانچه به طور دائم با هوای خشک‌تر جایگزین نشود، نیروی محرک برای انتقال بخار آب و در نتیجه تبخیر - تفرق کاهش می‌یابد.

در شکل ۱۰ اثر ترکیبی پارامترهای اقلیمی مؤثر بر تبخیر - تفرق در دو شرایط متفاوت نشان داده شده است. تقاضای تبخیر - تفرق در اقلیم گرم و خشک به دلیل خشکی هوا و بالا بودن مقدار انرژی حاصل از تابش مستقیم خورشید و گرمای نهان محیط، بالا می‌باشد. تحت این شرایط، مقدار بیشتر بخار آب می‌تواند در هوا ذخیره شود و در همان حال، وزش باد ممکن است جابجایی بخار آب را شدت بخشیده و سبب تبخیر بیشتر گردد. به عبارت دیگر، در اقلیم مرطوب، رطوبت بالا در هوا و وجود ابرها، تبخیر - تفرق را کاهش می‌دهد. اثر افزایش سرعت باد بر تبخیر - تفرق در دو اقلیم متفاوت، در شیب منحنی‌های شکل ۱۰ نشان داده می‌شود. با خشک‌تر شدن هوا، تأثیر سرعت باد بر تبخیر - تفرق بیشتر و شیب منحنی تندتر است. در شرایط مرطوب، اثر باد، تنها، به صورت جایگزینی هوای اشباع با هوای دارای رطوبت پایین و همچنین، جابجایی انرژی گرمایی است. در نتیجه، اثر سرعت باد بر تبخیر - تفرق در مقایسه با شرایط خشک که در آن تغییر جزئی سرعت باد، ممکن است، موجب تغییر بسیار شود، کمتر می‌باشد.

پارامترهای آتمسفری

روابط بسیاری برای تعیین پارامترهای اقلیمی ارائه شده است. اثر پارامترهای اصلی بر تبخیر - تفرق با کمک این روابط قابل ارزیابی است. برخی از روابط به پارامترهای نیازمند هستند که ویژگی معینی از آتمسفر را بیان می‌کنند. پیش از بررسی چهار پارامتر اقلیمی اصلی، برخی از پارامترهای وابسته به آتمسفر بیان می‌شوند.

فشار آتمسفر

فشار آتمسفر (P)، فشار اعمال شده به وسیله وزن آتمسفر اطراف کره زمین است. تبخیر با افزایش ارتفاع به دلیل کم شدن فشار آتمسفر، همان طور که در ضریب ثابت سایکرومتری بیان شده است، افزایش می‌یابد. هرچند، این اثر کم بوده و در محاسبه فشار از یک مقدار میانگین در یک منطقه استفاده می‌شود. فشار آتمسفر با استفاده از قانون گازهای ایده‌آل (کامل) در دمای استاندارد ۲۰ درجه سلسیوس به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad (7)$$

که در آن:

P = فشار آتمسفر [کیلوپاسکال] و

Z = ارتفاع از سطح دریا [متر] می باشد.

مقادیر فشار آتمسفر که تابع ارتفاع بوده، در پیوست دو (جدول ۱-۲) ارائه شده است.

گرمای نهان تبخیر

گرمای نهان تبخیر (λ)، انرژی مورد نیاز برای تبخیر یک واحد جرم آب مایع در فشار و دمای ثابت است. مقدار گرمای نهان تبخیر تابع دما می باشد. انرژی مورد نیاز تبخیر در دمای پایین نسبت به دمای بالا، کمتر است. از آنجا که، تغییر گرمای نهان تبخیر در دامنه دمای عادی اندک بوده، معادله پنمن - مانتیث فائو با وارد کردن عدد $2/54$ مگاژول بر کیلوگرم به عنوان گرمای نهان تبخیر هوای 20 درجه سلسیوس، ساده شده است.

ضریب ثابت سایکرومتری

ضریب ثابت سایکرومتری (γ) با معادله زیر محاسبه می شود:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (8)$$

که در آن:

γ = ضریب ثابت سایکرومتری [کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس]،

P = فشار آتمسفر [کیلوپاسکال]،

λ = گرمای نهان تبخیر هوای 20 درجه سلسیوس مساوی با $2/45$ [مگاژول بر کیلوگرم]،

c_p = گرمای ویژه در فشار ثابت مساوی با $10^{-3} \times 1/0.13$ [مگاژول بر کیلوگرم بر درجه سلسیوس] و

ε = نسبت وزن مولکولی بخار آب به هوای خشک مساوی با 0.622 می باشد.

گرمای ویژه، انرژی مورد نیاز افزایش یک درجه دمای یک واحد جرم هوا در فشار ثابت است که مقدار آن به ترکیب هوا (برای مثال رطوبت آن) بستگی دارد. برای شرایط میانگین آتمسفر، مقدار گرمای ویژه هوا $10^{-3} \times 1/0.13$ [مگاژول بر کیلوگرم بر درجه سلسیوس] می باشد. از آنجا که از میانگین فشار آتمسفر منطقه (معادله ۷) استفاده می شود، ضریب سایکرومتری در یک منطقه مقداری ثابت است. ضرایب ثابت سایکرومتری که تابع ارتفاع بوده، در پیوست دو ارائه شده است (جدول ۲-۲).

مثال ۲- تعیین پارامترهای آتمسفری	
مقدار فشار آتمسفر و ضریب ثابت سایکرومتری را در ارتفاع ۱۸۰۰ متری تعیین کنید.	
برای:	$z = 1800 \text{ m}$
از معادله ۷:	$P = 101/3 [(293 - (0/0065) 1800/293)^{5/26}] = 81/8 \text{ kPa}$
از معادله ۸:	$\gamma = 0/665 \times 10^{-3} \times (81/8) = 0/054 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$
میانگین فشار آتمسفر ۸۱/۸ کیلو پاسکال می باشد.	
ضریب ثابت سایکرومتری ۰/۰۵۴ کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس است.	

دمای هوا

در ایستگاه هواشناسی کشاورزی، دمای هوا در نزدیک به سطح بالای پوشش گیاهی بررسی می شود. در ایستگاه های هواشناسی سنتی و مدرن خودکار هر دو، دمای هوا در داخل محفظه هایی (صفحات استیونسون^۱ یا محفظه های تابش تهویه دار) که مطابق استاندارد سازمان جهانی هواشناسی در ارتفاع دو متری بالای سطح زمین نصب شده، اندازه گیری می شود. این محفظه ها به نحوی طراحی شده اند که تجهیزات درون آن از تابش مستقیم خورشید محافظت شوند. شبکه های تعبیه شده بر روی این محفظه ها، امکان جابجایی هوای آزاد در اطراف تجهیزات را فراهم می آورند. دمای هوا با استفاده از دماسنج ها، ترمیستورها^۲ یا ترموکوپل های^۳ نصب شده در داخل محفظه، اندازه گیری می شود. دماسنج های حداکثر و حداقل، دمای حداکثر و حداقل هوا را در طول یک دوره ۲۴ ساعت ثبت می کنند. دمانگارها^۴ در طول روز یا هفته دمای لحظه ای را رسم می کنند. ایستگاه های هواشناسی خودکار، اغلب، دمای هوا را در هر دقیقه اندازه گیری کرده و میانگین ساعتی و همچنین، مقادیر دمای حداکثر و حداقل در طول ۲۴ ساعت، را گزارش می کنند.

با توجه به غیرخطی بودن داده های رطوبت مورد نیاز در معادله پنمن-مانتیت، باید فشار بخار هوا برای یک دوره مشخص به صورت میانگین فشار بخار در حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا در همان دوره محاسبه شود. بدین ترتیب، حداکثر و حداقل دمای هوا در طول دوره ۲۴ ساعت که از نیمه شب آغاز شده، تعیین می شود. حداکثر و حداقل دمای هوا در دوره های طولانی تر نظیر هفتگی، ده روزه یا ماهانه با تقسیم مجموع مقادیر دمای روزانه بر تعداد روزها همان دوره محاسبه می گردد. میانگین دمای روزانه هوا در معادله پنمن-مانتیت فائو، تنها، برای محاسبه شیب منحنی فشار بخار اشباع (Δ) بکار می رود و در این شرایط میانگین اثر تغییر جرم مخصوص هوا (ρ_a) بر متغیر اقلیمی مورد نظر قابل ملاحظه نمی باشد. در یک روش استاندارد، میانگین دمای هوا برای دوره زمانی ۲۴ ساعت از روی میانگین اندازه گیری ساعتی تعیین نشده و به جای آن، به صورت میانگین بین حداکثر و حداقل دمای روزانه محاسبه می شود:

1-Stevenson screens

2- Thermistors

4- Termocouples

4- Thermographs

$$T_{\text{mean}} = \frac{T_{\text{max}} + T_{\text{min}}}{2} \quad (9)$$

دما بر حسب درجه سلسیوس ($^{\circ}\text{C}$) یا درجه فارنهایت ($^{\circ}\text{F}$) بیان می‌شود. جدول تبدیل واحدها در پیوست یک ارائه شده است. در برخی از روش‌های محاسباتی، دما بر حسب واحد کلوین (K) مورد نیاز است که با اضافه کردن عدد $273/16$ به درجه سلسیوس (یعنی: $K = ^{\circ}\text{C} + 273/16$) به دست می‌آید. مقیاس کلوین و درجه سلسیوس یکسان می‌باشد.

رطوبت هوا

مفاهیم

مقدار آب موجود در هوا را می‌توان به روش‌های گوناگون بیان کرد. در هواشناسی کشاورزی، فشار بخار، دمای نقطه شبنم و رطوبت نسبی، مفاهیم متداول برای بیان رطوبت هوا است.

فشار (بفار)

بخار آب یک گاز بوده و فشار آن جزیی از کل فشار آتمسفر را تشکیل می‌دهد. بخار آب موجود در هوا، به طور مستقیم، به فشار جزیی اعمال شده به وسیله بخار مرتبط است. بنابراین، فشار جزیی معیار اندازه‌گیری مستقیم بخار هوا می‌باشد. در سیستم SI، فشار با واحدهایی نظیر سانتی‌متر آب، میلی‌متر جیوه، بار، آتمسفر و غیره اندازه‌گیری نمی‌شود و واحد فشار در این سیستم، پاسکال (Pa) است. ضرایب تبدیل واحدهای مختلف و از جمله پاسکال در پیوست یک ارائه شده است. از آنجا که، واحد پاسکال به فشار اعمال شده به وسیله یک نیروی کوچک (یک نیوتن) وارد بر یک سطح بزرگ (یک مترمربع) اشاره دارد، در اغلب موارد، واحد پایه چندین برابر بزرگتر در نظر گرفته می‌شود. در این نشریه، فشار بخار برحسب کیلوپاسکال بیان می‌گردد (یک کیلوپاسکال، $1000 = \text{kPa}$ پاسکال، Pa).

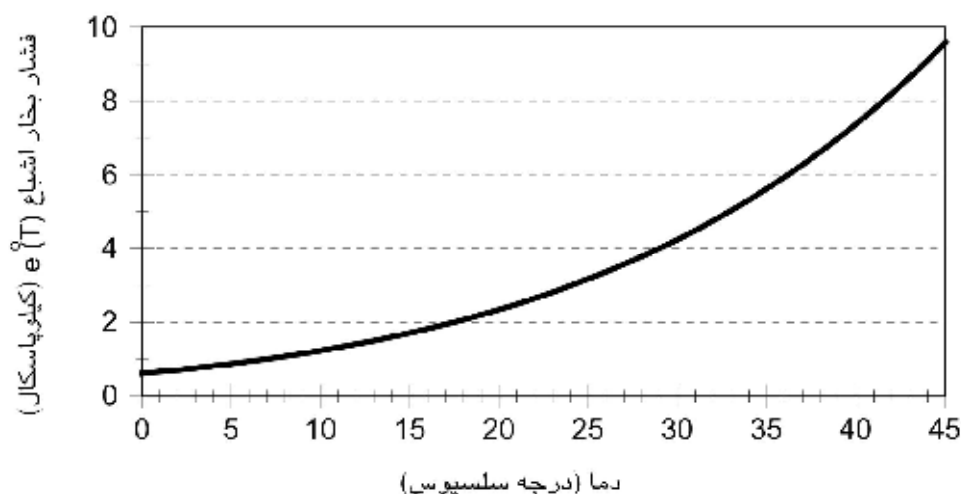
پس از محبوس شده هوا در بالای یک سطح آب در حال تبخیر و برقراری تعادل بین مولکول‌های بخار آب خروجی و برگشتی به منبع و هنگامی که، هوا افزون بر آن قادر به ذخیره مولکول‌های اضافی بخار نباشد، فشار هوای اشباع، فشار بخار اشباع $[e^{\circ}(T)]$ نامیده می‌شود. در هوا، تعداد مولکول‌های بخار قابل ذخیره، تابع دمای هوا است. با افزایش دما، ظرفیت ذخیره بخار و در نتیجه فشار بخار اشباع افزایش می‌یابد (شکل ۱۱).

همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، شیب منحنی فشار بخار اشباع (Δ) متناسب با دما و به صورت نمایی تغییر می‌کند. در دمای پایین، تغییر شیب منحنی کم می‌باشد یعنی با افزایش دما، تغییر فشار بخار اشباع اندک است. در دمای بالا، تغییر شیب منحنی زیاد بوده و با تغییر اندک دما، افزایش شیب منحنی بخار اشباع زیاد است. شیب منحنی فشار بخار اشباع عامل مهم در تشریح فرآیند تبخیر بوده و در معادله‌های محاسبه تبخیر - تعرق مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی مورد نیاز است.

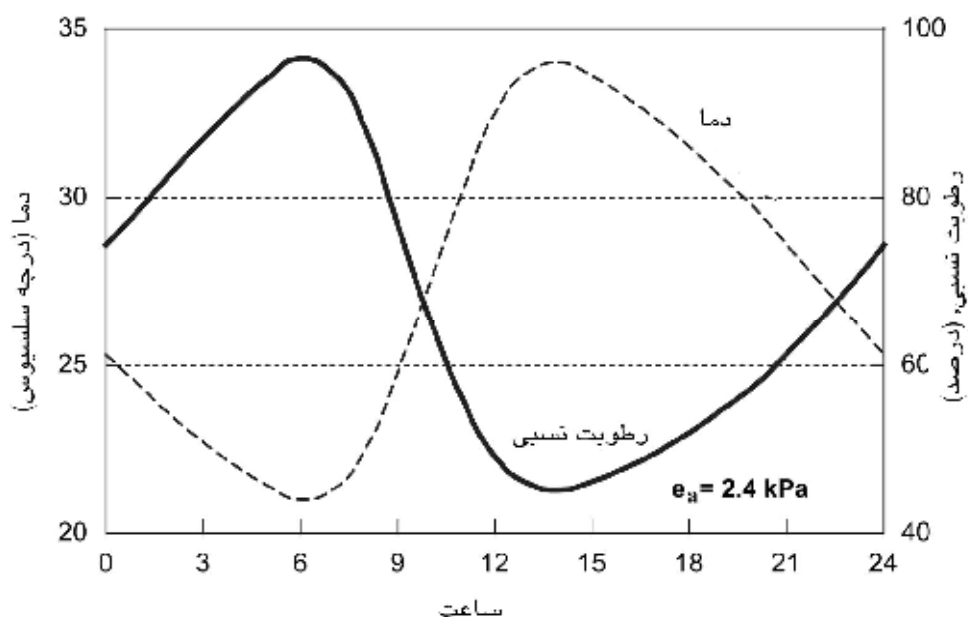
فشار بخار واقعی (e_a)، همان فشار بخار آب موجود در هوا می‌باشد. در هوای غیر اشباع، فشار بخار واقعی کمتر از اشباع است. تفاوت بین فشار بخار اشباع و واقعی، کمبود فشار بخار یا کمبود اشباع نامیده شده و نمایه دقیق از توان واقعی تبخیرکنندگی آتمسفر است.

دمای نقطه شبنم

دمایی که هوا باید تا آن سرد شده و اشباع شود، دمای نقطه شبنم نامیده می‌شود. فشار بخار واقعی هوا، همان فشار بخار اشباع در دمای نقطه شبنم است. هر چه هوا خشک‌تر باشد، تفاوت دمای هوا و دمای نقطه شبنم بیشتر خواهد بود.



شکل ۱۱- رابطه فشار بخار اشباع و دمای هوا؛ منحنی $e^o(T)$



شکل ۱۲- تغییر رطوبت نسبی در ۲۴ ساعت برای فشار بخار واقعی ثابت ۲/۴ کیلوپاسکال

رطوبت نسبی

رطوبت نسبی، درجه اشباع هوا را به صورت نسبت فشار بخار واقعی به فشار بخار اشباع در همان دما نشان می‌دهد.

$$RH = 100 \frac{e_a}{e^{\circ}(T)} \quad (10)$$

پس، رطوبت نسبی، نسبت مقدار رطوبت واقعی به رطوبت اشباع در همان دما می‌باشد. رطوبت نسبی بدون واحد بوده و به طور معمول، به صورت درصد بیان می‌شود. فشار بخار واقعی ممکن است در طول روز، به طور نسبی، ثابت باشد. لیکن، رطوبت نسبی از بیشترین مقدار در نزدیک به طلوع خورشید تا کمترین آن در اوایل بعد از ظهر نوسان می‌کند (شکل ۱۲). تغییر رطوبت نسبی، ناشی از این واقعیت است که فشار بخار اشباع تابع دمای هوا می‌باشد بنابراین، رطوبت نسبی با تغییر دما به طور لحظه‌ای در طول روز تغییر می‌کند.

اندازه‌گیری

امکان اندازه‌گیری فشار بخار واقعی به طور مستقیم، وجود ندارد. فشار بخار، به طور معمول، با استفاده از رطوبت نسبی یا دمای نقطه شبنم تعیین می‌شود. رطوبت نسبی، به طور مستقیم، به وسیله رطوبت (نم) سنج‌ها^۱ اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری رطوبت، بر پایه استفاده از برخی خواص طبیعی موادی نظیر تار مو که طول آن با تغییر رطوبت هوا تغییر کرده یا با استفاده از یک صفحه حساس^۲ که ظرفیت الکتریکی آن با تغییر رطوبت نسبی تغییر می‌کند، استوار است. فشار بخار هوا می‌تواند، به طور غیرمستقیم، به وسیله سایکرومتر که با آن تفاوت دما بین دو دماسنج خشک و تر اندازه‌گیری شده، تعیین شود. دماسنج خشک دمای هوا را اندازه‌گیری می‌کند. حباب دماسنج تر، به وسیله یک فتیله پوشانده شده و، به طور پیوسته، مرطوب و در حالت اشباع است. تبخیر آب از فتیله که فرآیندی گرماگیر می‌باشد، دمای دماسنج را کاهش می‌دهد. هر چه هوا خشک‌تر باشد، تبخیر افزایش و دما کاهش می‌یابد. تفاوت بین دمای خشک و تر به نام کمبود دمای تر^۳ نامیده شده و معیار مناسبی برای اندازه‌گیری رطوبت هوا است. دمای نقطه شبنم با شبنم‌سنج‌ها^۴ اندازه‌گیری می‌شود. مبنای کار برخی از این دستگاه‌ها، بر خنک کردن هوای محیط تا حد تشکیل شبنم استوار است. دمای هوا در زمان تشکیل شبنم، دمای نقطه شبنم می‌باشد.

داده‌های رطوبت نسبی و دمای نقطه شبنم، به طور آشکار، دارای خطای اندازه‌گیری می‌باشند. خطای اندازه‌گیری برای هر دو نوع دستگاه دمانگار - رطوبت سنج^۵ قدیمی و الکترونیکی مدرن عمومیت دارد. این دستگاه‌ها در پیوست پنج توصیف شده‌اند. در برآورد صحت و درستی داده‌های رطوبت نسبی و دمای نقطه شبنم لازم است دقت بیشتری اعمال شود. کاربر، همواره باید دمای نقطه شبنم محاسبه شده را با حداقل دمای روزانه هوا را، همان طور که در انتهای این فصل و در پیوست‌های پنج و شش شرح داده شده

1- Hygrometers

2- Capacitance plate

3- Wet bulb depression

4- Dewpoint Meters

5- Hygrothermograph

است، مقایسه کند. به طور کلی، بهتر است به جای استفاده از اندازه‌گیری غیر قابل اطمینان رطوبت نسبی، از دمای نقطه شبنم برآورد شده از حداقل دمای روزانه هوا، استفاده شود.

روش‌های محاسبه

میانگین فشار بخار اشباع

از آنجا که، فشار بخار اشباع تابع دمای هوا است، می‌توان آن را با استفاده داده‌های دما محاسبه کرد. رابطه بین فشار بخار اشباع و دمای هوا به صورت رابطه (۱۱) است.

$$e^{\circ}(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T}{T + 237.3} \right] \quad (11)$$

که در آن:

$e^{\circ}(T)$ = فشار بخار اشباع هوا در دمای واقعی [کیلوپاسکال]،

T = دمای هوا [درجه سلسیوس] و

$\exp[...]$ = $2.7183^{\dots}$ (پایه لگاریتم طبیعی) به توان عبارت [...] می‌باشند.

مقادیر فشار بخار اشباع در هر دمای هوا در پیوست دو (جدول ۲-۳) ارائه شده است. با توجه به غیرخطی بودن معادله (۱۱)، باید میانگین فشار بخار اشباع در دوره یک روز، هفتگی، ده روزه یا ماهانه به صورت میانگین بین فشار بخار اشباع در حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا برای همان دوره محاسبه شود:

$$e_s = \frac{e^{\circ}(T_{\max}) + e^{\circ}(T_{\min})}{2} \quad (12)$$

استفاده از میانگین روزانه دمای هوا به جای میانگین روزانه دمای حداکثر و حداقل، موجب برآورد کمتر از واقع میانگین فشار بخار اشباع شده و در نتیجه، کمبود فشار بخار در دمای واقعی هوا (معرف توان تبخیرکنندگی آتمسفر) نیز، کمتر بدست می‌آید. در نتیجه، تبخیر - تعرق گیاه مرجع کمتر از مقدار واقعی برآورد خواهد شد. بنابراین، میانگین فشار بخار اشباع باید به صورت میانگین بین فشار بخار اشباع در حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا محاسبه شود.

مثال ۳- تعیین میانگین فشار بخار اشباع	
حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا به ترتیب ۲۴/۵ و ۱۵ درجه سلسیوس است.	
از معادله ۱۱:	$e^{\circ}(T_{\max}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 \times (24.5)}{24.5 + 237.3} \right] = 3.075 \text{ kPa}$
از معادله ۱۱:	$e^{\circ}(T_{\min}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 \times (15)}{15 + 237.3} \right] = 1.705 \text{ kPa}$
از معادله ۱۲:	$e_s = \frac{(3.075 + 1.705)}{2} = 2.39 \text{ kPa}$
تذکر: برای میانگین دما که ۱۹/۷۵ درجه سلسیوس می‌باشد، $e^{\circ}(T)$ مساوی با ۲/۳۰ کیلوپاسکال است.	
میانگین بخار اشباع ۲/۳۹ کیلوپاسکال می‌باشد.	

شیب منحنی فشار بخار اشباع

برای محاسبه تبخیر - تعرق، شیب تابع (رابطه) فشار بخار اشباع و دمای هوا مورد نیاز می‌باشد. شیب منحنی (شکل ۱۱) در یک دمای مشخص عبارت است از:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T+237.3} \right] \right]}{(T+237.3)^2} \quad (۱۳)$$

که در آن:

Δ = شیب منحنی فشار بخار اشباع در دمای T [کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس]

T = دمای هوا [درجه سلسیوس] و

[...] = $\exp[...]$ (پایه لگاریتم طبیعی) به توان عبارت [...] می‌باشد.

شیب منحنی فشار بخار اشباع به صورت تابع دمای هوا در پیوست دو ارائه شده است (جدول ۲-۴). در معادله پنمن-مانتیث فائو، عبارت (Δ) در صورت و مخرج معادله بکار رفته است که با استفاده از میانگین دمای هوا محاسبه می‌شود (معادله ۹).

فشار بخار واقعی با استفاده از دمای نقطه شبنم

دمای نقطه شبنم دمایی است که هوا تا آن اندازه خنک شده و اشباع شود. فشار بخار واقعی (e_a) نیز، فشار بخار اشباع در دمای نقطه شبنم (T_{dew}) است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$e_a = e^\circ(T_{dew}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{dew}}{T_{dew} + 237.3} \right] \quad (۱۴)$$

که پارامترهای معادله در بخش‌های پیش توصیف شده‌اند.

فشار بخار واقعی با استفاده از داده‌های سایکرومتر

فشار بخار واقعی می‌تواند با استفاده از تفاوت دمای خشک و تر که کمبود دمای تر نامیده شده، تعیین شود. این رابطه به صورت معادله زیر است:

$$e_a = e^\circ(T_{wet}) - \gamma_{psy} (T_{dry} - T_{wet}) \quad (۱۵)$$

که در آن:

e_a = فشار بخار واقعی [کیلوپاسکال]،

$e^\circ(T_{wet})$ = فشار بخار اشباع در دمای تر [کیلوپاسکال]،

γ_{psy} = ضریب ثابت سایکرومتری [کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس] و

$T_{dry} - T_{wet}$ = کمبود دمای تر (T_{dry} دمای خشک و T_{wet} دمای تر). برحسب درجه سلسیوس می‌باشند.

ضریب ثابت سایکرومتری، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\gamma_{psy} = a_{psy} P \quad (۱۶)$$

که در آن، a_{psy} ضریبی [بر حسب $^{\circ}C^{-1}$] است که به نوع تهویه دماسنج تر بستگی دارد و P فشار آتمسفر [بر حسب کیلوپاسکال] می باشد.

ضریب a_{psy} ، به نحوه طراحی دستگاه سایکرومتر و میزان تهویه اطراف دماسنج تر وابسته است. ضریب a_{psy} زیر در شرایط مختلف استفاده می شوند:

$a_{psy} = ۰/۰۰۰۶۶۲$ برای سایکرومتر تهویه دار (نوع آسمن^۱) (با سرعت جریان هوا حدود ۵ متر بر ثانیه)،

$a_{psy} = ۰/۰۰۰۸$ برای سایکرومتر با تهویه طبیعی (با سرعت جریان هوا تقریباً، ۱ متر بر ثانیه)،

$a_{psy} = ۰/۰۰۱۲$ برای سایکرومتر بدون تهویه واقع در محیط بسته.

مثال ۴- تعیین فشار بخار واقعی با استفاده از داده های سایکرومتر	
فشار بخار واقعی هوا را در محلی با ارتفاع ۱۲۰۰ متر با استفاده از داده های یک سایکرومتر تهویه دار تعیین کنید. دمای اندازه گیری شده با دماسنج های خشک و تر به ترتیب ۲۵/۶ و ۱۹/۵ درجه سلسیوس است.	
$z = ۱۲۰۰ \text{ m}$	از معادله ۷ (جدول ۲-۱ پیوست دو)، در:
$P = ۸۷/۹ \text{ kPa}$	داریم:
$T_{wet} = ۱۹/۵ \text{ }^{\circ}C$	از معادله ۱۱ (جدول ۳-۲ پیوست دو)، در:
$e^{\circ}(T_{wet}) = ۲/۲۶۷ \text{ kPa}$	داریم:
$a_{psy} = ۰/۰۰۰۶۶۲ \text{ }^{\circ}C^{-۱}$	ضریب ثابت سایکرومتری تهویه دار:
$e_a = ۲/۲۶۷ - ۰/۰۰۰۶۶۲ \times (۸۷/۹) \times (۲۵/۶ - ۱۹/۵) = ۱/۹۱ \text{ kPa}$	از معادله ۱۵:
فشار بخار واقعی ۱/۹۱ کیلو پاسکال می باشد.	

فشار بخار واقعی با استفاده از داده های رطوبت نسبی

فشار بخار واقعی با استفاده از رطوبت نسبی، نیز، قابل محاسبه است. با در دسترس بودن داده های رطوبت نسبی، باید از معادله های مختلف استفاده کرد.

• با استفاده از حداکثر (RH_{max}) و حداقل (رطوبت نسبی) (RH_{min}):

$$e_a = \frac{e^{\circ}(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e^{\circ}(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}}{2} \quad (۱۷)$$

که در آن:

e_a = فشار بخار واقعی [کیلو پاسکال]،

$$e^{\circ}(T_{\min}) = \text{فشار بخار اشباع در حداقل دمای روزانه [کیلوپاسکال]},$$

$$e^{\circ}(T_{\max}) = \text{فشار بخار اشباع در حداکثر دمای روزانه [کیلوپاسکال]},$$

$$RH_{\max} = \text{حداکثر رطوبت نسبی [درصد] و}$$

$$RH_{\min} = \text{حداقل رطوبت نسبی [درصد] می باشد.}$$

برای دوره‌های هفتگی، ده روزه یا ماهانه، مقادیر حداکثر و حداقل رطوبت نسبی از تقسیم مجموع مقادیر روزانه آن دوره‌ها بر تعداد روزهای دوره محاسبه می‌شود.

• با استفاده از حداکثر رطوبت نسبی ($RH_{\max}$):

هنگامی که خطای اندازه‌گیری منجر به برآورد حداقل رطوبت نسبی بالا بوده یا صحت داده‌های رطوبت نسبی مورد تردید است، باید فشار بخار واقعی را از روی داده‌های حداکثر رطوبت نسبی محاسبه کرد:

$$e_a = e^{\circ}(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} \quad (18)$$

• با استفاده از میانگین رطوبت نسبی (RH_{mean}):

چنانچه، داده‌های حداکثر و حداقل رطوبت نسبی در دسترس نباشد، فشار بخار واقعی با معادله زیر برآورد می‌شود:

$$e_a = \frac{RH_{\text{mean}}}{100} \left[\frac{e^{\circ}(T_{\max}) + e^{\circ}(T_{\min})}{2} \right] \quad (19)$$

در معادله فوق، RH_{mean} میانگین رطوبت نسبی از روی حداکثر و حداقل رطوبت نسبی است. با این حال، استفاده از معادله ۱۹ نسبت به معادله‌های ۱۷ یا ۱۸ عمومیت کمتری دارد.

کمبود فشار (بف)

کمبود فشار بخار ($e_s - e_a$)، همان تفاوت فشار بخار اشباع (e_s) و فشار بخار واقعی (e_a) در یک دوره مشخص است. برای دوره‌های هفتگی، ده روزه یا ماهانه، فشار بخار اشباع از معادله ۱۲ و با استفاده از میانگین حداکثر و حداقل دمای هوا در همان دوره و فشار بخار واقعی نیز، با یکی از معادله‌های ۱۴ تا ۱۹ و استفاده از میانگین اندازه‌گیری‌ها در همان دوره، محاسبه می‌شود. در معادله ۱۲، همان طور که در پیش اشاره شد، استفاده از میانگین دمای هوا به جای میانگین حداکثر و حداقل دمای هوا، موجب برآورد کمتر از واقع فشار بخار اشباع و در نتیجه محاسبه کمتر از واقع مقدار کمبود فشار بخار می‌شود. بنابراین، تبخیر - تعرق مرجع نیز کمتر از واقع برآورد می‌شود (به کادر ۷ مراجعه شود). در صورت لزوم، فشار

بخار اشباع و واقعی در دوره‌های طولانی می‌تواند به صورت میانگین مقادیر محاسبه شده برای هر روز آن دوره، تعیین کرد.

مثال ۵- تعیین فشار بخار واقعی با استفاده از رطوبت نسبی	
با استفاده از دمای حداکثر و حداقل روزانه و داده‌های رطوبت نسبی زیر، فشار بخار واقعی را تعیین کنید.	
$RH_{\max} = 82\%$ و $T_{\min} = 18^{\circ}C$	
$RH_{\min} = 54\%$ و $T_{\max} = 25^{\circ}C$	
$T_{\min} = 18^{\circ}C$	از معادله ۱۱ (جدول ۲-۳ پیوست دو) در:
$e^{\circ}(T_{\min}) = 2/0.64 \text{ kPa}$	داریم:
$T_{\max} = 25^{\circ}C$	از معادله ۱۱ (جدول ۲-۳ پیوست دو) در:
$e^{\circ}(T_{\max}) = 3/1.68 \text{ kPa}$	داریم:
$e_a = \left[2/0.64 \times \left(\frac{82}{100} \right) + 3/1.68 \times \left(\frac{54}{100} \right) \right] = 1/7.0 \text{ kPa}$	از معادله ۱۷:
$e_a = 1/7.8 \text{ kPa}$	اگر از معادله ۱۹ استفاده شود:

مثال ۶- تعیین کمبود فشار بخار	
کمبود فشار بخار را با استفاده از داده‌های مثال قبل (مثال ۵) تعیین کنید.	
$e^{\circ}(T_{\min}) = 2/0.64 \text{ kPa}$	از مثال ۵:
$e^{\circ}(T_{\max}) = 3/1.68 \text{ kPa}$	
$e_a = 1/7.0 \text{ kPa}$	
$e_s - e_a = \frac{(2/0.64 + 3/1.68)}{2} - 1/7.0 = 0/9.1 \text{ kPa}$	
کمبود فشار بخار ۰/۹۱ کیلو پاسکال است.	

تابش

مفاهیم

تابش فرازمینی^۱

تابش ورودی به سطح عمود بر جهت تابش در بالای اتمسفر زمین، ثابت خورشیدی نامیده شده و حدود ۰/۰۸۲ مگاژول بر مترمربع بر دقیقه می‌باشد. لیکن، شدت تابش محلی به زاویه جهت تابش با سطح عمود بر اتمسفر بستگی دارد. این زاویه در طول روز تغییر کرده و تابع عرض جغرافیایی و فصل سال است. تابش خورشیدی ورودی به یک سطح افقی در بالای اتمسفر زمین تابش فرازمینی (R_a) نامیده می‌شود.

1-Extraterrestrial radiation

کادر ۷- راهنمای محاسبه کمبود فشار بخار واقعی ($e_s - e_a$)				
فشار بخار اشباع e_s : (معادله ۱۱ یا جدول ۳-۲ پیوست دو)				
کیلو پاسکال	$e^{\circ}(T_{\max}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{\max}}{T_{\max} + 237.3} \right]$	درجه سلسیوس	...	$T_{\max}$
کیلو پاسکال	$e^{\circ}(T_{\min}) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{\min}}{T_{\min} + 237.3} \right]$	درجه سلسیوس	...	$T_{\min}$
کیلو پاسکال	فشار بخار اشباع (معادله ۱۲) $e_s = \frac{[e^{\circ}(T_{\max}) + e^{\circ}(T_{\min})]}{2}$			
فشار بخار واقعی: e_a				
۱- e_a با استفاده از دمای نقطه شبنم (معادله ۱۴ یا جدول ۳-۲ پیوست دو):				
کیلو پاسکال	$e_a = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{\text{dew}}}{T_{\text{dew}} + 237.3} \right]$	درجه سلسیوس	...	T_{dew}
۲- e_a با استفاده از حداکثر و حداقل رطوبت نسبی:				
کیلو پاسکال	$e^{\circ}(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100}$	درصد	...	$RH_{\max}$
کیلو پاسکال	$e^{\circ}(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}$	درصد	...	$RH_{\min}$
کیلو پاسکال	معادله ۱۷: $e_a = \frac{\left[e^{\circ}(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + e^{\circ}(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100} \right]}{2}$			
۳- e_a با استفاده از حداکثر رطوبت نسبی (هنگامی که به علت خطای حداقل رطوبت نسبی، از آن استفاده نمی‌شود):				
کیلو پاسکال	$e_a = e^{\circ}(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100}$	درصد	...	$RH_{\max}$
۴- e_a با استفاده از میانگین رطوبت نسبی (این روش کمتر توصیه می‌شود)				
کیلو پاسکال	$e_a = \frac{e_s (RH_{\text{mean}})}{100}$	درصد	...	RH_{mean}
کیلو پاسکال	کمبود فشار بخار واقعی: ($e_s - e_a$)			

چنانچه، خورشید از بالا به طور مستقیم بتابد، زاویه بین شعاع تابش و سطح عمود بر آتمسفر صفر و تابش فرازمینی مساوی با ۰/۰۸۲ مگاژول بر مترمربع بر دقیقه است. موقعیت خورشید، طول روز و در نتیجه تابش فرازمینی با فصل سال متغیر می‌باشد. بنابراین، تابش فرازمینی تابع عرض جغرافیایی، فصل و ساعت از روز است. تغییر میانگین روزانه تابش فرازمینی در ماه‌های سال برای عرض‌های جغرافیایی مختلف در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

تابش خورشیدی یا تابش طول موج کوتاه

کسری از مقدار تابش نفوذ یافته به درون آتمسفر به وسیله گازها، گرد و غبار و ابرها پراکنده شده، انعکاس یافته و یا جذب می‌شود. مقدار تابش ورودی به یک سطح افقی، تابش خورشیدی (R_s) نامیده می‌شود. از آن جا که، انرژی خورشید به وسیله امواج الکترومغناطیسی با طول موج کوتاه می‌تابد، تابش خورشیدی را تابش طول موج کوتاه نیز می‌نامند.

برای یک روز غیر ابری، تابش خورشیدی حدود ۷۵ درصد تابش فرازمینی است. در یک روز ابری، تابش در آتمسفر پراکنده می‌شود. لیکن، حتی با وجود پوشش ابر بسیار متراکم نیز، ممکن است، حدود ۲۵ درصد تابش فرازمینی و، به طور عمده، به صورت تابش پخشیده^۱ به سطح زمین برسد. تابش خورشیدی تابش جهانی^۲ نیز، نامیده می‌شود. بدین مفهوم که، تابش جهانی مجموع تابش خورشیدی طول موج کوتاه مستقیم و پخشیده در تمامی زوایای به سمت بالا می‌باشد.

تابش طول موج کوتاه نسبی

تابش طول موج کوتاه نسبی ($\frac{R_s}{R_{s0}}$) نسبت تابش خورشیدی ورودی واقعی به سطح زمین به تابش خورشیدی ورودی مورد انتظار به همان سطح در آسمان صاف است. به عبارتی، R_s مقدار تابش خورشیدی ورودی به سطح زمین در یک دوره مشخص در شرایط واقعی (ابری یا غیر ابری) بوده لیکن، R_{s0} مقدار تابش خورشیدی ورودی مورد انتظار به همان سطح در همان دوره به شرط صاف (غیر ابری) بودن هوا است.

تابش طول موج کوتاه نسبی معیاری برای توصیف ابرناکی آتمسفر است. با افزایش ابر در آسمان، این نسبت کوچکتر خواهد شد. تابش طول موج کوتاه نسبی بین حدود ۰/۳۳ (آسمان با ابر متراکم) و ۱/۰۰ (آسمان صاف) تغییر می‌کند. در صورت عدم اندازه‌گیری مستقیم تابش خالص، در محاسبه تابش طول موج بلند خالص از تابش طول موج کوتاه نسبی استفاده می‌شود.

1- Diffused

2- Global radiation

ساعات آفتابی نسبی

ساعات آفتابی نسبی ($\frac{n}{N}$)، نسبت دیگری برای توصیف ابرناکی آتمسفر می‌باشد که به صورت، نسبت ساعات آفتابی واقعی (n) به حداکثر ساعات آفتابی یا روشنایی ممکن (N) بیان می‌شود. در شرایط غیرابری، ساعات آفتابی واقعی مساوی با حداکثر ساعات آفتابی ($n = N$) بوده و نسبت این دو مساوی با یک است. در حالی که، در روزهای ابری ممکن است، ساعات آفتابی واقعی صفر و در نتیجه نسبت ($\frac{n}{N}$) نیز، صفر باشد. در صورت عدم امکان اندازه‌گیری مستقیم تابش خورشیدی، اغلب، از ساعات آفتابی نسبی برای تعیین تابش خورشیدی از روی تابش فرازمینی استفاده می‌شود.

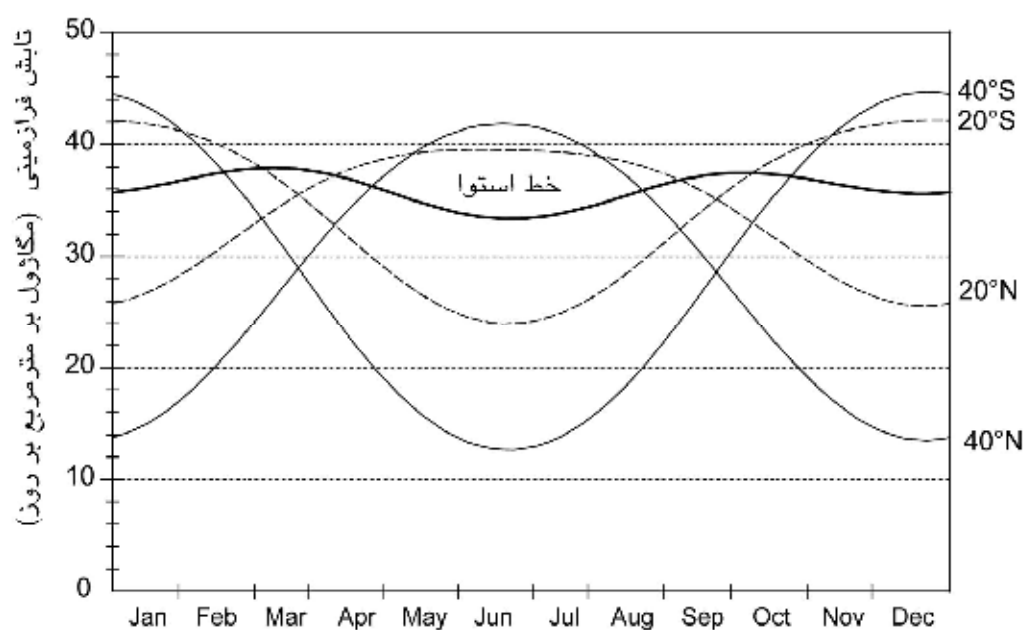
حداکثر ساعات آفتابی، نیز، مشابه تابش فرازمینی به موقعیت خورشید بستگی دارد و تابع عرض جغرافیایی و زمان است. در شکل ۱۴ مقادیر حداکثر ساعات آفتابی روزانه برای ماه‌های سال در عرض جغرافیایی متفاوت ارائه شده است.

ضریب بازتابش و تابش خالص

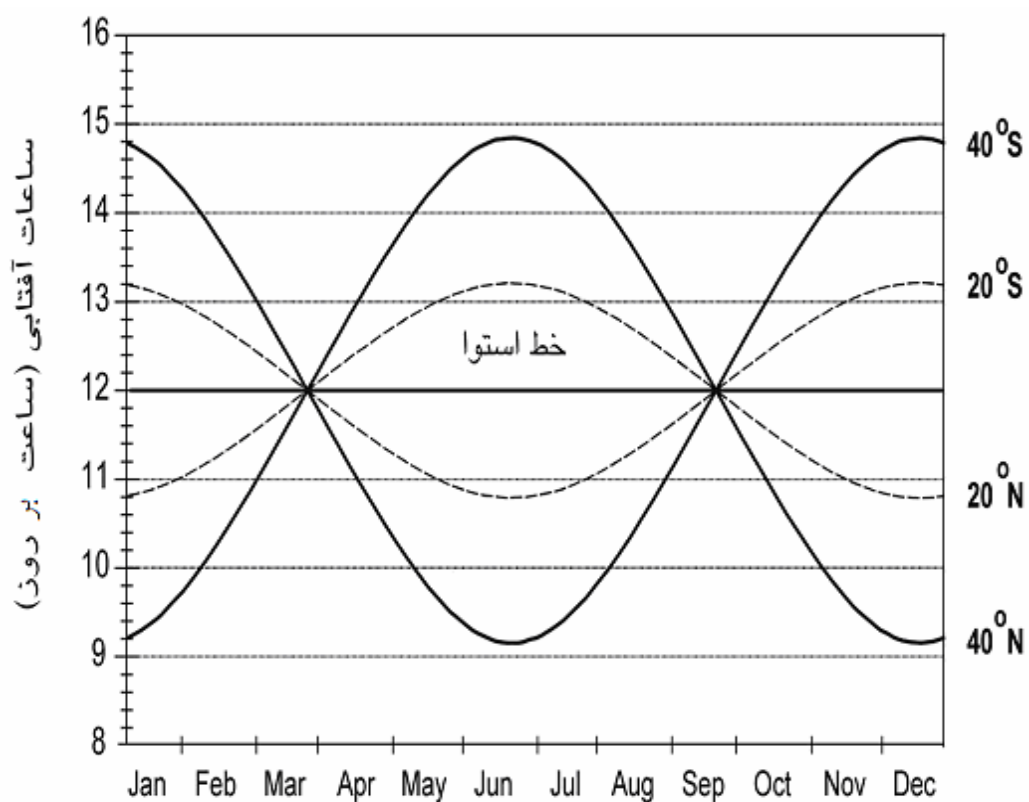
مقدار قابل ملاحظه از تابش ورودی به سطح زمین، منعکس می‌شود. کسر منعکس شده از تابش به وسیله یک سطح، ضریب بازتابش یا آلبدو (α) سطح نامیده می‌شود. مقدار آلبدو برای سطوح مختلف و نیز برای زاویه تابش با سطح بسیار متغیر می‌باشد. مقدار آن، ممکن است، برای برف تازه باریده ۰/۹۵ و برای خاک مرطوب و بدون پوشش ۰/۰۵ باشد. ضریب آلبدو برای یک پوشش گیاهی سبز حدود ۰/۲ تا ۰/۲۵ است. مقدار α گیاه مرجع چمن سبز ۰/۲۳ فرض می‌شود. تابش خالص (R_{ns}) کسری از تابش (R_s) بوده که از سطح زمین منعکس نشده و مقدار عددی آن $(1 - \alpha)R_s$ است.

تابش طول موج بلند خالص

تابش خورشیدی جذب شده به وسیله زمین، به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود. زمین این انرژی را تحت فرآیندهای گوناگون از جمله تابش امواج از دست می‌دهد. زمین که دمای آن بسیار پایین‌تر از دمای خورشید است، انرژی تابشی را با طول موج بلند منتشر می‌کند. بنابراین، تابش زمینی را تابش طول موج بلند نیز می‌نامند. تابش انتشار یافته با طول موج بلند از زمین (R_l) به سمت بالا) به وسیله آتمسفر جذب یا در فضا تلف می‌شود. تابش طول موج بلند ورودی به آتمسفر (R_l)، به سمت پایین) سبب افزایش دمای آن می‌گردد. به طور کلی، در آتمسفر، انرژی به صورت‌های ارائه شده در شکل ۱۵ منتشر می‌شود. کسری از تابش طول موج بلند به سطح زمین برمی‌گردد. در نتیجه، سطح زمین تابش طول موج بلند را علاوه بر انتشار، دریافت نیز می‌کند. تفاوت بین تابش طول موج بلند ورودی و خروجی، تابش طول موج بلند خالص (R_{nl}) نامیده می‌شود. از آنجا که، تابش طول موج بلند خروجی از سطح زمین، به طور تقریب همیشه، بزرگتر از تابش طول موج بلند ورودی بوده بنابراین، R_{nl} نمایانگر اتلاف انرژی است.



شکل ۱۳- تغییر تابش فرازمینی (R_a) در خط استوا و مدار ۲۰ و ۴۰ درجه شمالی و جنوبی در ماه‌های مختلف سال



شکل ۱۴- تغییر ساعات آفتابی (N) در خط استوا و مدار ۲۰ و ۴۰ درجه شمالی و جنوبی در ماه‌های مختلف سال

تابش خالص

تابش خالص (R_n)، تفاوت بین تابش ورودی و خروجی با هر دو طول موج کوتاه و بلند می‌باشد. تابش خالص، موازنه بین انرژی جذب، منعکس و منتشر شده به وسیله سطح زمین یا تفاوت بین تابش طول موج کوتاه ورودی خالص (R_{ns}) و تابش طول موج بلند خروجی خالص (R_{nl}) است (شکل ۱۵). تابش خالص، به طور معمول، در روز مثبت و در شب منفی است. کل مقدار تابش خالص روزانه به جز در شرایط حدی در عرض‌های جغرافیایی بالا، همواره مثبت می‌باشد.

شار گرمای خاک

در برآورد تبخیر - تعرق، باید تمامی اجزای موازنه انرژی (معادله ۱) در نظر گرفته شوند. شار گرمای خاک (G)، مقدار انرژی مصرفی برای گرم شدن خاک است. مقدار شار گرمای خاک در هنگام گرم شدن خاک مثبت و در زمان سرد شدن آن، منفی است. هر چه، مقدار شار گرمای خاک در مقایسه با تابش خالص پایین بوده و اغلب، ممکن است از آن صرف نظر شود لیکن، از نظر فرض علمی، مقدار انرژی بدست آمده یا از دست رفته به وسیله خاک در این فرآیند، باید هنگام برآورد تبخیر - تعرق به مقدار تابش خالص افزوده یا از آن کم شود.

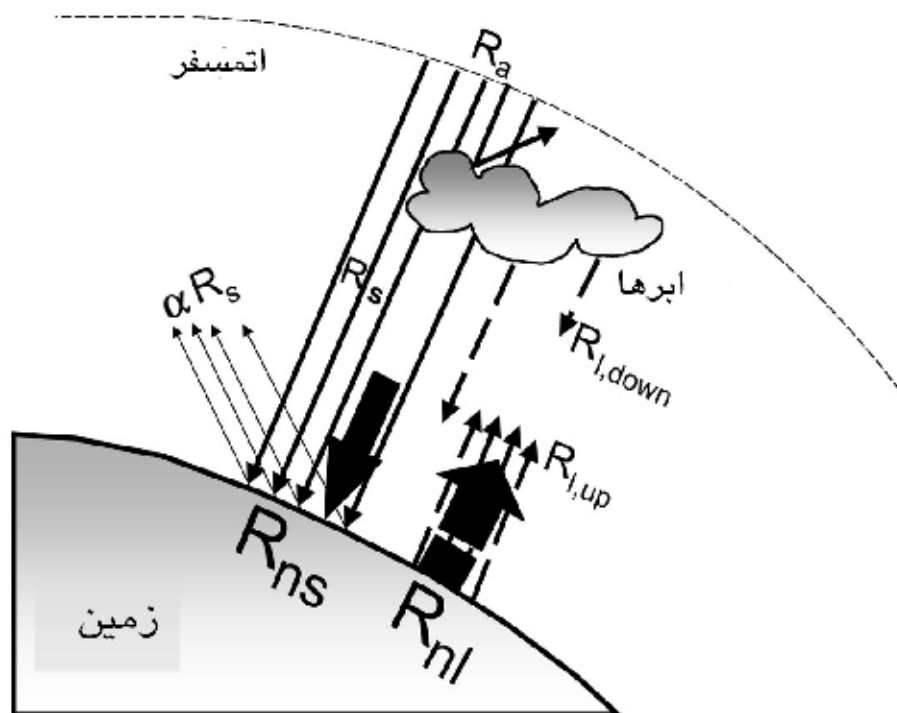
واحدها

در این نشریه واحد استاندارد مورد استفاده برای انرژی ورودی بر واحد سطح بر واحد زمان، مگاژول بر مترمربع بر روز می‌باشد ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$). در نشریه‌های هواشناسی، ممکن است، از سایر واحدها استفاده شود و یا تابش به صورت واحدها غیر استاندارد SI نظیر، کالری بر سانتی‌مترمربع بر روز بیان شود.

در معادله پنمن - مانتیث فائو (معادله ۶)، تابش که بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز بیان شده، با استفاده از یک ضریب تبدیل که مساوی با عکس گرمای نهان تبخیر ($\frac{1}{\lambda} = 0.408$) است، به تبخیر معادل بر حسب میلی‌متر بر روز تبدیل می‌شود (کادر ۸).

$$\text{Equivalent evaporation [mm day}^{-1}] = 0.408 \times \text{Radiation [MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}] \quad (20)$$

واحدهای متداول برای بیان انرژی ورودی به هر واحد سطح در هر واحد زمان و ضرایب تبدیل به طور خلاصه، در جدول ۳ آمده است.



شکل ۱۵- اجزای مختلف تابش خورشیدی

کادر ۸- تبدیل انرژی به تبخیر معادل

تبدیل مقادیر انرژی به عمق آب یا برعکس به صورت رابطه زیر است:

$$\text{Radiation}[\text{depth of water}] = \frac{\text{Radiation}[\frac{\text{energy}}{\text{surface}}]}{\lambda \rho_w}$$

که در آن:

λ = گرمای نهان تبخیر [مگاژول بر کیلوگرم]،

ρ_w = جرم مخصوص آب [۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب]،

[depth of water] به متر و $[\frac{\text{energy}}{\text{surface}}]$ به مگاژول بر مترمربع بیان شده است.

با بکارگیری عدد ۲/۴۵ مگاژول بر کیلوگرم برای λ (به بخش پارامترهای اتمسفری و پیوست سه مراجعه شود) و ضرب کردن عدد ۱۰۰۰ در معادله فوق داریم:

$$\text{Radiation}[\text{mm day}^{-1}] = \frac{\text{Radiation}[\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}]}{2.45} = 0.408 \times \text{Radiation}[\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}]$$

جدول ۳- ضرایب تبدیل واحدهای تابش خورشیدی

تبخیر معادل	ضریب تبدیل برای تعیین انرژی ورودی بر واحد سطح بر واحد زمان				
	مگاژول بر مترمربع بر روز (MJ m ⁻² day ⁻¹)	ژول بر سانتی مترمربع بر روز (J cm ⁻² day ⁻¹)	کالری بر سانتی مترمربع بر روز (Cal cm ⁻² day ⁻¹)	وات بر مترمربع (Wm ⁻²)	میلی متر بر روز (mm day ⁻¹)
مگاژول بر مترمربع بر روز	۱	۱۰۰	۲۳/۹	۱۱/۶	۰/۴۰۸
کالری بر سانتی مترمربع بر روز	۴/۱۸۶۸ × ۱۰ ^{-۲}	۴/۱۸۶۸	۱	۰/۴۸۵	۰/۰۱۷۱
وات بر مترمربع	۰/۰۸۶۴	۸/۶۴	۲/۰۶	۱	۰/۰۳۵
میلی متر بر روز	۲/۴۵	۲۴۵	۵۸/۵	۲۸/۴	۱

اندازه گیری

تابش خورشیدی را می توان با پیرانومتر^۱، تابش سنج^۲ یا نورسنج^۳ اندازه گیری کرد. این دستگاه ها دارای یک بخش حساس (سنسور^۴) نصب شده بر روی یک سطح افقی هستند که، شدت تابش کل شامل هر دو تابش مستقیم و پخشیده به وسیله ابرها را اندازه گیری می کنند. سنسور (صفحه حساس)، اغلب، به وسیله یک حفاظ شیشه ای گنبدی شکل که باید به طور دائم تمیز شود، محافظت شده و در یک هوای خشک نگهداری می شود.

تابش طول موج بلند و کوتاه خالص می تواند از طریق ثبت تفاوت بین خروجی سنسورهایی که به سمت بالا و پایین نصب شده اند، اندازه گیری شود. در تابش سنج هایی که تابش خالص را اندازه گیری می کنند، محافظ های پلی اتیلن گنبدی شکل که برای هر دو تابش طول موج کوتاه و بلند رسانا هستند، جایگزین محافظ شیشه ای می شوند.

هنگامی که، پیرانومتر در دسترس نباشد، تابش خورشیدی را، به طور معمول با استفاده از ساعات آفتابی برآورد می کنند. ساعات آفتاب واقعی با آفتاب نگار کمبل - استوکس اندازه گیری می شود. این دستگاه ساعات آفتابی را با استفاده از یک کره شیشه ای با کارکرد عدسی، اندازه گیری می کند. اشعه های خورشیدی در یک نقطه کانونی متمرکز شده و یک نقطه از کارت مخصوص تعبیه شده در زیر کره شیشه ای را می سوزاند. حرکت خورشید، نقطه کانونی را در طول روز تغییر می دهد و یک مسیر خطی از نقاط سوخته شده بر روی کارت را ترسیم می کند. چنانچه، مانعی در مقابل اشعه تابش خورشید قرار

1- Pyranometer

2- Radiometer

3- Solarimeter

4- Sensor

گیرد، امتداد سوختگی خط مذکور قطع شده و ساعات آفتابی از مجموع طول خط سوخته شده، تعیین می‌شود.

مقدار گرمای هدایت شده در خاک را می‌توان با سیستم‌های صفحه‌های شار گرمای خاک و ترموکوپل‌ها یا ترمیستورها اندازه‌گیری کرد.

روش‌های محاسبه

تابش فرازمینی (هزانه)

تابش فرازمینی برای هر روز از سال در عرض جغرافیایی مختلف با استفاده از عدد ثابت خورشید، زاویه میل خورشید^۱ و زمان به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (21)$$

که در آن:

R_a = تابش فرازمینی [مگاژول بر مترمربع بر روز]،

G_{sc} = ثابت خورشیدی [مساوی با ۰/۰۸۲۰ مگاژول بر مترمربع بر دقیقه]،

d_r = فاصله نسبی زمین تا خورشید (معادله ۲۳)،

ω_s = زاویه ساعتی خورشید^۲ (معادله ۲۵ یا ۲۶) [رادیان]،

φ = عرض جغرافیایی [رادیان] (معادله ۲۲) و

δ = زاویه میل خورشید (معادله ۲۴) [رادیان] می‌باشند.

در معادله فوق، تابش فرازمینی برحسب مگاژول بر مترمربع بر روز بیان می‌شود. تبخیر معادل برحسب میلی‌متر بر روز با ضرب کردن مقدار تابش فرازمینی در عدد ۰/۴۰۸ به دست می‌آید (معادله ۲۰). عرض جغرافیایی که برحسب رادیان بیان شده، برای نیمکره شمالی مثبت و برای نیمکره جنوبی منفی است (مثال ۷). تبدیل از درجه اعشاری به رادیان با استفاده از رابطه زیر صورت می‌پذیرد:

$$\text{Radiation} = \frac{\pi}{180} [\text{decimal degree}] \quad (22)$$

1- Solar declination

2- Sunset hour angle

مثال ۷- تبدیل عرض جغرافیایی از درجه و دقیقه به رادیان		
عرض جغرافیایی بانکوک (تایلند) ۱۳ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی و ریودوژانیرو (برزیل) ۲۲ درجه و ۵۴ دقیقه جنوبی است، عرض جغرافیایی این شهرها را بر حسب رادیان محاسبه کنید.		
عرض جغرافیایی	بانکوک (نیمکره شمالی)	ریودوژانیرو (نیمکره جنوبی)
درجه و دقیقه	۱۳° ۴۴' شمالی	۲۲° ۵۴' جنوبی
درجه	$۱۳ + \frac{۴۴}{۶۰} = ۱۳/۷۳$	$(-۲۲) + (-\frac{۵۴}{۶۰}) = -۲۲/۹۰$
رادیان	$\left(\frac{\pi}{۱۸۰}\right) \times ۱۳/۷۳ = +۰/۲۴۰$	$\left(\frac{\pi}{۱۸۰}\right) \times (-۲۲/۹۰) = -۰/۴$
عرض جغرافیایی بانکوک و ریودوژانیرو، به ترتیب +۰/۲۴ و -۰/۴ رادیان است.		

فاصله نسبی زمین- خورشید و زاویه میل خورشید به صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (۲۳)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (۲۴)$$

که در آنها، J شماره روز از سال بین ۱ (اول ژانویه) تا ۳۶۵ یا ۳۶۶ (۳۰ یا ۳۱ دسامبر) می‌باشد. مقادیر J برای تمام روزهای سال و همچنین، معادله برآورد J، در پیوست دو (جدول ۲-۵) ارائه شده است. زاویه ساعتی خورشید (ω_s) با رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (۲۵)$$

از آنجاکه، تابع arc کسینوس در برخی زبان‌های برنامه‌نویسی تعریف نشده است، زاویه ساعتی خورشید را با استفاده از تابع arc تانژانت نیز می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan\left[\frac{-\tan(\varphi) \tan(\delta)}{x^{0.5}}\right] \quad (۲۶)$$

که در آن:

$$X = 1 - [\tan(\varphi)]^2 [\tan(\delta)]^2 \quad (۲۷)$$

و $X = 1 \times 10^{-5}$ است، اگر $X \leq 0$ باشد.

مقادیر تابش فرازمینی در عرض‌های جغرافیایی مختلف در پیوست دو (جدول ۲-۶) ارائه شده است. برای تمامی عرض‌های جغرافیایی در طول دوره‌های غیر یخبندان، این مقادیر تابش فرازمینی در روز پانزدهم هر ماه را نشان می‌دهند، و تفاوت کمتر از یک درصد با مقادیر میانگین روزانه ماه تفاوت دارند و بکارگیری آنها موجب سادگی محاسبه‌ها است. این مقادیر، با ارقام جداول اسمیتسونیان^۱ اندکی تفاوت دارند. برای ماه‌های زمستان در عرض‌های جغرافیایی بیشتر از ۵۵ درجه (شمالی یا جنوبی)، معادله‌های مربوط به تابش فرازمینی کمتر اعتبار دارند. برای ارزیابی تغییر احتمالی، باید به جداول اسمیتسونیان مراجعه کرد.

مثال ۸- تعیین تابش فرازمینی	
مقدار تابش فرازمینی را در ۳ سپتامبر برای عرض جغرافیایی ۲۰ درجه جنوبی تعیین کنید.	
از معادله ۲۲ برای ۲۰ درجه جنوبی یا (این مقدار برای نیمکره جنوبی منفی است): $\varphi = \left(\frac{\pi}{180} \right) \times (-20) = -0.35$	
از جدول ۲-۵: $J = 246$	
از معادله ۲۳: رادیان $d_r = 1 + 0.33 \times \cos\left(\frac{2\pi(246)}{365}\right) = 0.985$	
از معادله ۲۴: رادیان $\delta = 0.49 \sin \times \left(\frac{2\pi(246)}{365} - 1/39\right) = 0.120$	
از معادله ۲۵: رادیان $\omega_s = \arccos[-\tan \times (-0.35) \tan \times (0.12)] = 1.527$ پس: $\sin(\varphi) \sin(\delta) = -0.41$ و: $\cos(\varphi) \cos(\delta) = 0.933$	
از معادله ۲۱: $R_a = \frac{24 \times (60)}{\pi} \times (0.820) \times (0.985) \times [1.527 \times (-0.41) + 0.933 \times \sin(1.527)] =$ $32.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	
از معادله ۲۰: $0.408 \times (32.2) = 13.1 \text{ mm day}^{-1}$ تابش فرازمینی ۳۲/۲ مگاژول بر مترمربع بر روز می‌باشد.	

تابش فرازمینی برای دوره‌های ساعتی یا کوتاه‌تر

هنگام محاسبه تابش فرازمینی برای دوره‌های زمانی ساعت یا کوتاه‌تر، باید زاویه ساعت خورشید در شروع و پایان آن دوره در نظر گرفته شود:

$$R_a = \frac{12(60)}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_2 - \omega_1) \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) (\sin(\omega_2) - \sin(\omega_1))] \quad (28)$$

که در آن:

R_a = تابش فرازمینی برای دوره زمانی ساعتی (یا کوتاه‌تر) [مگاژول بر مترمربع بر ساعت]،

G_{sc} = ثابت خورشیدی [مساوی با ۰/۰۸۲ مگاژول بر مترمربع بر دقیقه]،

d_r = فاصله نسبی زمین - خورشید (معادله ۲۳)،

δ = زاویه میل خورشید [رادیان] (معادله ۲۴)،

φ = عرض جغرافیایی [رادیان] (معادله ۲۲)،

ω_1 = زاویه ساعتی خورشید در ابتدا دوره [رادیان] (معادله ۲۹)،

ω_2 = زاویه ساعتی خورشید در انتهای دوره [رادیان] (معادله ۳۰) می‌باشند.

زوایای ساعتی خورشید در ابتدا و انتهای دوره، به صورت معادله‌های زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi t_1}{24} \quad (29)$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi t_1}{24} \quad (30)$$

که در آن:

ω = زاویه ساعتی خورشید در نیمه دوره ساعتی یا کوتاه‌تر [رادیان] و

t_1 = طول دوره محاسبه [ساعت]. یعنی؛ عدد ۱ برای دوره ساعتی یا عدد ۰/۵ برای دوره ۳۰ دقیقه‌ای،

می‌باشند.

زاویه ساعتی خورشید در نیمه دوره عبارت است از:

$$\omega = \frac{\pi}{12} [(t + 0.06667(L_z - L_m) + S_c) - 12] \quad (31)$$

که در آن:

t = وقت استاندارد در نیمه دوره [بر حسب ساعت] است. برای مثال، t برای یک دوره بین ساعات ۱۴ و ۱۵،

مساوی ۱۴/۵ ساعت،

L_z = طول جغرافیایی مرکز منطقه دارای یک وقت محلی^۱ [درجه در غرب خط گرینویچ]، برای مثال، L_z ؛

۷۵، ۹۰، ۱۰۵ و ۱۲۰ درجه به ترتیب برای مناطق شرقی، مرکزی، کوهستان راکي و اقیانوس آرام (ایالات

۱ - منطقه‌ای که دارای یک وقت محلی مشترک می‌باشد.

متحدہ آمریکا) و صفر درجه برای گرینویچ، ۳۳۰ درجه برای شهر قاهره (مصر) و ۲۵۵ درجه برای بانکوک (تایلند)،

L_m = طول جغرافیایی محل اندازه گیری [درجه در غرب گرینویچ] و
 S_c = ضریب اصلاح فصل برای زاویه ساعتی خورشید [ساعت] می باشد.
 البته، در معادله ۳۱، $\omega > \omega_s$ یا $\omega < -\omega_s$ نمایانگر این فرض است که خورشید در زیر خط افق قرار دارد و بنا بر تعریف، تابش فرازمینی صفر است.
 ضریب اصلاح زاویه ساعتی خورشید برای فصل به صورت رابطه زیر محاسبه می شود:

$$S_c = 0.1645 \sin(2b) - 0.1255 \cos(b) - 0.025 \sin(b) \quad (32)$$

$$b = \frac{2\pi(J - 81)}{364} \quad (33)$$

که در آن، J شماره روز از سال (از اول ژانویه) می باشد.

مداکثر ساعات آفتابی

حداکثر ساعات آفتابی روزانه با معادله زیر تعیین می شود:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (34)$$

که در آن، (ω_s) زاویه ساعتی خورشید بر حسب رادیان است که با استفاده از معادله های ۲۵ یا ۲۶ تعیین می شود. مقادیر میانگین حداکثر ساعات آفتابی (در روز پانزده هر ماه) برای عرض های جغرافیایی مختلف در پیوست دو (جدول ۲-۷) ارائه شده است.

مثال ۹- تعیین حداکثر ساعات آفتابی	
حداکثر ساعات آفتابی را در سوم سپتامبر برای منطقه واقع در عرض جغرافیایی ۲۰ درجه جنوبی محاسبه کنید.	
از مثال ۸:	$\omega_s = \arccos[-\tan(-0.35) \times \tan(0.120)] = 1.527$ رادیان
از معادله ۳۴:	$N = \frac{24}{\pi} \times (1.527) = 11.7$ ساعت
در این منطقه، حداکثر ساعات آفتابی در سوم سپتامبر ۱۱/۷ ساعت می باشد.	

کادر ۹- محاسبه تابش فرازمینی (R _a) و حداکثر ساعات آفتابی (N)		
عرض جغرافیایی ... درجه و ... دقیقه		
(علامت مثبت برای نیمکره شمالی و علامت منفی برای نیمکره جنوبی)		
درجه	←-----	... درجه
درجه	←----- بر ۶۰ تقسیم شود	... دقیقه
درجه	عرض جغرافیایی به درجه (مجموع دو سطر بالا)	
رادیان	معادله ۲۲ $\varphi = \frac{\pi}{180} \times (\text{عرض جغرافیایی به درجه})$	
	روز از سال	
	...	روز
	ماه ، ... J از جدول ۲-۵ (پیوست دو)	
	معادله ۲۳: $d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$	
رادیان	معادله ۲۴: $\delta = .409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right)$	
	$\sin(\varphi)\sin(\delta)$	
	$\cos(\varphi)\cos(\delta)$	
رادیان	معادله ۲۵: $\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)]$	
مگاژول بر مترمربع بر روز	$\left(\frac{24(60)}{\pi}\right) \times G_{sc} = 37/59$	
تابش فرازمینی: R _a		
مگاژول بر مترمربع بر روز	معادله ۲۱: $R_a = \frac{24 \times (60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)]$	
حداکثر ساعات آفتابی: N		
ساعت به روز	معادله ۳۴: $N = \frac{24}{\pi} \omega_s$	

تابش خورشیدی

چنانچه، تابش خورشیدی (طول موج کوتاه) اندازه‌گیری نشود، می‌توان آن را با معادله آنگستروم^۱ محاسبه کرد. این معادله رابطه تابش خورشیدی، تابش فرازمینی و ساعات آفتابی نسبی را به صورت زیر ارائه می‌دهد:

1- Angstrom

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (35)$$

که در آن:

R_s = تابش خورشیدی یا تابش طول موج کوتاه [مگاژول بر مترمربع بر روز]،

n = ساعات آفتابی واقعی [ساعت]،

N = حداکثر ساعات آفتابی [ساعت]،

$\frac{n}{N}$ = ساعات آفتابی نسبی [بدون واحد]،

R_a = تابش فرازمینی [مگاژول بر مترمربع بر روز]،

a_s = کسر تابش فرازمینی ورودی به سطح زمین در روزهای ابری ($n=0$) و

$a_s + b_s$ = کسر تابش فرازمینی ورودی به سطح زمین در روزهای صاف ($n=N$)، می‌باشند.

تابش طول موج کوتاه در معادله بالا، بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز می‌باشد. تبخیر معادل برحسب میلی‌متر بر روز، از حاصل ضرب کردن تابش طول موج کوتاه در 0.408 به دست می‌آید (معادله ۲۰). طبق شرایط آتمسفر (رطوبت، گرد و غبار) و زاویه میل خورشید (عرض جغرافیایی و ماه)، ضرایب آنگستروم (a_s و b_s) تغییر می‌کنند. چنانچه، داده‌های تابش خورشیدی واقعی در دسترس نباشد و یا ضرایب آنگستروم و اسنچی نشده باشند، از مقادیر، $a_s = 0.25$ و $b_s = 0.5$ استفاده می‌شود.

تابش فرازمینی و حداکثر ساعات آفتاب با معادله‌های ۲۱ و ۳۴ محاسبه می‌شوند. مقادیر این عوامل برای عرض‌های جغرافیایی مختلف در پیوست دو (جدول‌های ۲-۶ و ۲-۷) ارائه شده‌اند. ساعات آفتابی واقعی به وسیله آفتاب نگار کمبل - استوکس اندازه‌گیری می‌شود.

مثال ۱۰ - تعیین تابش خورشیدی با استفاده از اندازه‌گیری ساعات آفتابی	
در ماه مه، در ریودوژانیرو (برزیل) با عرض جغرافیایی ۲۲ درجه و ۵۴ دقیقه جنوبی، ساعت آفتابی ۲۲۰ اندازه‌گیری شده است. تابش خورشیدی را در این ماه مه تعیین کنید.	
$\text{رادیان } -40 = \left(\frac{\pi}{180} \right) \times (-22/90) = 22/90^\circ S = 22^\circ 45' S = \text{عرض جغرافیایی}$	از جدول ۲-۵ (پیوست دو) برای پانزدهم ماه مه.
$J = 135$	از معادله ۲۱ یا جدول ۲-۶ (پیوست دو):
$R_a = 25/1 \text{ (MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1} \text{)}$	از معادله ۳۴ یا جدول ۲-۷ (پیوست دو):
$N = 10/9 \text{ hours day}^{-1}$	
$n = \frac{220}{31} = 7/1 \text{ hours day}^{-1}$	
$R_s = 0/25 + 0/5 \times \left(\frac{5/7}{10/9} \right) R_a = 0/58 \times 25/1 = 14/5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	از معادله ۳۵:
$\text{از معادله ۲۰: } 5/9 \text{ mm day}^{-1} = 0/408 \times (14/5)$	تبخیر معادل
تابش خورشیدی ۱۴/۵ مگاژول بر مترمربع بر روز برآورد می‌شود.	

تابش خورشیدی در آسمان صاف

برای محاسبه تابش طول موج بلند خالص، تعیین مقدار تابش خورشیدی در آسمان صاف (R_{s0}) که در آن ساعات آفتابی واقعی و حداکثر مساوی هستند ($n = N$)، مورد نیاز است.

- برای مناطق ساحلی یا هنگامی که مقادیر واسنجی شده a_s و b_s در دسترس باشند:

$$R_{s0} = (a_s + b_s) R_a \quad (36)$$

که در آن:

R_{s0} = تابش خورشیدی در آسمان صاف (مگاژول بر مترمربع بر روز) و
 $a_s + b_s$ = کسر تابش فرازمینی ورودی به سطح زمین در روزهای صاف ($n = N$)، می‌باشند.

- هنگامی که مقادیر واسنجی شده a_s و b_s در دسترس نباشند:

$$R_{s0} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (37)$$

که در آن، z ارتفاع ایستگاه از سطح دریا برحسب متر می‌باشد.

برآوردهای تابش خورشیدی در آسمان صاف با بکارگیری روابط پیچیده‌تر که اثر بخار آب و کدورت هوا نیز در نظر گیرد، در پیوست سه ارائه شده‌اند (معادله‌های ۳-۱۴ تا ۳-۲۰).

تابش خورشیدی فالص یا تابش طول موج کوتاه فالص

تابش طول موج کوتاه خالص بر مبنای رابطه موازنه تابش ورودی و منعکس شده به صورت معادله زیر است:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (38)$$

که در آن:

R_{ns} = تابش خورشیدی خالص یا تابش طول موج کوتاه خالص [مگاژول بر مترمربع بر روز]،
 α = ضریب بازتابش یا آلبدو برای پوشش گیاهی، برای گیاه مرجع چمن فرضی ۲۳/ است، و
 R_s = تابش خورشیدی طول موج کوتاه ورودی به سطح زمین [مگاژول بر مترمربع بر روز] می‌باشند.

تابش طول موج بلند فاصل

شدت انتشار انرژی طول موج بلند متناسب با توان چهارم دمای مطلق سطح می‌باشد. این رابطه، توسط قانون استفان - بولتزمن^۱ بیان شده است. با این حال، به دلیل جذب و تابش به سمت پایین از آتمسفر، شار انرژی خالص خروجی از سطح زمین کمتر از مقدار محاسبه شده توسط این قانون است. بخار آب، ابرها، دی اکسید کربن و گرد و غبار، تابش طول موج بلند را جذب و پخش می‌کنند و باید غلظت آنها در هنگام ارزیابی شار خالص خروجی معلوم باشد. هنگام برآورد شار تابش طول موج بلند خروجی خالص، باید قانون استفان - بولتزمن برای دو عامل رطوبت و ابرناکی اصلاح شود. غلظت سایر جذب‌کننده‌های تابش، ثابت فرض می‌شود:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (39)$$

که در آن:

R_{nl} = تابش طول موج بلند خروجی خالص [مگاژول بر مترمربع بر روز]،

σ = ثابت قانون استفان - بولتزمن [$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^{-4}$]،

$T_{\max,K}$ = حداکثر دمای مطلق [$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$]،

$T_{\min,K}$ = حداقل دمای مطلق [$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$]،

e_a = فشار بخار واقعی [کیلوپاسکال]،

$\frac{R_s}{R_{so}}$ = تابش موج کوتاه نسبی [کوچکتر یا مساوی ۱]،

R_s = تابش خورشیدی محاسبه یا اندازه‌گیری شده (معادله ۳۵) [مگاژول بر مترمربع بر روز]،

R_{so} = تابش محاسبه شده در آسمان صاف (معادله ۳۶ یا ۳۷) [مگاژول بر مترمربع بر روز] می‌باشند.

عوامل فوق در همان دوره یکسان تعیین می‌شود.

از توان چهارم میانگین حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا، به طور معمول، در معادله استفان - بولتزمن

استفاده می‌شود. عبارت $(0.34 - 0.14\sqrt{e_a})$ ، ضریب اصلاح برای رطوبت هوا است و مقدار آن با

افزایش رطوبت کمتر می‌شود. اثر ابرناکی هوا، با عبارت $(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35)$ بیان می‌شود. با

افزایش ابرناکی هوا، مقدار این عبارت کاهش یافته و در نتیجه، تابش طول موج کوتاه نیز، کاهش می‌یابد.

هر چه ضرایب اصلاح کمتر باشند، شار تابش طول موج بلند خروجی خالص کمتر می‌شود. توجه شود که

در معادله ۳۹، نسبت $\frac{R_s}{R_{so}}$ باید ۱ یا کوچکتر باشد.

هنگامی که، داده‌های اندازه‌گیری شده تابش طول موج کوتاه و بلند ورودی و خروجی در طول ساعات

آفتابی و ابری در دسترس باشند، ضرایب مورد استفاده در معادله ۳۹ قابل واسنجی هستند.

پیوست دو (جدول ۲-۸) مقادیر σT_k^4 در دمای مختلف هوا را نشان می‌دهد.

مثال ۱۱- تعیین تابش طول موج بلند خالص	
در ماه مه، در ریودوژانیرو (برزیل) با عرض جغرافیایی ۲۲ درجه و ۵۴ دقیقه جنوبی (۲۲/۷۰ درجه)، ساعات آفتابی ۲۲۰، میانگین روزانه دمای حداکثر و حداقل هوا به ترتیب ۲۵/۱ و ۱۹/۱ درجه سلسیوس و فشار بخار ۲/۱ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شده است. تابش طول موج بلند خالص را تعیین کنید.	
از مثال ۱۰:	$R_s = 14.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
از معادله ۳۶:	$R_{so} = 0.75 R_a = 0.75 \times (25.1) = 18.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
از جدول ۲-۸ یا برای:	$\sigma = 4/90.3 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
پس:	$T_{\max} = 25.1^\circ \text{C} = 298.3 \text{ K}$
و	$\sigma T_{\max, K}^4 = 38.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
و	$T_{\min} = 19.1^\circ \text{C} = 292.3 \text{ K}$
و	$\sigma T_{\min, K}^4 = 35.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
و	$e_a = 2.1 \text{ kPa}$
و	$0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} = 0.14$
و	$\frac{R_s}{R_{so}} = \left(\frac{14.5}{18.8} \right) = 0.77$
-	$1/25 \times (0.77) - 0.35 = 0.69$
از معادله ۳۹:	$R_{nl} = \left[\frac{(38.8 + 35.8)}{2} \right] \times (0.14) \times (0.69) = 3.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
از معادله ۲۰:	$\text{تبخیر معادل} = 0.408 \times (3.5) = 1.4 \text{ mm day}^{-1}$
تابش طول موج بلند خالص ۳/۵ مگاژول بر مترمربع بر روز می‌باشد.	

مثال ۱۲- تعیین تابش خالص	
در ماه مه، تابش خالص را در ریودوژانیرو با استفاده از داده‌های مثال‌های پیش تعیین کنید.	
از مثال ۱۰:	$R_s = 14.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
از معادله ۳۹:	$R_{ns} = (1 - 0.23) R_s = 11.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
از مثال ۱۱:	$R_{nl} = 3.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
از معادله ۴۰:	$R_n = 11.1 - 3.5 = 7.6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
از معادله ۲۰:	$\text{تبخیر معادل} = 0.408 \times (7.6) = 3.1 \text{ mm day}^{-1}$
تابش خالص ۷/۶ مگاژول بر مترمربع بر روز می‌باشد.	

تابش خالص

تابش خالص (R_n)، تفاوت بین تابش موج کوتاه ورودی خالص (R_{ns}) و تابش موج بلند خروجی خالص

(R_{nl}) می‌باشد:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (40)$$

کادر ۱۰- صفحه گسترده محاسبه تابش خالص (R _n)			
عرض جغرافیایی	...	درجه	
روز	...	R _a (کادر ۹ یا جدول ۲-۶ پیوست دو) مگاژول بر مترمربع بر روز	
ماه	...	N ساعت (کادر ۹ یا جدول ۲-۷ پیوست دو)	
n	...	ساعت	$\frac{n}{N}$ (در صورت معلوم نبودن R _s)
تابش خالص: R _{ns}			
چنانچه n به جای R _{ns} اندازه گیری شود:			
$R_s = (0.25 + 0.5 \frac{n}{N}) R_a \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$			معادله ۳۵:
$R_s = [0.75 \times \frac{2 \times (\text{Atitude})}{10000}] R_a \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$			معادله ۳۷:
$\frac{R_s}{R_{so}} \leq 1.0$			
$R_{ns} = 0.77 R_s \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$			معادله ۳۸:
تابش طول موج بلند خالص: R _{nl}			
$\sigma = 4/90.3 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$			با:
$T_K = T(^{\circ}\text{C}) + 273/16$			و:
تبدیل T _{max}	از °C	به K	$T_{\text{max},K} = T_{\text{max}} + 273/16$
تبدیل T _{min}	از °C	به K	$T_{\text{min},K} = T_{\text{min}} + 273/16$
$\sigma T_{\text{max},K}^4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$			(جدول ۲-۸ پیوست دو)
$\sigma T_{\text{min},K}^4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$			(جدول ۲-۸ پیوست دو)
$\left(\frac{\sigma T_{\text{max},K}^4 + \sigma T_{\text{min},K}^4}{2} \right) \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$			
e _a	kPa	$(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a})$	
$\frac{R_s}{R_{so}}$	$(1/35 \times \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35)$		
معادله ۳۹:			
$R_{nl} = \left(\frac{\sigma T_{\text{max},K}^4 + \sigma T_{\text{min},K}^4}{2} \right) \times (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \times \left(1/35 \times \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right) \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$			
تابش خالص: R _n			
$R_n = R_{ns} - R_{nl} \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$			معادله ۴۰:

شار گرمای خاک

مدل‌های پیچیده‌ای برای توصیف شار گرمای خاک معرفی شده است. از آنجا که، مقدار شار گرمای خاک در مقایسه با تابش خالص، به ویژه، هنگامی که پوشش گیاهی سطح زمین کامل بوده و محاسبه برای دوره روزانه یا طولانی‌تر انجام شده، کوچک است، بنابراین، با این فرض دمای خاک تابع دمای هوا است، یک روش ساده برای محاسبه در دوره‌های طولانی ارائه می‌شود.

$$G = c_s \frac{T_i + T_{i-1}}{\Delta t} \Delta z \quad (41)$$

که در آن:

G = شار گرمای خاک [مگاژول بر مترمربع بر روز]،

c_s = ظرفیت گرمای خاک [مگاژول بر مترمکعب بر درجه سلسیوس]،

T_i = دمای هوا در زمان i ام [درجه سلسیوس]،

T_{i-1} = دمای هوا در زمان $i-1$ ام [درجه سلسیوس]،

Δt = طول فاصله زمانی بین i ام و $i-1$ ام [روز] و

Δz = عمق مؤثر خاک [متر] می‌باشند.

از آن جا که، دمای خاک پس از یک تأخیر زمانی^۱ معادل دمای هوا می‌گردد، هنگام برآورد شار گرمای روزانه خاک، باید میانگین دما در یک دوره مشخص محاسبه شود. یعنی، Δt باید بیشتر از یک روز باشد. زیرا، عمق نفوذ گرما در خاک تابع زمان است. برای دوره زمانی یک یا چند روز، عمق خاک متأثر از دمای هوا تنها، ۰/۱ تا ۰/۲ متر می‌باشد. لیکن، برای دوره‌های ماهانه ممکن است، این عمق به ۲ متر یا بیشتر افزایش یابد. ظرفیت گرمای خاک به ترکیب‌های معدنی و آب خاک بستگی دارد.

• شار گرمای خاک برای دوره‌های روزانه و ده روزه:

مقدار شار گرمای خاک زیرین سطح مرجع چمن برای دوره‌های روزانه و ده روز، به طور نسبی، پایین می‌باشد، بنابراین، می‌توان از آن صرف نظر کرد. یعنی:

$$G_{day} \approx 0 \quad (42)$$

• شار گرمای خاک برای دوره‌های ماهانه:

با فرض ظرفیت ثابت گرمای خاک (۲/۱ مگاژول بر مترمکعب بر درجه سلسیوس) و برای یک عمق مناسب خاک، معادله ۴۱ می‌تواند برای تعیین شار گرمای ماهانه خاک استفاده شود:

$$G_{month,i} = 0.07(T_{month,i+1} - T_{month,i-1}) \quad (43)$$

یا در صورتی که، $T_{\text{month}, i+1}$ معلوم نباشد، داریم:

$$G_{\text{month}, i} = 0.14(T_{\text{month}, i} - T_{\text{month}, i-1}) \quad (۴۴)$$

که در آن:

$T_{\text{month}, i}$ = میانگین دمای هوا در ماه مورد نظر، i ام [درجه سلسیوس]،

$T_{\text{month}, i-1}$ = میانگین دمای هوا در ماه پیش از ماه مورد نظر، $i-1$ ام [درجه سلسیوس] و

$T_{\text{month}, i+1}$ = میانگین دمای هوا در ماه پس از ماه مورد نظر، $i+1$ ام [درجه سلسیوس] می باشند.

• **شار گرمای خاک برای دوره های ساعتی یا کوتاه تر:**

شار گرمای خاک زیر پوشش متراکم چمن در دوره های ساعتی یا کوتاه تر، با دمای هوا همبستگی مناسبی ندارد. مقدار شار گرمای ساعتی خاک را می توان، به طور تقریبی، به صورت زیر برآورد کرد:

در روز:

$$G_{\text{hr}} = 0.1 R_n \quad (۴۵)$$

و در شب:

$$G_{\text{hr}} = 0.5 R_n \quad (۴۶)$$

هنگام گرم شدن خاک، شار گرمای خاک مثبت است. بنابراین، در برآورد تبخیر - تعرق، مقدار انرژی مورد نیاز این فرآیند از مقدار تابش خالص کم می شود.

مثال ۱۳- تعیین شار گرمای ماهانه خاک	
در ماه آوریل، در شهر الجزیره (الجزایر)، شار گرمای خاک در حال گرم شدن را تعیین کنید. میانگین دما در ماه های مارس، آوریل و مه به ترتیب ۱۴/۱ و ۱۶/۱ و ۱۸/۸ درجه سلسیوس می باشد.	
از معادله ۴۳ برای ماه آوریل:	$G_{\text{month}} = 0.07 \times (18/8 - 14/1) = 0.33 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
از معادله ۲۰:	$\text{تبخیر معادل} = 0.408 \times (0.33) = 0.13 \text{ mm day}^{-1}$
شار گرمای خاک ۰/۳۳ مگاژول بر مترمربع بر روز می باشد.	

سرعت باد

اندازه‌گیری

باد با جهت و سرعت آن مشخص می‌شود. جهت باد به سمتی که باد از آن می‌وزد، اشاره دارد. برای محاسبه تبخیر - تعرق، سرعت باد یک متغیر وابسته می‌باشد. از آنجا که، سرعت باد در هر مکان تابع زمان می‌باشد، لذا، ضرورت دارد به صورت میانگین در یک دوره مشخص تعیین شود. سرعت باد برحسب واحدهای متر بر ثانیه یا کیلومتر بر روز بیان می‌شود.

سرعت باد با بادسنج^۱ اندازه‌گیری می‌شود. بادسنج‌های متداول در ایستگاه‌های هواشناسی از نوع فنجانی یا پروانه‌ای هستند که به وسیله نیروی باد می‌چرخند. با شمارش تعداد چرخش‌ها در یک دوره زمانی مشخص، میانگین سرعت باد در همان دوره محاسبه و تعیین می‌شود.

نیمرخ باد

سرعت اندازه‌گیری شده باد تابع ارتفاع محل اندازه‌گیری در بالای سطح خاک است. اصطکاک سطحی سرعت باد در حال عبور را کاهش می‌دهد. سرعت باد در سطح زمین کمترین مقدار را دارد و با افزایش ارتفاع افزایش می‌یابد. بنابراین، سرعت‌سنج‌ها در یک ارتفاع مشخص استاندارد یعنی ۱۰ متر برای ایستگاه اقلیم‌شناسی و ۲ متر برای ایستگاه کشاورزی نصب می‌شوند. برای محاسبه تبخیر - تعرق، اندازه‌گیری سرعت باد در ارتفاع دو متری بالای سطح زمین مورد نیاز است. با فرض تغییر لگاریتمی سرعت باد در بالای سطح چمن کوتاه، می‌توان داده‌های سرعت باد اندازه‌گیری شده در هر ارتفاع مشخص را به سرعت در ارتفاع دو متری تبدیل کرد.

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln (67.8z - 5.42)} \quad (47)$$

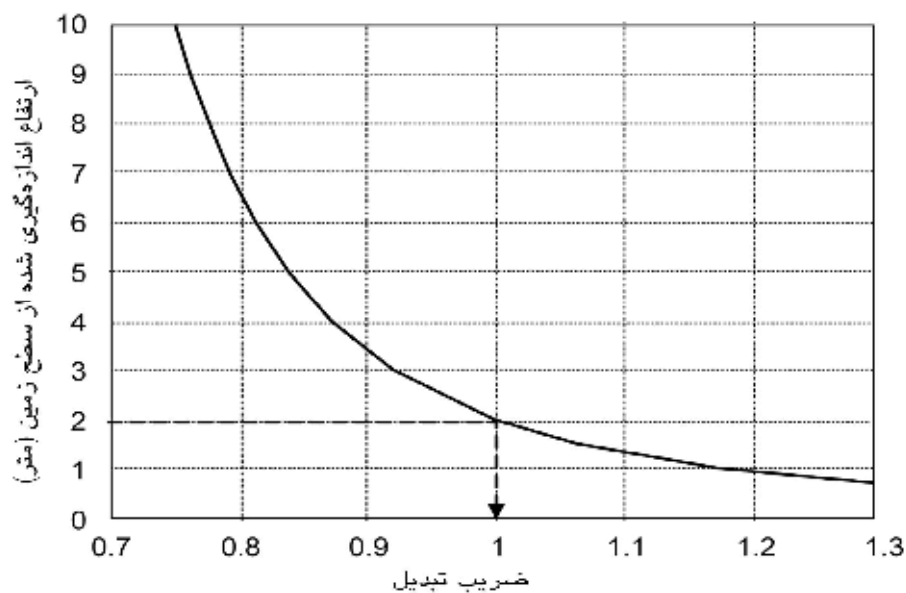
که در آن:

u_2 = سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)،

u_z = سرعت باد اندازه‌گیری شده در ارتفاع z ام بالای سطح زمین (متر بر ثانیه) و

z = ارتفاع اندازه‌گیری بالای سطح زمین (متر) می‌باشند.

ضرایب تبدیل در پیوست دو (جدول ۲-۹) و شکل ۱۶ ارائه شده‌اند.



شکل ۱۶- ضریب تبدیل اندازه‌گیری سرعت باد در یک ارتفاع مشخص بالای سطح زمین به ارتفاع استاندارد دو متری

مثال ۱۴- تبدیل سرعت باد اندازه گیری شده در ارتفاع Z به ارتفاع استاندارد دو متری:		
سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری بالای سطح خاک ۳/۲ متر بر ثانیه اندازه گیری شده است، سرعت باد در ارتفاع استاندارد دو متری بالای سطح زمین را تعیین کنید.		
برای:	متر بر ثانیه	$u_z=3/2$
و:	متر بر ثانیه	$z = 10$
پس:	$\text{ضریب تبدیل} = \frac{4/87}{\ln[67/8 \times (10) - 5/42]} = 0/75$	
از معادله ۴۷:	متر بر ثانیه $u_z=3/2 \times (0/75) = 2/4$	
سرعت باد در ارتفاع دو متری بالای سطح زمین ۲/۴ متر بر ثانیه است.		

تهیه داده‌های هواشناسی

ایستگاه‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی در انواع ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شوند. در ایستگاه هواشناسی کشاورزی محصور در مناطق تحت کشت، دستگاه‌های اندازه‌گیری در شرایط اقلیم مشابه با گیاهان پیرامون ایستگاه قرار دارند. در این ایستگاه، دمای هوا، رطوبت هوا، سرعت باد و ساعات آفتابی، به طور معمول، در ارتفاع دو متری بالای سطح وسیع چمن یا گیاهان کوتاه اندازه‌گیری می‌شود. در صورت لزوم و امکان، پوشش چمن ایستگاه آبیاری می‌گردد. راهنمای احداث و نگهداری ایستگاه هواشناسی کشاورزی

در نشریه فنی شماره ۲۷ آبیاری و زهکشی فائو ارائه شده است. این نشریه، همچنین، انواع مختلف دستگاه‌ها، روش‌های نصب و قابلیت اطمینان داده‌های اندازه‌گیری شده را تشریح می‌کند.

داده‌های جمع‌آوری شده در ایستگاه‌های هواشناسی غیر کشاورزی، پیش از بکارگیری باید به لحاظ صحت و اعتبار ارزیابی شوند. برای مثال، در ایستگاه‌های هوانوردی، داده‌های مرتبط با فنون هوانوردی اندازه‌گیری می‌شوند. از آنجا که، فرودگاه‌ها، اغلب، نزدیک مناطق شهری قرار دارند، دما اندازه‌گیری شده ممکن است، بیشتر از دمای قرائت شده در مناطق کشاورزی باشد. در ایستگاه فرودگاهی، به طور معمول، سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری بالای سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود.

برای دسترسی به اطلاعات در زمینه داده‌های هواشناسی جمع‌آوری شده در انواع ایستگاه‌های هواشناسی کشور، باید به سازمان ملی هواشناسی کشور مراجعه شود. سازمان هواشناسی کشورها، به طور معمول، خبرنامه‌های هواشناسی شامل داده‌های اقلیمی پردازش شده مرتبط با ایستگاه‌های مختلف را منتشر می‌کنند.

در پیوست‌های این نشریه، روش کار و مراحل مختلف تحلیل آماری، ارزیابی، اصلاح و تکمیل همه یا برخی داده‌های هواشناسی غیرموجود به صورت زیر ارائه شده است.

پیوست چهار: تحلیل آماری مجموعه داده‌های هواشناسی،

پیوست پنج: اندازه‌گیری و ارزیابی صحت داده‌های هواشناسی،

پیوست شش: اصلاح داده‌های هواشناسی مشاهده شده در ایستگاه‌های غیر مرجع برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع.

پایگاه داده‌های اقلیمی - زراعی ماهانه^۱

در سال ۱۹۸۴، فائو داده‌های اقلیمی - زراعی ماهانه ۲۳۰۰ ایستگاه را در مجموعه نشریه‌های حفاظت و تولید گیاهان منتشر کرده است. جلد‌های بسیاری در این زمینه ارائه شده است که از آن جمله به موارد زیر اشاره می‌شود:

- شماره ۲۲؛ جلد ۱: داده‌های مربوط به آفریقا، کشورهای شمال خط استوا (۱۹۸۴)،

جلد ۲: داده‌های مربوط به آفریقا، کشورهای جنوب خط استوا (۱۹۸۴)،

- شماره ۲۴: داده‌های اقلیمی - زراعی مربوط به آمریکای لاتین و جزایر کارائیب (۱۹۸۵)،

- شماره ۲۵؛ جلد ۱: داده‌های اقلیمی - زراعی مربوط به کشورهای آسیا به ترتیب حروف الفبا از A تا J (۱۹۸۷) و

جلد ۲: داده‌های اقلیمی - زراعی مربوط به کشورهای آسیا به ترتیب حروف الفبا از K تا Z (۱۹۸۷)،

برنامه CLIMWAT برای نرم‌افزار CROPWAT (نشریه فنی شماره ۴۶ آبیاری و زهکشی فائو) شامل داده‌های هواشناسی ماهانه ۳۲۶۲ ایستگاه اقلیم‌شناسی می‌باشد که بر روی پنج لوح فشرده جداگانه ارائه شده است. ایستگاه‌ها، بر پایه کشور و قاره گروه‌بندی شده‌اند. میانگین ماهانه دمای حداکثر و حداقل، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی، تابش، بارندگی و همچنین، میانگین ماهانه تبخیر - تعرق گیاه مرجع محاسبه شده به روش پنمن - مونتیث فائو برای مناطق اقلیمی دارای اطلاعات دراز مدت، بر روی لوح‌های فشرده ذخیره شده‌اند.

برنامه FAOCLIM، بر روی یک لوح فشرده، بانک اطلاعاتی از داده‌های هواشناسی دریافتی از گروه هواشناسی کشاورزی فائو را ارائه کرده است. این داده‌ها از اطلاعات مندرج در مجموعه نشریات حفاظت و تولید گیاهان فائو گسترده‌تر می‌باشند و تعداد ایستگاه‌ها، نیز، از ۲۳۰۰ به حدود ۱۹۰۰۰ ایستگاه افزایش یافته است. هر چند، تمامی پارامترهای اصلی هواشناسی برای این ایستگاه‌ها در دسترس نمی‌باشند و در بسیاری از ایستگاه‌ها نیز، تنها داده‌های دمای هوا و بارندگی ثبت شده‌اند.

از این بانک اطلاعاتی می‌توان برای تأیید صحت و دقت داده‌های واقعی یا برآورد پارامترهای غیرموجود استفاده کرد. لیکن، از آنجا که ارقام به صورت میانگین ماهانه می‌باشند، باید در بررسی‌های مقدماتی مورد استفاده قرار گیرند. نرم‌افزار FAOCLIM، مجموعه داده‌های ماهانه برای تعدادی از ایستگاه‌ها را ارائه می‌کند. اطلاعات موجود در این مجموعه، نباید جایگزین داده‌های واقعی شوند.

یک بانک از داده‌های الکترونیکی نیز برای برخی مناطق مختلف جهان، توسط مؤسسه بین‌المللی مدیریت آب^۱ منتشر شده است. این بانک اطلاعاتی شامل دمای روزانه و ماهانه هوا، بارندگی و برآورد تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از معادله تبخیر - تعرق هارگریوز^۲ می‌باشد. معادله اخیر، بر مبنای تفاوت حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا معرفی شده است.

برآورد داده‌های هواشناسی غیرموجود

روش برآورد تبخیر - تعرق مرجع با استفاده از معادله پنمن - مونتیث در فصل چهارم توصیف شده است. محاسبه‌ها در این روش به میانگین روزانه، ده روزه یا ماهانه دمای حداکثر و حداقل (T_{min} و T_{max})، فشار بخار واقعی (e_a)، تابش خالص (R_n) و سرعت باد اندازه‌گیری شده در ارتفاع دو متری (u_2) مورد نیاز است. اگر، برخی داده‌های اقلیمی مورد نیاز موجود نبوده یا قابل محاسبه نباشند، تأکید می‌شود که کاربر داده‌های هواشناسی غیرموجود را با یکی از روش‌های زیر برآورد کرده و سپس، از روش پنمن - مونتیث فائو برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع استفاده کند.

بکارگیری یک روش جایگزین برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع که در آن از داده‌های هواشناسی محدود استفاده شده، توصیه نمی‌شود. روش‌ها و مراحل برآورد داده‌های غیرموجود رطوبت، تابش و سرعت باد در این بخش ارائه شده است.

1- International Water Management Institute (IWMI)

2- Hargreaves

برآورد داده‌های رطوبت غیرموجود

آنجا که، داده‌های رطوبت در دسترس نبوده یا صحت داده‌ها مورد تردید است، با فرض این که دمای نقطه شبنم (T_{dew}) به حداقل دمای روزانه (T_{min}) نزدیک می‌باشد، فشار بخار واقعی را می‌توان برآورد کرد. این فرض در هنگام طلوع خورشید که، دمای هوا نزدیک به حداقل دما بوده و هوا، به طور تقریبی، از بخار آب اشباع شده و رطوبت نسبی آن نیز، حدود ۱۰۰ درصد است، اعتبار دارد. اگر، حداقل دما (T_{min}) به عنوان T_{dew} مورد استفاده قرار گیرد، می‌توان نوشت:

$$e_a = e^{\circ}(T_{min}) = 0.611 \exp \left[\frac{17.27 T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right] \quad (48)$$

فرض رابطه $T_{dew} \approx T_{min}$ برای مناطقی معتبر است که در آن پوشش گیاهی ایستگاه، به طور کامل، آبیاری شده باشد. هر چند در این شرایط نیز، به ویژه در مناطق خشک، ممکن است هوا در دمای حداقل در حالت اشباع نباشد. در نتیجه، ممکن است، حداقل دما از دمای نقطه شبنم بالاتر و واسنجی دقیق‌تر برای برآورد دمای نقطه شبنم مورد نیاز باشد. در چنین شرایطی، با کاهش ۲ تا ۳ درجه سلسیوس از حداقل دما، می‌توان تقریب بهتری از معادله فوق را بدست آورد. روش‌های مناسب اصلاح داده‌ها در پیوست شش ارائه شده‌اند. در اقلیم‌های مرطوب و نیمه مرطوب، حداقل دما و دمای نقطه شبنم اندازه‌گیری شده در ابتدای صبح، ممکن است به دلیل تراکم شبنم در طول شب، از دمای نقطه شبنم اندازه‌گیری شده در طول روز کمتر باشد. پس از طلوع خورشید، با تبخیر شبنم، هوا دوباره مرطوب شده و مقدار T_{dew} اندازه‌گیری شده در طول روز را افزایش خواهد داد. این پدیده، در شکل ۵-۴ پیوست پنج نشان داده شده است. هر چند، استفاده از دمای نقطه شبنم اندازه‌گیری یا محاسبه شده در اوایل صبح، یک رویه استاندارد برای محاسبه تبخیر - تعرق روزانه گیاه مرجع به شمار می‌رود.

نتیجه برآورد فشار بخار واقعی با استفاده از حداقل دما، باید کنترل شود. هرگاه، ارقام پیش‌بینی شده با معادله ۴۸ برای یک منطقه معتبر باشد، می‌توان از آن برای برآورد فشار بخار واقعی روزانه استفاده کرد.

برآورد داده‌های تابش غیرموجود

دستگاه‌های اندازه‌گیری تابش خالص که به کنترل تخصصی نیاز دارند به ندرت، در ایستگاه هواشناسی کشاورزی نصب می‌شوند. در صورت عدم اندازه‌گیری مستقیم، تابش طول موج بلند و تابش (طول موج کوتاه) خالص می‌توانند از روی سایر پارامترهای هواشناسی نظیر تابش خورشیدی یا ساعات آفتابی، دمای هوا و فشار بخار که، به طور معمول، اندازه‌گیری شده، تعیین شوند. هنگامی که، تابش خورشیدی اندازه‌گیری نشود، ممکن است بتوان آن را از روی ساعات آفتابی اندازه‌گیری شده، برآورد کرد. چنانچه، داده‌های ساعات آفتابی روزانه موجود نباشند، داده‌های تابش را نمی‌توان با استفاده از روش‌هایی که در قبل ارائه شده‌اند، محاسبه کرد. در این بخش، روش‌های مختلف برآورد داده‌های تابش

همراه با یک معادله جایگزین برای تعیین تبخیر - تعرق مرجع در شرایط غیرموجود بودن داده‌های هواشناسی معرفی می‌شود.

استفاده از داده‌های تابش ایستگاه هواشناسی مجاور

این روش، مبتنی بر این فرض است که برای یک ماه و، اغلب، یک روز مشخص، عوامل مؤثر بر تابش ورودی به سطح زمین و بر ساعات آفتابی، در کل منطقه مشابه می‌باشند. این فرض هنگامی معتبر است که: (۱) منطقه کوچک باشد، (۲) توده‌های هوای مؤثر بارندگی و ابرناکی، به طور تقریبی، در منطقه یکنواخت باشند، و (۳) پستی و بلندی منطقه، به طور تقریبی، یکسان و همگن و به عبارتی تفاوت‌ها ناچیز باشند زیرا، پستی و بلندی سطح زمین بر جابجایی توده‌های هوا تأثیر دارند. تحت این شرایط، داده‌های تابش خورشیدی اندازه‌گیری شده در یک ایستگاه مجاور محل مورد نظر، می‌تواند استفاده گردد.

هنگام بکارگیری این روش در مناطق کوهستانی و ساحلی، آنجا که تفاوت در نورگیری و ارتفاع با اهمیت بوده و یا بارندگی متأثر از شرایط همرفت متغیر است، باید احتیاط شود. به علاوه، داده‌های یک ایستگاه مجاور واقع در سمت دیگر کوهستان ممکن است، به دلیل تفاوت شرایط مؤثر بر تابش، قابل استفاده نباشد. بنابراین، کاربر باید شرایط اقلیمی هر دو منطقه را مشاهده کند و اطلاعات مربوط به تفاوت‌های کلی پوشش زمین و نوع ابرها را از طریق افراد بومی و محلی بدست آورد.

هنگامی که، فاصله شمال - جنوب محل مورد نظر با ایستگاه هواشناسی درون یک منطقه همگن بیشتر از ۵۰ کیلومتر باشد که موجب تغییر تابش فرازمینی گردد، باید اندازه‌گیری تابش (R_s) با استفاده از نسبت

$$\left(\frac{R_s}{R_a}\right) \text{ اصلاح شود:}$$

$$R_s = \frac{R_{s,reg}}{R_{a,reg}} R_a \quad (49)$$

که در آن:

$R_{s,reg}$ = تابش خورشیدی در محل مورد نظر [مگاژول بر مترمربع برروز] و

$R_{a,reg}$ = تابش فرازمینی در محل مورد نظر [مگاژول بر مترمربع بر روز] می‌باشند.

چنانچه، تابش خورشیدی از روی داده‌های تابش ایستگاه مجاور تعیین شده باشد، تابش طول موج بلند خالص (معادله ۳۹) و تابش طول موج کوتاه خالص (معادله ۴۰) قابل محاسبه می‌باشند.

روش محاسبه که در معادله ۴۹ ارائه شده، برای برآورد ماهانه تبخیر - تعرق گیاه مرجع توصیه می‌شود. چنانچه، این روش برای برآورد روزانه تبخیر - تعرق گیاه مرجع استفاده شود، باید داده‌های دو ایستگاه هواشناسی مورد نظر و مجاور به طور دقیق‌تر تحلیل شوند. یعنی مشخص شود هر دو ایستگاه دارای اقلیم همگن هستند یا فاصله بین دو ایستگاه تا آن حد کوتاه بوده که در روز مورد نظر، شرایط اقلیمی مشابهی برقرار شده است. این تحلیل باید شامل مقایسه داده‌های هواشناسی روزانه هر دو ایستگاه، به ویژه حداکثر و حداقل دما و رطوبت هوا باشد. زیرا، ابرناکی و ساعات آفتابی همسان، بر تشابه روند تغییر دما و رطوبت دلالت دارند.

به طور کلی، محاسبه روزانه تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های تابش برآورد شده چنانچه به صورت یک مجموع یا میانگین داده‌ها در طول یک دوره (چند روزه) استفاده شوند، معتبر می‌باشند. این شرایط برای محاسبه میانگین تبخیر - تعرق در بین دو آبیاری متوالی یا در برنامه‌ریزی آبیاری فراهم است. تحت این شرایط، خطای نسبی محاسبه در یک روز از دوره میانگین‌گیری شده، اغلب، با خطای روز دیگر خنثی می‌شود. این برآوردها نباید به عنوان ارقام برآورد شده روزانه استفاده شوند بلکه، تنها به عنوان میانگین در طول دوره مورد نظر قابل استناد می‌باشند.

داده‌های تابش فورشیدی با استفاده از تفاوت حداقل و حداکثر دمای هوا

تفاوت بین دمای حداکثر و حداقل به ابرناکی هوای منطقه بستگی دارد. حداکثر دمای روزانه هوا در آسمان صاف (غیر ابری) بیشتر از آسمان ابری می‌باشد. زیرا، آتمسفر در مقابل ورود تابش یک محیط شفاف محسوب می‌شود. در شرایط فوق، حداقل دما نیز در شب کمتر است، زیرا، مقدار کمتری از تابش طول موج بلند خروجی به وسیله آتمسفر جذب می‌شود. به علاوه، در هوای ابری، حداکثر دمای هوا کمتر از هوای صاف می‌باشد. زیرا، بخش قابل ملاحظه تابش ورودی به آتمسفر به وسیله ابرها جذب و منعکس شده و هرگز به سطح زمین نمی‌رسد. در این شرایط، حداقل دمای هوا نیز بالاتر خواهد بود. زیرا، پوشش ابر مشابه پتو عمل می‌کند و تابش موج بلند خالص خروجی را کاهش می‌دهد. در نتیجه، تفاوت دمای حداکثر و حداقل هوا، به عنوان معیاری برای بیان کسر تابش فرازمینی ورودی به سطح زمین قابل استفاده است. این اصل، توسط هارگریوز و سامانی^۱ به منظور برآورد تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های دمای هوا پیشنهاد شده است.

رابطه هارگریوز در ایستگاه‌های هواشناسی با تنوع اقلیمی، تعدیل و تأیید شده است و به صورت زیر می‌باشد:

$$R_s = k_{Rs} \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} R_a \quad (50)$$

که در آن:

R_a = تابش فرازمینی [مگاژول بر مترمربع برروز]،

$T_{\max}$ = حداکثر دمای هوا [درجه سلسیوس]،

$T_{\min}$ = حداقل دمای هوا [درجه سلسیوس] و

k_{Rs} = ضریب اصلاح مساوی با ۰/۱۶ تا ۰/۱۹ [درجه سلسیوس به توان ۰/۵] می‌باشد.

در رابطه ۵۰، تابش روزانه در محل مورد نظر با ریشه دوم تفاوت دمای حداکثر و حداقل هوا در آن محل متناسب است. ضریب اصلاح (k_{Rs})، تجربی بوده و برای مناطق غیر ساحلی و ساحلی متفاوت می‌باشد:

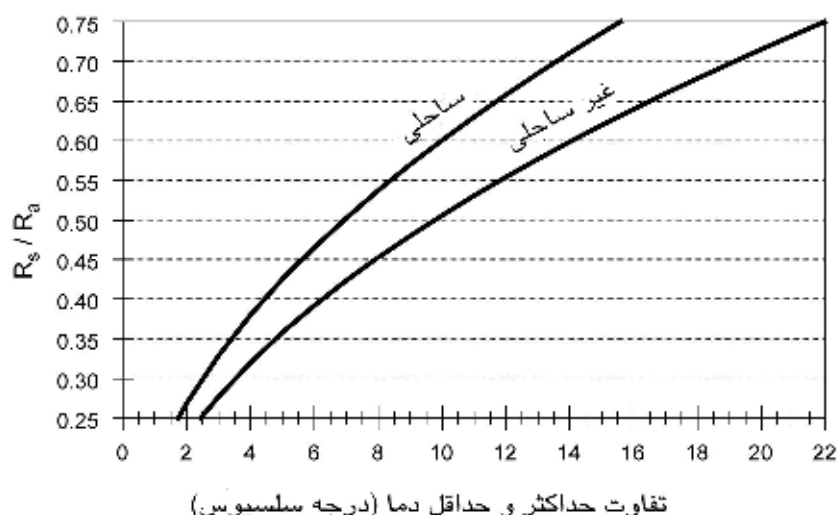
- برای مناطق غیر ساحلی دارای اراضی وسیع، توده‌های هوا چندان تحت تأثیر حجم گسترده آب قرار ندارند و ضریب اصلاح حدود ۰/۱۶ می‌باشد.
- برای مناطق وسیع ساحلی که توده‌های هوا تحت تأثیر حجم گسترده آب قرار دارند، ضریب اصلاح حدود ۰/۱۹ می‌باشد.

رابطه بین $\frac{R_s}{R_a}$ و تفاوت دمای حداکثر و حداقل هوا برای مناطق غیر ساحلی و ساحلی در شکل ۱۷

رسم شده است. بخشی از تابش فرازمینی که به سطح زمین می‌رسد $\frac{R_s}{R_a}$ ، از حدود ۰/۲۵ در یک روز با پوشش ابر متراکم تا حدود ۰/۷۵ در یک روز صاف غیر ابری متغیر است. مقدار تابش خورشیدی برآورد شده به وسیله معادله ۵۰، باید مساوی با تابش خوشیدی در آسمان صاف (معادله ۳۶ یا ۳۷) یا کوچکتر از آن باشد.

استفاده از تفاوت دمای حداکثر و حداقل هوا برای محلی پیشنهاد می‌شود که در آن به دلیل همگن نبودن شرایط اقلیمی در منطقه یا کمبود اطلاعات ثبت شده، داده‌های تابش ورودی به سطح زمین در یک ایستگاه مجاور در دسترس نمی‌باشد. روش معرفی شده در معادله ۵۰ برای جزیره‌ها، به دلیل اثر معتدل‌کنندگی توده آب پیرامون، مناسب نیست.

هنگامی محاسبه روزانه تبخیر - تعرق گیاه مرجع باید بیشتر دقت شود. در این حالت، توصیه ارائه شده برای معادله ۴۹، باید به طور کامل، بکار رود. برای کاهش خطای محاسبه توصیه شده که، تبخیر - تعرق روزانه گیاه مرجع با استفاده از میانگین تخمین تابش در آسمان صاف برای یک دوره مشخص نظیر یک هفته، ده روز یا یک ماه محاسبه و برآورد شود.



شکل ۱۷- رابطه کسر تابش فرازمینی ورودی به سطح زمین $(\frac{R_s}{R_a})$ با تفاوت دمای حداکثر و حداقل

هوا $(T_{\max} - T_{\min})$ برای؛ مناطق غیر ساحلی $(k_{R_s} = 0/16)$ و ساحلی $(k_{R_s} = 0/19)$

مثال ۱۵- تعیین تابش خورشیدی با استفاده از داده‌های دما	
در شهر لیون (فرانسه)، تابش خورشیدی را با استفاده از داده‌های دما در ماه ژوئیه واقع در عرض جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۳ دقیقه شمالی و ارتفاع ۲۰۰ متری بالای سطح دریا محاسبه کنید. در ماه ژوئیه، میانگین ماهانه دمای حداکثر و حداقل هوا به ترتیب ۲۶/۶ و ۱۴/۸ درجه سلسیوس می‌باشد.	
از جدول ۲-۵: از معادله ۲۱ یا از جدول ۲-۶ (پیوست دو):	رادیان $\phi = 0/8$ درجه $+45/72 = 45^\circ 43' = 45^\circ$ عرض جغرافیایی $J = 196$ $R_a = 40/6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
از معادله ۵۰: (همان عرض جغرافیایی):	$R_s = 0/16 \times [\sqrt{26/6 - 14/8}] R_a = 0/55 \times (40/6) = 22/3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
از معادله ۲۰: (همان عرض جغرافیایی):	$0/408 \times (22/3) = 9/1 \text{ mm day}^{-1}$ تبخیر معادل
در ژوئیه، تابش خورشیدی ۲۲/۳ مگاژول بر مترمربع بر روز برآورد می‌شود.	

مثال ۱۶- تعیین تابش خالص در شرایط غیرموجود بودن داده‌های تابش	
تابش خالص خورشیدی در شهر بانکوک (۱۳ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی) با استفاده از دمای حداکثر و حداقل هوا را محاسبه کنید. ایستگاه هواشناسی در منطقه ساحلی و در ارتفاع ۲ متری از سطح دریا واقع شده است. در ماه آوریل، میانگین روزانه دمای حداکثر و حداقل و فشار بخار هوا به ترتیب ۳۴/۸ و ۲۵/۶ درجه سلسیوس و ۲/۸۵ کیلوپاسکال می‌باشد.	
عرض جغرافیایی ۱۳ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی برابر ۱۳/۷۳ درجه شمالی یا ۰/۲۴- رادیان و شماره روز در سال برای ۱۵ آوریل $J = 105$ است.	
از معادله ۲۱ یا جدول ۲-۶ (پیوست دو):	$R_a = 28/1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $K_{Rs} = 0/19$ (در مناطق ساحلی) $(T_{\max} - T_{\min}) = (34/8 - 25/6) = 9/2^\circ \text{C}$
از معادله ۵۰: از معادله ۳۶: از معادله ۳۸:	$R_s = 0/19 \sqrt{9/2} R_a = 21/9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $R_{so} = 0/75 R_a = 28/5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $R_{ns} = 0/77 R_a = 16/9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
	$\sigma = 4/903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $T_{\max} = 34/8^\circ \text{C}$ $\sigma T_{\max, K}^4 = 44/1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$
	$T_{\min} = 25/6^\circ \text{C}$ $\sigma T_{\min, K}^4 = 39/1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $\left(\frac{\sigma T_{\max, K}^4 + \sigma T_{\min, K}^4}{2} \right) = \left(\frac{44/1 + 39/1}{2} \right) = 41/6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$

ادامه مثال ۱۶-

$e_a = 2/85 \text{ kPa}$ $(0/34 - 0/14\sqrt{e_a}) = 0/1$	برای:
$\frac{R_s}{R_{so}} = 0/77$ $[1/35 \times (\frac{R_s}{R_{so}}) - 0/35] = 0/69$	برای: پس:
$R_{nl} = 41/6 \times (0/10) \times 0/69 = 3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $R_n = (16/9 - 2/9) = 13/9 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	از معادله ۳۹: از معادله ۴۰:
$\text{از معادله ۲۰: } 0/408 \times (13/9) = 5/7 \text{ mm day}^{-1}$	از معادله ۲۰:
تابش خالص ۱۳/۹ مگاژول بر مترمربع بر روز برآورد می‌شود.	

روش تجربی تعیین تابش در جزیره‌ها

برای جزیره‌ها که در جهت عمود بر خط ساحل دارای پهنای ۲۰ کیلومتر یا کمتر هستند، توده‌های هوای مؤثر بر شرایط آتمسفر، در تمامی جهت‌ها تحت تأثیر آب پیرامون قرار دارند. لذا، روش استفاده از دما برای این شرایط مناسب نمی‌باشد. چنانچه، داده‌های تابش در جزیره اندازه‌گیری نشود، می‌توان یک برآورد اولیه از میانگین تابش ماهانه را با استفاده از رابطه تجربی زیر به دست آورد:

$$R_s = 0.7R_a - b \quad (51)$$

که در آن:

R_s = تابش خورشیدی [مگاژول بر مترمربع بر روز]،

R_a = تابش فرازمینی [مگاژول بر مترمربع بر روز] و

b = ضریب ثابت تجربی مساوی با ۴ [مگاژول بر مترمربع بر روز] می‌باشد.

این رابطه، تنها، برای مناطق کم ارتفاع (از ۰ تا ۱۰۰ متر) کاربرد دارد. ضریب ثابت تجربی (b)، بیانگر این واقعیت است که جزیره‌ها، به طور معمول، تا حدودی ابری هستند و بنابراین، تابش خورشیدی کوچکتر از میانگین ۴ مگاژول بر مترمربع تابش در آسمان صاف (یعنی، $0/7R_a$) می‌باشد. اصلاح ضریب ثابت تجربی (b) در محل مورد نظر، ممکن است، دقت تخمین را افزایش دهد.

این روش، تنها، برای محاسبه ماهانه مناسب هستند. فرض ثابت بودن نسبت تابش خورشیدی و تابش فرازمینی، موجب کاهش دقت در برآورد تابش روزانه می‌شود.

داده‌های سرعت باد غیرموجود

داده‌های سرعت باد از ایستگاه هواشناسی مجاور

در استفاده از داده‌های سرعت باد اندازه‌گیری شده در ایستگاه هواشناسی مجاور، مشابه داده‌های تابش، فرض می‌شود که جریان هوا در بالای منطقه، همگن می‌باشد. هر چند، ممکن است، در طول روز، مقدار تغییر لحظه‌ای سرعت باد بالا باشد، لیکن، این تغییر در دوره‌های طولانی‌تر یا برای کل روز، چندان قابل ملاحظه نیست. چنانچه، توده‌های هوا دارای منشاء یکسان بوده یا جبهه‌های مشابه موجب ایجاد جریان‌های هوا در منطقه شده و نیز، در مناطقی که پستی و بلندی سطح زمین همگن است، می‌توان از داده‌های سرعت باد اندازه‌گیری شده در ایستگاه مجاور استفاده کرد.

هنگام استفاده از داده‌های سرعت باد ایستگاه مجاور، اقلیم منطقه، روند تغییر سایر پارامترهای هواشناسی و پستی و بلندی منطقه نیز باید مقایسه شود. اغلب، بادهای شدید دارای رطوبت نسبی پایین هستند و بادهای ملایم رطوبت نسبی بالا دارند. بنابراین، تغییر حداکثر و حداقل رطوبت نسبی روزانه باید در هر دو محل یکسان باشد. در مناطق کوهستانی، نباید از داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه استفاده شود، بلکه، داده‌های ایستگاه مجاور با ارتفاع و بادهای غالب مشابه، مناسب‌تر می‌باشند. بر پایه مشخصات بادهای غالب، داده‌های دو ایستگاه همجوار ممکن است، حتی، از یک فصل به فصل دیگر تغییر کنند.

داده‌های سرعت باد از یک ایستگاه مجاور، برای برآورد تبخیر - تعرق ماهانه قابل استفاده می‌باشند. محاسبه روزانه، هنگامی که از مجموع یا میانگین داده‌ها در طول یک دوره زمانی نظیر یک هفته یا ده روز استفاده شود، مناسب و قابل قبول است.

برآوردهای تجربی سرعت باد ماهانه

از آنجا که، تغییر میانگین سرعت ماهانه باد، به طور نسبی، کم است، بنابراین، مقادیر ماهانه سرعت باد را می‌توان برآورد کرد. برآورد میانگین سرعت ماهانه باد ممکن است با استفاده از اطلاعات موجود برای اقلیم یک منطقه انتخاب شود لیکن، تغییر فصل نیز باید در نظر گرفته شود. گروه‌بندی کلی بادهای در جدول ۴ پیشنهاد شده است.

چنانچه، داده‌های سرعت باد در منطقه در دسترس نباشد، می‌توان از مقدار ۲ متر بر ثانیه به عنوان یک تخمین اولیه استفاده کرد. این مقدار، میانگین سرعت باد در ۲۰۰۰ ایستگاه هواشناسی مختلف جهان می‌باشد.

جدول ۴- گروه‌بندی کلی بادهای

گروه	میانگین سرعت ماهانه باد در ارتفاع دو متری
باد ملایم (نسیم)	۱ متر بر ثانیه یا کمتر
باد ملایم تا متوسط	۱ تا ۳ متر بر ثانیه
باد متوسط تا شدید	۳ تا ۵ متر بر ثانیه
باد شدید	۵ متر بر ثانیه یا بیشتر

به طور کلی، در معادله تبخیر - تعرق گیاه مرجع (معادله ۶)، سرعت باد در ارتفاع دو متری باید 0.5 متر بر ثانیه یا بیشتر باشد. این فرض برای محاسبه اثر ناپایداری لایه مرزی و تلاطم هوا در تشدید تبادل بخار در سطح تبخیر هنگامی که هوا آرام بوده، ضروری است. این اثر، هنگامی قابل توجه بوده که سرعت باد پایین است و تلاطم هوای گرم موجب تبادل هوا در سطح تبخیر می‌گردد. اعمال فرض $0.5 \geq u_2$ متر بر ثانیه در معادله تبخیر - تعرق گیاه مرجع (ET_0)، دقت برآورد معادله برای سرعت باد پایین، را افزایش می‌دهد.

حداقل داده‌های مورد نیاز

این بخش، روش برآورد داده‌های تابش خورشیدی، فشار بخار و باد در هنگام غیرموجود بودن اطلاعات را ارائه کرده است. بسیاری از روش‌های پیشنهاد شده بر اندازه‌گیری دمای حداکثر و حداقل هوا متکی هستند. متأسفانه، هیچ روش قابل اعتمادی برای برآورد دمای هوا در صورت غیرموجود بودن آن معرفی نشده است. بنابراین، داده‌های دمای حداکثر و حداقل روزانه هوا، حداقل اطلاعات مورد نیاز است که باید برای استفاده از روش پنمن - مونتیت فائو در دسترس باشد.

معادله جایگزین برای تبخیر - تعرق مرجع هنگام غیر موجود بودن داده‌های هواشناسی

هنگامی که داده‌های تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و یا سرعت باد در دسترس نباشد، باید به وسیله روش‌های معرفی شده در این بخش برآورد شود. به عنوان یک روش جایگزین، می‌توان با استفاده از معادله هارگریوز، تبخیر - تعرق گیاه مرجع را به صورت زیر برآورد کرد:

$$ET_0 = 0.0023(T_{\text{mean}} + 17.8) (T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5} R_a \quad (52)$$

تمامی عوامل معادله ۵۲ در بخش‌های پیش تعریف شده‌اند. تبخیر - تعرق گیاه مرجع و تابش فرازمینی در معادله ۵۲ برحسب میلی‌متر بر روز تعیین می‌شوند. معادله ۵۲ در هر منطقه جدید باید با مقایسه کردن ET_0 بدست آمده به دو روش هارگریوز و پنمن - مونتیت فائو (معادله ۶) در ایستگاه‌های هواشناسی دارای داده‌های کامل تابش خورشیدی، دمای هوا، رطوبت و سرعت باد، ارزیابی و تایید شود. در صورت لزوم، معادله ۵۲ را با تعیین ضرایب تجربی می‌توان برای دوره‌های ماهانه یا سالانه طبق رابطه $ET_0 = a + b ET_{0(\text{Eq.52})}$ ، واسنجی کرد. در این رابطه، a و b ضرایب تجربی و عبارت "Eq. 52" بیانگر تبخیر - تعرق گیاه مرجع برآورد شده با معادله ۵۲ می‌باشد. ضرایب a و b را می‌تواند با روش رگرسیون

یا برازش بهترین خط، تعیین گردد. به طور کلی، نتایج تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع با برآورد داده‌های تابش، فشار بخار و سرعت باد (همان طور که در معادله‌های ۴۸ تا ۵۱ و جدول ۴ بیان شده) و سپس استفاده از معادله ۶ (معادله پنمن- مونتیث فائو)، دقیق‌تر از برآورد تبخیر - تعرق گیاه مرجع با معادله ۵۲ می‌باشد. این دقت حاصل گنجاندن ویژگی‌های اقلیمی (نظیر سرعت باد بالا یا پایین) در معادله‌های بکار رفته برای استخراج معادله ۶ می‌باشد.

معادله ۵۲، تحت شرایطی که سرعت باد (در ارتفاع دو متری) بالا (بیشتر از ۳ متر بر ثانیه) بوده، مقدار تبخیر - تعرق مرجع را کمتر برآورد^۱ و تحت شرایطی که رطوبت نسبی بالا باشد، آن را بیشتر برآورد^۲ می‌کند.

1- Underpredict

2-Overpredict

فصل چهارم

تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع

در این فصل، روش تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی یا تشت تبخیر ارائه می‌شود.

روش پنمن - مونتیت فائو به عنوان تنها روش استاندارد برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از داده‌های هواشناسی معرفی می‌شود. مشروح این روش، در فصل دوم و نحوه تعیین تمامی داده‌های مورد نیاز برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع، نیز، در فصل سوم بیان شده است. این فصل، برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع در دوره‌های زمانی متفاوت به طور ساعتی تا ماهانه و حتی در شرایط در دسترس نبودن داده‌های هواشناسی، روش‌هایی را ارائه می‌کند. محاسبه‌های مربوط به تعیین تبخیر - تعرق گیاه مرجع را می‌توان با ماشین حساب، صفحه محاسبه یا رایانه انجام داد. به علاوه، می‌توان آن را از روی مقدار تبخیر از سطح آب، نیز، برآورد کرد. روش بدست آوردن تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از تشت تبخیر و ضرایب موجود برای انواع تشت‌ها در این فصل ارائه شده است.

معادله پنمن - مونتیت

روش استخراج معادله پنمن - مونتیت فائو با استفاده از معادله اصلی پنمن - مونتیت و معادله‌های آئرودینامیک و مقاومت پوشش گیاهی، در فصل دوم (معادله ۶) بیان شده است:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (۶)$$

که در آن:

ET_0 = تبخیر - تعرق مرجع [میلی متر بر روز]،

R_n = تابش خالص در سطح گیاه [مگاژول بر مترمربع بر روز]

G = شار گرمای خاک [مگاژول بر مترمربع بر روز]

T = دمای هوا در ارتفاع دو متری [درجه سلسیوس]،

u_2 = سرعت باد در ارتفاع دو متری [متر بر ثانیه]،

e_s = فشار بخار اشباع [کیلوپاسکال]،

e_a = فشار بخار واقعی [کیلوپاسکال]،

$(e_s - e_a)$ = کمبود فشار بخار اشباع [کیلوپاسکال]،

Δ = شیب منحنی فشار بخار [کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس] و

γ = ضریب ثابت سایکرومتری [کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس] می‌باشند.

معادله پنمن - مونتیت فائو، تبخیر - تعرق سطح مرجع چمن فرضی را تعیین کرده و یک استاندارد برای مقایسه تبخیر - تعرق در دوره‌های متفاوت سال یا در سایر مناطق و ارتباط دادن تبخیر - تعرق گیاهان به یکدیگر را ارائه می‌کند.

روش محاسبه

صفحه مناسبه

تبخیر - تعرق گیاه مرجع را می‌توان با استفاده از صفحه محاسبه که نمونه آن در کادر ۱۱ ارائه شده، برآورد کرد. در این صفحه محاسبه، از جداول پیوست دو برای تعیین برخی پارامترهای اقلیمی استفاده می‌شود. روش کار، شامل مراحل زیر است:

۱- تعیین برخی پارامترهای اقلیمی از روی حداکثر (T_{max}) و حداقل (T_{min}) دمای روزانه هوا، ارتفاع از سطح زمین (Z) و میانگین سرعت باد در ارتفاع دو متری (U_2).

۲- محاسبه کمبود فشار بخار ($e_s - e_a$) که در آن فشار بخار اشباع (e_s) با استفاده از حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا تعیین می‌شود. فشار بخار واقعی (e_a) را می‌توان از روی دمای نقطه شبنم (T_{dew}) یا حداکثر رطوبت نسبی (RH_{max}) و حداقل رطوبت نسبی (RH_{min}) یا، تنها، از حداکثر رطوبت نسبی یا میانگین رطوبت نسبی (RH_{mean}) تعیین کرد.

۳- تعیین تابش خالص (R_n) که برابر تفاضل تابش خالص طول موج کوتاه (R_{ns}) و تابش خالص طول موج بلند (R_{nl}) است. در صفحه محاسبه، از شار گرمای خاک در محاسبه روزانه با توجه به اینکه مقدار شار گرما در این دوره به طور نسبی، پایین بوده، صرف نظر شده است. تابش خالص که بر حسب [مگاژول بر مترمربع بر روز] بیان شده، در معادله پنمن - مونتیت فائو با استفاده از ضریب ۰/۴۰۸ (به عنوان ضریب تبدیل) به میلی‌متر بر روز (یعنی تبخیر معادل) تبدیل شده است.

۴- تبخیر - تعرق گیاه مرجع از ترکیب نتایج مراحل قبل بدست می‌آید.

مثال‌های ۱۷ و ۲۰، نمونه روش استفاده از صفحه گسترده برای انجام محاسبه‌ها هستند.

محاسبه‌ها (رایانه‌ای)

محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع، اغلب، با استفاده از رایانه انجام می‌شود. روش‌های محاسبه تمامی داده‌های مورد نیاز تعیین تبخیر - تعرق مرجع به روش پنمن - مونتیت فائو در فصل سوم بیان و ترتیب مراحل محاسبه‌ها به صورت صفحه گسترده ارائه شده است. در تنظیم یک صفحه گسترده یا برنامه رایانه‌ای برای محاسبه، از روش‌های ارائه شده در کادرهای ۷ (کمبود فشار بخار)، ۹ (تابش فرازمینی و ساعات آفتابی)، ۱۰ (تابش خالص) و ۱۱ (تبخیر - تعرق گیاه مرجع) می‌توان استفاده کرد.

تاکنون، بسته‌های نرم‌افزاری بسیار برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع به روش پنمن - مونتیت فائو ارائه شده‌اند. به عنوان مثال، اطلاعات خروجی برنامه نرم‌افزار CROPWAT که نرم‌افزار فائو برای طراحی و برنامه‌ریزی آبیاری می‌باشد، در شکل ۱۸ ارائه شده است.

محاسبه تبخیر - تعرق مرجع برای دوره‌های مختلف

انتخاب دوره زمانی که تبخیر - تعرق مرجع در آن محاسبه شود، به هدف محاسبه، دقت مورد نظر و دوره زمانی که داده‌های هواشناسی در آن اندازه‌گیری شده‌اند، بستگی دارد.

کادر ۱۱- صفحه گسترده محاسبه تبخیر - تعرق مرجع (پنمن- مونتیت فائو) با استفاده از جدول‌های هواشناسی پیوست دو			
پارامترها			
	T_{max}	$^{\circ}C$	
$T_{mean} = (T_{max} + T_{min}) / 2$	T_{min}	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$
T_{mean}	T_{mean}	$^{\circ}C$	$kPa \ ^{\circ}C^{-1}$
Δ (جدول ۲-۴ از پیوست دو)	T_{mean}	$^{\circ}C$	$kPa \ ^{\circ}C^{-1}$
γ (جدول ۲-۲ از پیوست دو)	Altitude	m	$kPa \ ^{\circ}C^{-1}$
$(1 + 0.34 u_2)$	u_2	ms^{-1}	
$\Delta / [\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)]$			
$\gamma / [\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)]$			
$[900 / (T_{mean} + 273)] u_2$			
کمبود فشار بخار			
T_{max}	T_{max}	$^{\circ}C$	kPa
T_{min}	T_{min}	$^{\circ}C$	kPa
فشاربخار اشباع $e_s = [(e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min}))] / 2$			
e_a با استفاده از دمای نقطه شبنم:			
T_{dew}	T_{dew}	$^{\circ}C$	kPa_a
e_a با استفاده از حداکثر و حداقل رطوبت نسبی			
RH_{max}	RH_{max}	%	kPa
RH_{min}	RH_{min}	%	kPa
e_a متوسط			
e_a با استفاده از حداکثر رطوبت نسبی (اگر RH_{min} دارای خطا باشد، توصیه می‌شود):			
RH_{max}	RH_{max}	%	kPa
e_a با استفاده از میانگین رطوبت نسبی (به دلیل غیرخطی بودن رابطه، کمتر توصیه می‌شود):			
RH_{mean}	RH_{mean}	%	kPa

ادامه کادر ۱۱

kPa	کمبود فشار بخار آب (e _s -e _a)		
تابش			
		درجه	عرض جغرافیایی
MJ m ⁻² day ⁻¹	R _a (جدول ۶-۲)		روز
hours	N (جدول ۷-۲)		ماه
	n/N	ساعت	n
MJ m ⁻² day ⁻¹	اگر داده‌های R _s موجود نباشند: R _s =(0.25+0.50 n/N) R _a		
MJ m ⁻² day ⁻¹	R _{so} = [0.75 + 2 (Altitude) / 100 000] R _a		
	R _s / R _{so}		
MJ m ⁻² day ⁻¹	R _{ns} = 0.77 R _s		
MJ m ⁻² day ⁻¹	σT _{max,K⁴} (جدول ۸-۲)	°C	T _{max}
MJ m ⁻² day ⁻¹	σT _{min,K⁴} (جدول ۸-۲)	°C	T _{min}
MJ m ⁻² day ⁻¹	(σT _{max,K⁴} + σT _{min,K⁴}) / 2		
	(0.34-0.14 √e _a)	kPa	e _a
	(1.35 R _s /R _{so} -0.35)		R _s /R _{so}
MJ m ⁻² day ⁻¹	R _{nl} = (σT _{max,K⁴} + σT _{min,K⁴}) / 2 (0.34 – 0.14√e _a) (1.35R _s / R _{so} – 0.35)		
MJ m ⁻² day ⁻¹	R _n = R _{ns} – R _{nl}		
MJ m ⁻² day ⁻¹	G _{day} (فرض شده)	°C	T _{month}
MJ m ⁻² day ⁻¹	G _{month} = 0.14 (T _{month} – T _{month-1})	°C	T _{month-1}
MJ m ⁻² day ⁻¹	R _n - G		
mm day ⁻¹	0.408 (R _n – G)		
تبخیر تعرق مرجع چمن			
mm day ⁻¹	$\left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \right] [0.408(R_n - G)]$		
mm day ⁻¹	$\left[\frac{\gamma}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \right] \left[\frac{900}{T + 273} \right] u_2 [(e_s - e_a)]$		
mm day ⁻¹	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$		

MONTHLY REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION PENMAN MONTEITH							
Meteostation: CABINDA				Country: Angola			
Altitude: 20 m.				Coordinates: -5.33 South 12.11 East			
Month	MinTemp °C	MaxTemp °C	Humid. %	Wind km/day	Sunshine Hours	Radiation MJ/m ² /day	ET _o -PenMon mm/day
January	22.8	29.6	81	78	4.0	15.7	3.4
February	22.7	30.3	82	69	4.6	16.9	3.7
March	23.0	30.6	80	78	5.1	17.4	3.8
April	23.0	30.2	82	69	5.0	16.4	3.5
May	22.0	28.6	84	69	3.8	13.5	2.9
June	19.2	26.5	81	69	3.3	12.2	2.6
July	17.6	25.1	78	78	3.2	12.3	2.6
August	18.6	25.3	78	78	2.6	12.4	2.6
September	20.5	26.5	78	104	2.0	12.4	2.8
October	22.5	28.0	79	130	2.2	12.9	3.1
November	23.0	28.7	80	104	3.2	14.4	3.3
December	23.0	29.1	82	95	3.8	15.2	3.4
Year	21.5	28.2	80	85	3.6	14.3	3.1

CROPWAT 7.0 Climate file: C:\PROF-P-1\CROPWAT\CROPWAT\CLI\CABINDA.PEN 03/07/98

شکل ۱۸- محاسبه تبخیر - تعرق مرجع با نرم افزار CROPWAT

دوره ده روزه یا ماهانه

علیرغم غیرخطی بودن معادله پنمن - مونتیت و برخی روش های مبتنی بر پارامترهای اقلیمی، می توان از میانگین ده روزه یا ماهانه داده های هواشناسی برای محاسبه میانگین تبخیر - تعرق مرجع ده روزه یا ماهانه استفاده کرد. تبخیر - تعرق روزانه که بر پایه میانگین روزانه داده های هواشناسی در ماه مورد نظر محاسبه می شود، با میانگین تبخیر - تعرق مرجع روزانه، که با استفاده از میانگین داده های هواشناسی آن ماه محاسبه شده است، همخوانی دارد.

داده های هواشناسی شامل موارد زیر می باشند:

- دمای هوا: میانگین حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا در دوره ده روزه یا ماهانه
- رطوبت هوا: میانگین فشار بخار واقعی روزانه در دوره ده روزه یا ماهانه با استفاده از داده های سایکرومتری، نقطه شبنم یا رطوبت نسبی
- سرعت باد: میانگین داده های سرعت باد روزانه اندازه گیری شده در ارتفاع دو متری در دوره ده روزه یا ماهانه
- تابش: میانگین تابش خالص روزانه در دوره ده روزه یا ماهانه که با استفاده از میانگین ده روزه یا ماهانه تابش طول موج کوتاه اندازه گیری شده یا میانگین ساعات آفتابی واقعی روزانه (n) محاسبه می شود. تابش فرازمینی (R_a) و حداکثر ساعات آفتابی (N) برای یک روز مشخص از ماه را می توان با استفاده از معادله های ۲۱ و ۳۴ محاسبه یا از جداول ۲-۵ و ۲-۶ پیوست دو، تعیین کرد.

هنگامی که خاک در حال گرم شدن (بهار) یا سرد شدن (پاییز) است، مقدار شار گرمای خاک (G) در دوره ماهانه، ممکن است، در مقایسه با میانگین ماهانه تابش خالص قابل ملاحظه باشد. در این موارد، شار گرمای خاک قابل صرف نظر کردن نیست و باید با استفاده از میانگین دمای هوا ماه‌های پیش و پس از ماه مورد نظر، تعیین شود. روش محاسبه (معادله‌های ۴۳ و ۴۴) در فصل سوم ارائه شده است.

مثال ۱۷- تعیین تبخیر - تفرق مرجع برای میانگین داده‌های ماهانه	
میانگین داده‌های هواشناسی ماهانه در بانکوک (تایلند) واقع در ۱۳ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی و ارتفاع دو متر در ماه آوریل می‌باشد:	
- میانگین حداکثر دمای روزانه (T_{max})، ۳۴/۸ درجه سلسیوس	- میانگین حداقل دمای روزانه (T_{min})، ۲۵/۶ درجه سلسیوس
- میانگین فشار بخار واقعی روزانه (e_a)، ۲/۸۵ کیلوپاسکال	- میانگین سرعت باد روزانه (u_2)، ۲ متر بر ثانیه
- میانگین ساعات آفتابی واقعی روزانه (n)، ۸/۵ ساعت بر روز	- میانگین دما ماه آوریل ($T_{month,i}$)، ۳۰/۲ درجه سلسیوس
- میانگین دما ماه مارس ($T_{month,i-1}$)، ۲۹/۲ درجه سلسیوس	
تعیین تبخیر - تفرق مرجع مطابق با مراحل کادر ۱۱ (صفحه محاسبه تبخیر - تفرق مرجع)	
پارامترها	
$T_{mean} = [(T_{max} = 34/8) + (T_{min} = 25/6)] = 30/2 \text{ } ^\circ\text{C}$	از جدول ۲-۴ (پیوست دو)
$\Delta = 0/246 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$	یا معادله ۱۳
Atitude = ۲	از جدول ۲-۱ و ۲-۲ (پیوست دو) یا معادله ۷ و معادله ۸
$P = 10/3 \text{ kPa}$	
$\gamma = 0/0674 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$	
$(1 + 0.34u_2) = 1.68$	
$\frac{\Delta}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} = \frac{0/246}{[0/246 + 0/0674 \times (1/68)]} = 0/685$	
$\frac{\gamma}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} = \frac{0/0667}{[0/246 + 0/0674 \times (1/68)]} = 0/188$	
$\frac{900}{(30/2 + 273) \times 1/68} = 5/94$	

ادامه مثال ۱۷

کمبود فشار بخار	
$T_{\max} = ۳۴/۸^{\circ}\text{C}$ $e^{\circ}(T_{\max}) = ۵/۵۶ \text{ kPa}$	از جدول ۲-۳ یا معادله ۱۱ (پیوست دو) یا:
$T_{\min} = ۲۵/۶^{\circ}\text{C}$ $e^{\circ}(T_{\min}) = ۳/۲۸ \text{ kPa}$	از جدول ۲-۳ یا معادله ۱۱ (پیوست دو) یا:
$e_s = \frac{(۵/۵۶ + ۳/۲۸)}{۲} = ۴/۴۲ \text{ kPa}$ $e_a = ۲/۸۵ \text{ kPa}$	داده شده
$(e_s - e_a) = (۴/۴۲ - ۲/۸۵) = ۱/۵۷ \text{ kPa}$	-
تابش (برای ماه آوریل)	
$J = ۱۰۵$	برای ۱۵ آوریل:
$\text{Latitude} = (۱۳ + \frac{۴۴}{۶۰}) = ۱۳/۷۳^{\circ}\text{N}$	
$R_a = ۳۸/۰۶ \text{ MJ m}^{-۲}\text{day}^{-۱}$	از جدول ۲-۵ یا ۲-۶ پیوست دو یا از معادله ۲۱ (فصل سوم):
$N = ۱۲/۳۱ \text{ hours}$	N از جدول ۲-۷ (پیوست دو) یا معادله ۳۴ (فصل سوم):
$\frac{n}{N} = (\frac{۸/۵}{۱۲/۳۱}) = ۰/۶۹$ $R_s = [۰/۲۵ + ۰/۵ \times (۰/۶۹)] \times ۳۸/۰۶ = ۲۲/۶۵ \text{ MJ m}^{-۲}\text{day}^{-۱}$ $R_{so} = (\frac{۰/۷۵ + ۲ \times (۲)}{۱۰ \dots}) \times ۳۸/۰۶ = ۲۸/۵۴ \text{ MJ m}^{-۲}\text{day}^{-۱}$ $\frac{R_s}{R_{so}} = (\frac{۲۲/۶۵}{۲۸/۵۴}) = ۰/۷۹$ $R_{ns} = ۰/۷۷ \times (۲۲/۶۵) = ۱۷/۴۴ \text{ MJ m}^{-۲}\text{day}^{-۱}$	
$T_{\max} = ۳۴/۸^{\circ}\text{C}$ $\sigma T_{\max, K}^4 = ۴۴/۱۰ \text{ MJ m}^{-۲}\text{day}^{-۱}$	از جدول ۲-۸ (پیوست دو)
$T_{\min} = ۲۵/۶^{\circ}\text{C}$ $\sigma T_{\min, K}^4 = ۳۹/۰۶ \text{ MJ m}^{-۲}\text{day}^{-۱}$	از جدول ۲-۸ (پیوست دو)
$\frac{(\sigma T_{\max, K}^4 + \sigma T_{\min, K}^4)}{۲} = \frac{(۴۴/۱۰ + ۳۹/۰۶)}{۲} = ۴۱/۵۸ \text{ MJ m}^{-۲}\text{day}^{-۱}$	
$e_a = ۲/۸۵ \text{ kPa}$	برای:
$(۰/۳۴ - ۰/۱۴ \sqrt{e_a}) = ۰/۱۰$	پس:
$\frac{R_s}{R_{so}} = ۰/۷۹$	برای:
$(۱/۳۵ \times \frac{R_s}{R_{so}} - ۰/۳۵) = ۰/۷۲$	پس:

ادامه مثال ۱۷

$R_{nl} = 41/58 \times (0/10) \times 0/72 = 2/11 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	-
$R_n = (17/44 - 2/11) = 14/33 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	-
$G = 0/14 \times (30/2 - 29/2) = 0/14 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	-
$(R_n - G) = (14/33 - 0/14) = 14/19 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	-
$0/408 \times (R_n - G) = 5/79 \text{ mm day}^{-1}$	-
تبخیر - تعرق مرجع چمن	
$\frac{0.408(R_n - G)\Delta}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} =$	-
$(5/79) \times 0/685 = 3/97 \text{ mm day}^{-1}$	-
$\frac{900u_2}{(T + 273)} (e_s - e_a) \times \frac{\gamma}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} =$	-
$5/94 \times (1/57) \times 0/188 = 1/75 \text{ mm day}^{-1}$	-
$ET_0 = (3/97 + 1/75) = 5/72 \text{ mm day}^{-1}$	-
تبخیر - تعرق مرجع چمن ۵/۷ میلی متر بر روز می باشد.	

دوره روزانه

محاسبه تبخیر - تعرق با استفاده از معادله پنمن - مانتیث در دوره های زمانی روزانه (۲۴ ساعت)، به طور معمول، نتایج دقیقی را ارائه می دهد. داده های هواشناسی مورد نیاز شامل:

- دمای هوا: حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا،
- رطوبت هوا: میانگین فشار واقعی بخار روزانه با استفاده از داده های سایکرومتری، دمای نقطه شبنم یا رطوبت نسبی،
- سرعت باد: میانگین سرعت باد روزانه، (اندازه گیری شده در ارتفاع دو متری)،
- تابش: تابش خالص اندازه گیری یا محاسبه شده با استفاده از تابش خورشیدی و تابش طول موج بلند یا ساعات آفتابی واقعی. تابش فرازمینی و حداکثر ساعت آفتابی برای یک روز مشخص از ماه باید با معادله های ۲۱ و ۳۴ محاسبه شوند. مقدار شار گرمای خاک زیرین چمن مرجع در طول روز، به طور نسبی، کم بوده و برای دوره های زمانی ۲۴ ساعت (روزانه) قابل صرف نظر است.

مثال ۱۸- تعیین تبخیر - تعرق مرجع برای داده‌های روزانه	
در تاریخ ششم ژوئیه در بروکسل (بلژیک) واقع در ۴۸° و ۵۰° شمالی و ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح دریا داده‌های هواشناسی زیر اندازه‌گیری شده است:	
- حداکثر دمای هوا (T_{max})، ۲۱/۵ درجه سلسیوس - حداقل دمای هوا (T_{min})، ۱۲/۳ درجه سلسیوس - حداکثر رطوبت نسبی (RH_{max})، ۸۴ درصد - حداقل رطوبت نسبی (RH_{min})، ۶۳ درصد - سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (u_{10})، ۱۰ کیلومتر بر ساعت - ساعات آفتابی واقعی (n)، ۹/۲۵ ساعت	
تبدیل سرعت باد	
$u_1 = 2/78 \text{ ms}^{-1}$ $u_2 = 0/748 \times (2/78) = 2/078 \text{ ms}^{-1}$	سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر: سرعت باد در ارتفاع دو متری با استفاده از معادله ۴۷ (فصل سوم):
پارامترها	
$z = 100$ متر $P = 100/1 \text{ kPa}$	برای ارتفاع: از معادله ۷ (فصل سوم):
$T_{mean} = \frac{(21/5 + 12/3)}{2} = 16/9 \text{ } ^\circ\text{C}$	
$T_{mean} = 16/9 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\Delta = 0/122 \text{ kPa}$	برای میانگین دمای هوا: از معادله ۱۳ (فصل سوم):
$P = 100/1 \text{ kPa}$ $\gamma = 0/0666 \text{ kPa / } ^\circ\text{C}$	برای فشار اتمسفر: از معادله ۸ (فصل سوم):
$(1 + 0.34u_2) = 1.71$	
$\frac{\Delta}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} = \frac{0/122}{[(0/122 + 0/0666 \times (1/71))]} = 0/518$	
$\frac{\gamma}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} = \frac{0/0666}{[0/122 + 0/0666 \times (1/71)]} = 0/282$	
$\frac{900}{(T_{mean} + 273)u_2} = 6/450$	
کمبود فشار بخار	
$T_{max} = 21/5 \text{ } ^\circ\text{C}$ $e^\circ(T_{max}) = 2/564 \text{ kPa}$	برای حداکثر دمای هوا: از معادله ۱۱ (فصل سوم):
$T_{min} = 12/3 \text{ } ^\circ\text{C}$ $e^\circ(T_{min}) = 1/431 \text{ kPa}$	برای حداقل دمای هوا: از معادله ۱۱ (فصل سوم):

ادامه مثال ۱۸-

$e_s = (2/564 + 1/431) = 1/997 \text{ kPa}$	
$RH_{\max} = \%.84$ $RH_{\min} = \%.63$	داده‌های رطوبت نسبی:
$e_a = \frac{[1/43 \times (0/84) + 2/564 \times (0/63)]}{2} = 1/409 \text{ kPa}$	از معادله ۱۷ (فصل سوم):
$(e_s - e_a) = (1/997 - 1/409) = 0/588 \text{ kPa}$	
تابش	
month=۷ day=۶ J=۱۸۷	از جدول ۲-۵ (پیوست دو):
Latitude = $50^\circ, 48' = 50/8^\circ \text{ N}$ J=۱۸۷	از معادله ۲۱ (فصل سوم) برای:
$R_a = 41/09 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	
Latitude = $50^\circ, 48' = 50/8^\circ \text{ N}$ J=۱۸۷ N=۱۶/۱ ساعت	از معادله ۳۴ (فصل سوم) برای:
$\frac{n}{N} = \frac{9/25}{16/3} = 0/57$	
$R_s = [0/25 + 0/50 \times (0/57)] \times 41/09 = 22/07 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	از معادله ۳۵ (فصل سوم):
$R_{so} = \left(\frac{0/75 + 2 \times (100)}{10000} \right) \times 41/09 = 30/90 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	از معادله ۳۷ (فصل سوم):
$\frac{R_s}{R_{so}} = 0/71$	
$R_{ns} = 0/77 \times (22/07) = 17/00 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	از معادله ۳۸ (فصل سوم):
$T_{\max} = 21/5^\circ \text{ C}$ $T_{\max, K} = 21/5 + 273/16 = 294/7 \text{ K}$ $\sigma T_{\max, K}^4 = 26/96 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $T_{\min} = 12/3^\circ \text{ C}$ $T_{\min, K} = 12/3 + 273/16 = 285/5 \text{ K}$ $\sigma T_{\min, K}^4 = 32/56 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $\frac{(\sigma T_{\max, K}^4 + \sigma T_{\min, K}^4)}{2} = \frac{(26/96 + 32/56)}{2} = 34/76 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	برای: پس: برای: پس:
$(0/34 - 0/14 \sqrt{e_a}) = 0/17$ $(1/35 \left(\frac{R_s}{R_{so}} \right) - 0/35) = 0/61$	

ادامه مثال ۱۸-

$R_{nl} = 34/76 \times (0/17) \times 0/61 = 3/71 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	از معادله ۳۹ (فصل سوم):
$R_n = (17/00 - 3/71) = 13/28 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	از معادله ۴۰ (فصل سوم):
$G = 0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	از معادله ۴۲ (فصل سوم):
$(R_n - G) = (13/28 - 0) = 13/28 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	-
$0.408(R_n - G) = 5/42 \text{ mm day}^{-1}$	-
تبخیر - تعرق مرجع چمن	
$\frac{0.408(R_n - G)\Delta}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} = 2/81 \text{ mm day}^{-1}$	-
$\frac{900}{(T + 273)u_2} (e_s - e_a) \frac{\gamma}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} = 1/07 \text{ mm day}^{-1}$	-
$ET_0 (\text{Eq.6}) = 2/81 + 1/07 = 3/88 \approx 3/9 \text{ mm day}^{-1}$	-
تبخیر - تعرق مرجع چمن، ۳/۹ میلی متر بر روز است.	

دوره ساعتی

در مناطقی که سرعت باد و دمای نقطه شبنم یا میزان ابرناکی در طول روز به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند، محاسبه ET_0 به طور ساعتی، به طور معمول، بهتر از روزانه می‌باشد. به دلیل تغییر هوا، توان تبخیرکنندگی محیط در طول برخی دوره‌های روز، ممکن است، با میانگین روزانه آن متفاوت شده و بنابراین موجب خطا در محاسبه‌ها شود. هر چند، در اغلب شرایط، نتایج معادله پنمن - مونتیت فائو بر پایه داده‌های روزانه دقیق است.

با پیشرفت علم الکترونیک، داده‌های هواشناسی در ایستگاه‌های هواشناسی خودکار، به طور ساعتی یا لحظه‌ای گزارش می‌شود. بنابراین، در شرایطی که محاسبه‌ها با رایانه انجام می‌شود، نتایج معادله پنمن - مونتیت فائو برای دوره زمانی ساعتی، نیز، می‌تواند دقیق باشد. هنگام به کارگیری معادله پنمن - مونتیت فائو برای دوره زمانی ساعتی یا کوتاه‌تر، باید معادله و برخی روش‌های محاسبه داده‌های هواشناسی اصلاح شوند. معادله پنمن - مونتیت فائو برای تعیین تبخیر - تعرق مرجع به طور ساعتی به صورت زیر است:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2 (e^\circ(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (53)$$

که در آن:

 ET_0 = تبخیر - تعرق مرجع [میلی متر بر ساعت]، R_n = تابش خالص در سطح چمن [مگاژول بر مترمربع بر ساعت] (معادله ۴۰)،

G = شار گرمای خاک [مگاژول بر مترمربع بر ساعت] (معادله‌های ۴۵ و ۴۶)،
 T_{hr} = میانگین ساعتی دمای هوا [درجه سلسیوس]،
 Δ = شیب منحنی فشار بخار اشباع در دمای T_{hr} [کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس] (معادله ۱۳)،
 γ = ضریب ثابت سایکرومتری [کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس] (معادله ۸)،
 $e^o(T_{hr})$ = فشار بخار اشباع در دمای T_{hr} [کیلوپاسکال] (معادله ۱۱)،
 e_a = میانگین ساعتی فشار بخار واقعی [کیلوپاسکال] (معادله ۵۴) و
 u_2 = میانگین ساعتی سرعت باد [متر بر ثانیه] می‌باشند.
 فشار بخار واقعی از روی اندازه‌گیری‌های رطوبت نسبی، به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$e_a = e^o(T_{hr}) \frac{RH_{hr}}{100} \quad (54)$$

که در آن:

e_a = میانگین ساعتی فشار بخار واقعی [کیلوپاسکال]،
 $e^o(T_{hr})$ = فشار بخار اشباع در دمای T_{hr} [کیلوپاسکال] (معادله ۱۱) و
 RH_{hr} = میانگین ساعتی رطوبت نسبی [درصد] می‌باشند.
 تابش خالص، به صورت تفاضل تابش طول موج کوتاه و بلند خالص در دوره‌های زمانی ساعتی محاسبه می‌شود. در نتیجه:

- اگر محاسبه تابش طول موج کوتاه و بلند خالص مورد نیاز باشد، باید از تابش فرازمینی برای دوره ساعتی (معادله ۲۸) استفاده شود.
- در محاسبه مقدار تابش طول موج بلند خالص با استفاده از معادله ۳۹، عبارت $\frac{\sigma T_{max,K}^4 + \sigma T_{min,K}^4}{2}$ با $\sigma T_{hr,K}^4$ جایگزین شده و ضریب ثابت استفان - بولتزمن به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\sigma = \left(\frac{4.903}{4}\right)10^{-9} = 2.043 \times 10^{-10} \text{ MJ m}^{-2} \text{ hour}^{-1}$$

از آنجا که، نسبت $\frac{R_s}{R_{so}}$ برای نمایش میزان ابرناکی هوا بکار می‌رود، هنگام محاسبه تابش طول موج بلند خالص (R_{nl}) ساعتی در شب، $\frac{R_s}{R_{so}}$ نسبت محاسبه شده برای دوره زمانی ۲ تا ۳ ساعت قبل از غروب آفتاب و (قبل از کم شدن زاویه خورشید)، فرض می‌شود. این فرض، به طور معمول، تقریب مناسبی از ابرناکی در شب را ارائه می‌کند. در محاسبه R_a ، دوره ۲ تا ۳ ساعت قبل از غروب را می‌توان دوره‌ای فرض کرد که در آن ω (محاسبه شده با معادله ۳۱) در محدوده $(\omega_s - 0.79) \leq \omega \leq (\omega_s - 0.52)$ قرار دارد (ω_s با معادله ۲۵ محاسبه می‌شود). به عنوان یک تقریب، می‌توان نسبت $\frac{R_s}{R_{so}}$ را در طول شب برای اقلیم‌های مرطوب و نیمه مرطوب ۰/۴ تا ۰/۶ و برای اقلیم‌های خشک و نیمه خشک ۰/۷ تا ۰/۸ فرض کرد. مقدار ۰/۳ هوای به طور کامل ابری را نشان می‌دهد.

تعیین شار گرمای ساعتی خاک مهم بوده و مورد نیاز است که با استفاده از معادله‌های ۴۵ و ۴۶ محاسبه می‌شود.

داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل:

- دمای هوا: میانگین ساعتی دما (T_{hr}),
 - رطوبت هوا: میانگین ساعتی رطوبت نسبی (RH_{hr}),
 - سرعت باد: میانگین ساعتی سرعت باد در ارتفاع دو متری و
 - تابش: کل تابش طول موج کوتاه (R_s) یا خالص (R_n) ساعتی.
- برای یک رویه استاندارد، در معادله ۵۳، از یک مقاومت سطحی ثابت (I_s) ۷۰ ثانیه بر متر در تمامی دوره‌های زمانی استفاده می‌شود. این فرض، ممکن است، موجب برآورد کمتر از واقع تبخیر - تعرق مرجع ساعتی در برخی اوقات روز، در هنگامی که مقاومت سطحی واقعی متفاوت با آن است، گردد. هنگامی که مقاومت سطحی واقعی بالاتر باشد، مقاومت ثابت، ممکن است، موجب برخی برآورد بیشتر از واقع تبخیر - تعرق مرجع ساعتی در عصر شود. هر چند، در تعیین تبخیر - تعرق روزانه، با جمع تبخیر - تعرق مرجع ساعتی محاسبه شده با معادله ۵۳، اختلاف‌ها حذف می‌شوند و به طور معمول، مقادیر تبخیر - تعرق مرجع که به صورت میانگین روزانه یا مجموع ساعت‌های یک روز محاسبه می‌شوند، همخوانی دارند. در برآورد دقیق تبخیر - تعرق مرجع به طور ساعتی، ممکن است استفاده از توابع پایداری آئروپدینامیک و اصلاح مقاومت سطحی از روی مقدار تابش، رطوبت و دما ضروری باشد. به طور معمول، کاربرد این توابع اصلاحی هنگامی که ET_0 روزانه از مجموع ET_0 ‌های ساعتی بدست می‌آید، مورد نیاز نبوده و بنابراین، در اینجا بیان نمی‌شوند.

مثال ۱۹- تعیین تبخیر - تعرق مرجع برای داده‌های ساعتی				
در روز اول ماه اکتبر، در شهر N'Diaya (سنگال) واقع در عرض ۱۶ درجه و ۱۳ دقیقه شمالی و طول ۱۶ درجه و ۱۵ دقیقه غربی و ارتفاع ۸ متری از سطح دریا میانگین داده‌های اقلیمی بین ساعت‌های ۲ تا ۳ و ۱۴ تا ۱۵ اندازه‌گیری شده است. در فقدان ضرایب واسنجی شده، از مقادیر توصیه شده a_s و b_s (معادله ۳۵، فرمول انگستروم) و برای ضرایب تابش طول موج بلند خالص از (معادله ۳۹) استفاده می‌شود.				
واحد	ساعت ۱۴/۰۰ تا ۱۵/۰۰	ساعت ۲/۰۰ تا ۳/۰۰	داده‌های اقلیمی اندازه‌گیری شده	
°C	۳۸	۲۸	میانگین ساعتی دما (T_{hr})	
%	۵۲	۹۰	میانگین ساعتی رطوبت نسبی (RH_{hr})	
ms ⁻¹	۳/۳	۱/۹	میانگین ساعتی سرعت باد (u_2)	
MJ m ⁻² hour ⁻¹	۲/۴۵۰	-	تابش کل خورشیدی R_s	
			پارامترها	
kPa °C ⁻¹	۰/۳۵۸	۰/۲۲۰	Δ	از معادله ۱۳ (فصل سوم):
kPa °C ⁻¹	۰/۰۶۷۳	۰/۰۶۷۳	γ	از معادله ۸ (فصل سوم):
			کمبود فشار بخار	
kPa	۶/۶۲۵	۳/۷۸۰	$e^{\circ}(T)$	از معادله ۱۱ (فصل سوم):
kPa	۳/۴۴۵	۳/۴۰۲	e_a	از معادله ۵۴ (فصل چهارم):
kPa	۳/۱۸۰	۰/۳۷۸	$e_s - e_a$	-

ادامه مثال ۱۹

واحد	ساعت ۱۴/۰۰ تا ۱۵/۰۰	ساعت ۲/۰۰ تا ۳/۰۰	تابش فرازمینی
-	$J = 274$		از جدول ۲-۵ (پیوست دو) برای اول اکتبر:
rad	$\varphi = \frac{\pi}{180} \times (16/22) = 0.283$		از معادله ۲۲ (فصل سوم):
-	$d_T = 1/0001$		از معادله ۲۳ (فصل سوم):
rad	$\delta = -0.753$		از معادله ۲۴ (فصل سوم):
-	$b = 3/3315$		از معادله ۳۳ (فصل سوم):
hour	$S_C = 0.1889$		از معادله ۳۲ (فصل سوم):
degrees	$L_Z = 15$		
degrees	$L_m = 16/25$		
hour	۱۴/۵	۲/۵	t
rad	۰/۶۸۲	-۲/۴۶	ω
hour	۱	۱	t_1
rad	۰/۵۵۱۲	-	ω_1
rad	۰/۸۱۳۰	-	ω_2
$MJ m^{-2} hour^{-1}$	۳/۵۴۳	۰	R_a
			از معادله ۲۸ (فصل سوم):
			تابش
$MJ m^{-2} hour^{-1}$	۲/۴۵۰	۰	R_s
$MJ m^{-2} hour^{-1}$	۲/۶۵۸	۰	R_{so}
$MJ m^{-2} hour^{-1}$	۱/۸۸۷	۰	R_{ns}
$MJ m^{-2} hour^{-1}$	۱/۹۱۵	۱/۶۸۱	σT_K^4
-	۰/۰۸۰	۰/۰۸۲	$(0.34-0.14 \sqrt{e_a})$
-	۰/۹۲۲	۰/۸ (فرض شده)	$\frac{R_s}{R_{so}}$
-	۰/۸۹۴	۰/۷۳۰	$(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35)$
$MJ m^{-2} hour^{-1}$	۰/۱۳۷	۰/۱۰۰	R_{nl}
$MJ m^{-2} hour^{-1}$	۱/۷۴۹	-۰/۱۰۰	R_n
$MJ m^{-2} hour^{-1}$	۰/۱۷۵	-۰/۰۵۰	G
$MJ m^{-2} hour^{-1}$	۱/۵۷۴	-۰/۰۵۰	$(R_n - G)$
$mm hour^{-1}$	۰/۶۴۲	-۰/۰۲۰	$0.408(R_n - G)$
			از معادله ۴۵ و ۴۶ (فصل دوم):

ادامه مثال ۱۹

تبخیر - تعرق مرجع چمن				
mm hour ⁻¹	۰/۴۶	-۰/۰۱	$\frac{0.408(R_n - G)}{\Delta} = \frac{37}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2) (T + 273)u_2(e_s - e_a)]}$	از معادله ۵۳ (فصل چهارم):
mm hour ⁻¹	۰/۱۷	۰/۰۱	$\frac{\gamma}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]}$	
mm hour ⁻¹	۰/۶۳	۰/۰۰	ET _o	
تبخیر - تعرق مرجع چمن بین ساعات ۲ و ۳ برابر صفر و بین ساعات ۱۴ و ۱۵ برابر ۰/۶۳ میلی متر بر ساعت می باشد.				

روش محاسبه هنگام غیرموجود بودن داده ها

داده های هواشناسی مورد نیاز برای برآورد تبخیر - تعرق مرجع به پنمن - مونتیث فائو شامل دمای هوا، رطوبت هوا، سرعت باد و تابش می باشد. چنانچه، بعضی از این داده ها در دسترس نبوده یا قابل محاسبه نباشند، به طور اکید، توصیه می شود داده های غیرموجود با یکی از روش های ارائه شده در فصل سوم برآورد شده و پس از آن، با استفاده از روش پنمن - مونتیث فائو محاسبه شود. بکارگیری روش های دیگر برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع که از داده های هواشناسی کمتری استفاده می کنند، توصیه نمی شود.

برآورد تبخیر - تعرق مرجع ماهانه با معادله پنمن - مونتیث فائو برای حالتی که مجموعه داده های شامل حداکثر و حداقل دمای هوا بوده، در مثال ۲۰ ارائه شده است. روش های ارائه شده در فصل سوم برای برآورد داده های غیرموجود رطوبت، تابش و سرعت باد در منطقه باید از طریق مقایسه تبخیر - تعرق مرجع محاسبه شده با استفاده از مجموعه داده های کامل و ناکامل (به صورت حذف عمدی برخی داده ها توسط کاربر) ایستگاه های هواشناسی دارای داده های کامل، ارزیابی و تایید شوند.

مثال ۲۰- تعیین تبخیر - تعرق مرجع در شرایط غیرموجود بودن داده ها	
میانگین حداکثر و حداقل دمای روزانه هوا در ماه ژوئیه در ایستگاهی نزدیک شهر لیون فرانسه واقع در عرض جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴۳ دقیقه شمالی با ارتفاع ۲۰۰ متر ارائه شده و داده های اقلیمی دیگری ثبت نشده است.	
$T_{\max} = ۲۶/۶^{\circ}\text{C}$	
$T_{\min} = ۱۴/۸^{\circ}\text{C}$	
تعیین برپایه کادر ۱۱ (برگ محاسبه تبخیر - تعرق مرجع)	
برآورد سرعت باد:	
از عدد ۲ متر بر ثانیه به عنوان یک برآورد اولیه استفاده می شود. به دلیل ارتفاع نسبتاً کم گیاه مرجع (۰/۱۲ متر) و وجود u ₂ در صورت و مخرج کسر معادله پنمن - مونتیث فائو، مقدار تبخیر - تعرق مرجع در محدوده تغییر عادی سرعت باد، به این عامل حساس نمی باشد.	
پارامترها	
$T_{\text{mean}} = \frac{(۲۶/۶ + ۱۴/۸)}{۲} = ۲۰/۷^{\circ}\text{C}$	

ادامه مثال ۲۰

$T_{\text{mean}} = ۲۰/۷^{\circ}\text{C}$ $\Delta = ۰/۱۵ \text{ kPa}/^{\circ}\text{C}$	از جدول ۲-۴ (پیوست دو) یا معادله ۱۳ (فصل سوم):
Altitude = ۲۰۰ m	برای ارتفاع:
$\gamma = ۰/۰۶۶ \text{ kPa}/^{\circ}\text{C}$ $(1 + 0.34u_2) = (1 + ۰/۳۴ \times (۲)) = ۱/۶۸$ $\frac{\Delta}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} = \frac{۰/۱۵۰}{[۰/۱۵۰ + ۰/۰۶۶ \times (۱/۶۸)]} = ۰/۵۷۶$ $\frac{\gamma}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} = \frac{۰/۰۶۵۸}{[۰/۱۵۰ + ۰/۰۶۶ \times (۱/۶۸)]} = ۰/۲۵۲$ $\frac{900}{(T_{\text{mean}} + 273)u_2} = ۶/۱۳$	از جدول ۲-۲ (پیوست دو) یا معادله ۸ (فصل سوم):
برآورد داده‌های رطوبت:	
$T_{\text{dew}} \approx T_{\text{min}} = ۱۴/۸^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{dew}} = ۱۴/۸^{\circ}\text{C}$ $e_a = ۱/۶۸ \text{ kPa}$	با این فرض که معادله ۴۸ (فصل سوم): پس: از معادله ۱۴ (فصل سوم) یا جدول ۲-۳ (پیوست دو):
$T_{\text{max}} = ۲۶/۶^{\circ}\text{C}$ $e^{\circ}(T_{\text{max}}) = ۳/۴۸ \text{ kPa}$	پس: از جدول ۲-۳ (پیوست سه) یا معادله ۱۱ (فصل سوم):
$T_{\text{min}} = ۱۴/۸^{\circ}\text{C}$ $e^{\circ}(T_{\text{min}}) = ۱/۶۸ \text{ kPa}$	پس: از جدول ۲-۳ (پیوست سه) یا معادله ۱۱ (فصل سوم):
$e_s = \frac{(۳/۴۸ + ۱/۶۸)}{۲} = ۲/۵۸ \text{ kPa}$ $(e_s - e_a) = (۲/۵۸ - ۱/۶۸) = ۰/۹۰ \text{ kPa}$	-
$RH_{\text{max}} = \frac{۱۰ \cdot e_a}{e^{\circ}(T_{\text{min}})} = ۱۰۰$ $RH_{\text{min}} = \frac{۱۰ \cdot e_a}{e^{\circ}(T_{\text{max}})} = ۱۰۰ \times \left(\frac{۱/۶۸}{۳/۴۸}\right) = ۴۸$ $RH_{\text{mean}} = \frac{(RH_{\text{max}} + RH_{\text{min}})}{۲} = ۷۴$	پس: - -
برآورد داده‌های تابش:	
R_s را می‌توان از روی تفاوت T_{min} و T_{max} تعیین کرد:	
$R_s = ۰/۱۶ \sqrt{(۲۶/۶ - ۱۴/۸)} R_a \text{ MJ m}^{-۲} \text{ day}^{-۱}$ $R_s = ۰/۵۵ R_a \text{ MJ m}^{-۲} \text{ day}^{-۱}$	از معادله ۵۰ (فصل سوم): -
J=۱۹۶	جدول ۲-۶ (پیوست دو) یا معادله ۲۱ (فصل سوم) برای روز ۱۵
Latitude = ۴۵°۴۳' N = ۴۵/۷۲° N	ژئوئیه و عرض جغرافیایی:
$R_a = ۴۰/۵۵ \text{ MJ m}^{-۲} \text{ day}^{-۱}$	داریم:

ادامه مثال ۲۰

$R_s = 0.55 R_a = 0.55 \times (40/55) = 22/29 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $R_{so} = \left(\frac{0.75 + 2 \times (200)}{10000} \right) 40/55 = 30/58 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $\frac{R_s}{R_{so}} = 0.73$ $R_{ns} = 0.77 \times (22/29) = 17/16 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	
$T_{\max} = 26/6^\circ \text{C}$ $T_{\max, K} = 26/6 + 273/16 = 299/16 \text{ K}$ $\sigma T_{\max, K}^4 = 29/59 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $T_{\min} = 14/8^\circ \text{C}$ $T_{\min, K} = 14/8 + 273/16 = 287/96 \text{ K}$ $\sigma T_{\min, K}^4 = 22/71 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $\frac{(\sigma T_{\min, K}^4 + \sigma T_{\max, K}^4)}{2} = \frac{(29/59 + 22/71)}{2} = 26/65 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	جدول ۲-۸ (پیوست دو) برای: پس: جدول ۲-۸ (پیوست دو)، برای: پس: -
$e_a = 1/68 \text{ kPa}$ $(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) = 0.16$	برای: پس:
$\frac{R_s}{R_{so}} = 0.73$ $(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35) = 0.63$ $R_{nl} = 26/65 \times (0.16) \times 0.63 = 2/68 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $R_n = (17/16 - 2/68) = 13/48 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$	برای: پس: - -
$G = 0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $(R_n - G) = (13/48 - 0) = 13/48 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $0.4 \times (R_n - G) = 5/50 \text{ mm day}^{-1}$	با فرض: - -
تبخیر - تعرق مرجع چمن	
$0.408 \times (R_n - G) \frac{\Delta}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} = 3/17 \text{ mm day}^{-1}$ $\frac{900}{(T + 273)u_2} (e_s - e_a) \frac{\gamma}{[\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)]} = 1/39 \text{ mm day}^{-1}$ $ET_o = (3/17 + 1/39) = 4/56 \text{ mm day}^{-1}$	- - -
با تقریب اولیه سرعت باد، تبخیر - تعرق مرجع چمن ۴/۶ میلی متر بر روز برآورد می شود. چنانچه، سرعت باد ۱ یا ۳ متر بر ثانیه (به جای ۲ متر بر ثانیه) فرض شود، تبخیر - تعرق مرجع به ترتیب ۷ درصد کمتر (یعنی، ۴/۲ میلی متر بر روز) یا ۶ درصد بیشتر (یعنی، ۴/۸ میلی متر بر روز) خواهد بود. در حالی که، معادله هارگریوز (معادله ۵۲) مقدار تبخیر - تعرق مرجع را ۵ میلی متر بر روز برآورد می کند که تفاوت بیشتر خواهد بود.	

روش تشت تبخیر

تشت تبخیر

تبخیر از سطح آب در تشت‌های تبخیر، به سادگی، قابل اندازه‌گیری است. در صورت فقدان بارندگی، مقدار آب تبخیر شده در طول یک دوره (بر حسب میلی‌متر بر روز) معادل کاهش عمق آب در همان دوره است. تشت‌ها، امکان اندازه‌گیری تلفیق اثر تابش، باد، دما و رطوبت منطقه بر تبخیر از سطح آب آزاد را فراهم می‌کنند. گرچه، تبخیر از تشت تحت تأثیر همان عوامل اقلیمی مؤثر بر تعرق گیاه قرار دارد، لیکن، عوامل زیادی سبب تفاوت قابل ملاحظه تلفات آب از سطح آب و گیاه می‌شود. میزان انعکاس تابش خورشیدی از سطح آب تشت کم عمق ممکن است، متفاوت از مقدار فرضی ۰/۲۳ برای سطح مرجع چمن باشد. ذخیره گرما در تشت می‌تواند قابل ملاحظه باشد و سبب افزایش معنی‌دار تبخیر در طول شب شود، در حالی که اغلب گیاهان، تنها، در طول روز دارای تعرق هستند. همچنین، تلاطم، دما و رطوبت هوا در لایه مجاور سطح آب و گیاه متفاوت است. انتقال گرما از لایه‌های تشت بر موازنه انرژی تأثیرگذار می‌باشد. علیرغم تفاوت تبخیر تشت و تبخیر - تعرق سطوح تحت کشت، استفاده از تشت‌ها برای برآورد تبخیر - تعرق گیاه مرجع در طول دوره‌های ده روزه یا طولانی‌تر، می‌تواند معتبر باشد. تبخیر از تشت با یک ضریب تجربی به صورت رابطه زیر به تبخیر - تعرق مرجع مرتبط می‌شود:

$$ET_0 = K_p \cdot E_{pan} \quad (55)$$

که در آن:

ET_0 = تبخیر - تعرق مرجع [میلی متر بر روز]،

K_p = ضریب تشت [بدون واحد]،

E_{pan} = تبخیر تشت [میلی متر بر روز] می‌باشند.

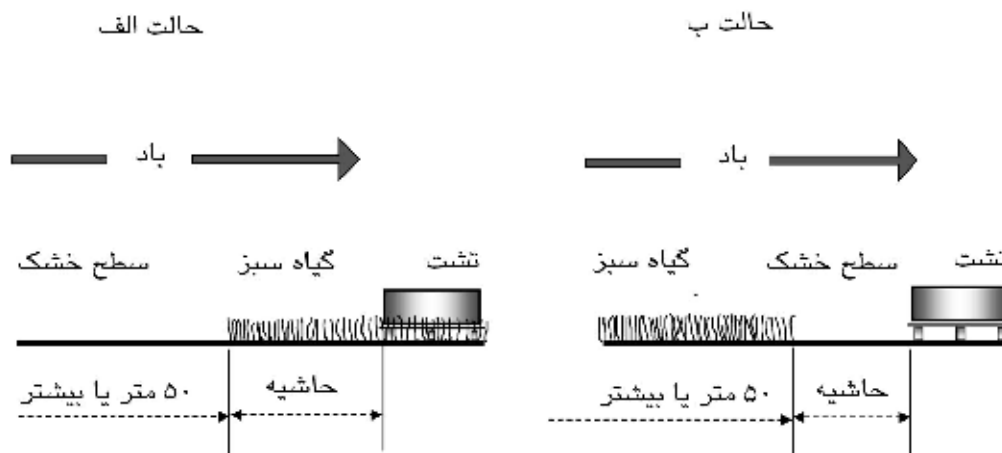
ضریب تشت

انواع تشت‌ها و وضعیت استقرار

تشت‌های تبخیر دارای انواع مختلف است. مشخصات تشت کلاس A و تشت کلرادو فرو رفته در خاک^۱ در کادرهای ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است. از آنجا که رنگ، اندازه و وضعیت استقرار تشت بر تبخیر اندازه‌گیری شده اثر معنی‌داری دارند، لذا ضریب هر تشت (K_s)، ویژگی همان تشت محسوب می‌شود. در انتخاب ضریب مناسب تشت، نه تنها نوع بلکه پوشش زمین ایستگاه محل نصب، وضعیت پیرامون تشت و همچنین، شرایط کلی باد و رطوبت هوا نیز باید در نظر گرفته شوند. علاوه بر وضعیت استقرار

1- Colorado Sunken Pan

تشت، محیط پیرامون آن نیز، در اندازه‌گیری تبخیر اثر دارد. این تأثیر، به ویژه، هنگام استقرار تشت در اراضی تحت آیش اهمیت بیشتری می‌یابد. دو حالت کلی در وضعیت استقرار تشت در نظر گرفته می‌شود: در "حالت الف"، تشت در زمین دارای پوشش گیاهی سبز (چمن) کوتاه ولی محصور با اراضی تحت آیش، و در "حالت ب"، تشت در زمین تحت آیش محصور با پوشش سبز، مستقر است (شکل ۱۹).



شکل ۱۹- دو حالت استقرار تشت

ضریب تشت

ضرایب تشت، به نوع تشت و اندازه و شرایط محیط بالادست (فچ)^۱ در جهت وزش باد بستگی دارند. با وسیع‌تر شدن محیط یکنواخت بالادست تشت‌ها در جهت وزش باد، جریان هوای عبورکننده از روی تشت در تعادل بیشتر با هوای بالادست قرار می‌گیرد. هوای عبورکننده در "حالت الف"، دارای بخار آب بیشتر و گرمای کمتر است. ضرایب تشت کلاس A و کلرادو در شرایط متفاوت پوشش زمین، محیط بالادست و اقلیم در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است. معادله‌های رگرسیون استخراج شده از این جداول، در جدول ۷ ارائه شده است. آنجا که، داده‌های اندازه‌گیری شده از سایر انواع تشت‌ها فرورفته در خاک در دسترس باشد، برای تعمیم K_p ، ابتدا، باید روابط این ارقام با داده‌های تشت کلرادو یا معادله پنمن - مونتیت فائو تعیین شوند. نسبت تبخیر از سایر تشت‌های فرورفته در خاک به تبخیر تشت کلرادو برای شرایط متفاوت در وضعیت استقرار و حاشیه بالادست تشت در جدول ۸ ارائه شده است.

چنانچه داده‌های هواشناسی در دسترس نباشند، سرعت باد u_2 را می‌توان مقدار پیشنهاد شده ۲ متر بر ثانیه در نظر گرفت یا از جدول ۴ برآورد کرد. میانگین رطوبت نسبی می‌تواند از روی دمای هوا و به

$$\text{RH}_{\text{mean}} = 50 \frac{e^{\circ}(T_{\min})}{e^{\circ}T_{\max}} + 50$$

صورت رابطه تقریبی؛ RH_{mean} ، محاسبه شود.

اصلاح ضریب تشت

در وضعیت متفاوت با شرایط جداول، ممکن است تعدیل (اصلاح) ضرایب تشت ضروری باشد. برای مثال، در مناطقی که سطح کشت کم بوده یا تشت‌ها توسط گیاهان بلند محصور شده‌اند، ضریب تشت اصلاح می‌شود. تغییر رنگ تشت به وضعیت غیر استاندارد یا نصب حفاظ‌های توری بر روی آن، می‌تواند بر اندازه‌گیری تبخیر از تشت تأثیر کند. در این شرایط، باید ضریب تشت اصلاح شود.

در مناطق با کشاورزی توسعه نیافته و یا دارای خاک‌های بدون پوشش گیاهی (حالت ب)، مشابه اقلیم بیابانی و نیمه بیابانی، ارقام ضرایب تشت ممکن است، در اقلیم خشک بادخیز تا ۲۰ و در اقلیم معتدل (از نظر باد، دما و رطوبت نسبی)، بین ۵ تا ۱۰ درصد کاهش یابد. کاهش ضریب تشت برای هوای خنک و مرطوب صفر یا ناچیز است.

چنانچه، تشت‌ها در محدوده کوچک مستقر و توسط گیاهان بلند نظیر ذرت با ارتفاع ۲/۵ متر محصور شوند، باید ضریب تشت در اقلیم خشک بادخیز تا ۳۰ درصد و در شرایط آرام و مرطوب تنها، بین ۵ تا ۱۰ درصد افزایش یابند.

رنگ‌آمیزی تشت ممکن است بر مقدار تبخیر از تشت مؤثر باشد. ضرایب تشت برای تشت‌هایی که به طور سالانه رنگ شده یا از جنس استیل می‌باشند، ارائه شده است. رنگ‌آمیزی سفید سطوح داخلی و خارجی تشت، تأثیر اندک بر تبخیر تشت خواهد داشت. لیکن، با رنگ‌آمیزی سیاه ممکن است، تبخیر تا حدود ۱۰ درصد افزایش یابد. جنس تشت ممکن است، تبخیر از تشت را به مقدار اندک حدود چند درصد تغییر دهد.

عمق آب تشت بر تبخیر از آن تأثیر دارد. هنگامی که عمق آب در تشت کلاس A، ۱۰ سانتی‌متر شود (حد استاندارد بین ۵ تا ۷/۵ سانتی‌متری است)، خطای اندازه‌گیری تا ۱۵ درصد خواهد بود. حفاظ‌های نصب شده بر روی تشت، سبب کاهش تبخیر تا حدود ۱۰ درصد می‌شود. به منظور جلوگیری از آشامیدن آب تشت توسط پرندگان، می‌توان ظروف آبی را در نزدیک تشت کلاس A قرار داد تا از آن استفاده شود. تشت تبخیر باید در مکان وسیع، امن و محصور مستقر شده تا از ورود حیوانات به داخل آن جلوگیری شود. تلاطم آب در تشت، به طور معمول، کمتر از ۵ درصد در تبخیر اثر دارد. تغییر میزان تبخیر از تشت تابع زمان، تخریب و رنگ‌آمیزی مجدد است.

جدول ۵- ضریب تشت (K_p) کلاس A در دو حالت استقرار تشت برای سطوح مختلف رطوبت نسبی و سرعت باد (نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو)

حالت الف				حالت ب				تشت کلاس A
تشت مستقر در اراضی دارای پوشش گیاهی کوتاه				تشت مستقر در اراضی خشک و آیش				میانگین رطوبت نسبی (درصد) ←
پایین <۴۰	متوسط ۴۰-۷۰	بالا >۷۰		پایین <۴۰	متوسط ۴۰-۷۰	بالا >۷۰		
فاصله تشت از پوشش گیاهی سبز بالادست در جهت وزش باد (متر)				فاصله تشت از اراضی خشک آیش بالادست در جهت وزش باد (متر)				سرعت باد (متر بر ثانیه)
۱	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۷۵	۱	۰/۷	۰/۸	۰/۸۵	آرام
۱۰	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸۵	۱۰	۰/۶	۰/۷	۰/۸	<۲
۱۰۰	۰/۷	۰/۸	۰/۸۵	۱۰۰	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۷۵	
۱۰۰۰	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۱۰۰۰	۰/۵	۰/۶	۰/۷	
۱	۰/۵	۰/۶	۰/۶۵	۱	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸	ملايم
۱۰	۰/۶	۰/۷	۰/۷۵	۱۰	۰/۵۵	۰/۶۵	۰/۷	۲-۵
۱۰۰	۰/۶۵	۰/۷۵	۰/۸	۱۰۰	۰/۵	۰/۶	۰/۶۵	
۱۰۰۰	۰/۷	۰/۸	۰/۸	۱۰۰۰	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۶	
۱	۰/۴۵	۰/۵	۰/۶	۱	۰/۶	۰/۶۵	۰/۷	تند
۱۰	۰/۵۵	۰/۶	۰/۶۵	۱۰	۰/۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۵-۸
۱۰۰	۰/۶	۰/۶۵	۰/۷	۱۰۰	۰/۴۵	۰/۵	۰/۶	
۱۰۰۰	۰/۶۵	۰/۷	۰/۷۵	۱۰۰۰	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵۵	
۱	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵	۱	۰/۵	۰/۶	۰/۶۵	خیلی تند
۱۰	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۶	۱۰	۰/۴۵	۰/۵	۰/۵۵	>۸
۱۰۰	۰/۵	۰/۶	۰/۶۵	۱۰۰	۰/۴	۰/۴۵	۰/۵	
۱۰۰۰	۰/۵۵	۰/۶	۰/۶۵	۱۰۰۰	۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۵	

جدول ۶- ضریب تشت (K_p) کلرادو در دو حالت استقرار تشت برای سطوح مختلف رطوبت نسبی و سرعت باد (نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو)

حالت ب تشت مستقر در اراضی خشک آیش*				حالت الف تشت مستقر در اراضی با پوشش گیاهی کوتاه				کلرادو فرو رفته در خاک
بالا >۷۰	متوسط ۴۰-۷۰	پایین <۴۰		بالا >۷۰	متوسط ۴۰-۷۰	پایین <۴۰		میانگین رطوبت نسبی (درصد) →
			فاصله تشت از اراضی خشک آیش بالادست در جهت وزش باد (متر)				فاصله تشت از پوشش گیاهی سبز بالادست در جهت وزش باد (متر)	سرعت باد (متر بر ثانیه)
۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱	۰/۸	۰/۷۵	۰/۷۵	۱	آرام
۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۱۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱۰	<۲
۰/۸	۰/۷۵	۰/۷۵	۱۰۰	۱/۱	۱/۱	۱/۱	≥ ۱۰۰	
۰/۷۵	۰/۷	۰/۷	۱۰۰۰					
۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۱	۰/۷	۰/۷	۰/۶۵	۱	ملایم
۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۱۰	۰/۹	۰/۸۵	۰/۸۵	۱۰	۲-۵
۰/۷	۰/۶۵	۰/۶۵	۱۰۰	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	≥ ۱۰۰	
۰/۶۵	۰/۶	۰/۶	۱۰۰۰					
۰/۸	۰/۸	۰/۸	۱	۰/۶۵	۰/۶	۰/۵۵	۱	تند
۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۵	۱۰	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۱۰	۵-۸
۰/۶۵	۰/۶	۰/۵۵	۱۰۰	۰/۸	۰/۸	۰/۸	≥ ۱۰۰	
۰/۶	۰/۵۵	۰/۵	۱۰۰۰					
۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷	۱	۰/۶	۰/۵۵	۰/۵	۱	خیلی تند
۰/۶۵	۰/۶	۰/۵۵	۱۰	۰/۷	۰/۷	۰/۶۵	۱۰	>۸
۰/۶	۰/۵۵	۰/۵	۱۰۰	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷	≥ ۱۰۰	
۰/۵۵	۰/۵	۰/۴۵	۱۰۰۰					

* در اراضی وسیع تحت آیش بدون پوشش گیاهی و غیر کشاورزی، باید ضریب تشت (K_p) در شرایط گرم و بادخیز تا ۲۰ درصد و در شرایط معتدل باد، دما و رطوبت، بین ۵ تا ۱۰ درصد کاهش یابد.

جدول ۷- ضریب تشت (K_p): معادله‌های رگرسیون استخراج شده از جدول‌های ۵ و ۶

$K_p=0.108-0.0286u_2+0.0422\ln(FET)+0.1434\ln(RH_{mean})$ $-0.000631[\ln(FET)]^2\ln(RH_{mean})$	تشت کلاس A مستقر در محیط سبز
$K_p=0.61+0.00341RH_{mean}-0.000162u_2RH_{mean}$ $-0.00000959u_2FET+0.00327u_2\ln(FET)$ $-0.00289u_2\ln(86.4u_2)-0.0106\ln(86.4u_2)\ln(FET)$ $+0.00063[\ln(FET)]^2\ln(86.4u_2)$	تشت کلاس A مستقر در محیط خشک
$K_p=0.87+0.119\ln(FET)-0.0157[\ln(86.4u_2)]^2$ $-0.0019[\ln(FET)]^2+0.013\ln(86.4u_2)=$ $\ln(RH_{mean})-0.000053\ln(86.4u_2)\ln(FET)RH_{mean}$	تشتک کلرادو فرو رفته در خاک مستقر در محیط سبز
$K_p=1.145-0.080u_2+0.000903(u_2)^2\ln(RH_{mean})$ $-0.0964\ln(FET)+0.0031u_2\ln(FET)$ $+0.0015[\ln(FET)]^2\ln(RH_{mean})$	تشتک کلرادو فرو رفته در خاک مستقر در محیط خشک
K_p u_2 $RH_{mean} = \frac{RH_{max} + RH_{min}}{2}$ FET (این حدها باید بر مبنای مقادیر مشاهده شده، تعیین شوند)	ضرایب و پارامترها میانگین سرعت باد روزانه در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه) میانگین رطوبت نسبی روزانه [درصد] فج یا فاصله محل استقرار تشت تبخیر (حالت الف یا ب) از محیط بالادست در جهت وزش باد
$1m \leq FET \leq 1000m$ $30\% \leq RH_{mean} \leq 84\%$ $1ms^{-1} \leq u_2 \leq 8ms^{-1}$	دامنه تغییر متغیرها

پیشنهادهای

اعمال فرض‌ها و تعدیل‌ها برای گنجانیدن اثر تمامی عوامل محیطی محلی مؤثر بر ضریب تشت ارائه شده در جدول‌ها و معادله‌ها است که موجب اصلاح ضریب برای شرایط محلی می‌شود. پیشنهاد می‌شود رابطه تبخیر از تشت و تبخیر - تعرق گیاه مرجع محاسبه شده با روش پنمن - مونتیت، واسنجی گردد. تشت تبخیر باید در داخل زمین مربع شکل با پوشش گیاهی سبز کوتاه به ضلع حداقل ۱۵ متر مستقر شود. تشت نه در مرکز این محوطه، بلکه باید به فاصله حداقل ۱۰ متری از پوشش گیاهی حاشیه بالادست در جهت وزش معمول باد مستقر شود.

در شرایط فقدان، ارقام سرعت باد و رطوبت نسبی مورد نیاز برای محاسبه ضریب تشت در محل مورد نظر، باید از اطلاعات نزدیکترین ایستگاه مشابه استفاده شود. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که میانگین متغیرهای اقلیمی مورد نیاز برای دوره مورد نظر تعیین شده و میانگین تبخیر تشت، نیز، برای همان دوره محاسبه شود.

در مثال ۲۲، با استفاده از معادله ۱ جدول ۷، ضریب تشت برای داده‌های مثال ۲۱، مساوی با ۰/۸۳ برآورد می‌شود.

جدول ۸- نسبت بین تبخیر از انواع تشتهای فرو رفته و تشته کلرادو فرو رفته در خاک در شرایط اقلیمی و محیطی مختلف (نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو)

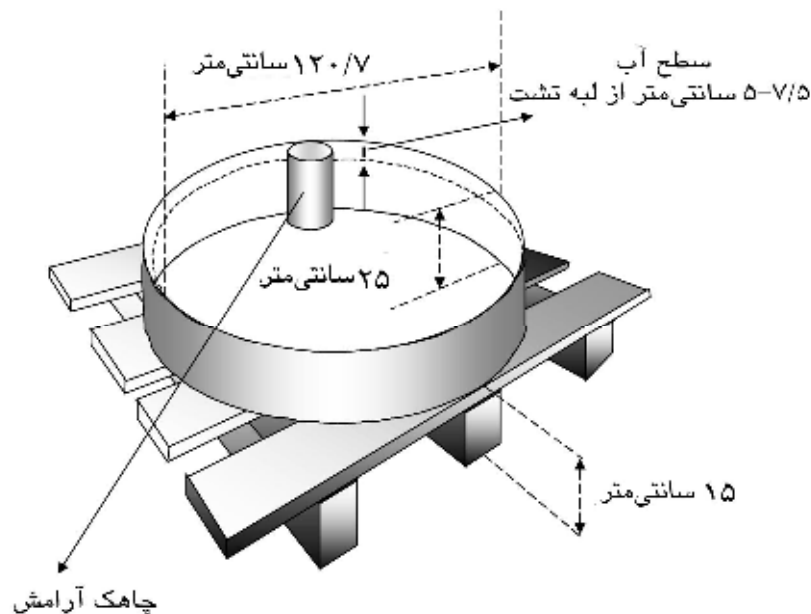
نسبت E_{pan} اصلاح شده به E_{pan} کلرادو					اقلیم	
خشک تا نیمه خشک (فصل خشک)		معتدل و مرطوب			پوشش گیاهی پیرامون تشته (۵۰ متر یا بیشتر)	
پوشش گیاهی کوتاه	آیش	پوشش گیاهی کوتاه	آیش	سطح تشته (m^2)		
۱/۲۵	۱/۰۵	۱/۱	۱/۰	۱۹/۶	GGI 20 قطر ۵ متر، عمق ۲ متر (اتحاد جماهیر شوروی سابق)	
				۱۰/۵	تشته فرو رفته در خاک با قطر ۱۲ فوت (۳/۶۶ متر)، عمق ۳/۳ فوت (فلسطین اشغالی)	
				۲/۶	BPI با قطر ۶ فوت (۱/۸۳ متر)، عمق ۲ فوت (۰/۶۱ متر) (ایالات متحده آمریکا)	
				۱/۲	تشته کنیا با قطر ۴ فوت (۱/۲۲ متر)، عمق ۱۴ اینچ (۰/۳۵۶ متر)	
۱/۰		۱/۰		۰/۷	تشته استرالیا با قطر ۳ فوت (۰/۹۱ متر)، عمق ۳ فوت (۰/۹۱ متر)	
				۰/۶	تشته Symmons با ۶ فوت مربع (۰/۵۶ متر مربع)، عمق ۲ فوت (۰/۶۱ متر)	
	۱/۰			۰/۳	تشته Aslyng با سطح ۰/۳۳ مترمربع، عمق ۱ متر (دانمارک)	
				۰/۳	تشته GGI 3000، قطر ۰/۶۱۸ سانتی متر، عمق ۶۰ تا ۸۰ سانتی متر (اتحاد جماهیر شوروی سابق)	
۰/۹۵	۱/۰	۰/۹۵	۱/۰	۰/۲	تشته فرو رفته در خاک با قطر ۵۰ سانتی متر، عمق ۲۵ سانتی متر (هلند)	

مثال ۲۱- تعیین تبخیر - تعرق مرجع از تشته تبخیر با استفاده از جدولها	
برای هفته اول ماه ژوئیه، داده‌های تبخیر روزانه از تشته کلاس A مستقر در یک منطقه سبز احاطه شده با گیاهان کوتاه تحت آبیاری، به ترتیب ۸/۲، ۷/۵، ۷/۶، ۶/۸، ۷/۶، ۸/۹ و ۸/۵ میلی متر بر روز است. در این دوره، میانگین سرعت باد روزانه ۱/۹ متر بر ثانیه و میانگین رطوبت نسبی روزانه ۷۳ درصد می‌باشد. میانگین تبخیر - تعرق مرجع را در این هفته تعیین کنید.	
تشته در یک منطقه دارای پوشش گیاهی سبز مستقر است: «حالت الف»	
Fetch _{max} = ۱۰۰۰ متر	تشته مستقر در گیاهان تحت آبیاری:
u ₂ < ۲ متر بر ثانیه	سرعت باد ملایم است:
RH _{mean} > ۷۰ درصد	رطوبت نسبی بالا است:
K _p = ۰/۸۵	از جدول ۵ (برای شرایط فوق):
- میلی متر بر روز $E_{pan} = (۸/۲ + ۷/۵ + ۷/۶ + ۶/۸ + ۷/۶ + ۸/۹ + ۸/۵) \times ۷/۹ = ۷/۹$ میلی متر بر روز $ET_0 = ۰/۸۵ \times (۷/۹) = ۶/۷$ از معادله ۵۵ (فصل چهارم): میانگین تبخیر - تعرق گیاه مرجع ۶/۷ میلی متر بر روز است.	

کادر ۱۲- مشخصات تشت کلاس A

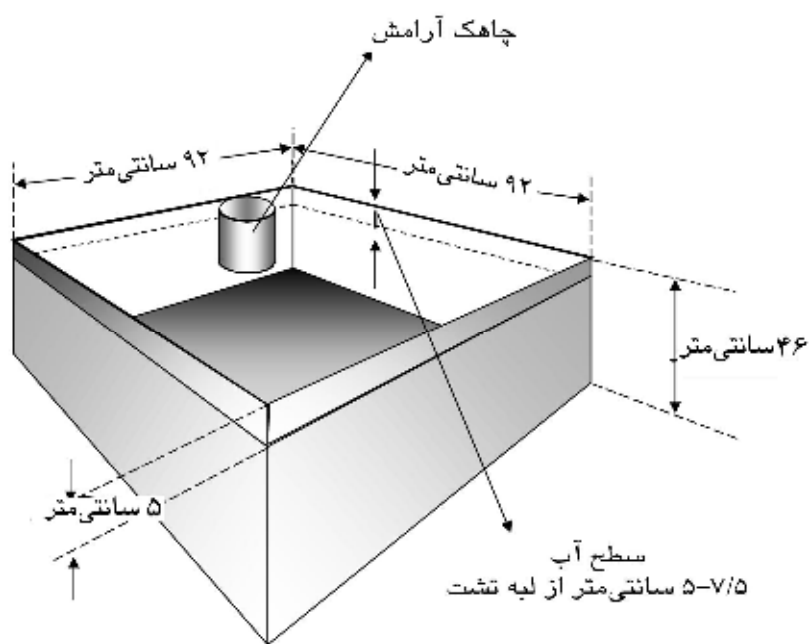
تشت کلاس A دایره‌ای شکل بوده و قطر و عمق آن به ترتیب $۱۲۰/۷$ و ۲۵ سانتی‌متر است. این تشت، از آهن گالوانیزه (شماره ۲۲) یا آلیاژی مرکب از نیکل، مس، آهن و منگنز (با ضخامت $۰/۸$ میلی‌متر) ساخته می‌شود. تشت، به طور معمول، بر روی سکوی چوبی با فاصله ۱۵ سانتی‌متر از سطح زمین، نصب می‌شود. تشت باید تراز باشد و تا ارتفاع ۵ سانتی‌متری از لبه با آب پر شود. فاصله سطح آب از لبه تشت نباید بیشتر از $۷/۵$ سانتی‌متر نشود. آب باید به طور مرتب و حداقل هفته‌ای یک بار عوض شده و بدون کدورت باشد. تشت غیر استیل باید سالانه رنگ شود. حفاظ‌های توری بالای تشت از جمله موارد مورد نیاز استاندارد نبوده و استفاده از آنها تأکید نمی‌شود. اطراف تشت باید حصارکشی شده تا از ورود حیوانات برای آشامیدن آب جلوگیری شود.

محل استقرار تشت، به طور ترجیحی، باید به ابعاد ۲۰ متر در ۲۰ متر چمن‌کاری شود و باید چهار سمت آن باز و در معرض جریان آزاد هوا باشد. بهتر است تشت در مرکز یا در جهت مخالف باد و در مزارع وسیع تحت کشت نصب شود. اندازه‌گیری از تشت، به طور روزانه، در صبح زود و در همان زمانی که بارندگی اندازه‌گیری شده، صورت می‌گیرد. اندازه‌گیری‌ها در یک چاهک آرامش نصب شده به دیواره داخلی تشت، انجام می‌شود. چاهک آرامش، استوانه فلزی با قطر حدود ۱۰ سانتی‌متر و عمق حدود ۲۰ سانتی‌متر بوده و سوراخ کوچکی در کف آن تعبیه شده است.



کادر ۱۳- مشخصات تشت کلرادو فرو رفته در خاک

تشت کلرادو، مربعی به ضلع ۹۲ سانتی‌متر (۳ فوت) و عمق ۴۶ سانتی‌متر (۱۸ اینچ) می‌باشد. این تشت، از آهن ضخیم ۳ میلی‌متری ساخته شده و به نحوی در خاک مستقر است که لبه آن در فاصله ۵ سانتی‌متری (۲ اینچ) بالای سطح خاک واقع باشد. گاهی، از تشت با طول و عرض یک متر و عمق ۰/۵ متر نیز، استفاده می‌شود. سطح بیرونی تشت را با قیر اندود می‌کنند. آب تشت هم تراز سطح خاک یا کمی پایین‌تر از آن یعنی در ارتفاع ۵ تا ۷/۵ سانتی‌متری از لبه تشت نگهداری می‌شود. اندازه‌گیری‌ها از این تشت مشابه تشت کلاس A می‌باشد. وضعیت استقرار و محیط پیرامون آن نیز، شبیه تشت کلاس A است. تشت‌های کلرادو فرو رفته در خاک، گاهی، در تحقیقات نیازهای آبی گیاه برتری دارند. زیرا، این نوع تشت‌ها نسبت به تشت کلاس A، برآورد بهتر از تبخیر - تعرق مرجع را به طور مستقیم ارائه می‌دهند. از معایب این تشت‌ها، دشواری نگهداری است و همچنین، سطح آب در تشت‌ها از فاصله دور قابل مشاهده نمی‌باشد.



مثال ۲۲- تعیین تبخیر - تعرق مروج از روی تبخیر از تشت با استفاده از معادله‌ها

با استفاده از اطلاعات میانه‌ترین تبخیر اندازه‌گیری شده هفته‌ای در مثال ۲۱ تبخیر - تعرق مروج برای در نوع تشت و در وضعیت حاشیه مشابه معادلات جدول ۷ را برآورد نمایید. فرض شود که حاشیه تشت‌ها در هر دو حالت پوششی گیاهی سبز و خشکی (۱۰۰۰ متر ادامه دارند).

m m/s %	1000 1.9 7.3		Fetich= $u_g =$ $RH_{mean} =$	
-	0.83	$K_p=0.108-0.0286(1.9)+0.0422\ln(1000)+0.1434\ln(73)-0.00063[\ln(1000)]^2\ln(73)$	$K_p=0.108-0.0286u_g+0.0422\ln(FET)+0.1434\ln(RH_{mean})-0.00063[\ln(FET)]^2\ln(RH_{mean})$	تشت کلاسی A با حاشیه سبز
mm/day mm/day	7.9 6.6	$ET_o=0.83(7.9)$	$E_{pan} =$ $ET_o =$	
-	0.61	$K_p=0.61+0.0034\ln(73)-0.000162\ln(1.9)(73)-0.00000959(1.9)(1000)+0.00327(1.9)\ln(1000)-0.00289(1.9)\ln(86.4(1.9))-0.0106\ln(1000)+0.00063[\ln(1000)]^2\ln(86.4(1.9))$	$K_p=0.61+0.0034\ln RH_{mean}-0.000162U_2 RH_{mean}-0.00000959u_2 FET+0.00327u_2 \ln(FET)-0.00289u_2(86.4u_2)+0.0106\ln(86.4u_2)\ln(FET)+0.00063[\ln(FET)]^2\ln(86.4u_2)$	تشت کلاسی A با حاشیه خشکی
mm/day mm/day	7.9 4.8	$ET_o=0.61(7.9)$	$E_{pan} =$ $ET_o =$	
-	0.97	$K_p=0.087+0.119\ln(100)-0.0157\ln(86.4(1.9))^2-0.0019[\ln(1000)]^2\ln(86.4(1.9))+0.013\ln(86.4(1.9))\ln(73)-0.000053\ln(86.4(1.9))\ln(1000)/73$	$K_p=0.87+0.119\ln(FET)-0.0157[\ln(86.4u_2)]^2-0.019[\ln(FET)]^2\ln(86.4u_2)+0.013\ln(96.4u_2)\ln(RH_{mean})-0.000053\ln(86.4u_2)\ln(FET)RH_{mean}$	تشت کلاسی A با حاشیه خشکی
mm/day mm/day	7.9 7.7	$ET_o=0.97(7.9)$	$E_{pan} =$ $ET_o =$	
-	0.69	$K_p=1.145-0.08(1.9)+0.000903(1.9)^2\ln(73)-0.0964\ln(1000)-0.003(1.9)\ln(1000)-0.0015[\ln(1000)]^2\ln(73)$	$K_p=1.145-0.08u_2+0.000903(u_2)^2\ln(RH_{mean})-0.0964\ln(FET)+0.003u_2\ln(FET)+0.0015[\ln(FET)]^2\ln(RH_{mean})$	تشت کلاسی A با حاشیه خشکی
mm/day mm/day	7.9 5.4	$ET_o=0.69(7.9)$	$E_{pan} =$ $ET_o =$	

میانه‌ترین ۷ هفته‌ای تبخیر - تعرق گیاه مروج برای چهار شرایط استقرار تشت و حاشیه آن به ترتیب ۴۰۸، ۷۷۷ و ۵۴۴ میلی‌متر بر روز است.

بخش ب

تبخیر- تعرق گیاهان تحت شرایط استاندارد

در این بخش، تبخیر - تعرق گیاهان تحت شرایط استاندارد (ETc) بررسی می‌شود که به تبخیر - تعرق یک محصول عاری از بیماری‌ها، با کودهای مناسب، روییده در سطح کشت وسیع و تحت شرایط مطلوب آب در خاک و با تولید عملکرد پتانسیل در آن اقلیم مشخص اشاره دارد.

در بخش الف، اثرات شرایط مختلف هواشناسی بر تبخیر - تعرق گیاهان، با معرفی تبخیر - تعرق سطح مرجع (ET_o) توصیف و اثرات مشخصات و تفاوت‌های گیاهان و سطح مرجع نیز، در ضریب گیاهی گنجانده و بیان شده است. با ضرب کردن ET_o در ضریب گیاهی، تبخیر - تعرق گیاهان تعیین می‌شود.

ارقام معمول ضریب‌های گیاهی، روش‌های اصلاح این ضریب‌ها و دو روش محاسبه ETc، تحت عنوان روش‌های ضریب گیاهی یک جزیی و دو جزیی در این بخش بیان شده است. در روش یک جزیی، تفاوت‌های بین تبخیر - تعرق گیاهان با سطح مرجع، در یک ضریب گیاهی ترکیب شده و در روش دو جزیی، دو عامل (ضریب) جداگانه برای توصیف تفاوت اجزای تبخیر و تعرق ارائه شده است.

بر طبق مشروح مطالب فصل پنجم و خلاصه آن در جدول ۱۰، روش ضریب گیاهی یک جزیی برای اغلب موارد طرح‌ریزی، طراحی و مدیریت آبیاری قابل بکارگیری است. روش‌های ضریب گیاهی دو جزیی در مواردی نظیر برنامه‌ریزی روزآمد آبیاری، مدل‌سازی کیفیت آب و در تحقیقات قابل استفاده می‌باشد.

فصل پنجم

مقدمه‌ای بر تبخیر - تعرق گیاهان

در این فصل، روش ضریب گیاهی برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه (ET_c) تحت شرایط استاندارد توصیف می‌شود. شرایط استاندارد، به وضعیت گیاهان کشت شده در مزارع وسیع و تحت مدیریت زراعی مطلوب بدون محدودیت آب در خاک، اشاره دارد. تبخیر - تعرق چمن مرجع (ET_0) و تبخیر - تعرق گیاهان به دلیل متفاوت بودن وضعیت سطح زمین، ویژگی‌های پوشش گیاهی و مقاومت آئرودینامیک سطوح کشت، متفاوت می‌باشند.

اثر ویژگی‌های محصولات متفاوت با چمن، در ضریب گیاهی (K_c) گنجانده شده است. در روش ضریب گیاهی، تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد با ضرب کردن ضریب گیاهی در تبخیر - تعرق مرجع ($K_c \times ET_0$) محاسبه و تعیین می‌شود.

تفاوت‌های تبخیر - تعرق محصولات و سطح مرجع چمن را می‌توان در یک ضریب گیاهی یک جزئی (K_c) تلفیق یا به صورت دو ضریب جداگانه یعنی ضریب گیاهی پایه (K_{cb}) و ضریب تبخیر از خاک (K_e) تفکیک کرد ($K_c = K_{cb} + K_e$). روش مورد نظر بر حسب هدف محاسبه، دقت مورد نیاز و دسترسی به داده‌ها انتخاب می‌شود.

روش‌های محاسبه

محاسبه مستقیم

تبخیر - تعرق از یک سطح تحت کشت را می‌توان، به طور مستقیم، با روش انتقال جرم یا موازنه انرژی محاسبه کرد. به علاوه، آن را می‌توان با بررسی موازنه آب خاک در مزارع یا لیسیمترها تعیین کرد. تبخیر - تعرق گیاه به روش پنمن - مونتیت (معادله ۳) با استفاده از داده‌های هواشناسی و اطلاعات گیاهی محاسبه می‌شود. تبخیر - تعرق گیاهان با تعدیل ضریب بازتابش (آلبیدو) و مقاومت‌های آئرودینامیک و سطحی (ظاهری) پوشش گیاهی، به طور مستقیم، قابل برآورد است. هر چند، برآورد دقیق آلبیدو و مقاومت‌های آئرودینامیک و سطحی، بدلیل تغییر در شرایط اقلیمی، وضعیت رشد گیاه و رطوبت خاک سطحی پیچیده می‌باشد. مقاومت سطحی پوشش گیاهی تابع آب قابل استفاده خاک است و تحت تنش آبی به شدت افزایش می‌یابد.

در حال حاضر، به علت کمبود قابل ملاحظه اطلاعات در مورد مقاومت آئرودینامیک و مقاومت سطحی انواع پوشش گیاهی، روش پنمن - مونتیت فائو ارائه شده در این نشریه تنها، برای برآورد ET_0 ، یعنی تبخیر - تعرق یک سطح چمن فرضی تحت آبیاری مطلوب، دارای ارتفاع، ضریب بازتابش و مقاومت سطحی ثابت، قابل بکارگیری است.

روش ضریب گیاهی

در روش ضریب گیاهی، تبخیر - تعرق گیاه با ضرب ضریب گیاهی در تبخیر - تعرق گیاه مرجع، محاسبه می‌شود:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (56)$$

که در آن:

ET_c = تبخیر - تعرق گیاه [میلی‌متر بر روز]،

K_c = ضریب گیاهی [بدون واحد] و

ET_0 = تبخیر - تعرق گیاه مرجع [میلی‌متر بر روز] می‌باشند.

بیشترین تأثیر اقلیم، در تبخیر - تعرق گیاه مرجع گنجانده شده است. بنابراین، همان طور که تبخیر - تعرق مرجع نمایه‌ای از تقاضای تبخیر در اقلیم مشخص است، ضریب گیاهی، به طور عمده، به ویژگی‌های گیاه و، به طور محدودتر، به اقلیم بستگی دارد. این ویژگی موجب بکارگیری ضرایب گیاهی استاندارد در مناطق و اقلیم‌های مختلف و دلیل اصلی پذیرش جهانی روش ضریب گیاهی و توسعه ضرایب گیاهی منتج از بررسی‌های گذشته به مطالعات حاضر بوده است.

تبخیر - تعرق گیاه مرجع با استفاده از معادله پنمن - مونتیت فائو (فصل چهارم) محاسبه و تعیین می‌شود. ضریب گیاهی، نسبت تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد به تبخیر - تعرق گیاه مرجع بوده و اثر چهار تفاوت عمده گیاه و چمن مرجع در آن گنجانده شده است. این ویژگی‌ها عبارتند از:

- ارتفاع گیاه: ارتفاع گیاه بر مقاومت آئروپنمیک (r_a) معادله پنمن - مونتیت فائو و انتقال بخار آب از گیاه به آتمسفر مؤثر است. عبارت مقاومت آئروپنمیک در صورت و مخرج کسر معادله کامل پنمن - مونتیت فائو وارد شده است.
- ضریب بازتابش سطح گیاه - خاک: ضریب بازتابش (آلبدو) متأثر از کسر پوشش گیاهی (نسبت سطح پوشش گیاهی به سطح خاک زیرین) و رطوبت سطح خاک می‌باشد. آلبیدو سطح گیاه - خاک بر تابش خالص ورودی، که منبع اصلی انرژی برای فرآیند تبخیر بوده، مؤثر است.
- مقاومت پوشش گیاهی: مقاومت گیاه در مقابل انتقال بخار آب آتمسفر تابع سطح برگ (تعداد روزنه‌ها)، عمر گیاه، شرایط برگ و میزان کنترل روزنه‌ها می‌باشد. مقاومت پوشش گیاهی بر مقاومت سطحی مؤثر است.
- تبخیر از خاک، به ویژه، در خاک‌های بدون پوشش گیاهی.

رطوبت سطح خاک و کسر پوشش گیاهی بر مقاومت سطحی (r_a) تأثیرگذار است. بدنبال خیس شدن سطح خاک، تبخیر از خاک، به ویژه، در سطح بدون پوشش گیاهی کامل، بالا است. مقاومت سطحی (ظاهری) با ترکیب مقاومت‌های سطحی پوشش گیاهی و خاک تعیین می‌شود. واژه مقاومت سطحی در معادله

پنمن - مونتیت، مقاومت موجود در مقابل جریان بخار آب از درون برگ‌ها و از سطح خاک به آتمسفر را نشان می‌دهد.

معادله ۵۶، تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد را برآورد می‌کند. این مقدار، کران بالایی تبخیر - تعرق گیاهان و نیز بیانگر شرایطی است که در آن رشد یا تبخیر - تعرق گیاه به دلیل کمبود آب، تراکم کشت، بیماری‌ها، علف‌های هرز، آفت‌ها یا تنش شوری محدود نمی‌شود. تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد با تعدیل ضریب گیاهی برای شرایط متفاوت با استاندارد، اصلاح می‌شود. منظور از شرایط غیر استاندارد، هر گونه شرایط یا ویژگی محیطی است که تبخیر - تعرق گیاه را محدود کند. ضرایب اصلاح تبخیر - تعرق استاندارد برای شرایط غیر استاندارد، در بخش پ ارائه شده است.

عوامل مؤثر بر ضریب گیاهی

ضریب گیاهی اثر متفاوت بودن ویژگی‌های یک محصول و سطح چمن با ظاهر ثابت و پوشش گیاهی کامل را در یک ضریب می‌گنجاند. بنابراین، انواع محصولات دارای ضرایب گیاهی متفاوت هستند. متغیر بودن ویژگی‌های گیاه در طول دوره رشد، نیز، بر ضریب گیاهی مؤثر است. سرانجام، شرایط مؤثر بر تبخیر بر ضریب گیاهی، نیز، تأثیرگذار است.

نوع گیاه

به دلیل تفاوت آلبيدو، ارتفاع، شرایط آئرودینامیک، ویژگی‌های برگ و روزنه بین گیاهان با رشد کامل و تحت آبیاری مطلوب و گیاه سطح مرجع، تبخیر - تعرق این دو متفاوت می‌باشد.

ضریب گیاهی بسیاری از محصولات با رشد کامل بدلیل کمتر بودن فاصله کشت و بلندتر بودن ارتفاع پوشش گیاهی و تفاوت زبری نسبت به سطح مرجع، بالاتر از ۱ و اغلب، بین ۵ تا ۱۰ درصد بیشتر از ضریب گیاهی سطح مرجع (با $K_c=1$) است. این تفاوت می‌تواند برای برخی گیاهان بلند نظیر ذرت، سرگوم یا نیلوفر بین ۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش یابد. مقادیر معمول ضریب گیاهی مرحله میانی رشد محصولات با رشد کامل ($K_{c\ mid}$) در جدول ۱۲ ارائه شده است.

ضریب گیاهی محصولاتی نظیر آناناس، بدلیل بسته بودن روزنه‌ها در طول روز، بسیار پایین می‌باشد. هر چند، در اغلب گونه‌ها، روزنه‌ها با افزایش تابش خورشیدی باز می‌شوند. علاوه بر واکنش روزنه‌ها نسبت به محیط، موقعیت و تعداد روزنه‌ها و مقاومت کوتیکول^۱ در مقابل انتقال بخار آب به آتمسفر، مقدار تلفات آب از گیاه را کنترل می‌کند. ضریب گیاهی برای گیاهان که، تنها، در بخش زیرین برگ روزنه داشته و یا مقاومت سطحی بالا دارند، به طور نسبی، پایین است. این وضعیت در مرکبات و اغلب درختان میوه خزان‌شونده^۲ مشاهده می‌شود. کنترل تعرق و فاصله درختان، موجب می‌شود که بیشترین مقدار پوشش گیاهی درختان بالغ با رشد کامل، تنها، ۷۰ درصد شود. چنانچه، فاصله کشت درختان فاقد پوشش گیاهی باشد، ضریب گیاهی، پایین‌تر از ۱ است (شکل ۲۰).

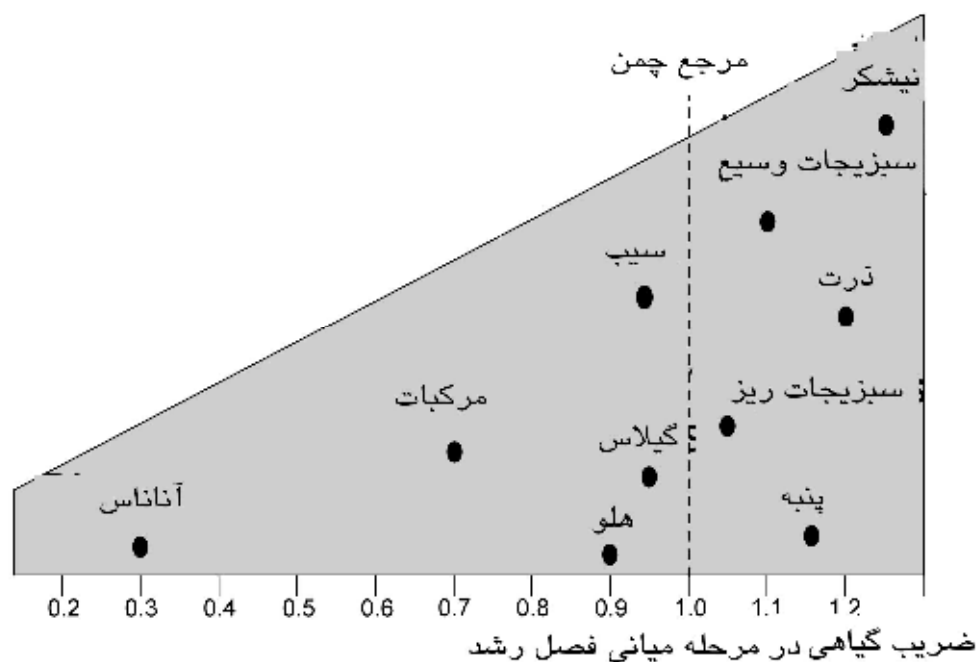
1- Cuticula

2- Deciduous fruit trees

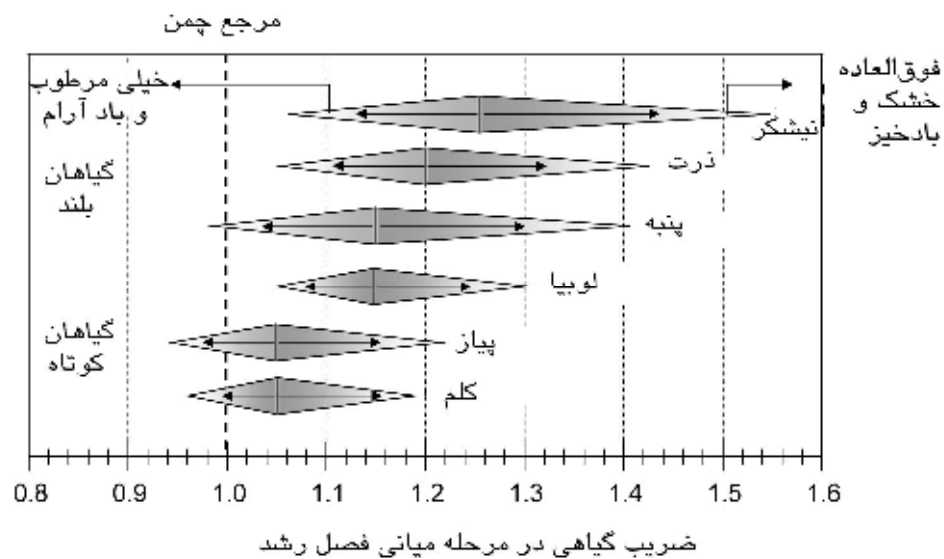
اقلیم

میانگین ضرایب گیاهی مورد انتظار تحت شرایط اقلیم استاندارد در جدول ۱۲ ارائه شده است. یک اقلیم نیمه مرطوب با میانگین روزانه حداقل رطوبت نسبی ۴۵ درصد و بادهای آرام تا ملایم (میانگین روزانه سرعت باد ۲ متر بر ثانیه)، اقلیم استاندارد تعریف می‌شود.

تغییر سرعت باد موجب تغییر مقاومت آئرو دینامیک و در نتیجه، تغییر ضریب گیاهی، به ویژه در گیاهان بلندتر از سطح مرجع چمن می‌شود. تفاوت ویژگی‌های آئرو دینامیک سطح مرجع چمن و محصولات علاوه بر نوع گیاه به شرایط اقلیمی و ارتفاع گیاه نیز وابسته است. تحت تفاوت مشخصات آئرو دینامیک، نسبت تبخیر - تعرق بسیاری از محصولات به تبخیر - تعرق گیاه مرجع (یعنی ضریب گیاهی)، اغلب، با افزایش سرعت باد و کاهش رطوبت نسبی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، گیاهان در اقلیم‌های خشک‌تر و سرعت باد بزرگ‌تر (از ۲ متر بر ثانیه)، دارای ضریب گیاهی بالاتر و در اقلیم‌های مرطوب‌تر و سرعت باد کوچک‌تر، دارای ضریب گیاهی پایین‌تر هستند.



شکل ۲۰- ضرایب گیاهی معمول برخی محصولات با رشد کامل



شکل ۲۱- حدهای مورد انتظار ضریب گیاهی محصولات با رشد کامل در اقلیم متفاوت

اثر نسبی شرایط اقلیمی بر ضریب گیاهی برخی محصولات با رشد کامل، در شکل ۲۱ نشان داده شده است. کران بالای ضریب گیاهی نمایانگر شرایط فوق العاده خشک و وزش باد است. کران پایین شرایط اقلیمی خیلی مرطوب و باد آرام را نشان می‌دهد. حدود تغییر مورد انتظار ضریب گیاهی، تحت تأثیر شرایط اقلیمی برای گیاهان کوتاه بسیار کم و برای گیاهان بلند، زیاد است. روش تعدیل ضریب گیاهی برای شرایط اقلیم محلی به صورت تابعی از ارتفاع گیاه در فصل ششم ارائه شده است.

در اقلیم مرطوب و باد آرام، ضریب گیاهی به تفاوت اجزای آنرودینامیک تبخیر - تعرق گیاه و مرجع وابستگی چندانی ندارد. در این وضعیت، ضریب گیاهی محصولات با رشد کامل، بالاتر از ۱/۰۵ نمی‌باشد. زیرا، محصولات با رشد کامل و گیاه مرجع چمن هر دو در این شرایط، به طور تقریبی، بیشترین مقدار تابش طول موج کوتاه که منبع اصلی تأمین انرژی تبخیر - تعرق است، را دریافت می‌کنند. به طور معمول، ضریب بازتابش (آلبیدو) اغلب محصولات با رشد کامل و گیاه مرجع هر دو، مشابه می‌باشند. از آنجا که، کمبود فشار بخار آب در اقلیم مرطوب کم است، تفاوت مقاومت آنرودینامیک محصولات و گیاه مرجع قابل ملاحظه نبوده و در نتیجه، تفاوت تبخیر - تعرق این دو، به ویژه هنگامی که سرعت باد کم تا متوسط بوده، اندک است.

تحت شرایط اقلیم خشک، اثر تفاوت مقاومت آنرودینامیک محصولات و گیاه مرجع چمن بر ET_c مشخص‌تر بوده زیرا، ممکن است، کمبود فشار بخار آب، به طور نسبی، زیاد باشد. این وضعیت، تأثیر تفاوت عامل آنرودینامیک وارد شده در صورت کسر معادله پنمن - مونتیث (معادله ۳) برای هر دو محصول مورد نظر و سطح مرجع چمن را تشدید می‌کند. در شرایط اقلیم خشک، اگر محصولات دارای برگ و ارتفاع زبری بیشتر از سطح مرجع چمن باشند، ضرایب گیاهی بالاتری خواهند داشت.

از آنجا که، عبارت $\frac{1}{r_a}$ وارد شده در صورت کسر معادله پنمن - مونتئیث (معادله ۳) در مقدار کمبود فشار بخار آب ضرب می‌شود، در شرایط رطوبت نسبی پایین، افزایش نسبی تبخیر - تعرق گیاهان بلند در مقایسه با گیاهان کوتاه، بیشتر می‌باشد. ضریب گیاهی محصولات بلند (۲ تا ۳ متر)، در یک اقلیم بادخیز و خشک ۳۰ درصد بیشتر از اقلیم آرام و مرطوب است. افزایش ضریب گیاهی در این حالت متأثر از بالا بودن زبری آئروپنایمیک محصولات بلند در مقایسه با چمن می‌باشد که انتقال بخار آب از سطح گیاه به آتمسفر را تشدید می‌کند.

تبخیر از سطح خاک

تفاوت‌های تبخیر از سطح خاک و تعرق بین سطح تحت کشت محصولات و گیاه سطح مرجع در ضریب گیاهی گنجانده شده است. تحت شرایط که پوشش زمین کامل است، به دلیل پایین بودن سهم تبخیر از لایه خاک سطحی، ضریب گیاهی تفاوت تعرق را منعکس می‌کند. هنگامی که گیاه کوچک بوده و سایه‌اندازی آن بر سطح زمین کم است، سهم تبخیر از خاک سطحی پس از بارندگی یا آبیاری بالا می‌باشد. ضریب گیاهی در این شرایط، به طور عمده، از روی فاصله خیس شدن خاک تعیین می‌شود. در شرایطی که، خاک با آبیاری و یا بارندگی خیس شده، تبخیر از خاک سطحی قابل ملاحظه بوده و ممکن است، ضریب گیاهی بالاتر از ۱ شود. همچنین، مقدار تبخیر از خاک سطحی خشک، ناچیز و ضریب گیاهی پایین بوده و ممکن است، حتی، به ۰/۱ کاهش یابد (شکل ۲۲).

تفاوت‌ها تبخیر از خاک تحت کشت محصولات و گیاه مرجع را می‌توان با استفاده از ضریب گیاهی دو جزئی، به صورت دقیق‌تر برآورد کرد.

مراحل رشد گیاه

پوشش سطح زمین، ارتفاع گیاه و سطح برگ با رشد گیاه تغییر می‌کند. ضریب گیاهی یک گیاه مشخص در طول دوره رشد به دلیل تفاوت تبخیر - تعرق در مراحل مختلف، تغییر خواهد کرد. دوره رشد گیاه را می‌توان به چهار مرحله متمایز اولیه،^۱ توسعه گیاه،^۲ میانی^۳ و پایانی^۴ تقسیم کرد. ترتیب و طول نسبی دوره و مراحل رشد انواع گیاهان در شکل ۲۳ نشان داده شده است.

مرحله اولیه رشد

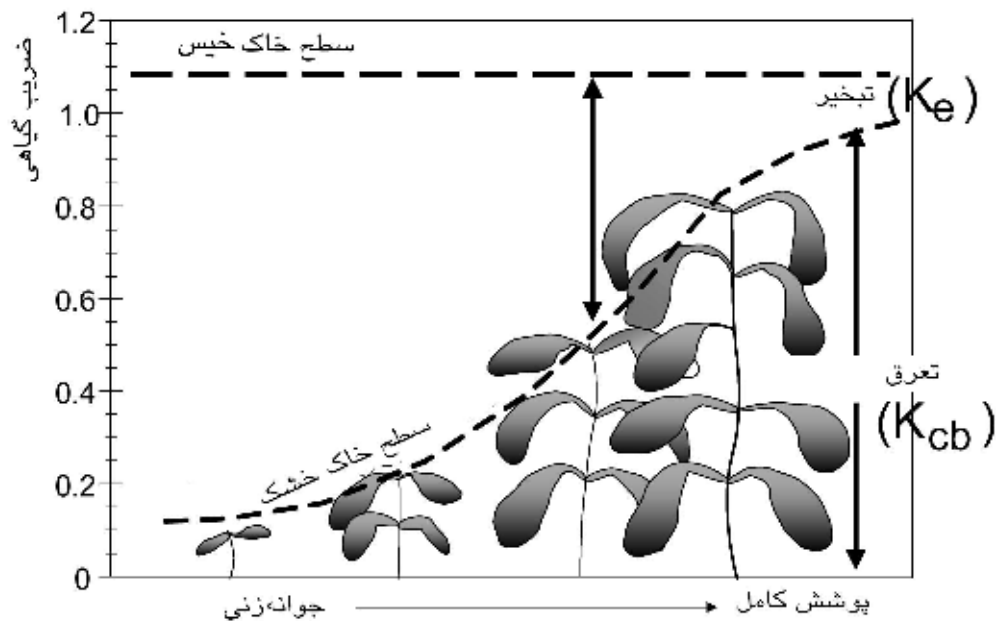
مرحله اولیه از تاریخ کشت شروع و نزدیک به زمان برقراری پوشش گیاهی ۱۰ درصد پایان می‌یابد. طول مرحله اولیه، به طور عمده، به نوع، گونه گیاه، زمان کشت و اقلیم بستگی دارد. پایان مرحله اولیه هنگامی است که پوشش گیاهی فعال حدود ۱۰ درصد سطح زمین را بپوشاند. در سال‌های پس از کشت برای گیاهان سالانه، زمان جوانه‌زنی برگ‌ها یعنی ظهور برگ‌های جدید، ابتدای مرحله اولیه رشد برای همان سال محسوب می‌شود.

1- Initial stage

2- Crop development stage

3- Mid-season stage

4- Late season stage



شکل ۲۲- اثر تبخیر بر ضریب گیاهی (K_e)، هنگام خیس شده متوالی خاک با خط افقی و هنگام خشک بودن خاک دارای رطوبت کافی برای تعرق، با منحنی نشان داده شده است.

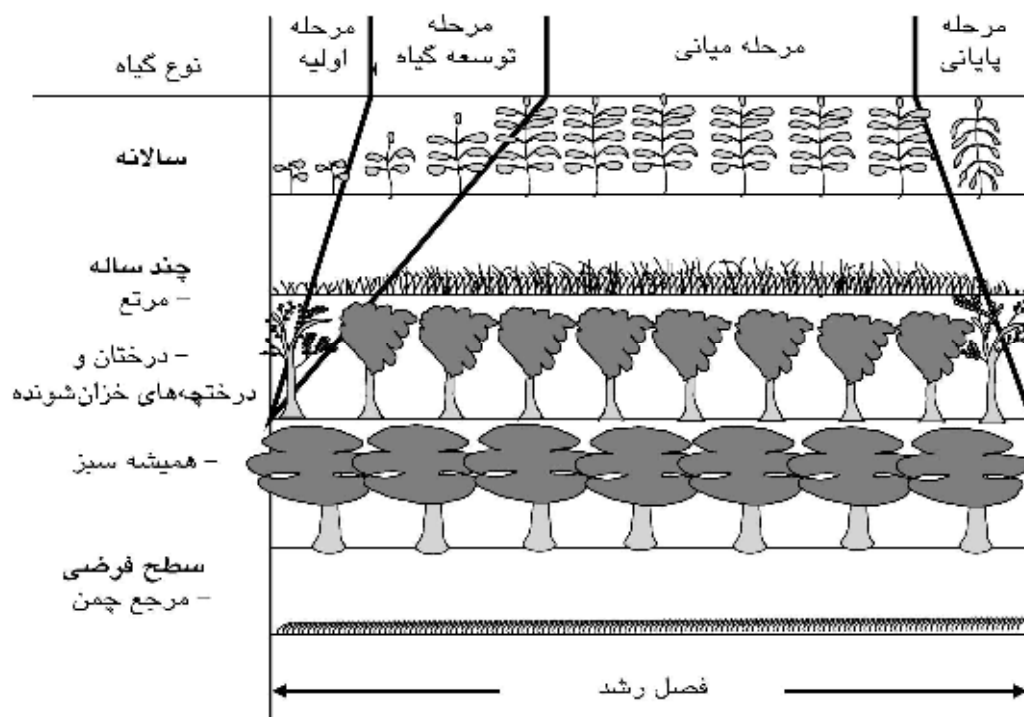
در طول مرحله اولیه رشد، سطح برگ محدود بوده و تبخیر - تعرق، به طور عمده، به صورت تبخیر از خاک سطحی است. بنابراین، ضریب گیاهی در مرحله اولیه رشد ($K_{c\ ini}$) هنگامی که خاک با آبیاری و بارندگی خیس شده، بالا و هنگامی که خاک سطحی خشک است، پایین می‌باشد. زمان لازم برای خشک شدن خاک به فاصله خیس شدن، توان تبخیرکنندگی آتمسفر (یعنی ET_0) و مقدار بارندگی و آبیاری بستگی دارد. برآورد تقریبی ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد به صورت تابعی از فاصله خیس شدن خاک (با بافت متوسط) و مقادیر متفاوت تبخیر - تعرق گیاه مرجع در جدول ۹ ارائه شده است. روش برآورد ضریب گیاهی این مرحله رشد در فصل ششم ارائه می‌شود.

جدول ۹- مقادیر تقریبی ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد برای بارندگی و آبیاری متوسط (عمق ۱۰ تا ۴۰ میلی متر) و بافت خاک متوسط

توان تبخیرکنندگی آتمسفر (ET_0)				فواصل خیس شدن
پایین ۱ تا ۳ میلی متر بر روز	متوسط ۳ تا ۵ میلی متر بر روز	بالا ۵ تا ۷ میلی متر بر روز	خیلی بالا بیشتر از ۷ میلی متر بر روز	
۰/۸-۱/۲	۰/۶-۱/۱	۰/۴-۱/۰	۰/۳-۰/۹	کمتر از یک هفته
۰/۸	۰/۶	۰/۴	۰/۳	یک هفته
۰/۴-۰/۷	۰/۲-۰/۴*	۰/۲-۰/۳*	۰/۱-۰/۲*	بیشتر از یک هفته

ارقام از شکل‌های ۲۹ و ۳۰ استخراج شده‌اند.

* توجه شود که فاصله آبیاری ممکن است تا حدی طولانی شده که انجام تعرق کامل برای برخی گیاهان سالانه جوان مقدور نشود.



شکل ۲۳- مراحل رشد انواع محصولات

مرحله توسعه گیاه

مرحله توسعه گیاه، از زمان پوشش گیاهی ۱۰ درصد شروع می‌شود و تا زمان پوشش مؤثر کامل ادامه می‌یابد. زمان پوشش مؤثر کامل برای بسیاری از گیاهان مصادف با شروع گل‌دهی است. برای گیاهان ردیفی مانند لوبیا، چغندر قند، سیب‌زمینی و ذرت، زمان پوشش مؤثر کامل هنگامی است که با تداخل برگ بوته‌های همجوار، سایه‌اندازی خاک تقریباً کامل می‌شود یا گیاهان بدون تداخل برگ نیز، به اندازه کامل خود می‌رسند. برای برخی گیاهان، به ویژه با ارتفاع بیشتر از ۰/۵ متر، میانگین کسر پوشش گیاهی (f_c)، در ابتدای کتم شدن پوشش مؤثر، حدود ۰/۷ تا ۰/۸ است و با رشد گیاه، کسر سطح خاک در معرض نور و تحت سایه‌اندازی گیاه و همچنین، سطح برگ‌های به سمت نور تغییر ندارد. مقدار f_c در مرحله توسعه گیاه از حدود ۰/۷ تا ۰/۸ تجاوز نمی‌کند. هر چند، گیاه پس از پوشش مؤثر کامل به رشد در ارتفاع و سطح برگ ادامه می‌دهد. تعیین زمان پوشش مؤثر کامل برای گیاهان متراکم نظیر غلات زمستانه و بهاره و برخی انواع علوفه دشوار بوده و بنابراین، از زمان ظهور خوشه^۱ (گل‌دهی) که به سادگی قابل تعیین است، استفاده می‌شود. برای چمن‌های با رشد کامل، پوشش مؤثر، ممکن است، در ارتفاع حدود ۰/۱ تا ۰/۱۵ متری کامل شود. برای گونه‌های چمن ظریف (مراعات دیم)، ارتفاع چمن قبل از رسیدن به پوشش

1- Stage of heading

مؤثر کامل، ممکن است، حدود $0/3$ تا $0/5$ متر باشد. علوفه با تراکم کشت مناسب نظیر یونجه و شبدر در ارتفاع حدود $0/3$ تا $0/4$ متری به پوشش مؤثر کامل می‌رسند.

روش دیگر برای برآورد زمان پوشش مؤثر کامل هنگامی است که نمایه سطح برگ (LAI)، ۳ باشد. نمایه سطح برگ به عنوان میانگین مجموع مساحت (یک سمت) برگ‌ها در واحد سطح (زمین) زیرین آن تعریف می‌شود.

تبخیر از سطح خاک، با افزایش رشد و سایه‌اندازی گیاه کاهش می‌یابد و به تدریج تعرق جزء اصلی فرآیند تلفات آب می‌شود. در مرحله توسعه گیاه، ضریب گیاهی متناسب با پوشش سطح زمین و رشد گیاه متغیر است. به طور مثال، چنانچه خاک سطحی خشک و تحت تأثیر سایه‌اندازی گیاه و انتقال خرد مقیاس گرمای محسوس از خاک به پوشش گیاهی باشد، ضریب گیاهی $0/5$ متناظر با پوشش گیاهی ۲۵ تا ۴۰ درصد است. اغلب، ضریب گیاهی $0/7$ با پوشش گیاهی حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد متناظر می‌باشد. بر مبنای نوع گیاه، فاصله خیس شدن خاک و این فرض که گیاه در زمان پوشش کامل (متناسب با شکل ظاهری و ارتفاع گیاه نسبت به چمن) بیشتر از گیاه مرجع آب مصرف می‌کند، این مقدار تغییر خواهد کرد.

مرحله میانی رشد

مرحله میانی رشد، از زمان برقراری پوشش کامل مؤثر شروع شده و تا رسیدن محصول ادامه می‌یابد. اغلب، با پلاسیدگی گیاه یعنی زرد یا پلاسیدن و ریزش برگ یا قهوه‌ای شدن میوه تا حدی که تبخیر - تعرق گیاه نسبت به تبخیر - تعرق مرجع کاهش یابد، مرحله رسیدن محصول ظاهر می‌شود. مرحله میانی طولانی‌ترین مرحله رشد در گیاهان چند ساله و بسیاری از گیاهان سالانه می‌باشد. لیکن، برای سبزی‌ها که برای تازه‌خوری برداشت می‌شوند، این مرحله ممکن است، کوتاه باشد.

در مرحله میانی رشد، ضریب گیاهی ($K_{c\ mid}$) به بیشترین مقدار می‌رسد. تفاوت ضریب گیاهی از مقدار مرجع (یعنی ۱)، به طور عمده، ناشی از تفاوت مقاومت و ارتفاع گیاه و سطح مرجع چمن و همچنین، شرایط اقلیمی است.

مرحله پایانی رشد

مرحله پایانی از شروع رسیدن محصول (انتهای مرحله میانی) تا برداشت آن یا پلاسیدگی کامل گیاه ادامه دارد. محاسبه ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق گیاه در پایان دوره رشد یعنی تا زمان برداشت، خشک شدن طبیعی و پلاسیدگی کامل گیاه یا ریزش برگ‌ها خاتمه می‌یابد.

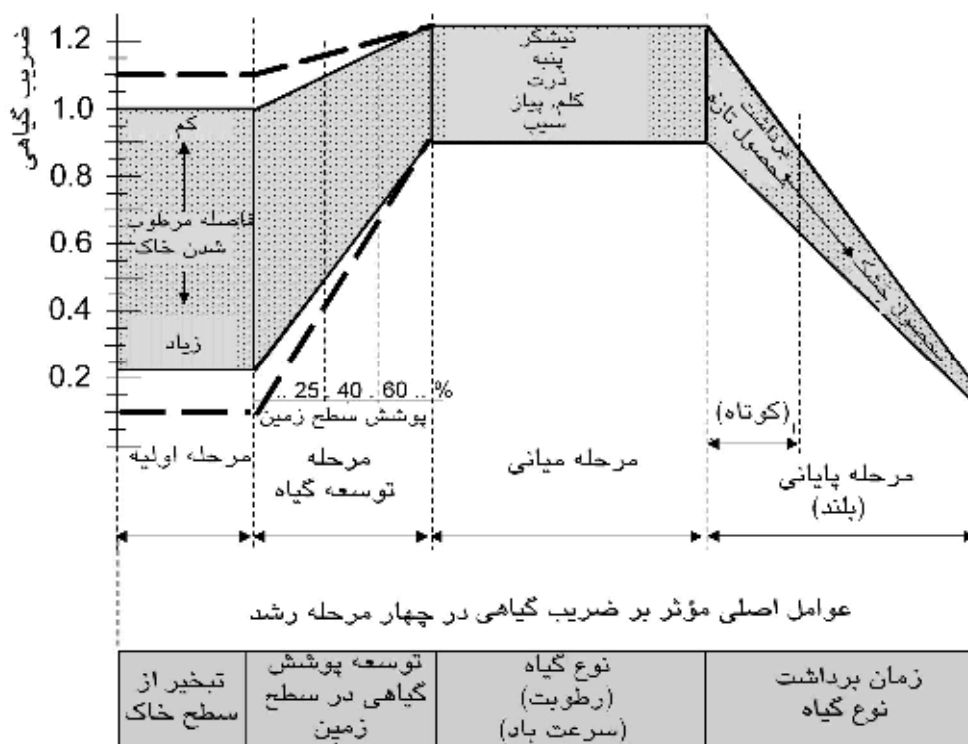
برای برخی گیاهان چند ساله در اقلیم بدون یخبندان، رشد گیاه ممکن است در سراسر سال ادامه یابد به نحوی که، انتهای مرحله پایانی رشد مصادف با تاریخ کشت گیاه در سال پیش گردد.

ضریب گیاهی در انتهای مرحله پایانی ($K_{c\ end}$)، تأثیر عملیات مدیریت آب و گیاه را منعکس می‌کند. چنانچه، آبیاری گیاه تا زمان برداشت محصول تر (برای تازه‌خوری) ادامه یابد، مقدار ضریب گیاهی مرحله

پایانی بالا و چنانچه، گیاه قبل از برداشت محصول پلاستیده و خشک شود، مقدار این ضریب پایین است. پلاستیدگی گیاه، به طور معمول، به دلیل غیرمؤثر شدن هدایت روزنه‌ای سطوح برگ، موجب کاهش ضریب گیاهی می‌شود. تغییر ضریب گیاهی انواع محصولات تابع اقلیم و توسعه گیاه در شکل ۲۴ نشان داده شده است.

تبخیر - تعرق گیاهان

تبخیر - تعرق گیاه از حاصل ضرب تبخیر - تعرق سطح مرجع (ET_0) و ضریب گیاهی (K_c) محاسبه می‌شود. ضریب گیاهی تفاوت تبخیر - تعرق گیاهان و سطح مرجع چمن را توصیف میکند. این تفاوت می‌تواند در یک ضریب یک جزیی تلفیق شده یا به صورت دو ضریب جداگانه که تفاوت دو جزء تبخیر و تعرق دو سطح را بیان کرده، نشان داده شود. انتخاب روش، به اهداف محاسباتی، دقت مورد نیاز، داده‌های اقلیمی در دسترس و دوره زمانی مورد نظر بستگی دارد. معیارهای کلی انتخاب روش محاسبه در جدول ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۲۴- حدهای معمول ضریب گیاهی مورد انتظار در چهار مرحله رشد

جدول ۱۰- معیارهای کلی برای انتخاب روش‌های ضریب گیاهی یک جزئی و دو جزئی

ضریب گیاهی دو جزئی ($K_{cb} + K_e$)	ضریب گیاهی یک جزئی (K_c)	
- تحقیقات - برنامه‌ریزی روزآمد^۱ آبیاری - برنامه‌ریزی آبیاری با فاصله کوتاه (خُرد آبیاری و آبیاری بارانی خودکار) - آبیاری تکمیلی - مطالعات تفضیلی خاک‌شناسی و موازنه هیدرولوژیکی آب	- طرح‌ریزی و طراحی آبیاری - مدیریت آبیاری - برنامه‌ریزی پایه‌ای آبیاری - برنامه‌ریزی روزآمد آبیاری با فاصله طولانی (آبیاری سطحی و بارانی)	هدف محاسبات
روزانه (داده‌ها و محاسبه‌ها)	روزانه، ده روزه، ماهانه (داده‌ها و محاسبه‌ها)	دوره زمانی
رایانه‌ای	نموداری با ماشین حساب جیبی رایانه‌ای	روش حل

روش ضریب گیاهی یک جزئی و دو جزئی

روش ضریب گیاهی یک جزئی

در روش ضریب گیاهی یک جزئی، اثر تعرق گیاه و تبخیر از خاک سطحی به صورت یک ضریب گیاهی نشان داده می‌شود. در این روش، تفاوت تبخیر از خاک و تعرق یک سطح تحت کشت گیاهان و چمن مرجع در یک ضریب گنجانده می‌شود. از آنجا که، ممکن است، تبخیر از خاک سطحی تحت تأثیر بارندگی یا آبیاری روزانه نوسان کند، ضریب گیاهی یک جزئی، تنها، میانگین اثر شرایط بر تبخیر - تعرق گیاه در طول دوره مورد نظر را توصیف می‌کند.

ضریب گیاهی یک جزئی، میانگین تبخیر از خاک و تعرق گیاهان را نشان می‌دهد، پس، این روش برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد در دوره‌های زمانی هفتگی یا طولانی‌تر مناسب است. ضریب گیاهی یک جزئی، برای طراحی سامانه‌های آبیاری که در آن میانگین اثر خیس شدن خاک مورد نظر بوده، قابل بکارگیری است. در طراحی سامانه‌های آبیاری سطحی و بارانی با فاصله چند روز و اغلب ۱۰ روز یا بیشتر، این روش مناسب می‌باشد. بنابراین، برای مدیریت آبیاری معمول، روش ضریب گیاهی یک جزئی معتبر است.

روش ضریب گیاهی دو جزئی ($K_{cb} + K_e$)

در روش ضریب گیاهی دو جزئی، تعرق گیاهان و تبخیر از سطح خاک، به طور جداگانه، بررسی و تعیین می‌شوند. در این روش از ضریب گیاهی پایه (K_{cb}) برای توصیف فرآیند تعرق گیاه و از ضریب تبخیر (K_e) برای توصیف فرآیند تبخیر از خاک استفاده می‌شود. در این روش، ضریب گیاهی یک جزئی (K_c) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (57)$$

که در آن:

K_{cb} = ضریب گیاهی پایه و

K_e = ضریب تبخیر از سطح خاک می‌باشند.

ضریب گیاهی پایه (K_{cb})، در شرایطی که لایه خاک سطحی خشک بوده، اما مقدار آب برای تعرق کامل گیاهان کافی است، به صورت نسبت تبخیر - تعرق گیاه به تبخیر - تعرق مرجع تعریف می‌شود. ضریب K_{cb} مقدار K_c بالقوه در شرایطی است که اثر تبخیر اضافی ناشی از خیس شدن خاک با آبیاری یا بارندگی وجود ندارد. ضریب تبخیر (K_e)، تبخیر از سطح خاک را توصیف می‌کند و مقدار آن پس از بارندگی یا آبیاری، ممکن است، بالا باشد. به هر حال، مجموع ضریب گیاهی پایه و تبخیر از حداکثر ضریب گیاهی ($K_{c \max}$) تابع انرژی در دسترس تبخیر - تعرق، بیشتر نخواهد شد. با خشک شدن خاک سطحی، ضریب تبخیر کاهش یافته و پس از مصرف آب قابل تبخیر، صفر می‌شود. برآورد ضریب تبخیر نیازمند محاسبه موازنه روزانه آب لایه خاک سطحی می‌باشد.

روش ضریب گیاهی دو جزئی در مقایسه با روش یک جزئی، دارای مراحل محاسباتی بیشتر است. روش دو جزئی برای برنامه‌ریزی آبیاری روزآمد، محاسبه موازنه آب خاک و بررسی اثر خیس شدن روزانه خاک (مشابه وضعیت سامانه‌های خرد آبیاری^۱ با فاصله کوتاه یا آبیاری بارانی متحرک نظیر دوار مرکزی^۲ یا متحرک خطی^۳) بر تبخیر - تعرق، مطالعه الگوی نفوذ آب در خاک و نفوذ عمقی مناسب است.

منحنی ضریب گیاهی

پس از انتخاب روش محاسبه، تعیین طول مراحل رشد و ضرایب گیاهی برای هر مرحله، منحنی ضریب گیاهی قابل رسم است. این منحنی، تغییر ضریب گیاهی در طول دوره رشد را نشان می‌دهد. تغییر پوشش گیاهی و سایه‌اندازی در مراحل توسعه و رسیدن محصول که بر نسبت تبخیر - تعرق گیاه (ET_c) به تبخیر - تعرق مرجع (ET_0) یعنی بر ضریب گیاهی مؤثر است، با این منحنی نشان داده می‌شود. ضریب گیاهی هر مرحله رشد می‌توان از روی منحنی ضریب گیاهی تعیین و در نتیجه تبخیر - تعرق محاسبه گردد.

1- Microirrigation Systems
2- Center Pivots
3- Linear Move Systems

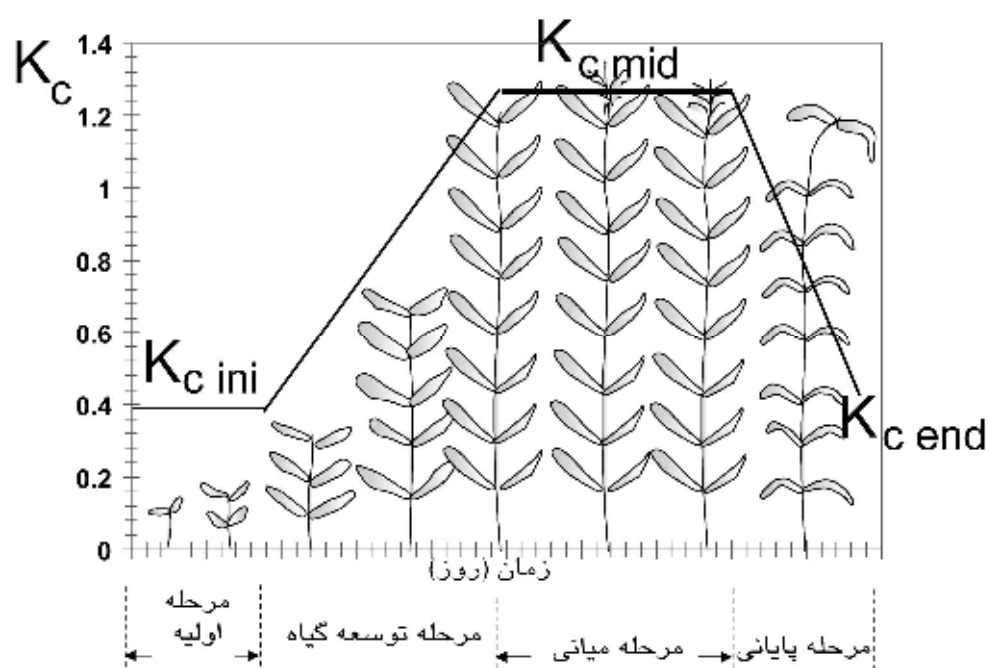
ضریب گیاهی یک جزیی

در شکل ۲۵، یک نمونه از منحنی ضریب گیاهی ارائه شده است. در اوایل دوره رشد گیاهان سالانه یا اندکی پس از ظهور برگ‌های اولیه گیاهان چند ساله، مقدار ضریب گیاهی پایین و اغلب کوچکتر از $0/4$ است. مقدار $K_{c\ ini}$ با شروع مرحله توسعه گیاه افزایش یافته و در زمان حداکثر توسعه یا نزدیک به آن، بیشترین مقدار (یعنی، $K_{c\ mid}$) است. در طول مرحله پایانی رشد که پلاسیدگی و ریزش برگ‌ها به طور طبیعی یا تحت تأثیر عملیات زراعی شروع می‌شود، ضریب گیاهی کاهش یافته و در مرحله پایانی ($K_{c\ end}$)، کمترین مقدار است.

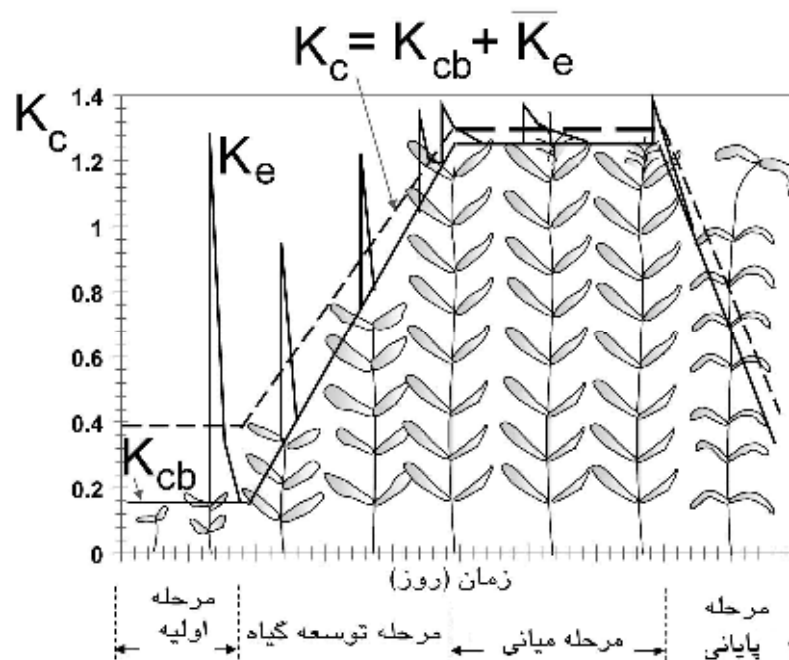
ضریب گیاهی دو جزیی

منحنی ضریب گیاهی یک جزیی در شکل ۲۵، میانگین تأثیر خیس شدن خاک را بر K_c نشان می‌دهد. مقدار ضریب گیاهی مرحله میانی برای اغلب شرایط رشد و عملیات زراعی معمول، به طور نسبی، ثابت است. با این وجود، تغییر روزانه ضریب گیاهی در مرحله اولیه و پایانی می‌تواند قابل ملاحظه باشد. این تغییر، به فاصله خیس شدن خاک با آبیاری و بارندگی بستگی دارد. روش ضریب گیاهی دو جزیی، افزایش واقعی ضریب گیاهی روزانه را به صورت تابعی از رشد گیاه و رطوبت خاک سطحی محاسبه می‌کند. از آنجا که، منحنی ضریب گیاهی یک جزیی شامل میانگین اثر تبخیر از خاک است، منحنی ضریب گیاهی پایه (K_{cb}) که تنها تعرق گیاه را توصیف می‌کند، پایین‌تر از منحنی ضریب گیاهی یک جزیی قرار می‌گیرد (شکل ۲۶). بیشترین تفاوت ضریب گیاهی یک جزیی و پایه در مرحله اولیه رشد مشاهده می‌شود، که تبخیر - تعرق، به طور عمده، به شکل تبخیر از خاک بوده و تعرق گیاه ناچیز است. از آنجا که، پوشش گیاهی مرحله میانی تقریباً کل سطح زمین را می‌پوشاند، تبخیر از خاک زیرین پوشش گیاهی اثر کمتر بر تبخیر - تعرق گیاه دارد و مقدار ضریب گیاهی پایه در این مرحله، حدود ضریب گیاهی به روش یک جزیی محاسبه می‌شود. بر پایه پوشش سطح زمین، ممکن است، ضریب گیاهی پایه در طول مرحله میانی، تنها، $0/05$ تا $0/1$ کمتر از ضریب گیاهی یک جزیی باشد. اگر فاصله آبیاری در مرحله پایانی رشد گیاه طولانی باشد، ضریب گیاهی پایه می‌تواند مشابه ضریب گیاهی یک جزیی تحت شرایط آبیاری با فاصله طولانی بوده یا از آن پایین‌تر باشد.

نمونه منحنی ضریب گیاهی پایه، ضریب تبخیر و ضریب گیاهی یک جزیی در شکل ۲۶ نشان داده شده است. منحنی K_{cb} در این شکل، نمایانگر کمترین مقدار ضریب گیاهی پایه برای شرایطی است که سطح خاک خشک بوده ولی تنش آبی وجود ندارد. در شکل ۲۶، حداکثر K_e ، افزایش تبخیر پس از بارندگی یا آبیاری را نشان می‌دهد که موجب افزایش موقت تبخیر - تعرق گیاه شده است. مقادیر اوج که با خشک شدن لایه خاک سطحی کاهش می‌یابند، به طور معمول، بر پایه اقلیم، عمق آب کاربردی و کسر خاک خیس شده بین $1/0$ تا $1/2$ متغیر می‌باشند.



شکل ۲۵- نمونه یک منحنی ضریب گیاهی در روش یک جزئی



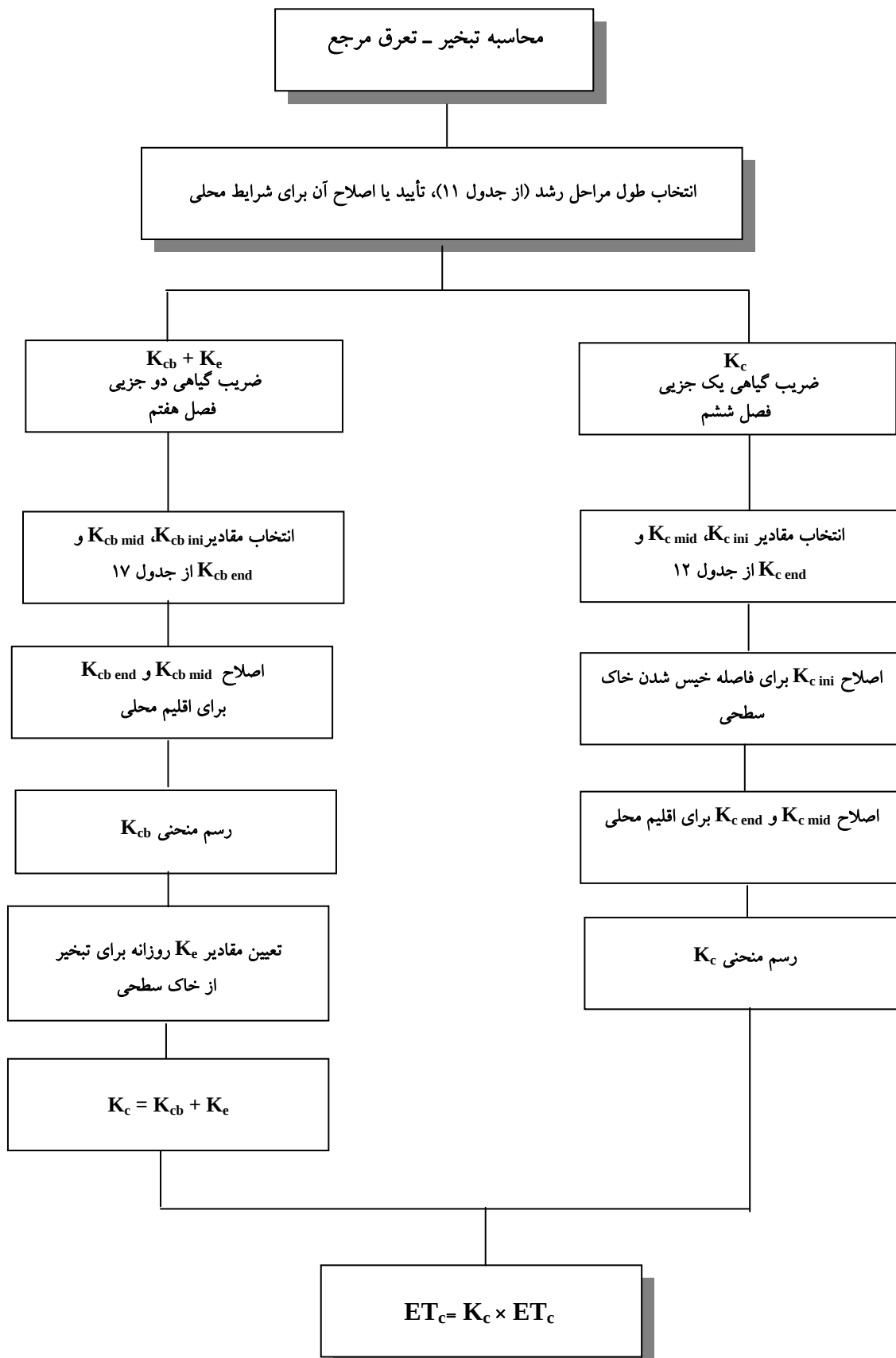
شکل ۲۶- منحنی‌های ضریب گیاهی شامل؛ ضریب گیاهی پایه (K_{cb})، تبخیر از خاک (K_e) و ضریب گیاهی یک جزئی ($K_c = K_{cb} + K_e$).

مجموع ضرایب گیاهی پایه و تبخیر، ضریب گیاهی یک جزیی را نشان می‌دهد. منحنی K_c کلی که در شکل ۲۶ با خط چین رسم شده، اثر میانگین $K_{cb}+K_e$ در یک دوره را نمایش می‌دهد. منحنی ضریب گیاهی یک جزیی با فاصله‌ای متناسب با تفاوت ضریب گیاهی در مراحل اولیه و توسعه گیاه، بالاتر از منحنی ضریب گیاهی پایه قرار دارد.

نمودار گردش محاسبه‌ها

مراحل محاسباتی مورد نیاز برای دو روش ضریب گیاهی در فصل‌های بعدی بیان شده است. در فصل ششم، روش ضریب گیاهی یک جزیی برای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد توصیف شده است. روش استفاده از دو ضریب برای گنجاندن اثر ویژگی‌های گیاه و خاک به طور جداگانه در فصل هفتم بیان شده است. شکل ۲۷، نمودار گردش محاسبه‌ها در شرایط استاندارد را نشان می‌دهد.

شکل ۲۷- محاسبه تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد



فصل ششم

تبخیر - تعرق گیاهان و ضریب گیاهی یک جزئی

در این فصل، روش محاسبه تبخیر - تعرق گیاه (ET_c) تحت شرایط استاندارد بیان می‌شود. در این شرایط، محدودیتی بر رشد یا تبخیر - تعرق گیاه تحت تأثیر تنش شوری و آبی، تراکم کشت پایین، آفات و بیماری‌های گیاهی، علف‌های هرز یا حاصلخیزی اندک خاک وجود ندارد. تبخیر - تعرق گیاه به روش ضریب گیاهی یک جزئی که در آن، اثر شرایط مختلف اقلیمی در تبخیر - تعرق مرجع (ET_0) و اثر ویژگی‌های گیاهی در ضریب گیاهی (K_c) گنجانده شده است، به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (58)$$

اثر هر دو عامل تعرق از گیاه و تبخیر از خاک در یک ضریب گیاهی (K_c) گنجانده شده است. ضریب K_c ویژگی‌های گیاه و میانگین اثر تبخیر از خاک را با یکدیگر تلفیق می‌کند. استفاده از میانگین ضرایب گیاهی برای برنامه‌ریزی معمول آبیاری و اهداف معمول مدیریتی و برای اغلب مطالعات موازنه هیدرولوژیک آب، مناسب‌تر و متداول‌تر از محاسبه روزانه ضریب گیاهی با بکارگیری ضرایب جداگانه گیاه و خاک است (فصل هفتم). هنگامی که مقادیر روزانه ضریب گیاهی برای محصولات کشاورزی و سال‌های مشخص مورد نیاز باشد، باید ضرایب جداگانه تعرق و تبخیر ($K_{cb} + K_e$)، در نظر گرفته شوند.

روش محاسبه تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد عبارت است از:

- ۱- تشخیص مراحل رشد گیاه، تعیین طول مدت هر مرحله و انتخاب ضریب گیاهی مربوطه
- ۲- اصلاح ضرایب گیاهی انتخاب شده، برای اثر فواصل خیس شدن خاک یا شرایط اقلیمی در طول هر مرحله رشد
- ۳- رسم منحنی ضریب گیاهی (به نحوی که تعیین مقادیر K_c برای هر دوره از مرحله رشد ممکن باشد)، و
- ۴- محاسبه تبخیر - تعرق از حاصل ضرب تبخیر - تعرق مرجع و ضریب گیاهی

طول مراحل رشد

در نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو، طول چهار مرحله جداگانه رشد و نیز دوره کامل فصل رشد برای اقلیم‌ها و مناطق مختلف ارائه شده است. خلاصه این ارقام که با داده‌های سایر منابع علمی موجود، تکمیل شده، در جدول ۱۱ آمده است. در برخی شرایط، زمان جوانه‌زنی گیاه و زمان پوشش مؤثر کامل را می‌توان با استفاده از معادله‌های رگرسیون یا مدل‌های پیشرفته‌تر رشد گیاه پیش‌بینی کرد. اینگونه مدل‌ها باید با استفاده از مشاهدات (داده‌های) واقعی برای شرایط محلی یا گیاهان مشخص، ارزیابی و تایید شوند.

جدول ۱۱- طول مراحل رشد انواع گیاهان برای تاریخ کشت و اقلیم متفاوت (روز)*

گیاه	مرحله اولیه (L _{ini})	مرحله توسعه گیاه (L _{dev})	مرحله میانی (L _{mid})	مرحله پایانی (L _{late})	کل	تاریخ کشت	منطقه
الف - سبزیجات ریز							
کلم بروکلی	۳۵	۴۵	۴۰	۱۵	۱۳۵	سپتامبر	صحرای کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
کلم	۴۰	۶۰	۵۰	۱۵	۱۶۵	سپتامبر	صحرای کالیفرنیا
هویج	۲۰	۳۰	۳۰/۵۰	۲۰	۱۰۰	اکتبر / ژانویه	اقلیم خشک
	۳۰	۴۰	۶۰	۲۰	۱۵۰	فوریه / مارس	مدیترانه‌ای
	۳۰	۵۰	۹۰	۳۰	۲۰۰	اکتبر	صحرای کالیفرنیا
گل کلم	۳۵	۵۰	۴۰	۱۵	۱۴۰	سپتامبر	صحرای کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
کرفس	۲۵	۴۰	۹۵	۲۰	۱۸۰	اکتبر	(نیمه) خشک
	۲۵	۴۰	۴۵	۱۵	۱۲۵	آوریل	مدیترانه
	۳۰	۵۵	۱۰۵	۲۰	۲۱۰	ژانویه	(نیمه) خشک
چلیپانیان ^۱	۲۰	۳۰	۲۰	۱۰	۸۰	آوریل	مدیترانه
	۲۵	۳۵	۲۵	۱۰	۹۵	فوریه	مدیترانه
	۳۰	۳۵	۹۰	۴۰	۱۹۵	اکتبر / نوامبر	مدیترانه
کاهو	۲۰	۳۰	۱۵	۱۰	۷۵	آوریل	مدیترانه
	۳۰	۴۰	۲۵	۱۰	۱۰۵	نوامبر / ژانویه	مدیترانه
	۲۵	۳۵	۳۰	۱۰	۱۰۰	اکتبر / نوامبر	منطقه خشک
	۳۵	۵۰	۴۵	۱۰	۱۴۰	فوریه	مدیترانه
پیاز (خشک)	۱۵	۲۵	۷۰	۴۰	۱۵۰	آوریل	مدیترانه
	۲۰	۳۵	۱۱۰	۴۵	۲۱۰	اکتبر / ژانویه	منطقه خشک، کالیفرنیا
پیاز (سبز)	۲۵	۳۰	۱۰	۵	۷۰	آوریل / مه	مدیترانه
	۲۰	۴۵	۲۰	۱۰	۹۵	اکتبر	منطقه خشک،
	۳۰	۵۵	۵۵	۴۰	۱۸۰	مارس	کالیفرنیا
پیاز (بذری)	۲۰	۴۵	۱۶۵	۴۵	۲۷۵	سپتامبر	صحرای کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
اسفناج	۲۰	۲۰	۲۵/۱۵	۵	۷۰/۶۰	آوریل؛ سپتامبر / اکتبر	مدیترانه
	۲۰	۳۰	۴۰	۱۰	۱۰۰	نوامبر	منطقه خشک
تربیجه	۵	۱۰	۱۵	۵	۳۵	مارس / آوریل	مدیترانه، اروپا
	۱۰	۱۰	۱۵	۵	۴۰	زمستان	منطقه خشک

* طول مراحل رشد گیاهان در شرایط معمول در این جدول ارائه شده لیکن ممکن است، این ارقام بر پایه اقلیم و شرایط کشت و نیز وارته گیاه در مناطق مختلف تغییر کنند. بنابراین، به طور اکید، توصیه می‌شود که از اطلاعات محلی استفاده شود.

۱- چلیپانیان شامل کلم معمولی، گل کلم، کلم بروکلی و کلم بروکسل می‌باشند. وسیع بودن دامنه طول دوره مراحل رشد به دلیل تفاوت‌های زیاد وارته در این خانواده می‌باشد.

ادامه جدول ۱۱-

گیاه	مرحله اولیه (L _{ini})	مرحله توسعه گیاه (L _{dev})	مرحله میانی (L _{mid})	مرحله پایانی (L _{late})	کل	تاریخ کشت	منطقه
ب- سبزیجات - خانواده بادمجانیان (Solanaceae)							
بادمجان	۳۰	۴۰	۴۰	۲۰	۱۳۰ ^۱	اکتبر	منطقه خشک
	۳۰	۴۵	۴۰	۲۵	۴۰	مه / ژوئن	مدیترانه
فلفل شیرین	۲۵/۳۰	۳۵	۴۰	۲۰	۱۲۵	آوریل / ژوئن	اروپا و مدیترانه
	۳۰	۴۰	۱۱۰	۳۰	۲۱۰	اکتبر	منطقه خشک
گوجه فرنگی	۳۰	۴۰	۴۰	۲۵	۱۳۵	ژانویه	منطقه خشک
	۳۵	۴۰	۵۰	۳۰	۱۵۵	آوریل / مه	کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
	۲۵	۴۰	۶۰	۳۰	۱۵۵	ژانویه	صحرای کالیفرنیا منطقه خشک
	۳۵	۴۵	۷۰	۳۰	۱۸۰	اکتبر / نوامبر	
	۳۰	۴۰	۴۵	۳۰	۱۴۵	آوریل / مه	مدیترانه
پ- سبزیجات - خانواده خیار (Cucubitaceae)							
گرمک و طالبی	۳۰	۴۵	۳۵	۱۰	۱۲۰	ژانویه	کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
	۱۰	۶۰	۲۵	۲۵	۱۲۰	اوت	کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
خیار	۲۰	۳۰	۴۰	۱۵	۱۰۵	ژوئن / اوت	منطقه خشک
	۲۵	۳۵	۵۰	۲۰	۱۳۰	نوامبر / فوریه	منطقه خشک
کدو تنبل، کدو زمستانه	۲۰	۳۰	۳۰	۲۰	۱۰۰	مارس / اوت	مدیترانه
	۲۵	۳۵	۳۵	۲۵	۱۲۰	ژوئن	اروپا
کدو سبز، کدو زوکینی ^۲	۲۵	۳۵	۲۵	۱۵	۱۰۰	آوریل / دسامبر	مدیترانه، منطقه خشک
	۲۰	۳۰	۲۵	۱۵	۹۰	مه / ژوئن	مدیترانه، اروپا
خریزه	۲۵	۳۵	۴۰	۲۰	۱۲۰	مه	مدیترانه
	۳۰	۳۰	۵۰	۳۰	۱۴۰	مارس	کالیفرنیا،
	۱۵	۴۰	۶۵	۱۵	۱۳۵	اوت	صحرای کالیفرنیا
	۳۰	۴۵	۶۵	۲۰	۱۶۰	دسامبر / ژانویه	منطقه خشک
هندوانه	۲۰	۳۰	۳۰	۳۰	۱۱۰	آوریل	ایتالیا
	۱۰	۲۰	۲۰	۳۰	۸۰	مارس / اوت	خاور نزدیک (صحرا)
ت- گیاهان ریشه‌ای و غده‌ای							
چغندر سالادی (لبو)	۱۵	۲۵	۲۰	۱۰	۷۰	آوریل / مه	مدیترانه
	۲۵	۳۰	۲۵	۱۰	۹۰	فوریه / مارس	مدیترانه و منطقه خشک
کاساوا ^۳	۲۰	۴۰	۹۰	۶۰	۲۱۰	فصل بارانی	مناطق گرمسیری
یکساله دو ساله	۱۵۰	۴۰	۱۱۰	۶۰	۳۶۰		
سیب زمینی	۲۵	۳۰	۳۰/۴۵	۳۰	۱۳۰/۱۱۵	ژانویه / نوامبر	اقلیم (نیمه) خشک
	۲۵	۳۰	۴۵	۳۰	۱۳۰	مه	اقلیم قاره‌ای
	۳۰	۳۵	۵۰	۳۰	۱۴۵	آوریل	اروپا
	۴۵	۳۰	۷۰	۲۰	۱۶۵	آوریل / مه	آیداهو، (ایالات متحده آمریکا)
	۳۰	۳۵	۵۰	۲۵	۱۴۰	دسامبر	صحرای کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
سیب زمینی شیرین	۲۰	۳۰	۶۰	۴۰	۱۵۰	آوریل	مدیترانه
	۱۵	۳۰	۵۰	۳۰	۱۲۵	فصل باران	مناطق گرمسیری

2- Zucchini

3- Cassava

ادامه جدول ۱۱-

گیاه	مرحله اولیه (L _{ini})	مرحله توسعه گیاه (L _{dev})	مرحله میانی (L _{mid})	مرحله پایانی (L _{late})	کل	تاریخ کشت	منطقه
چغندر قند	۳۰	۴۵	۹۰	۱۵	۱۸۰	مارس	کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
	۲۵	۳۰	۹۰	۱۰	۱۵۵	ژوئن	کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
	۲۵	۶۵	۱۰۰	۶۵	۲۵۵	سپتامبر	صحرای کالیفرنیا
	۵۰	۴۰	۵۰	۴۰	۱۸۰	آوریل	آیداهو (ایالات متحده آمریکا)
	۲۵	۳۵	۵۰	۵۰	۱۶۰	مه	مدیترانه
	۴۵	۷۵	۸۰	۳۰	۲۳۰	نوامبر	مدیترانه
	۳۵	۶۰	۷۰	۴۰	۲۰۵	نوامبر	مناطق خشک
ث- بقولات (Leguminosae)							
لوبیا (سبز)	۲۰	۳۰	۳۰	۱۰	۹۰	فوریه / مارس	کالیفرنیا، مدیترانه
	۱۵	۲۵	۲۵	۱۰	۷۵	اوت / سپتامبر	کالیفرنیا، مصر، لبنان
لوبیاها (دانه‌ای)	۲۰	۳۰	۴۰	۲۰	۱۱۰	مه / ژوئن	اقالیم قاره‌ای
	۱۵	۲۵	۳۵	۲۰	۹۵	ژوئن	پاکستان، کالیفرنیا
	۲۵	۲۵	۳۰	۲۰	۱۰۰	ژوئن	آیداهو (ایالات متحده آمریکا)
باقلا، بُردبین (نوعی لوبیا) - خشک - سبز	۱۵	۲۵	۳۵	۱۵	۹۰	مه	اروپا
	۲۰	۳۰	۳۵	۱۵	۱۰۰	مارس / آوریل	مدیترانه
	۹۰	۴۵	۴۰	۶۰	۲۳۵	نوامبر	اروپا
	۹۰	۴۵	۴۰	۰	۱۷۵	نوامبر	اروپا
لوبیا چشم بلبلی	۲۰	۳۰	۳۰	۲۰	۱۱۰	مارس	مدیترانه
بادام زمینی	۲۵	۳۵	۴۵	۲۵	۱۳۰	فصل خشک	غرب افریقا
	۳۵	۳۵	۳۵	۳۵	۱۴۰	مه	عرض‌های جغرافیایی بالا
	۳۵	۴۵	۳۵	۲۵	۱۴۰	مه / ژوئن	مدیترانه
عدس	۲۰	۳۰	۶۰	۴۰	۱۵۰	آوریل	اروپا
	۲۵	۳۵	۷۰	۴۰	۱۷۰	اکتبر / نوامبر	منطقه خشک
نخودفرنگی	۱۵	۲۵	۳۵	۱۵	۹۰	مه	اروپا
	۲۰	۳۰	۳۵	۱۵	۱۰۰	مارس / آوریل	مدیترانه
	۳۵	۲۵	۳۰	۲۰	۱۱۰	آوریل	آیداهو (ایالات متحده آمریکا)
سویا	۱۵	۱۵	۴۰	۱۵	۸۵	دسامبر	گرمسیری
	۲۰	۳۵/۳۰	۶۰	۲۵	۱۴۰	مه	امریکای مرکزی
	۲۰	۲۵	۷۵	۳۰	۱۵۰	ژوئن	ژاپن
ج- سبزیجات چند ساله (با خواب زمستانه و در خاک بدون پوشش و یا با مالچ)							
کنگر فرنگی	۴۰	۴۰	۲۵۰	۳۰	۳۶۰	آوریل (سال اول)	کالیفرنیا (برداشت در ماه مه)
	۲۰	۲۵	۲۵۰	۳۰	۳۲۵	مه (سال دوم)	
مارچوبه	۵۰	۳۰	۱۰۰	۵۰	۲۳۰	فوریه	زمستان گرم
	۹۰	۳۰	۲۰۰	۴۵	۳۶۵	فوریه	مدیترانه

ادامه جدول ۱۱-

گیاه	مرحله اولیه (L _{ini})	مرحله توسعه گیاه (L _{dev})	مرحله میانی (L _{mid})	مرحله پایانی (L _{late})	کل	تاریخ کشت	منطقه
ج- گیاهان فیبری							
پنبه	۳۰	۵۰	۶۰	۵۵	۱۹۵	مارس / مه	مصر، پاکستان، کالیفرنیا
	۴۵	۹۰	۴۵	۴۵	۲۲۵	مارس	صحرای کالیفرنیا
	۳۰	۵۰	۶۰	۵۵	۱۹۵	سپتامبر	یمن
	۳۰	۵۰	۵۵	۴۵	۱۸۰	آوریل	تکزاس
کتان	۲۵	۳۵	۵۰	۴۰	۱۵۰	آوریل	اروپا
	۳۰	۴۰	۱۰۰	۵۰	۲۲۰	اکتبر	آریزونا
ح- گیاهان روغنی							
کرچک	۲۵	۴۰	۶۵	۵۰	۱۸۰	مارس	اقلیم (نیمه) خشک
	۲۰	۴۰	۵۰	۲۵	۱۳۵	نوامبر	اندونزی
گلرنگ	۲۰	۳۵	۴۵	۲۵	۱۲۵	آوریل	کالیفرنیا
	۲۵	۳۵	۵۵	۳۰	۱۴۵	مارس	عرض های جغرافیایی بالا
	۳۵	۵۵	۶۰	۴۰	۱۹۰	اکتبر / نوامبر	منطقه خشک
کنجد	۲۰	۳۰	۴۰	۲۰	۱۰۰	ژوئن	چین
آفتابگردان	۲۵	۳۵	۴۵	۲۵	۱۳۰	آوریل / مه	مدیترانه، کالیفرنیا
خ- غلات							
جو، یولاف، گندم	۱۵	۲۵	۵۰	۳۰	۱۲۰	نوامبر	هند (مرکزی)
	۲۰	۲۵	۶۰	۳۰	۱۳۵	مارس / آوریل	عرض جغرافیایی ۳۵ الی ۴۵
	۱۵	۳۰	۶۵	۴۰	۱۵۰	ژوئیه	درجه
	۴۰	۳۰	۴۰	۲۰	۱۳۰	آوریل	آفریقای شرقی
	۴۰	۶۰	۶۰	۴۰	۲۰۰	نوامبر	
	۲۰	۵۰	۶۰	۳۰	۱۶۰	دسامبر	
	۲۰ ^۵	۶۰ ^۵	۷۰	۳۰	۱۸۰	دسامبر	صحرای کالیفرنیا (ایالات متحده)
	۳۰	۱۴۰	۴۰	۳۰	۲۴۰	نوامبر	آمریکا)
	۱۶۰	۷۵	۷۵	۲۵	۳۳۵	اکتبر	کالیفرنیا (ایالات متحده)
							آمریکا)
غلات دانه ریز	۲۰	۳۰	۶۰	۴۰	۱۵۰	آوریل	مدیترانه
	۲۵	۳۵	۶۵	۴۰	۱۶۵	اکتبر / نوامبر	پاکستان، منطقه خشک

۵- در اقلیم های دارای یخبندان، طول این دوره ها برای گندم کشت پاییز (گندم زمستانه) به تعداد روزهای دارای پتانسیل رشد صفر و دوره خواب گندم بستگی دارد. تحت شرایط معمولی و بدون داده های محلی، می توان فرض کرد که در اقلیم های معتدل شمالی گندم کشت پاییز هنگامی که میانگین متحرک ۱۰ روزه متوسط دمای روزانه هوا به ۱۷ درجه سلسیوس کاهش می یابد یا در اول دسامبر (هر کدام زودتر اتفاق می افتد)، کشت می شود. به علاوه، می توان فرض کرد که کشت گندم بهاره آنگاه که میانگین متحرک ۱۰ روزه متوسط دمای روزانه هوا تا ۵ درجه سلسیوس افزایش می یابد، انجام می شود. ذرت دانه ای نیز در بهار هنگامی که میانگین متحرک ۱۰ روزه متوسط دمای روزانه هوا تا ۱۳ درجه سلسیوس افزایش یابد، کشت می شود.

ادامه جدول ۱۱-

گیاه	مرحله اولیه (L _{ini})	مرحله توسعه گیاه (L _{dev})	مرحله میانی (L _{mid})	مرحله پایانی (L _{late})	کل	تاریخ کشت	منطقه
ذرت (دانه‌ای)	۳۰	۵۰	۶۰	۴۰	۱۸۰	آوریل	آفریقای شرقی
	۲۵	۴۰	۴۵	۳۰	۱۴۰	دسامبر / ژانویه	اقلیم خشک
	۲۰	۳۵	۴۰	۳۰	۱۲۵	ژوئن	نیجریه (مرطوب)
	۲۰	۳۵	۴۰	۳۰	۱۲۵	اکتبر	هند (خشک، سرد)
	۳۰	۴۰	۵۰	۳۰	۱۵۰	آوریل	اسپانیا (بهار، تابستان)، کالیفرنیا
	۳۰	۴۰	۵۰	۵۰	۱۷۰	آوریل	آیداهو
ذرت (شیرین)	۲۰	۲۰	۳۰	۱۰	۸۰	مارس	فیلیپین
	۲۰	۲۵	۲۵	۱۰	۸۰	مه / ژوئن	مدیترانه
	۲۰	۳۰	۳۰/۵۰	۱۰	۹۰	اکتبر / دسامبر	اقلیم خشک
	۳۰	۳۰	۳۰	۱۰ ^۶	۱۱۰	آوریل	آیداهو (ایالات متحده آمریکا)
	۲۰	۴۰	۷۰	۱۰	۱۴۰	ژانویه	صحرای کالیفرنیا
ارزن	۱۵	۲۵	۴۰	۲۵	۱۰۵	ژوئن	پاکستان
	۲۰	۳۰	۵۵	۳۵	۱۴۰	آوریل	آمریکا (مرکزی)
ذرت خوشه‌ای (سرگوم)	۲۰	۳۵	۴۰	۳۰	۱۳۰	مه / ژوئن	آمریکا، پاکستان، مدیترانه
	۲۰	۳۵	۴۵	۳۰	۱۴۰	مارس / آوریل	منطقه خشک
برنج	۳۰	۳۰	۶۰	۳۰	۱۵۰	دسامبر / مه	گرمسیری، مدیترانه
	۳۰	۳۰	۸۰	۴۰	۱۸۰	مه	گرمسیری
د- علوفه							
یونجه، کل فصل رشد ^۷	۱۰	۳۰	متغیر	متغیر	متغیر		آخرین ۴- درجه سلسیوس در بهار تا اولین ۴- درجه سلسیوس در پاییز
یونجه ^۷ (اولین چین)	۱۰	۲۰	۲۰	۱۰	۶۰	ژانویه	کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
	۱۰	۳۰	۲۵	۱۰	۷۵	آوریل (آخرین ۴- درجه سلسیوس)	آیداهو (ایالات متحده آمریکا)
یونجه ^۷ چین‌های بعدی	۵	۲۰	۱۰	۱۰	۴۵	مارس / ژوئن	کالیفرنیا / آیداهو
برموداگراس (بذری)	۱۰	۲۵	۳۵	۳۵	۱۰۵	مارس	صحرای کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
برموداگراس (با چند چین)	۱۰	۱۵	۷۵	۳۵	۱۳۵	-	صحرای کالیفرنیا
علف مرتعی ^۷	۱۰	۲۰	-	-	-	-	۷ روز قبل از آخرین ۴- درجه سلسیوس در بهار تا ۷ روز بعد از اولین ۴- درجه سلسیوس در پاییز

۶- مرحله پایانی فصل رشد ذرت (شیرین)، چنانچه برداشت پس از رسیدن و خشک شدن دانه‌ها انجام شود، ۳۵ روز می‌باشد.

۷- در اقلیم‌های با یخبندان شدید، فصل رشد برای یونجه و علوفه را می‌توان به صورت زیر برآورد کرد:

یونجه: از آخرین روز با حداقل دمای ۴- درجه سلسیوس در بهار تا اولین روز با حداقل دمای ۴- درجه سلسیوس در پاییز، مرجع مورد استفاده:

(Everson, D.O., M. Faubion and D.E. Amos. 1978. "Freezing temperatures and growing seasons in Idaho." Univ. Idaho Agric. Exp. Station bulletin 494. 18 p.)

علوفه: از ۷ روز قبل از آخرین روز با حداقل دمای ۴- درجه سلسیوس در بهار تا، ۷ روز بعد از آخرین روز با حداقل دمای ۴- درجه سلسیوس در پاییز،

منبع مورد استفاده:

(Kruse, E.G. and H.R. Haise, 1974. "Water use by native grasses in high altitude Colorado meadows." USDA Agric. Res. Service, Western Region report ARS-W-6-1974. 60 pages)

ادامه جدول ۱۱-

نوع گیاه	مرحله اولیه (L _{ini})	مرحله توسعه گیاه (L _{dev})	مرحله میانی (L _{mid})	مرحله پایانی (L _{late})	کل	تاریخ کشت	منطقه
سودان گراس (اولین چین)	۲۵	۲۵	۱۵	۱۰	۷۵	آوریل	صحرای کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
سودان گراس (چین های بعدی)	۳	۱۵	۱۲	۷	۳۷	ژوئن	صحرای کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)
ذ- نیشکر							
نیشکر (نشا)	۳۵	۶۰	۱۹۰	۱۲۰	۴۰۵		عرض های جغرافیایی پایین گرمسیری
	۵۰	۷۰	۲۲۰	۱۴۰	۴۸۰		هاوایی (ایالات متحده آمریکا)
	۷۵	۱۰۵	۳۳۰	۲۱۰	۷۲۰		
نیشکر، راتون	۲۵	۷۰	۱۳۵	۵۰	۲۸۰		عرض های جغرافیایی پایین گرمسیری
	۳۰	۵۰	۱۸۰	۶۰	۳۲۰		هاوایی (ایالات متحده آمریکا)
	۳۵	۱۰۵	۲۱۰	۷۰	۴۲۰		
ر- میوه ها و درختان گرمسیری							
موز (سال اول)	۱۲۰	۹۰	۱۲۰	۶۰	۳۹۰	مارس	مدیترانه
موز (سال دوم)	۱۲۰	۶۰	۱۸۰	۵	۳۶۵	فوریه	مدیترانه
آناناس	۶۰	۱۲۰	۶۰۰	۱۰	۷۹۰		هاوایی
ز- انگور و توت							
انگور	۲۰	۴۰	۱۲۰	۶۰	۲۴۰	آوریل	عرض های جغرافیایی پایین
	۲۰	۵۰	۷۵	۶۰	۲۰۵	مارس	کالیفرنیا عرض های جغرافیایی بالا
	۲۰	۵۰	۹۰	۲۰	۱۸۰	مه	بالا
	۳۰	۶۰	۴۰	۸۰	۲۱۰	آوریل	عرض های جغرافیایی متوسط
رازک	۲۵	۴۰	۸۰	۱۰	۱۵۵	آوریل	آیداهو (ایالات متحده آمریکا)
س- درختان میوه							
مرکبات	۶۰	۹۰	۱۲۰	۹۵	۳۶۵	ژانویه	مدیترانه
درختان میوه خزان شونده	۲۰	۷۰	۹۰	۳۰	۲۱۰	مارس	عرض های جغرافیایی بالا
	۲۰	۷۰	۱۲۰	۶۰	۲۷۰	مارس	عرض های جغرافیایی پایین
	۳۰	۵۰	۱۳۰	۳۰	۲۴۰	مارس	کالیفرنیا
زیتون	۳۰	۹۰	۶۰	۹۰	۲۷۰ ^۸	مارس	مدیترانه
پسته	۲۰	۶۰	۳۰	۴۰	۱۵۰	فوریه	مدیترانه
گردو	۲۰	۱۰	۳۰	۳۰	۱۹۰	آوریل	یوتا (ایالات متحده آمریکا)
ش- گیاهان تالابی- اقلیم معتدل							
گیاهان تالابی (لویی برگ پهن، نی)	۱۰	۳۰	۸۰	۲۰	۱۴۰	مه	یوتا (ایالات متحده آمریکا) با یخبندان شدید
	۱۸۰	۶۰	۹۰	۳۵	۳۶۵	نوامبر	فلوریدا (ایالات متحده آمریکا)
گیاهان تالابی (پوشش گیاهی کوتاه)	۱۸۰	۶۰	۹۰	۳۵	۳۶۵	نوامبر	اقلیم بدون یخبندان

۸- برگ های جوان درختان زیتون در ماه مارس (اسفند) ظاهر می شوند. برای اطلاعات بیشتر به پی نوشت ۲۴ در جدول ۱۲ که در آن بر ضریب گیاهی خارج از فصل رشد نیز تأکید دارد، مراجعه شود.

منبع مورد استفاده اولیه:

FAO Irrigation and Drainage Paper 24 (Doorenbos and Pruitt, 1977), Table 22.

طول مراحل اولیه و توسعه گیاه برای درختان خزان شونده و درختچه‌هایی که در فصل بهار به سرعت برگ‌های جدید تولید می‌کنند، ممکن است، به طور نسبی کوتاه، باشد (شکل ۲۳).

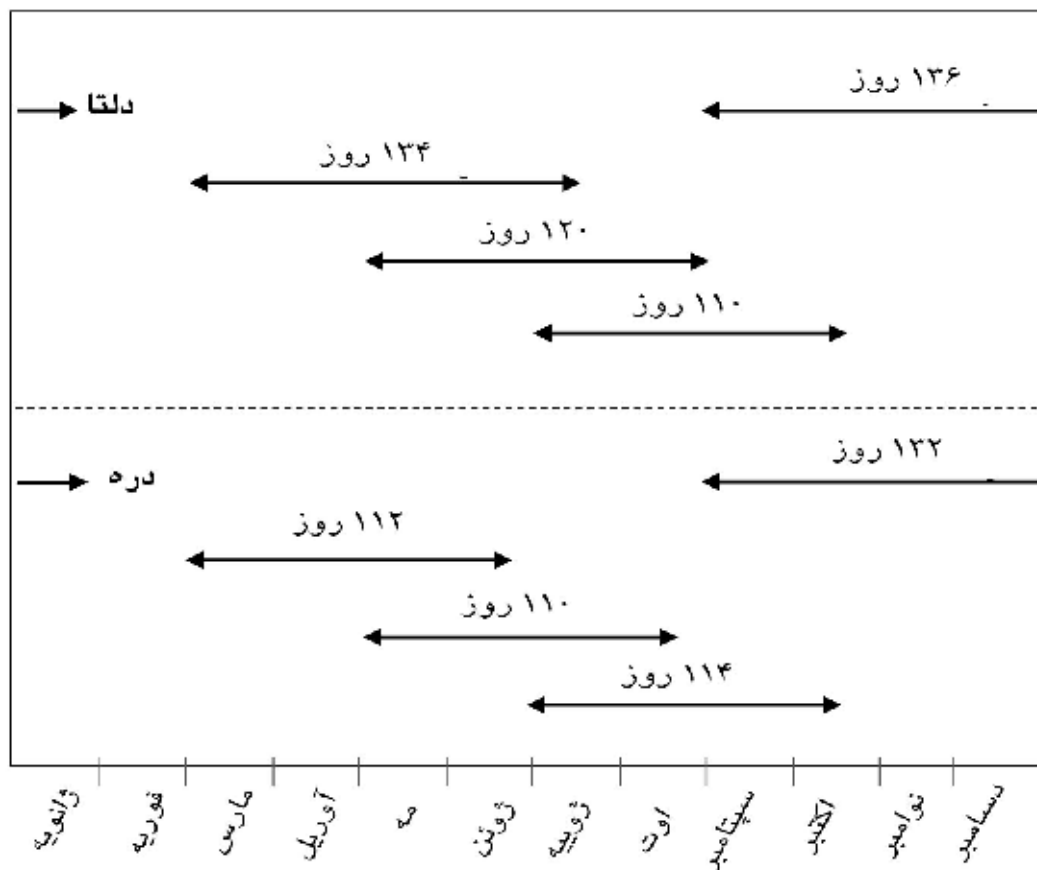
به طور کلی، شدت توسعه پوشش گیاهی و زمان لازم برای رسیدن به پوشش کامل مؤثر، به شرایط اقلیمی و به طور خاص به میانگین روزانه دمای هوا بستگی دارد. بنابراین، طول مدت بین زمان کشت و زمان پوشش کامل مؤثر با توجه به اقلیم، عرض جغرافیایی، ارتفاع و تاریخ کشت متفاوت خواهد بود و به گونه گیاه نیز بستگی دارد. به طور معمول، پس از برقراری پوشش کامل مؤثر برای یک پوشش گیاهی، شدت توسعه فنولوژیکی^۱ مراحل بعدی رشد (گل دهی، تولید بذر، رسیدن محصول و پلاسیدگی) وابستگی بیشتری به نوع ژنوتیپ^۲ (نژادمانه) گیاه و بستگی کمتری به اقلیم دارد. برای مثال، شکل ۲۸ طول فصل رشد یک واریته برنج را در یک منطقه برای تاریخ‌های کشت متفاوت نشان می‌دهد.

به طور معمول، پایان مرحله میانی و آغاز مرحله پایانی با پلاسیدگی برگ‌ها که، اغلب، از برگ‌های پایینی گیاه شروع شده، مشخص می‌شود. طول مرحله پایانی ممکن است به دلیل یخ‌زدگی (برای مثال، یخ‌زدگی ذرت در مناطق مرتفع و عرض جغرافیایی بیش از ۴۰ درجه شمالی) یا برداشت محصول برای تازه‌خوری (برای مثال، چغندر سالادی و سبزیجات ریز)، به طور نسبی، کوتاه (کمتر از ۱۰ روز) باشد.

دمای زیاد، ممکن است رسیدن محصول و پلاسیدگی گیاهان را تسریع کند. طولانی بودن دوره گرم (دمای بیشتر از ۳۵ درجه سلسیوس)، ممکن است، سبب خواب^۳ برخی گیاهان نظیر چمن شود. چنانچه، دمای بالا با تنش رطوبت توأم شود، دوره خواب گیاه ممکن است تا انتهای فصل رشد ادامه یابد. به طور معمول، تنش آبی (یا سایر تنش‌های محیطی)، سرعت رسیدن محصول را افزایش داده و می‌تواند مراحل میانی و پایانی را کوتاه کند.

مقادیر جدول ۱۱، تنها، ارقام راهنما بوده و برای مقایسه قابل استفاده هستند. این ارقام مثال‌هایی از میانگین مراحل رشد در مناطق و دوره‌های مشخص می‌باشند. در صورت امکان، برای گنجاندن تأثیر واریته گیاهی، اقلیم و عملیات زراعی، باید از داده‌های واقعی مراحل رشد گیاهان استفاده شود. اطلاعات محلی را می‌توان از کشاورزان، مروجان کشاورزی، محققین و بررسی‌های محلی و بکارگیری روش سنجش از دور^۴ بدست آورد. در تعیین تاریخ آغاز و پایان هر مرحله رشد نیز استفاده از مشاهدات و تجربه‌های محلی، ممکن است، مفید باشد.

1- Phenological
2- Genotype
3- Dormancy
4- Remote sensing



شکل ۲۸- تغییرات طول فصل رشد برنج (گونه Jaya) در تاریخ کشت و مناطق مختلف ساحلی رودخانه سنگال (آفریقا)

ضرایب گیاهی

تغییر پوشش گیاهی و پوشش سطح خاک موجب تغییر ضریب گیاهی در طول فصل رشد می‌شوند. روند تغییر ضریب گیاهی در طول فصل رشد در منحنی ضریب گیاهی نشان داده شده است. منحنی ضریب گیاهی، تنها، با معلوم بودن سه ضریب گیاهی مراحل اولیه ($K_{c\ ini}$)، میانی ($K_{c\ mid}$) و پایانی ($K_{c\ end}$) رشد قابل توصیف و ترسیم است.

مقادیر ضریب گیاهی

ضرایب گیاهی مراحل اولیه، میانی و پایانی محصولات کشاورزی برای شرایط استاندارد در جدول ۱۲ ارائه شده است. در این جدول گیاهان گروه‌بندی شده‌اند (به عنوان مثال، سبزیجات ریز، بقولات، غلات و غیره). بین ضرایب گیاهی محصولات یک گروه که دارای ارتفاع، سطح برگ، پوشش سطح خاک و مدیریت آب مشابه باشند، به طور معمول، تشابه وجود دارد.

ضرایب جدول ۱۲، اثر هر دو عامل تعرق و تبخیر در طی زمان را با هم ترکیب می‌کنند. این ترکیب، میانگین اثر فواصل خیس شدن خاک برای یک محصول استاندارد تحت شرایط عادی رشد در یک منطقه تحت آبیاری را نشان می‌دهد. ضریب گیاهی مرحله اولیه به شدت تحت تأثیر فواصل خیس شدن سطح خاک قرار دارد و بنابراین، در شرایط خیس شدن پی در پی سطح خاک (مانند شرایط آبیاری بارانی یا بارندگی با فواصل کم)، ضریب گیاهی در مرحله اولیه رشد، به طور اساسی، افزایش می‌یابد.

ضرایب گیاهی مراحل میانی و پایانی رشد در جدول ۱۲، برای اقلیم نیمه مرطوب با میانگین روزانه حداقل رطوبت نسبی ۴۵ درصد و باد آرام تا ملایم با میانگین سرعت روزانه ۲ متر بر ثانیه ارائه شده و باید برای شرایط با رطوبت یا خشکی و سرعت باد بیشتر یا کمتر، همان طوری که در این فصل بیان شده، اصلاح شوند. مقادیر ضریب گیاهی جدول ۱۲، برای گیاهان کشت شده در شرایط مطلوب زراعی و مدیریت آب، بدون تنش و برای تولید حداکثر محصول (شرایط استاندارد) ارائه شده است. هنگامی که تراکم کشت، ارتفاع یا سطح برگ کمتر از شرایط استاندارد باشد، باید ضرایب گیاهی مراحل میانی و پایانی اصلاح شوند (بخش پ، فصل‌های هشتم، نهم و دهم).

ضریب گیاهی در مرحله اولیه رشد

(روش مناسب)

مقادیر ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد ($K_c \text{ ini}$) ارائه شده در جدول ۱۲ تقریبی بوده و، تنها، در بررسی‌های مقدماتی برای برآورد تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد قابل استفاده می‌باشند. در این جدول، برای چندین نوع گیاه در هر گروه، تنها یک مقدار ضریب گیاهی ارائه شده که، فرض است نماینده ضریب گیاهی گروه محصولات تحت شرایط استاندارد مدیریت آب آبیاری باشد. ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد با اعمال فرض‌های زیر دقیق‌تر برآورد می‌شود:

توان تبخیرکنندگی آتمسفر

مقدار ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد تحت تأثیر توان تبخیرکنندگی آتمسفر (که با تبخیر - تعرق گیاه مرجع برآورد شده)، می‌باشد. به عبارتی، با افزایش توان تبخیرکنندگی آتمسفر، سطح خاک در فاصله بین بارندگی و یا آبیاری سریع‌تر خشک شده و میانگین ضریب گیاهی، پایین خواهد بود.

مقدار فیس شدن خاک

مقدار آب قابل تبخیر و مدت زمان خشک شدن لایه سطحی خاک تابع عمق آب آبیاری و بارندگی می‌باشد. ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد بر پایه فاصله و عمق آبیاری و بارندگی و توان تبخیرکنندگی آتمسفر از ۰/۱ تا ۱/۱۵ متغیر است. یک روش عددی برای محاسبه ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد در پیوست هفت ارائه شده است.

فاصله زمانی فیس شدن سطح خاک

بخش عمده تبخیر - تعرق گیاهان سالانه در مرحله اولیه رشد به صورت تبخیر از سطح خاک است. بنابراین، در برآوردهای دقیق ضریب گیاهی در این مرحله باید به فاصله زمانی بین خیس شدن خاک توجه گردد. در شرایطی که خاک پی در پی با آبیاری و یا بارندگی خیس شود، تبخیر از سطح خاک قابل ملاحظه و مقدار ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد، بالا خواهد بود. خشک شدن سطح خاک تبخیر را محدود و ضریب گیاهی را کاهش می‌دهد (جدول ۹).

به طور کلی، میانگین فاصله زمانی خیس شدن سطح خاک در مرحله اولیه رشد را می‌توان بر اساس بارندگی و آبیاری بیشتر از چند میلیمتر، برآورد کرد. بارندگی و آبیاری با فاصله زمانی کوتاه، یک نوبت منظور می‌شود. میانگین فاصله بارندگی و آبیاری از تقسیم طول مرحله اولیه رشد بر تعداد بارندگی و یا آبیاری برآورد می‌شود.

چنانچه، تنها مقادیر بارندگی ماهانه بدون هیچگونه اطلاعاتی از تعداد روزهای بارانی موجود باشد، تعداد بارندگی از تقسیم عمق بارندگی ماهانه بر عمق یک بارندگی (معمول) برآورد می‌شود. عمق یک بارندگی معمولاً به اقلیم، منطقه و فصل بستگی دارد. برخی اطلاعات از دامنه تغییر عمق بارندگی در جدول ۱۳ ارائه شده است. پس از تشخیص بارندگی معمول منطقه، می‌توان تعداد روزهای بارانی و سپس میانگین فاصله بین بارندگی‌ها را تعیین کرد.

چنانچه، مقدار بارندگی در طول فصل رشد کافی نباشد، انجام آبیاری برای تأمین آب مورد نیاز گیاه ضروری است. حتی اگر برنامه آبیاری مشخص نباشد، می‌توان میانگین فاصله آبیاری را با هدف پیشگیری از بروز اثر تنش آبی در گیاه، تعیین کرد. بر پایه شرایط اقلیمی، فاصله بین دو آبیاری از چند روز برای سبزیجات ریز تا یک هفته یا بیشتر برای غلات متغیر است. چنانچه فاصله آبیاری قابل برآورد نباشد، می‌توان $K_{c\ ini}$ را با استفاده از مقادیر جدول ۱۲ برآورد کرد.

جدول ۱۲- میانگین ضریب گیاهی (یک جزیی) و حداکثر ارتفاع گیاه تحت شرایط بدون تنش، مدیریت زراعی مطلوب و اقلیم نیمه مرطوب ($RH_{min}=45$ درصد و $u_2=2$ متر بر ثانیه) برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع به روش پنمن - مونتیت فائو.

گیاه	$K_{c\ ini}^1$	$K_{c\ mid}$	$K_{c\ end}$	حداکثر ارتفاع گیاه (متر)
الف - سبزیجات ریز				
کلم بروکلی	۰/۷	۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۳
کلم بروکسل		۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۴
کلم		۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۴
هویج		۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۳
گل کلم		۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۴
کرفس		۱/۰۵	۱/۰۰	۰/۶
سیر		۱/۰۰	۰/۷۰	۰/۳
کاهو		۱/۰۰	۰/۹۵	۰/۳
پیاز - انباری		۱/۰۵	۰/۷۵	۰/۴
- تازه		۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۳
- بذری		۱/۰۵	۰/۸۰	۰/۵
اسفناج		۱/۰۰	۰/۹۵	۰/۳
تربچه		۰/۹	۰/۸۵	۰/۳
ب- سبزیجات-(خانواده بادمجانیان)				
بادمجان	۰/۶	۱/۱۵	۰/۸۰	
فلفل شیرین		۱/۰۵ ^۲	۰/۹۰	۰/۸
گوجه فرنگی		۱/۱۵ ^۲	۰/۹۰-۰/۷۰	۰/۶
پ- سبزیجات (خانواده فیار)				
طالبی	۰/۵	۰/۸۵	۰/۶۰	۰/۳
خیار - تازه خوری	۰/۶	۱/۰۰ ^۲	۰/۷۵	۰/۳
- برداشت مکانیزه	۰/۵	۱/۰۰	۰/۹۰	۰/۳
کدو تنبل - کدو زمستانه		۱/۰۰	۰/۸۰	۰/۴
کدو سبز- کدو زوکی		۰/۹۵	۰/۷۵	۰/۳
خریزه		۱/۰۵	۰/۷۵	۰/۴
هندوانه	۰/۴	۱/۰۰	۰/۷۵	۰/۴

۱- ارقام $K_{c\ ini}$ در این جدول برای شرایط استاندارد مدیریت آبیاری و خیس شدن سطح خاک می باشند. اگر فاصله خیس شدن خاک کوتاه باشد (مشابه بارندگی روزانه یا آبیاری بارانی با فواصل کوتاه)، این مقادیر، ممکن است، به ۱ یا ۱/۲ نیز افزایش یابند. ضریب $K_{c\ ini}$ در طول مراحل اولیه و توسعه گیاه، تابع فواصل خیس شدن سطح خاک و شدت تبخیر بالقوه است و به طور دقیق تر، با استفاده از شکل های ۲۹ و ۳۰، معادله (۷-۳) در پیوست هفت یا معادله ضریب گیاهی دو جزیی ($K_{cb\ ini} + K_e$) برآورد می شوند.

۲- در حالتی که لویا، نخود، بقولات، گوجه فرنگی، فلفل و خیار به کمک داربست تا ارتفاع ۱/۵ الی ۲ متر رشد می کنند، باید از مقادیر بالاتر ضریب گیاهی استفاده شود. برای لویا سبز، فلفل و خیار از ضریب گیاهی ۱/۱۵ و برای گوجه فرنگی، لویا دانه ای و نخود از ضریب گیاهی ۱/۲ می توان استفاده کرد. تحت این شرایط، حداکثر ارتفاع نیز افزایش خواهد یافت.

ادامه جدول ۱۲-

گیاه	$K_{c\text{ ini}}$	$K_{c\text{ mid}}$	$K_{c\text{ end}}$	حداکثر ارتفاع گیاه (متر)
ت- گیاهان ریشه‌ای و غده‌ای	۰/۵	۱/۱۰	۰/۹۵	
چغندر سالادی (لبو)		۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۴
کاساوا - یکساله	۰/۳	۰/۸۰ ^۳	۰/۳۰	۱/۰
- دو ساله				
	۰/۳	۱/۱۰	۰/۵۰	۱/۵
هویج وحشی	۰/۵	۱/۰۵	۰/۹۵	۰/۴
سیب زمینی		۱/۱۵	۰/۷۵ ^۴	۰/۶
سیب زمینی شیرین		۱/۱۵	۰/۶۵	۰/۴
شلغم (زرد)		۱/۱۰	۰/۹۵	۰/۶
چغندر قند	۰/۳۵	۱/۲۰	۰/۷۰ ^۵	۰/۵
ث- بقولات	۰/۴	۱/۱۵	۰/۵۵	
لوبیا سبز	۰/۵	۱/۰۵ ^۲	۰/۹۰	۰/۴
لوبیا (دانه‌ای)	۰/۴	۱/۱۵ ^۲	۰/۳۵	۰/۴
نخود		۱/۰۰	۰/۳۵	۰/۴
باقلا - تازه	۰/۵	۱/۱۵ ^۲	۱/۱۰	۰/۸
- دانه‌ای / بذری	۰/۵	۱/۱۵ ^۲	۰/۳۰	۰/۸
گراپزو	۰/۴	۱/۱۵	۰/۳۵	۰/۸
گرین گرام و لوبیا چشم بلبلی		۱/۰۵	۰/۶۰-۰/۳۵ ^۶	۰/۴
بادام زمینی		۱/۱۵	۰/۶۰	۰/۴
عدس		۱/۱۰	۰/۳۰	۰/۵
نخود - تازه	۰/۵	۱/۱۵ ^۲	۱/۱۰	۰/۵
- دانه‌ای و بذری		۱/۱۵	۰/۳۰	۰/۵
سویا		۱/۱۵	۰/۵۰	۱/۰-۰/۵
ج- سبزیجات چند ساله (با دوره خواب زمستانی و خاک بدون پوشش یا با مالچ)	۰/۵	۱/۰۰	۰/۸۰	
کنگر	۰/۵	۱/۰۰	۰/۹۵	۰/۷
مارچوبه	۰/۵	۰/۹۵ ^۷	۰/۳۰	۰/۸-۰/۲
نعناع	۰/۶۰	۱/۱۵	۱/۱۰	۰/۸-۰/۶
توت فرنگی	۰/۴۰	۰/۸۵	۰/۷۵	۰/۲

۳- ضرایب گیاهی کاساوا در مرحله میانی رشد بدون تنش آبی در طول یا پس از فصل بارندگی و مقادیر $K_{c\text{ end}}$ ، برای دوره خواب گیاه در فصل خشک استفاده می‌شود.

۴- مقدار $K_{c\text{ end}}$ برای سیب‌زمینی با فصل رشد طولانی حدود ۰/۴ می‌باشد.

۵- مقدار $K_{c\text{ end}}$ برای آخرین ماه فصل رشد که آبیاری انجام نمی‌شود، کاربرد دارد. مقدار $K_{c\text{ end}}$ برای چغندر قند تحت آبیاری یا بارندگی کافی در طی ماه آخر فصل رشد، بیشتر (و تا حدود ۱) است.

۶- اولین $K_{c\text{ end}}$ برای هنگامی است که محصول به صورت عملکردتر مورد نظر است و دومین رقم برای برداشت محصول خشک (دانه‌ای) می‌باشد.

۷- به طور معمول، ضریب گیاهی مارچوبه در طول دوره برداشت به دلیل پوشش گیاهی کم پشت در حد $K_{c\text{ ini}}$ باقی می‌ماند. مقدار $K_{c\text{ mid}}$ برای دوره پس از برداشت محصول و رشد مجدد گیاه ارائه شده است.

ادامه جدول ۱۲-

گیاه	$K_c \text{ ini}$	$K_c \text{ mid}$	$K_c \text{ end}$	حداکثر ارتفاع گیاه (متر)
ه- گیاهان فیبری				
پنبه	۰/۳۵	۱/۲۰-۱/۱۵	۰/۷۰-۰/۵۰	۱/۲-۱/۵
کتان		۱/۱۰	۰/۲۵	۱/۲
کنف ^۸		۰/۷-۰/۴	۰/۷-۰/۴	۱/۵
ه- گیاهان روغنی				
کرچک	۰/۳۵	۱/۱۵	۰/۳۵	۰/۳
کلزا		۱/۵-۱/۱ ^۹	۰/۳۵	۰/۶
گلرنگ		۱/۵-۱/۱۰ ^۹	۰/۲۵	۰/۸
کنجد		۱/۱۰	۰/۲۵	۱/۰
آفتابگردان		۱/۰-۱/۱۵ ^۹	۰/۳۵	۲/۰
ه- غلات				
جو	۰/۳	۱/۱۵	۰/۱۴	۱/۰
یولاف (جو دوسر)		۱/۱۵	۰/۲۵	۱/۰
گندم بهاره		۱/۱۵	۰/۴۰-۰/۲۵ ^{۱۰}	۱/۰
گندم کشت پاییز - با دوره یخبندان - بدون دوره یخبندان	۰/۴	۱/۱۵	۰/۴۰-۰/۲۵ ^{۱۰}	۱/۰
	۰/۷	۱/۱۵	۰/۴۰-۰/۲۵ ^{۱۰}	۱/۰
ذرت (دانه‌ای)		۱/۲۰	۰/۶۰-۰/۳۵ ^{۱۱}	۲/۰
ذرت (شیرین)		۱/۱۵	۱/۰۵ ^{۱۲}	۱/۵
ارزن		۱/۰۰	۰/۳۰	۱/۵
سرگوم - دانه‌ای - علوفه‌ای		۱/۱۰-۱/۰۰	۰/۵۵	۲/۰-۱/۰
		۱/۲۰	۱/۰۵	۴/۰-۲/۰
برنج	۱/۰۵	۱/۲۰	۰/۹۰-۰/۶۰	۱/۰
د- علوفه				
یونجه - میانگین چند چین - برای هر چین جداگانه - بذری	۰/۴۰	۰/۹۵ ^{۱۳}	۰/۹۰	۰/۷
	۰/۴۰ ^{۱۴}	۱/۲۰ ^{۱۴}	۱/۱۵ ^{۱۴}	۰/۷
	۰/۴۰	۰/۵۰	۱/۵۰	۰/۷
برموداگراس - میانگین چند چین - محصول بهاره	۰/۵۵	۱/۰۰ ^{۱۳}	۰/۸۵	۰/۳۵
	۰/۳۵	۰/۹۰	۰/۶۵	۰/۴
شبدر برسيم - میانگین چند چین - در هر چین	۰/۴۰	۰/۹۰ ^{۱۳}	۰/۸۵	۰/۶
	۰/۴۰ ^{۱۴}	۱/۱۵ ^{۱۴}	۱/۱۰ ^{۱۴}	۰/۶
چاودار - میانگین چند چین	۰/۹۵	۱/۰۵	۱/۰۰	۰/۳

۸- ضریب گیاهی کنف به تراکم کشت و مدیریت آبیاری بستگی دارد (به عنوان مثال، تنش آبی مدیریتی)

۹- مقادیر کوچکتر برای گیاهان دیم غیر متراکم است.

۱۰- مقادیر بزرگتر برای گیاهانی که به طور غیر مکانیزه برداشت می‌شوند.

۱۱- اولین مقدار $K_c \text{ end}$ برای برداشت محصول دانه با رطوبت بالا و دومین مقدار ضریب گیاهی برای برداشت محصول دانه با رطوبت حدود ۱۸ درصد می‌باشد.

۱۲- اگر محصول برای مصرف تازه‌خوری برداشت شود، از $K_c \text{ end}$ ذرت در حالتی استفاده می‌شود که محصول رسیده و خشک باشد.

۱۳- ضریب $K_c \text{ mid}$ گیاهان علوفه‌ای، میانگین $K_c \text{ mid}$ کل است که از میانگین ضریب گیاهی در دوره‌های قبل و پس از هر نوبت برداشت بدست می‌آید. این ضریب در دوره‌ای که از انتهای اولین مرحله توسعه گیاه شروع و تا شروع آخرین مرحله پایانی رشد ادامه می‌یابد، کاربرد دارد.

۱۴- ضریب گیاهی گیاهان علوفه‌ای به ترتیب برای زمان‌های بلافاصله پس از برداشت، پوشش کامل و بلافاصله قبل از برداشت ارائه شده است. فصل رشد به عنوان مجموعه‌ای از دوره‌های با چین‌های جداگانه در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳۵).

ادامه جدول ۱۲-

گیاه	K _c ini	K _c mid	K _c end	حداکثر ارتفاع گیاه (متر)
سودان گراس (سالانه)				
- میانگین چندچین	۰/۵۰	۰/۹۰ ^{۱۴}	۰/۸۵	۱/۲
- در هر چین جداگانه	۰/۵۰ ^{۱۴}	۱/۱۵ ^{۱۴}	۱/۱۰ ^{۱۴}	۱/۲
علف مرتعی - چرای متناوب	۰/۴۰	۱/۰۵-۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۳۰-۰/۱۵
- چرای مفرط	۰/۳۰	۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۱
چمن - فصل خنک ^{۱۵}	۰/۹۰	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۱
- فصل گرم ^{۱۵}	۰/۸۰	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۱
ذ- نیشکر	۰/۴۰	۱/۲۵	۰/۷۵	۳/۰
ر- درختان میوه‌های گرمسیری				
موز - سال اول	۰/۵۰	۱/۱۰	۱/۰۰	۳/۰
- سال دوم	۱/۰۰	۱/۲۰	۱/۱۰	۴/۰
کاکائو	۱/۰۰	۱/۰۵	۱/۰۵	۳/۰
قهوه - خاک بدون پوشش	۰/۹۰	۰/۹۵	۰/۹۵	۳/۰-۲/۰
- خاک با علف‌های هرز	۱/۰۵	۱/۱۰	۱/۱۰	۳/۰-۲/۰
خرما	۰/۹۰	۰/۹۵	۰/۹۵	۸/۰
درختان نخل	۰/۹۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۸/۰
آناناس ^{۱۶} - خاک بدون پوشش	۰/۵۰	۰/۳۰	۰/۳۰	۱/۲-۰/۶
- خاک با پوشش چمن	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۱/۲-۰/۶
درختان کائوچو	۰/۹۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۱۰
چای - خاک بدون سایه انداز	۰/۹۵	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۵
- خاک با سایه انداز ^{۱۷}	۱/۱۰	۱/۱۵	۱/۱۵	۲/۰
ز- انگور و توت				
توت (بوت‌های)	۰/۳۰	۱/۰۵	۰/۵۰	۱/۵
انگور - تازه یا کشمش	۰/۳۰	۰/۸۵	۰/۴۵	۲/۰
- نوشیدنی	۰/۳۰	۰/۷۰	۰/۴۵	۲/۰-۱/۵
رازک	۰/۳	۱/۰۵	۰/۸۵	۵

۱۵- گونه‌های چمن فصل سرد شامل blue grass, regrass, fescue می‌باشد. گونه‌های فصل گرم شامل برموداگراس و چمن سنت اگوستین است. رقم های ۰/۹۵ برای چمن فصل سرد با ارتفاع ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ متر تحت شرایط عمومی است. اگر مدیریت دقیق آب اعمال شود و رشد سریع گیاه مورد نظر نباشد، مقدار K_c برای چمن به ۰/۱ کاهش می‌یابد.

۱۶- تعرق آناناس خیلی پایین است، زیرا، روزنه‌های آن در طول روز بسته و تنها در شب باز می‌باشند. بنابراین، بیشترین جزء تبخیر - تعرق گیاه آناناس تحت شرایط استاندارد مربوط به تبخیر از سطح خاک بوده و K_c mid > K_c ini است زیرا ضریب K_c mid مربوط به مرحله‌ای می‌باشد که زمین دارای پوشش کامل بوده و تبخیر از سطح خاک پایین است. مقادیر توصیه شده برای حالتی است که ۵۰ درصد سطح زمین با مالچ پلاستیکی سیاه پوشیده و آبیاری به صورت بارانی انجام می‌شود. برای آبیاری قطره‌ای همراه با کاربرد مالچ پلاستیکی، مقدار ضریب گیاهی، ممکن است، تا ۰/۱ کاهش یابد.

۱۷- با احتساب نیازهای آبی درختان سایه‌دار.

ادامه جدول ۱۲-

گیاه	$K_c \text{ ini}$	$K_c \text{ mid}$	$K_c \text{ end}$	حداکثر ارتفاع گیاه (متر)
۱- درختان میوه				
بادام، زمین بدون پوشش	۰/۴۰	۰/۹۰	۰/۶۵ ^{۱۸}	۵
سیب، آلبالو، گلابی				
زمین بدون پوشش، با یخبندان شدید	۰/۴۵	۰/۹۵	۰/۷۰ ^{۱۸}	۴
زمین بدون پوشش، بدون یخبندان	۰/۶۰	۰/۹۵	۰/۷۵ ^{۱۸}	۴
زمین با پوشش زنده با یخبندان شدید	۰/۵۰	۱/۲۰	۰/۹۵ ^{۱۸}	۴
زمین با پوشش زنده بدون یخبندان	۰/۸۰	۱/۲۰	۰/۸۵ ^{۱۸}	۴
زردآلو، هلو، میوه‌های هسته‌دار ^{۱۹-۲۰}				
زمین بدون پوشش، با یخبندان شدید	۰/۴۵	۰/۹۰	۰/۶۵ ^{۱۸}	۳
زمین بدون پوشش، بدون یخبندان	۰/۵۵	۰/۹۰	۰/۶۵ ^{۱۸}	۳
زمین با پوشش زنده، با یخبندان شدید	۰/۵۰	۱/۱۵	۰/۹۰ ^{۱۸}	۳
زمین با پوشش زنده، بدون یخبندان	۰/۸۰	۱/۱۵	۰/۸۵ ^{۱۸}	۳
آوکادو، زمین بدون پوشش	۰/۶۰	۰/۸۵	۰/۷۵	۳
مرکبات، زمین بدون پوشش ^{۲۱}				
- پوشش گیاهی ۷۰ درصد	۰/۷۰	۰/۶۵	۰/۷۰	۴
- پوشش گیاهی ۵۰ درصد	۰/۶۵	۰/۶۰	۰/۶۵	۳
- پوشش گیاهی ۲۰ درصد	۰/۵۰	۰/۴۵	۰/۵۵	۲
مرکبات، زمین با پوشش زنده یا علف هرز ^{۲۲}				
- پوشش گیاهی ۷۰ درصد	۰/۷۵	۰/۷۰	۰/۷۵	۴
- پوشش گیاهی ۵۰ درصد	۰/۸۰	۰/۸۰	۰/۸۰	۳
- پوشش گیاهی ۲۰ درصد	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۲

۸ - ضریب $K_c \text{ end}$ برای مرحله قبل از ریزش برگ است. بعد از ریزش برگ‌ها، مقدار $K_c \text{ end}$ حدود ۰/۲ برای خاک بدون پوشش و خشک، حدود ۰/۵ تا ۰/۸ برای خاک با پوشش گیاهی زنده می‌باشد (به فصل یازدهم مراجعه شود).

۱۹- برای برآورد ضریب گیاهی بیشه‌های جوان به معادله ۹۴، ۹۷ یا ۹۸ و پی‌نوشت‌های ۲۱ و ۲۲ مراجعه شود.

۲۰- گروه میوه‌های هسته‌دار شامل هلو، زردآلو، گلابی، خرما و گردو می‌شد.

۲۱- این ضریب گیاهی را می‌توان با استفاده از معادله ۹۸ برای $K_c \text{ min} = ۰/۱۵$ و $K_c \text{ full}$ مراحل اولیه، میانی و پایانی رشد به ترتیب ۰/۷۵، ۰/۷۰ و ۰/۷۵ و $f_c \text{ eff} = f_c$ که کسر پوشش گیاهی درختان با فرض تابش مستقیم خورشید است، محاسبه کرد. مقادیر جدول با ارقام پیشنهادی توسط دورنباس و پروت (۱۹۷۷) و مشاهدات سال‌های اخیر همخوانی دارد. مقدار ضریب گیاهی مرحله میانی به دلیل اثر بسته بودن روزنه‌ها در طول دوره‌های حداکثر تبخیر - تعرق از ضرایب گیاهی در مراحل اولیه و پایانی پایین است. برای اقلیم‌های مرطوب و نیمه مرطوب، که کنترل روزنه‌ای در مرکبات کمتر است، مقادیر $K_c \text{ ini}$ ، $K_c \text{ mid}$ و $K_c \text{ end}$ را می‌توان به مقدار ۰/۱ تا ۰/۲ افزایش داد (راجرز و همکاران، ۱۹۸۳).

۲۲- مقادیر K_c را می‌توان به صورت $K_c = f_c \cdot K_{c \text{ nge}} + (1 - f_c) \cdot K_{c \text{ cover}}$ محاسبه کرد که $K_{c \text{ nge}}$ برابر K_c مرکبات در خاک تحت پوشش غیرزنده (در پی‌نوشت ۲۱ محاسبه شده است)، $K_{c \text{ cover}}$ برابر K_c مرکبات در خاک تحت پوشش زنده (۰/۹۵) و f_c در پی‌نوشت ۲۱ تعریف شده است. مقادیر جدول با مقادیر ارائه شده توسط دورنباس و پروت (۱۹۷۷)، و با داده‌های اخیر همخوانی دارد. K_c برای مرکبات در خاک با پوشش زنده را می‌توان به طور مستقیم، از معادله ۹۸ و با در نظر گرفتن $K_c \text{ min} = K_{c \text{ cover}}$ برآورد کرد. برای آب و هوای مرطوب و نیمه مرطوب که کنترل روزنه‌ای مرکبات کمتر است، مقادیر $K_c \text{ ini}$ ، $K_c \text{ mid}$ و $K_c \text{ end}$ را می‌توان به مقدار ۰/۱ تا ۰/۲ افزایش داد (Following Rogers et al., 1983).

برای خاک با پوشش غیرزنده یا نسبتاً زنده (پوشش سبز دارای رشد با نمایه سطح برگ بیشتر از ۲ و تا حدود ۳ پوشش زنده محسوب می‌شود)، میانگین وزنی K_c باید بین مقدار K_c برای شرایط خاک بدون پوشش و K_c خاک دارای پوشش گیاهی زنده تعیین شود. مقدار K_c خاک دارای پوشش گیاهی زنده به میزان سبز بودن و سطح برگ‌هایی که زمین را می‌پوشانند، بستگی دارد.

ادامہ جدول ۱۲-

حد اکثر ارتفاع گیاه (متر)	K _c end	K _c mid	K _c ini	گیاه
۱۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	درختان مخروطدار (مثل کاج) ^{۲۳}
۳	۱/۰۵	۱/۰۵	۰/۴۰	کیوی
۳-۵	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۶۵	زیتون (با پوشش پوشش گیاهی ۴۰ تا ۶۰ درصد) ^{۲۴}
۳-۵	۰/۴۵	۱/۱۰	۰/۴۰	پسته، زمین بدون پوشش
۴-۵	۰/۶۵ ^{۱۸}	۱/۱۰	۰/۵۰	باغ گردو ^{۱۹}
س- کتلاوها، اقلیم معتدل				
۲	۰/۳۰	۱/۲۰	۰/۳۰	علف دم گربه‌ای، نی، با یخبندان شدید
۲	۰/۶۰	۱/۲۰	۰/۶۰	لویی برگ پهن و نی، بدون یخبندان
۰/۳	۱/۱۰	۱/۱۰	۱/۰۵	سبزیجات ریز، بدون یخبندان
۱-۳	۱/۰۰	۱/۲۰	۱/۰۰	نی باتلاق، در مرداب
۱-۳	۰/۷۰	۱/۲۰	۰/۹۰	نی باتلاق، در خاک مرطوب
ش- مالت فاص				
	۱/۰۵	۱/۰۵		آب آزاد با عمق کمتر از ۲ متر یا در اقلیم‌های نیمه مرطوب یا مناطق گرمسیری
	۱/۲۵ ^{۲۵}	۰/۶۵ ^{۲۵}		آب آزاد با عمق بیشتر از ۵ متر بدون کدورت، اقلیم معتدل

۲۳- مخروط‌داران به دلیل کاهش مقاومت آبرودینامیک، کنترل روزنه‌ای قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهند. ضریب K_c را می‌توان کمتر از ارقام ارائه شده در جدول، که نشان‌دهنده شرایط آبیاری مطلوب برای جنگلهای وسیع می‌باشد، در نظر گرفت.

۲۴- این ضرایب برای پوشش گیاهی حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد می‌باشند. با مراجعه به معادله ۹۸ و پی‌نوشت ۲۱ و ۲۲ می‌توان مقدار K_c درختان در دوره غیرباردهی را برآورد نمود. در اسپانیا، (Pastor and Orgaz, 1994) ضرایب ماهانه K_c باغ‌های زیتون را با ۶۰ درصد پوشش گیاهی در ماه‌های ژانویه تا دسامبر به ترتیب برابر ۰/۵۰، ۰/۵۰، ۰/۶۵، ۰/۶۵، ۰/۵۰، ۰/۴۵، ۰/۴۵، ۰/۵۵، ۰/۶۰، ۰/۶۵، ۰/۵۰، ۰/۵۰ تعیین شد. این ضرایب می‌توانند در شرایط مشابه بر پایه $K_{c\text{ ini}} = ۰/۶۵$ ، $K_{c\text{ mid}} = ۰/۴۵$ ، $K_{c\text{ end}} = ۰/۶۵$ و چهار مراحل رشد به ترتیب ۳۰، ۹۰، ۶۰ و ۹۰ روز مورد استفاده قرار گیرند. ضریب گیاهی K_c برای زمستان (فصل غیرزراعی) از دسامبر تا فوریه، ۰/۵ پیشنهاد شد.

۲۵- این مقدار K_c برای آب عمیق در عرض جغرافیایی متوسط که در آن تغییرات دمای آب در طول سال زیاد و تبخیر دوره ابتدایی اولیه و حداکثر به دلیل جذب انرژی توسط آب پایین می‌باشد، ارائه شده است. تبخیر از سطح آب در طول پاییز و زمستان به دلیل آزاد شدن گرما از توده آب بیشتر از تبخیر از سطح علفه است. بنابراین، $K_{c\text{ mid}}$ متناظر K_c دوره‌ای است که توده آب انرژی گرمایی را جذب می‌کند و $K_{c\text{ end}}$ متناظر دوره‌ای است که توده آب انرژی گرمایی را آزاد می‌کند. این مقادیر K_c باید با احتیاط استفاده شوند.

منبع مورد استفاده اولیه:

$K_{c\text{ ini}}$: (Doorenbos and Kassam, 1979)

$K_{c \text{ mid}}$ and $K_{c \text{ end}}$: Doorenbos and Pruitt. (1977); Pruitt (1998); Wright (1981, 1982); Snyder et. al. (1989).

جدول ۱۳- طبقه‌بندی عمق بارندگی

عمق (میلی متر)	بارندگی
کمتر یا مساوی ۳	خیلی سبک (نم‌نم)
۵	سبک (رگبار سبک)
کمتر یا مساوی ۱۰	متوسط (رگبار)
بیشتر یا مساوی ۴۰	سنگین (باران سیل‌آسا)

مثال ۲۳- برآورد فواصل بین بارندگی‌ها

در طول فصل بارندگی، فاصله بین بارندگی برای یک ایستگاه با اقلیم معتدل (پاریس، فرانسه: ۵۰ میلیمتر بر ماه)، اقلیم خشک (گفسا^۱، تونس: ۲۰ میلیمتر بر ماه) و اقلیم گرمسیری (کلکته، هند: ۳۰۰ میلیمتر بر ماه) را بر پایه میانگین داده‌های بارندگی ماهانه برآورد کنند.

ایستگاه	بارندگی ماهانه (میلیمتر)	بارندگی معمول (میلیمتر)	تعداد روزهای بارندگی	فاصله بارندگی
پاریس	۵۰	۳	۱۷	حدود ۲ روز
گفسا	۲۰	۵	۴	هفتگی
کلکته	۳۰۰	۲۰	۱۵	حدود ۲ روز

تعیین ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد

ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد می‌تواند با استفاده از شکل‌های ۲۹ و ۳۰ که در آن ضریب گیاهی تابعی از میانگین فواصل بین خیس شدن خاک، عمق آبیاری، عمق بارندگی و تبخیر - تعرق گیاه مرجع است، برآورد گردد.

فیس شدن سبک سطح خاک (عمق آب نفوذ یافته ۱۰ میلیمتر یا کمتر): بارندگی و آبیاری با فواصل کوتاه

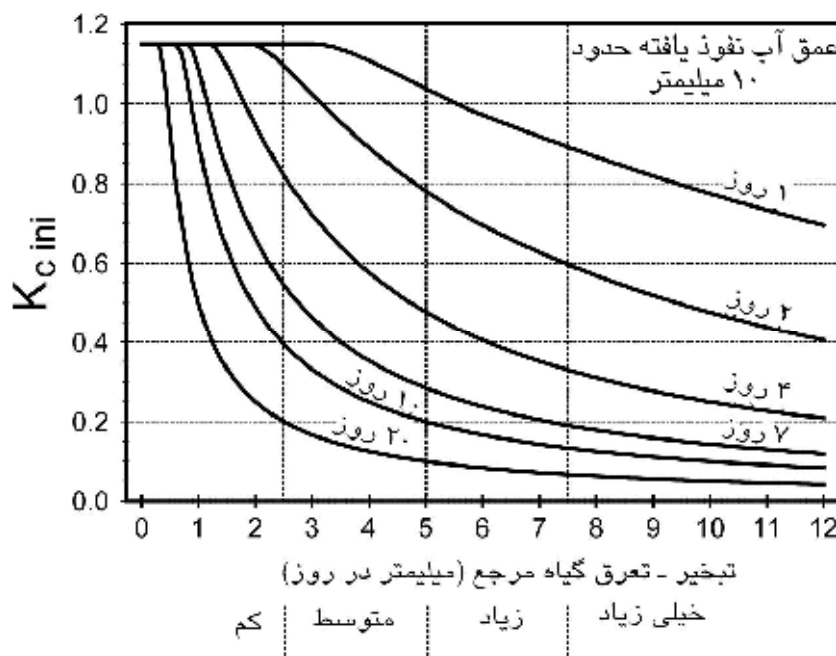
شکل ۲۹، برای انواع خاک‌ها که به صورت سبک خیس می‌شوند، استفاده می‌گردد. اگر خاک در مرحله اولیه رشد گیاه تنها به وسیله بارندگی خیس شود، به طور معمول، برای تعیین ضریب گیاهی این مرحله از شکل ۲۹ استفاده می‌شود. همچنین، تحت آبیاری با فواصل کم مشابه سامانه‌های خُرد آبیاری^۲ (قطره‌ای، ...) و دوآر مرکزی^۳ و عمق حدود ۱۰ میلیمتر یا کمتر، می‌توان از منحنی فوق استفاده کرد.

1- Gafsa
2- Micro Irrigation
3- Center Pivot

مثال ۲۴- تعیین ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد به روش نموداری	
در مرحله اولیه رشد گیاه، آبیاری با روش سامانه آبیاری دوار مرکزی و فاصله ۲ روز انجام می‌شود. بافت خاک لوم سیلت، میانگین عمق آبیاری حدود ۱۲ میلیمتر و میانگین تبخیر - تعرق گیاه مرجع ۴ میلیمتر بر روز است. تبخیر - تعرق گیاه در این مرحله را برآورد کنید.	
$K_{c\ ini}=0.85$ $ET_c=K_c ET_0=0.85 \times (4/0)=3.4$	از شکل ۲۹ برای آبیاری با فاصله ۲ روز:
میلیمتر بر روز	
میانگین تبخیر - تعرق گیاه در مرحله اولیه رشد ۳/۴ میلیمتر بر روز می‌باشد.	

فیس شدن سنگین سطح خاک (عمق آب آبیاری نفوذ یافته ۴۰ میلیمتر یا بیشتر): روش‌های آبیاری سطحی و بارانی

شکل ۳۰ برای شرایطی استفاده می‌شود که در آن عمق آب نفوذ یافته به خاک بیشتر از ۴۰ میلیمتر باشد. این شکل همچنین، برای هنگامی که آبیاری در ابتدای فصل رشد گیاه، به روش بارانی یا سطحی انجام شده، کاربرد دارد. متعاقب خیس شدن سطح خاک، مقدار آب قابل تبخیر در لایه سطحی خاک زیاد بوده و ممکن است، طول مدت خشک شدن آن به طور معنی‌داری افزایش یابد. در نتیجه، میانگین ضریب گیاهی بیشتر از حالتی است که شرایط خیس شدن سبک خاک می‌باشد. از آنجا که، مدت خشک شدن لایه سطحی خاک، علاوه بر توان تبخیرکنندگی آتمسفر و فواصل خیس شدن به ظرفیت ذخیره آب در این لایه نیز بستگی دارد، لذا این مدت برای انواع خاک متفاوت است.



شکل ۲۹- میانگین ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد به صورت تابع تبخیر - تعرق گیاه مرجع و فواصل خیس شدن برای بافت مختلف خاک مقدار آب نفوذ یافته کم تا متوسط (حدود ۱۰ میلیمتر)

شکل ۳۰- الف برای خاک‌های با بافت درشت و شکل ۳۰- ب برای خاک‌های با بافت متوسط و ریز استفاده می‌شود. بافت درشت شامل خاک‌های شنی و شن لومی، بافت متوسط شامل خاک‌های لوم شنی، لوم و لوم سیلت و سیلت و بافت ریز شامل خاک‌های لوم رس سیلتی، رس سیلتی و رس می‌باشند.

فیس شدن متوسط خاک (عمق آب نفوذ یافته بین ۱۰ تا ۴۰ میلیمتر):

در شرایطی که میانگین عمق آب نفوذ یافته بین ۱۰ تا ۴۰ میلیمتر باشد، مقدار ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد را می‌توان با استفاده از شکل‌های ۲۹ و ۳۰ برآورد کرد:

$$K_{c\ ini} = K_{c\ ini\ (Fig.29)} + \frac{I-10}{40-10} [K_{c\ ini\ (Fig.30)} - K_{c\ ini\ (Fig.29)}] \quad (59)$$

که در آن:

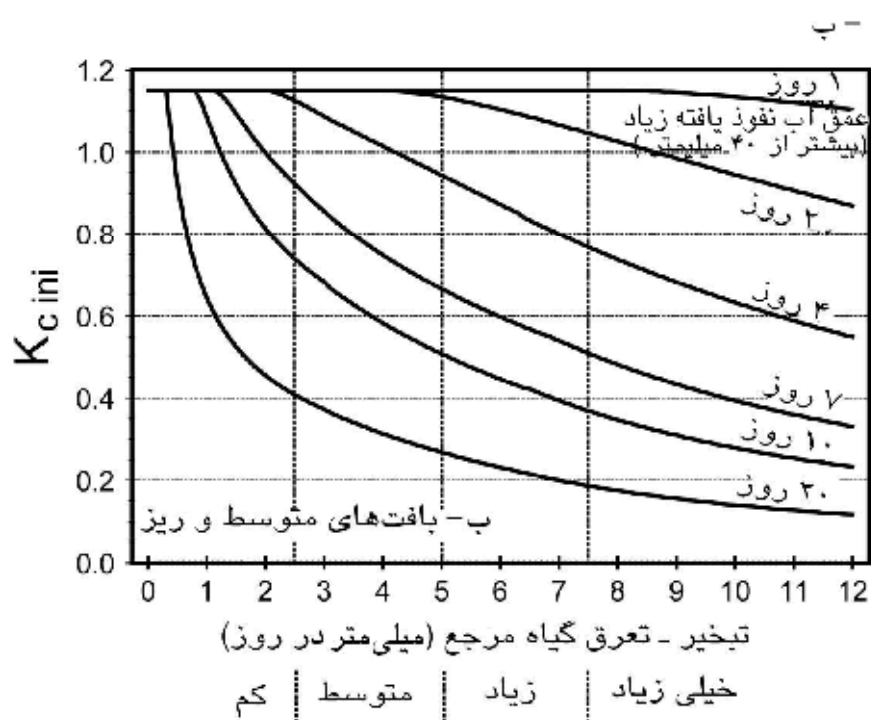
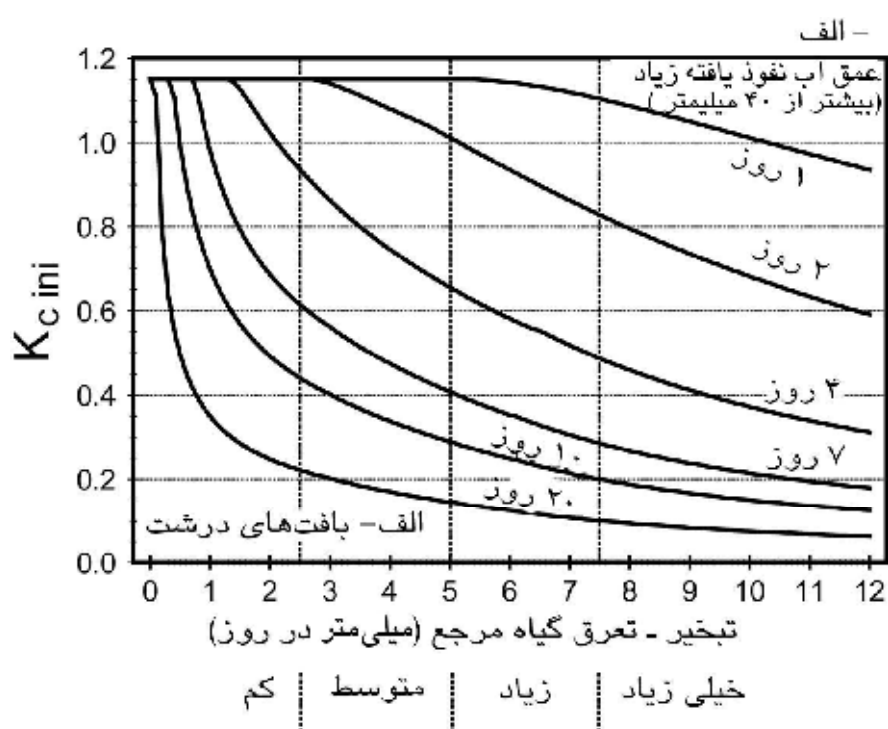
$K_{c\ ini}$ مقدار $K_{c\ ini}$ با استفاده از شکل ۲۹،

$K_{c\ ini}$ مقدار $K_{c\ ini}$ با استفاده از شکل ۳۰، و

I = میانگین عمق نفوذ آب آبیاری نفوذ یافته [میلیمتر]، می‌باشد.

مقادیر ۱۰ و ۴۰ در معادله ۵۹، میانگین عمق آب نفوذ یافته (به میلیمتر) است که بر مبنای آن، شکل‌های ۲۹ و ۳۰ رسم شده‌اند.

مثال ۲۵- میان‌یابی بین فواصل خیس شدن سبک و سنگین خاک	
در یک منطقه خشک با خاک درشت بافت، سبزیجات ریز به صورت بارانی هفته‌ای دو بار با عمق ۲۰ میلیمتر آبیاری می‌شوند. میانگین تبخیر - تعرق گیاه مرجع در مرحله اولیه رشد، ۵ میلیمتر بر روز می‌باشد. تبخیر - تعرق گیاه را در این مرحله برآورد کنید.	
برای فاصله آبیاری: $\frac{V}{P} = \frac{3}{5}$ روز و تبخیر و تعرق مرجع: خاک: ۵ میلیمتر بر روز درشت بافت	
$K_{c\ ini\ (Fig.29)} \approx 0.55$	از شکل ۲۹:
$K_{c\ ini\ (Fig.30-a)} \approx 0.7$	از شکل ۳۰-الف:
$I = 20$ میلی متر $K_{c\ ini} = 0.55 + \left(\frac{20-10}{40-10}\right) \times (0.7 - 0.55) =$ $= 0.55 + 0.33 \times (0.15) = 0.60$ $ET_0 = 0.60 \times (5) = 3.0$ میلی متر بر روز	برای عمق آب آبیاری: از معادله ۵۹: از معادله ۵۸:
میانگین تبخیر - تعرق گیاه در طول مرحله اولیه رشد برای سبزیجات ریز، ۳/۰ میلیمتر بر روز برآورد می‌شود.	



شکل ۳۰- میانگین ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد به صورت تابعی از تبخیر - تعرق گیاه مرجع و فاصله آبیاری با عمق ۴۰ میلیمتر و بیشتر؛ الف- بافت درشت، ب- بافت متوسط و ریز

اصلاح برای اثر فیس شدن سطح خاک با آبیاری

در بسیاری از روش‌های آبیاری، تنها کسری از سطح خاک خیس می‌شود. برای مثال، ممکن است، کسر سطح خاک خیس شده، f_w ، در آبیاری قطره‌ای، $0/4$ و در روش آبیاری نهرچه‌ای، کسر سطح خاک خیس شده، ممکن است، از $0/3$ تا $0/8$ متغیر باشد. مقادیر معمول کسر سطح خاک خیس شده با بارندگی یا آبیاری در جدول ۲۰ ارائه شده است. هنگامی که تنها کسری از سطح خاک خیس می‌شود، ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد که با استفاده از جدول ۱۲ یا شکل‌های ۲۹ یا ۳۰ تعیین شده است، با ضرب در کسر سطح خاک خیس شده اصلاح می‌شود:

$$K_{c\ ini} = f_w K_{c\ ini} \text{ (Tab, Fig)} \quad (60)$$

که در آن:

$$f_w = \text{کسر سطح خاک خیس شده با بارندگی یا آبیاری [۰ تا ۱] و}$$

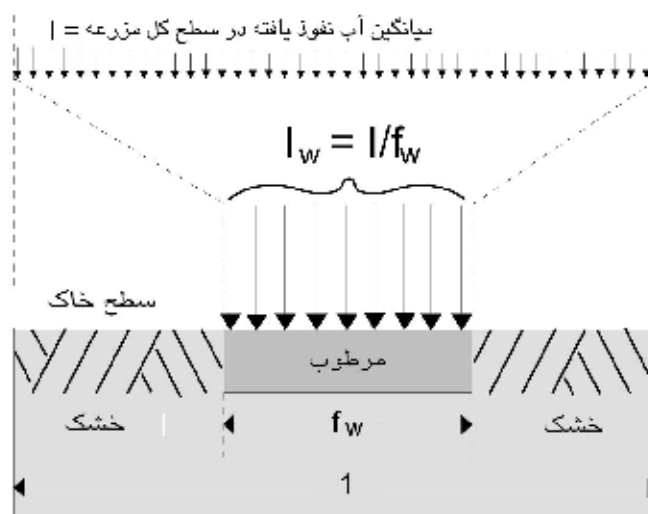
$$K_{c\ ini} \text{ (Tab, Fig)} = \text{مقدار ضریب گیاهی با استفاده از جدول ۱۲ یا شکل‌های ۲۹ و ۳۰، می‌باشند.}$$

برای انتخاب شکل مناسب (شکل ۲۹ یا ۳۰)، باید میانگین عمق آب نفوذ یافته در کل سطح مزرعه بر حسب میلیمتر، به کسر سطح خاک خیس شده، تقسیم و عمق واقعی آب نفوذ یافته از سطح خیس شده خاک (شکل ۳۱)، تعیین شود:

$$I_w = \frac{I}{f_w} \quad (61)$$

که در آن:

I_w ، عمق آبیاری در کسر خاک خیس شده [میلیمتر]، f_w ، کسر سطح خاک خیس شده با آبیاری، و I ، عمق آبیاری در کل سطح مزرعه [میلیمتر]، می‌باشد. هنگامی که در مرحله اولیه رشد، آبیاری بخشی از سطح خاک و بارندگی کل سطح خاک را خیس کنند، کسر سطح خاک خیس شده، به صورت میانگین وزنی (f_w) برای این دو حالت تعیین می‌شود.



شکل ۳۱- خیس شدن کسری از سطح خاک با آبیاری

مثال ۲۶- تعیین ضریب گیاهی در مرحله اولیه رشد هنگامی که کسری از سطح خاک خیس می‌شود.	
تبخیر - تعرق گیاه مثال ۲۴ تحت آبیاری قطره‌ای با فاصله ۲ روز، را تعیین کنید. عمق آب آبیاری به طور یکنواخت ۱۲ میلیمتر، میانگین کسر خاک خیس شده ۰/۴ و میزان بارندگی در مرحله اولیه رشد گیاه ناچیز است..	
میانگین عمق آب نفوذ یافته در کسر خیس شده سطح خاک به صورت زیر محاسبه می‌شود:	
از معادله ۶۱:	$I_w = \frac{I}{f_w} = \frac{12}{0.4} = 30 \text{ میلیمتر}$
بنابراین، می‌توان از شکل ۲۹ برای بارندگی یا آبیاری سبک (حدود ۱۰ میلیمتر) و شکل ۳۰-ب برای خاک با بافت متوسط و بارندگی و یا آبیاری سنگین (حدود ۴۰ میلیمتر)، میان‌یابی کرد.	
برای تبخیر - تعرق مرجع: و فاصله خیس شدن: از شکل ۲۹: از شکل ۳۰-ب: از معادله ۵۹:	۴ میلیمتر بر روز ۲ روز $K_{c\text{ ini}} = 0.85$ $K_{c\text{ ini}} = 0.15$ $K_{c\text{ ini}} = 0.85 + \left[\frac{30 - 10}{40 - 10} \right] \times (1/15 - 0.85)$ $K_{c\text{ ini}} = 1/0.5$
از آنجا که، کسر خاک خیس شده با آبیاری قطره‌ای ۰/۴ می‌باشد، $K_{c\text{ ini}}$ واقعی برای این روش به صورت زیر محاسبه می‌شود:	
از معادله ۶۰:	$K_{c\text{ ini}} = f_w \cdot K_{c\text{ ini Fig}} = 0.4 \times (1/0.5) = 0.42$ مقدار ۰/۴۲ برابر حالتی است که آب در کل سطح مزرعه پخش شود. $ET_c = K_{c\text{ ini}} ET_0 = 0.42 \times (4) = 1.7 \text{ میلی متر بر روز}$
میانگین تبخیر - تعرق مرحله اولیه رشد برای گیاه تحت آبیاری قطره‌ای ۱/۷ میلیمتر بر روز است.	

ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد درختان و درختچه‌ها

ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد درختان و درختچه‌ها باید شرایط سطح زمین در دوره پیش از رویش مجدد برگ درختان یا درختچه‌های خزان‌شونده یا شرایط دوره خواب یا فعالیت پایین درختان یا درختچه‌های همیشه سبز را منعکس کند. این ضریب به مقدار پوشش چمن یا علف‌های هرز، فواصل بارندگی و آبیاری، تراکم درختان و پوشش مالچ بستگی دارد. برای درختان میوه خزان‌شونده در اقلیم بدون یخبندان، مقدار ضریب گیاهی در مرحله اولیه رشد می‌تواند در خاک دارای پوشش گیاهی، ۰/۸ تا ۰/۹ و در شرایطی که خاک بدون پوشش بوده و فواصل بارندگی یا آبیاری زیاد است، ۰/۳ تا ۰/۴ باشد. مقدار این ضریب برای درختان میوه همیشه سبز (بدون ریزش همزمان برگ‌ها) و دارای دوره خواب تغییر چندانی نداشته و مشابه موارد جدول ۱۲ و پی‌نوشت‌های ۲۱ و ۲۲ برای مرکبات است. چنانچه، پوشش گیاهی ۵۰ درصد یا کمتر باشد، این ضریب وضعیت سطح خاک (خاک بدون پوشش، خاک با پوشش مالچ یا چمن زنده یا علف‌های هرز) را، نیز، منعکس می‌کند.

جدول ۱۴- ضریب گیاهی برنج در مرحله اولیه رشد برای رطوبت هوا و سرعت باد مختلف

سرعت باد (متر بر ثانیه)			رطوبت
شدید	متوسط	آرام	
۱/۲۰	۱/۱۵	۱/۱۰	خشک - نیمه خشک
۱/۱۵	۱/۱۰	۱/۰۵	نیمه مرطوب - مرطوب
۱/۱۰	۱/۰۵	۱/۰۰	خیلی مرطوب

ضریب گیاهی برنج در مرحله اولیه رشد

جزء عمده تبخیر - تعرق مرحله اولیه رشد برنج در مزارع با عمق مانداب ۰/۱ تا ۰/۲ متر، به صورت تبخیر از آب راکد است. در جدول ۱۲، مقدار این ضریب برای اقلیم نیمه مرطوب با سرعت باد آرام تا ملایم ۱/۰۵ می باشد که، برای اقلیم محلی باید با استفاده از جدول ۱۴، اصلاح شود.

ضریب گیاهی در مرحله میانی رشد

نمایش اثر اقلیم

مقادیر معمول ضریب گیاهی مرحله میانی رشد برای انواع محصولات کشاورزی، در جدول ۱۲ ارائه شده است. همان طور که در فصل پنجم بیان شد، اثر تفاوت در ویژگی های آیرودینامیک سطح مرجع چمن و محصولات کشاورزی، نه تنها وابسته به گیاه بوده، بلکه با شرایط اقلیمی و ارتفاع گیاه نیز تغییر می کند (شکل ۲۱). مقادیر ضرایب گیاهی مرحله میانی رشد در اقلیم خشک دارای بادهای با سرعت بالا، بیشتر و در اقلیم مرطوب دارای بادهای با سرعت پایین، کمتر می باشند، اثر نسبی اقلیم بر ضریب گیاهی مرحله میانی رشد در شکل ۳۲، نشان داده شده که در آن مقادیر جدول ۱۲ برای اقلیم، میانگین سرعت باد روزانه و ارتفاع گیاه، تعدیل شده اند. به عنوان مثال، تغییر مورد انتظار ضریب گیاهی مرحله میانی رشد گوجه فرنگی برای اثر اقلیم محلی، در کادر ۱۴ ارائه شده است.

تعیین ضریب گیاهی مرحله میانی رشد

مقادیر ضرایب گیاهی مرحله میانی رشد در جدول ۱۲، برای اقلیم هایی که حداقل رطوبت نسبی ۴۵ درصد و یا سرعت باد (در ارتفاع دو متری) ۲ متر بر ثانیه نمی باشد، به صورت زیر تعدیل می شوند:

$$K_{c mid} = K_{c mid (Tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \quad (62)$$

که در آن:

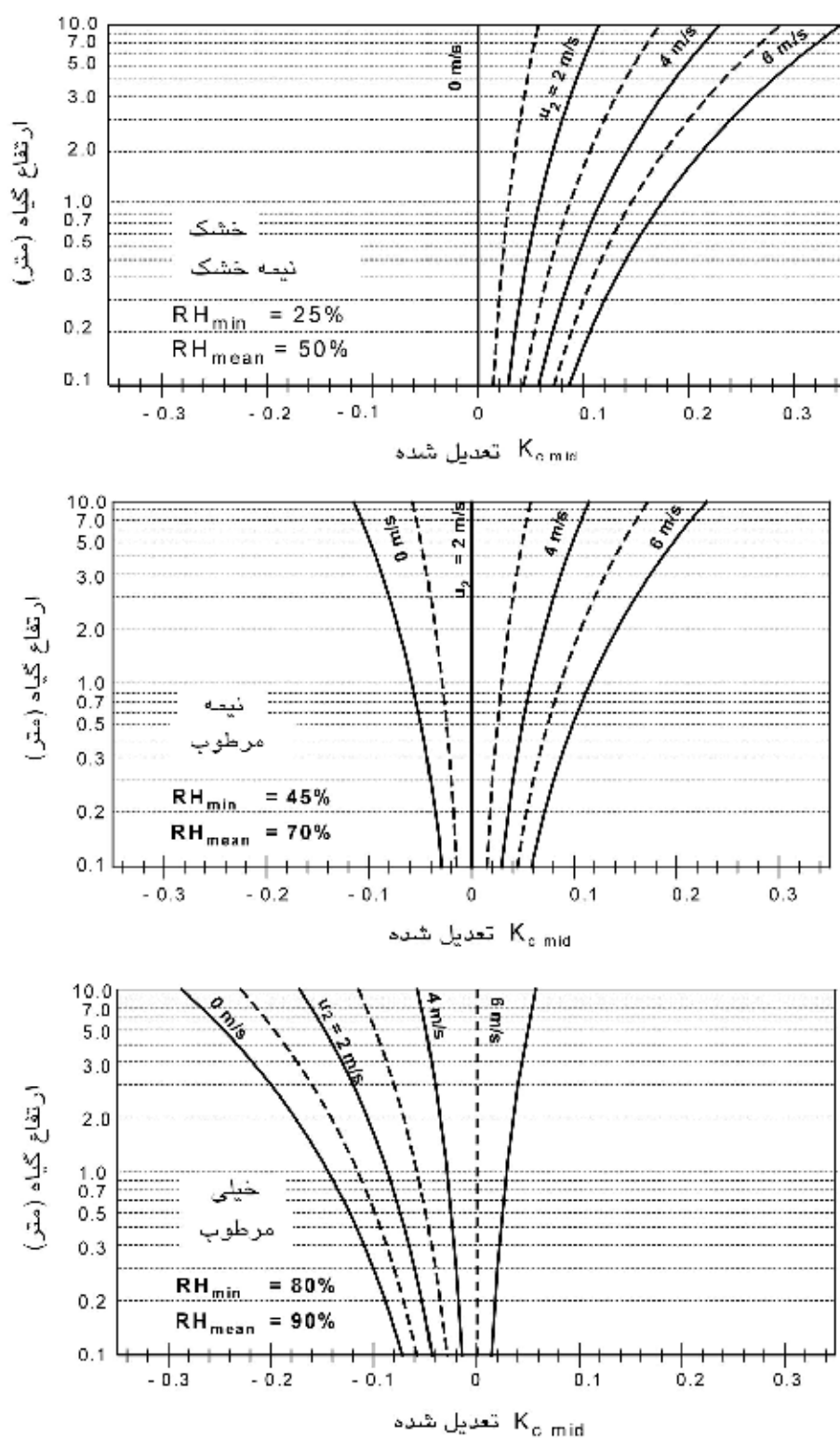
$K_{c mid (Tab)}$ = مقدار $K_{c mid}$ از جدول ۱۲،

u_2 = میانگین سرعت باد روزانه در ارتفاع دو متری بالای سطح چمن در مرحله میانی رشد [متر بر ثانیه]،

بین ۱ تا ۶ متر بر ثانیه،

RH_{min} = میانگین حداقل رطوبت نسبی روزانه در مرحله میانی رشد [درصد]، بین ۲۰ تا ۸۰ درصد و،

h = میانگین ارتفاع گیاه در مرحله میانی رشد [متر]، بین ۰/۱ تا ۱۰ متر، می باشند.



شکل ۳۲- تعدیل (افزایش) مقادیر $K_{c \text{ mid}}$ ارائه شده در جدول ۱۲ برای ارتفاع گیاه، میانگین سرعت باد روزانه (u_2) مختلف در شرایط متفاوت رطوبت هوا

با معادله‌های ۶۲ و ۶۵، میانگین مقادیر $K_{c\ mid}$ اصلاح شده در مراحل میانی و پایانی رشد را تعیین می‌شود. بنابراین باید از میانگین روزانه داده‌های سرعت باد در ارتفاع دو متری بالای سطح زمین و حداقل رطوبت نسبی استفاده شود (به مثال پیوست هشت مراجعه شود). حدهای بیان شده برای سرعت باد، حداقل رطوبت نسبی و ارتفاع گیاه باید رعایت شوند^۱.

کادر ۱۴- اثر اقلیم بر ضریب گیاهی مرحله میانی رشد گندم تحت شرایط مزرعه‌ای

از جدول ۱۲، برای گندم با $h = ۱$ متر و $K_{c\ mid} = ۱/۱۵$

شرایط نیمه خشک تا خشک

$K_{c\ mid} = ۱/۱۵ + ۰/۱۰ = ۱/۲۵$	- باد شدید (۴ متر بر ثانیه)
$K_{c\ mid} = ۱/۱۵ + ۰/۰۵ = ۱/۲۰$	- باد ملایم (۲ متر بر ثانیه)
$K_{c\ mid} = ۱/۱۵ + ۰/۰۲ = ۱/۱۷$	- باد آرام (۱ متر بر ثانیه)

شرایط نیمه مرطوب

$K_{c\ mid} = ۱/۱۵ + ۰/۰۵ = ۱/۲۰$	- باد شدید (۴ متر بر ثانیه)
$K_{c\ mid} = ۱/۱۵ + ۰/۰۰ = ۱/۱۵$	- باد ملایم (۲ متر بر ثانیه)
$K_{c\ mid} = ۱/۱۵ - ۰/۰۳ = ۱/۱۰$	- باد آرام (۱ متر بر ثانیه)

شرایط مرطوب و خیلی مرطوب

$K_{c\ mid} = ۱/۱۵ - ۰/۰۵ = ۱/۱۰$	- باد شدید (۴ متر بر ثانیه)
$K_{c\ mid} = ۱/۱۵ - ۰/۱۰ = ۱/۰۵$	- باد ملایم (۲ متر بر ثانیه)
$K_{c\ mid} = ۱/۱۵ - ۰/۱۵ = ۱/۰۰$	- باد آرام (۱ متر بر ثانیه)

ضریب گیاهی مرحله میانی رشد گندم بر اساس شرایط اقلیم و باد از ۱/۰۰ (برای اقلیم مرطوب و باد آرام) تا ۱/۲۵ (برای اقلیم خشک و باد شدید) متغیر است.

از آنجا که روش محاسبه (تقریبی) حداقل رطوبت نسبی از روی حداکثر دما ساده است، هنگامی که داده‌های رطوبت نسبی در دسترس نمی‌باشد، به جای میانگین از حداقل رطوبت نسبی استفاده می‌شود. به علاوه، در شرایطی که حداقل دما به دمای نقطه شبنم نزدیک است (یعنی، $RH_{max} \approx ۱۰۰\%$)، کمبود فشار بخار یعنی $(e_s - e_a)$ ^۲، از رابطه $e^\circ(T_{max}) \left[\frac{100 - RH_{min}}{100} \right]$ ، تعیین می‌شود که در آن، $e^\circ(T_{max})$ فشار بخار اشباع در حداکثر دمای روزانه هوا است. این رابطه نشان می‌دهد که حداقل رطوبت نسبی بهتر از میانگین آن، اثر کمبود فشار بخار آب بر ضریب گیاهی را منعکس می‌کند. حداقل رطوبت نسبی از روی داده‌های روزانه یا میانگین ماهانه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

۱- چنانچه ماشین حساب در دسترس نباشد، به جای عبارت $(\frac{h}{3})^{1/3}$ ، مقدار $[(\frac{h}{3})^{1/5}]^{3/5}$ محاسبه می‌شود.

۲- که در آن e_s از معادله ۱۲ و e_a از معادله ۱۷ تعیین می‌شوند.

$$RH_{\min} = \frac{e^{\circ}(T_{\text{dew}})}{e^{\circ}(T_{\max})} 100 \quad (۶۳)$$

که در آن، T_{dew} دمای نقطه شبنم و $T_{\max}$ حداکثر دمای روزانه هوا در مرحله میانی رشد گیاه است. اگر، دمای نقطه شبنم یا سایر داده‌های رطوبت در دسترس نبوده یا قابل اطمینان نباشند، حداقل رطوبت نسبی از روی میانگین حداقل دمای روزانه هوا به جای دمای نقطه شبنم^۱ برآورد می‌شود. بنابراین:

$$RH_{\min} = \frac{e^{\circ}(T_{\min})}{e^{\circ}(T_{\max})} 100 \quad (۶۴)$$

برای استفاده از روابط فوق، برآورد تقریبی مقادیر سرعت باد (در ارتفاع دو متری) و حداقل رطوبت نسبی در مرحله میانی رشد، ضرورت دارد. زیرا، معادله ۶۲ نسبت به این مقادیر خیلی حساس نمی‌باشد و $RH_{\min}$ برای گیاه با ارتفاع ۳ متر، با تغییر ۱ متر بر ثانیه سرعت باد و ۱۰ درصد حداقل رطوبت نسبی، تنها ۰/۰۴ تغییر می‌کند. روش‌های اندازه‌گیری، محاسبه و برآورد داده‌های باد و رطوبت، در شرایط غیرموجود بودن، در فصل سوم ارائه شده است. چنانچه سرعت باد در ارتفاع غیراستاندارد (متفاوت از دو متر) اندازه‌گیری شده باشد، باید با استفاده از معادله ۴۷ اصلاح و به سرعت باد در ارتفاع دو متر بالای سطح چمن تبدیل شود. چنانچه، داده‌های میانگین روزانه سرعت باد و حداقل رطوبت نسبی در دسترس نباشد، می‌توان از طبقه‌بندی کلی داده‌های سرعت باد و رطوبت که در جداول ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است، استفاده کرد.

جدول ۱۵- برآورد سرعت باد ماهانه بر پایه داده‌های تجربی

توصیف	میانگین ماهانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)
آرام	کمتر از ۱/۰
آرام تا ملایم	۲/۰
ملایم تا شدید	۴/۰
شدید	بیشتر از ۵/۰
شرایط عمومی	۲/۰

جدول ۱۶- مقادیر معمول حداقل و میانگین رطوبت نسبی در اقلیم‌های مختلف

طبقه‌بندی کلی اقلیم	حداقل رطوبت نسبی (درصد)	میانگین رطوبت نسبی (درصد)
خشک	۲۰	۴۵
نیمه خشک	۳۰	۵۵
نیمه مرطوب	۴۵	۷۰
مرطوب	۷۰	۸۵
خیلی مرطوب	۸۰	۹۰

۱- هنگام استفاده از معادله ۶۴ در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک، مقدار $T_{\min}$ همان طور که در پیوست شش (معادله ۶-۶) بیان شده است، با کاهش ۲ درجه سلسیوس تعدیل می‌شود تا تقریب بهتری از T_{dew} بدست آید.

معادله ۶۲ برای گیاهان با میانگین ارتفاع تا ۱۰ متر اعتبار دارد. شرایط آیرودینامیک گیاهان کوتاهتر از ۰/۱ متر، به عنوان مثال سبزیجات، مشابه گیاه مرجع چمن است و نباید از معادله ۶۲ استفاده نمی‌شود. مقادیر معمول ارتفاع محصولات کشاورزی در جدول ۱۲ ارائه شده است. هر چند، میانگین ارتفاع گیاهان به واریته و عملیات زراعی بستگی دارد و پیشنهاد می‌شود که در صورت امکان، ارتفاع گیاه در شرایط واقعی اندازه‌گیری شود. توان ۰/۳، معادله ۶۲ را نسبت به خطاهای ناچیز مربوط به ارتفاع گیاه، غیرحساس می‌نماید. به طور معمول، در مرحله میانی رشد، از یک میانگین ارتفاع گیاه استفاده می‌شود.

اصلاح ضریب گیاهی برای فواصل فیس شدن خاک

فواصل خیس شدن سطح خاک بر مقدار ضریب گیاهی مرحله میانی کمتر از مرحله اولیه، مؤثر است. زیرا، به طور معمول، پوشش گیاهی در مرحله میانی نزدیک به کامل شدن است و بنابراین، اثر تبخیر از سطح خاک بر ضریب گیاهی کم می‌باشد. هنگامی که ضریب گیاهی مرحله میانی در جدول ۱۲، کمتر از ۱ باشد، برای آبیاری با فاصله کمتر از ۳ روز می‌توان از مقدار تقریبی ضریب گیاهی ۱/۱ تا ۱/۳ استفاده کرد، تا ترکیب اثر خیس شدن پی در پی خاک، تبخیر ذرات آب پخش شده در هوا (آبیاری بارانی) و زبری پوشش گیاهی، به ویژه در هنگام خیس شدن کسر وسیعی از سطح خاک (یعنی، $f_w > 0/3$)، بر ضریب گیاهی در نظر گرفته شود.

مثال ۲۷- تعیین ضریب گیاهی در مرحله میانی رشد

مقدار $K_{c\text{ mid}}$ ذرت در مناطق تایپه- تایوان^۱ و مویچا- یمن^۲ را محاسبه کنید. در این مرحله، میانگین سرعت باد روزانه در ارتفاع دو متری در تایپه ۱/۳ و در مویچا ۴/۶ متر بر ثانیه، میانگین حداقل رطوبت نسبی روزانه در تایپه ۷۵ و در مویچا ۴۴ درصد است.

از جدول ۱۲، مقدار $K_{c\text{ mid}}$ ذرت ۱/۲ و ارتفاع گیاه ۲ متر است.

با استفاده از معادله ۶۲ برای تایپه (اقلیم مرطوب):

$$K_{c\text{ mid}} = 1/20 + [0/04 \times (1/3 - 2) - 0/04 \times (75 - 45)] \times \left(\frac{2}{3}\right)^{0/3} = 1/07$$

برای مویچا (اقلیم خشک):

$$K_{c\text{ mid}} = 1/20 + [0/04 \times (4/6 - 2) - 0/04 \times (44 - 45)] \times \left(\frac{2}{3}\right)^{0/3} = 1/30$$

میانگین ضریب گیاهی مرحله میانی رشد ذرت در تایپه ۱/۰۷ و در مویچا ۱/۳۰ برآورد می‌شود.

1- Taipei, Taiwan

2- Mocha, Yemen

ضریب گیاهی در مرحله پایانی رشد

مقادیر معمول ضرایب گیاهی مرحله پایانی رشد ($K_{c\ end}$) محصولات کشاورزی در جدول ۱۲ ارائه شده است. در این مقادیر، اثر مدیریت آبیاری و عملیات زراعی گنجانده شده است. چنانچه گیاه تا زمان برداشت محصول (به صورت تازه‌خوری) آبیاری شود، لایه خاک سطحی مرطوب بوده و مقدار ضریب گیاهی مرحله پایانی، بالا است. در مرحله پایانی رشد محصولاتی که به صورت خشک برداشت می‌شوند، فاصله آبیاری طولانی شده یا انجام نمی‌شود. بنابراین، در این حالت، که سطح خاک و پوشش گیاهی هر دو خشک است، مقدار ضریب گیاهی مرحله پایانی رشد پایین خواهد بود (شکل ۳۳).

در شرایط واقعی، که مدیریت آب و زمان برداشت محصول با شرایط استاندارد جدول ۱۲، متفاوت است، باید ضریب گیاهی مرحله پایانی اصلاح شود. برخی روش‌های اصلاح ضریب گیاهی بر مبنای فواصل خیس شدن خاک در فصل هفتم ارائه شده است. برای برداشت محصول پیش از رسیدن آن، می‌توان یک منحنی ضریب گیاهی را با استفاده از مقادیر $K_{c\ end}$ جدول ۱۲ و طول مرحله پایانی رشد و با فرض برداشت در زمان معمول رسم کرد. نقطه پایانی این منحنی همان زمان برداشت واقعی است.

ضرایب گیاهی مرحله پایانی در جدول ۱۲، مقادیر میانگین و تحت شرایط اقلیمی استاندارد می‌باشند. در اقلیم خشک‌تر و سرعت باد بیشتر، این ضرایب بالاتر و در اقلیم مرطوب‌تر و سرعت باد کمتر، ضرایب پایین‌تر خواهند بود. برای تعدیل ضریب گیاهی برای اثر اقلیم، در شرایطی که میانگین حداقل رطوبت نسبی روزانه با ۴۵ درصد و میانگین سرعت باد روزانه در ارتفاع دو متری با ۲ متر بر ثانیه متفاوت است، می‌توان از معادله زیر استفاده کرد:

$$K_{c\ end} = K_{c\ end(Tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \quad (65)$$

که در آن:

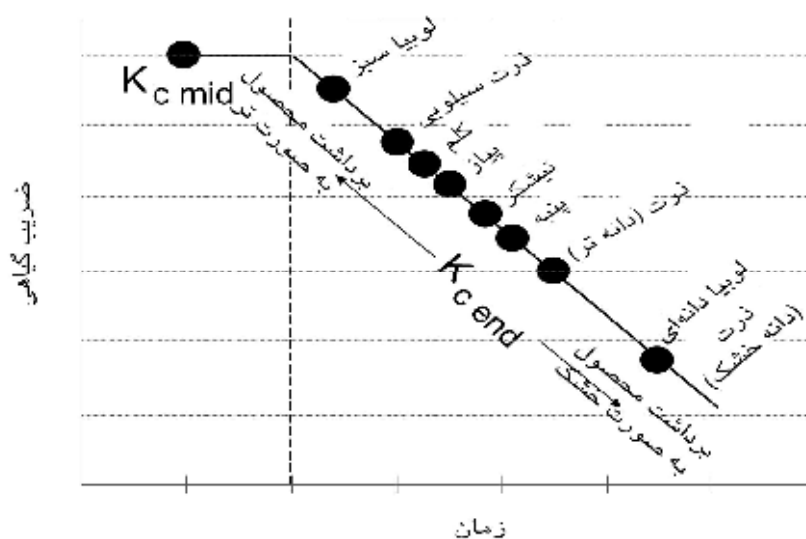
$K_{c\ end(Tab)}$ = مقدار $K_{c\ end}$ از جدول ۱۲،

u_2 = میانگین سرعت باد روزانه در ارتفاع دو متری از سطح چمن در مرحله پایانی رشد [متر بر ثانیه]، بین

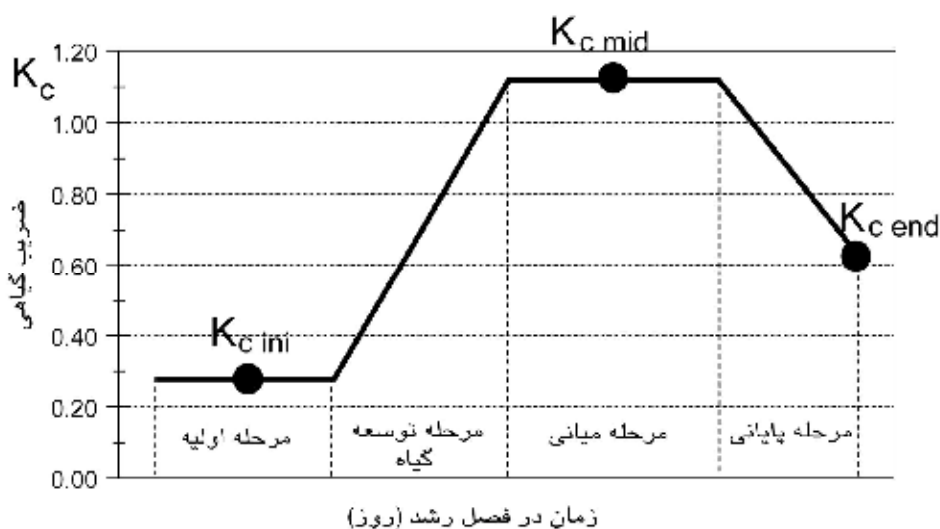
۱ تا ۶ متر بر ثانیه،

RH_{min} = میانگین حداقل رطوبت نسبی روزانه در مرحله پایانی رشد [درصد]، بین ۲۰ تا ۸۰ درصد،

h = میانگین ارتفاع گیاه در مرحله پایانی رشد [متر]، بین ۰/۱ تا ۱۰ متر، می‌باشند.



شکل ۳۳- حدهای مورد انتظار ضریب گیاهی در مرحله پایانی رشد



شکل ۳۴- منحنی ضریب گیاهی

معادله ۶۵، تنها، هنگامی که ضرایب گیاهی مرحله پایانی ارائه شده در جدول بیشتر از ۰/۴۵ بوده، قابل استفاده است. در این معادله، ضریب گیاهی مرحله پایانی با افزایش حداقل رطوبت نسبی، کاهش می‌یابد. این کاهش ویژگی محصولاتی است که به صورت تازه‌خوری (سبز) و قبل از خشک شدن کامل محصول، برداشت می‌شوند (یعنی، $K_{c\ end} \geq 0/45$).

هنگامی که $K_{c\ end} (Table) < 0/45$ باشد (یعنی، $K_{c\ end} = K_{c\ end} (Tab)$) اصلاح ضریب گیاهی ضرورت ندارد. در شرایطی که قرار است محصول در مزرعه پلاسیده یا خشک شود (یعنی، $K_{c\ end} < 0/45$)، حداقل رطوبت نسبی و سرعت باد اثر کمتری بر مقدار ضریب گیاهی مرحله پایانی رشد دارد و اصلاح $K_{c\ end}$ ضروری نیست. از آنجا که، کاهش رطوبت نسبی هوا، روند خشک شدن محصول را شتاب می‌دهد،

ضریب گیاهی مرحله پایانی رشد گیاهانی که محصول آنها هنگام برداشت کاملاً رسیده و خشک هستند، با کاهش حداقل رطوبت نسبی، ممکن است، کاهش یابد.

ترسیم منحنی ضریب گیاهی گیاهان سالانه

برای توصیف و ترسیم منحنی ضریب گیاهی، تنها سه مقدار اصلی ضریب گیاهی مورد نیاز است. منحنی مشابه با شکل ۳۴ را می‌توان با استفاده از سه مرحله زیر رسم کرد:

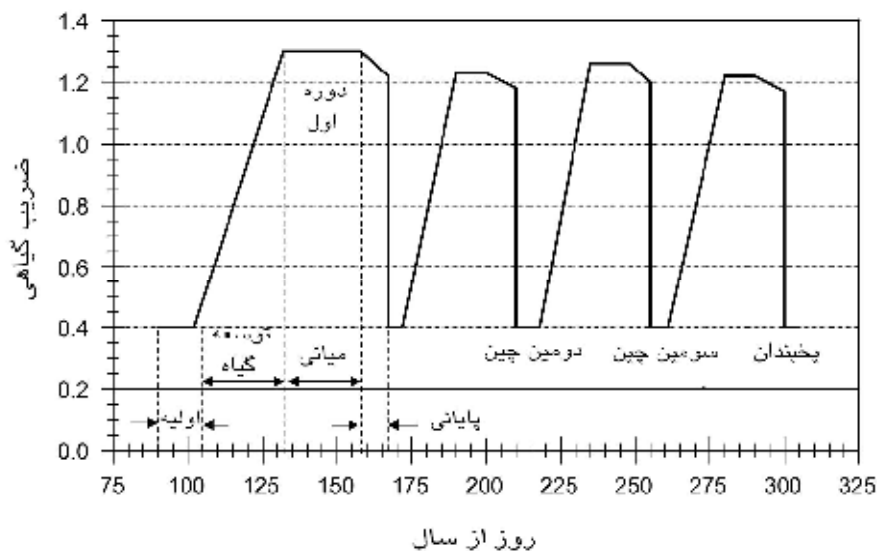
۱- دوره رشد گیاه به چهار مرحله کلی (اولیه، توسعه گیاه، میانی و پایانی) تقسیم و طول مراحل رشد تعیین شود. ضرایب گیاهی برای سه مرحله رشد یعنی $K_{c\ ini}$ ، $K_{c\ mid}$ و $K_{c\ end}$ از جدول ۱۲ تعیین شوند.

۲- مقادیر ضریب گیاهی بر پایه فواصل خیس شدن خاک و یا شرایط اقلیم در هر مرحله، مطابق آنچه که در بخش قبل بیان شد، اصلاح شود.

۳- برای ترسیم منحنی ضریب گیاهی با دو پاره خط موازی با محور X ها به نحوی رسم می‌شوند که از نقاط $K_{c\ ini}$ و $K_{c\ mid}$ عبور کرده و طول آنها بر پایه مقیاس محور X ها مساوی با طول مدت مراحل اولیه و میانی رشد باشد. خطوط افقی توسط خطوط مایل به یکدیگر وصل شده و منحنی مشابه با شکل ۳۴ بدست آید.

گیاهان علوفه‌ای

محصول گیاهان علوفه‌ای در طول فصل رشد، چندین بار برداشت می‌شود. به طور معمول، هر بخش از دوره رشد یک زیر فصل رشد محسوب شده و دارای یک منحنی ضریب گیاهی است. منحنی ضریب گیاهی کل از مجموع این منحنی‌های مرتبط با چند زیر فصل تعیین می‌شود. منحنی ضریب گیاهی یونجه علوفه‌ای در جنوب آیداهو (ایالات متحده آمریکا) برای یک فصل رشد کامل به صورت شکل ۳۵ رسم شده است.



شکل ۳۵- ترسیم منحنی ضریب گیاهی یونجه علوفه‌ای در جنوب آیداهو (ایالات متحده آمریکا) با استفاده از مقادیر جدول ۱۱ و ۱۲ و اصلاح شده با معادله‌های ۶۲ و ۶۵ (داده‌های از رایت^۱، ۱۹۹۰).

در اقلیم جنوب آیداهو، جوانه‌زنی برگ‌های گیاه یونجه در بهار و، به طور تقریبی، از نودمین روز سال (میلادی) شروع می‌شود. به طور معمول، محصول یونجه علوفه‌ای در طول فصل رشد در سه یا چهار چین برداشت می‌گردد. بنابراین، چهار ضریب گیاهی مربوط به زیر فصل‌های رشد یا چین‌های جداگانه در شکل ۳۵ مشاهده می‌شود. زیر فصل اول، متعاقب جوانه‌زنی برگ‌ها در بهار شروع شده و ضریب گیاهی سه زیر فصل بعدی مربوط به چین‌های دوم تا چهارم می‌باشند. پوشش گیاهی خاک پس از هر چین به کمتر از ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. طول دوره رشد تا چین اول به دلیل پایین بودن دمای هوا و خاک که میزان رشد گیاه را کاهش می‌دهد، طولانی‌تر از دوره‌های رشد بین چین‌های بعدی است.

در جدول ۱۱، برای آیداهو، طول چهار مرحله رشد یونجه در چین اول به ترتیب ۱۰، ۳۰، ۲۵ و ۱۰ روز و در چین‌های بعدی به ترتیب ۵، ۲۰، ۱۰ و ۱۰ روز است. این ارقام بر پایه مشاهدات در شرایط اقلیمی جنوب آیداهو انتخاب شده‌اند. در برخی سال‌ها، سرمای پاییز (اوایل تا نیمه اکتبر) فصل رشد یونجه را پایان می‌دهد. به طور معمول، فصل رشد یونجه در این منطقه ۲۸۰ تا ۲۹۰ روز است.

به دلیل تعدیل $K_{c\ mid}$ و $K_{c\ end}$ برای هر چین ضرایب گیاهی مرحله میانی رشد یونجه که برای هر چین در شکل ۳۵ نشان داده شده، با معادله‌های ۶۲ و ۶۵، متفاوت می‌باشند. در این دو معادله، از میانگین مقادیر سرعت باد (U_2) و حداقل رطوبت نسبی در مراحل میانی و پایانی هر چین، استفاده شده است. منحنی‌های ضریب گیاهی پایه مشابه شکل ۳۵ را می‌توان برای گیاهان علوفه‌ای و با استفاده از روش‌های ارائه شده در فصل هفتم رسم کرد.

در برخی شرایط، ممکن است، برای گیاهان علوفه‌ای میانگین اثر چند چین در کل فصل رشد مورد نظر باشد. در این حالت، تنها یک ضریب گیاهی مرحله میانی رشد و یک منحنی ضریب گیاهی برای کل فصل رشد مورد نیاز است. پس، یک منحنی ضریب گیاهی عادی مشابه شکل ۳۵ رسم می‌شود که در آن تنها یک مرحله میانی رشد کلی برای محصول علوفه‌ای نشان داده شده است. در $K_{c\ mid}$ برای این مرحله میانی رشد کلی باید میانگین اثر چین‌های را نشان دهد. مقدار بکار رفته برای $K_{c\ mid}$ یک میانگین از منحنی K_c مربوط به دوره بین اولین پوشش کامل تا آخرین مرحله پایانی رشد (نزدیک به دوره خواب گیاه یا یخبندان)، می‌باشد. مقدار $K_{c\ mid}$ بکار رفته برای این شرایط، ممکن است تنها ۸۰ درصد مقدار ضریب گیاهی مرحله میانی در شرایطی باشد که پوشش گیاهی کامل را نشان دهد. این میانگین برای مقادیر $K_{c\ mid}$ با فصل رشد کامل، در جدول ۱۲ ارائه شده است. به عنوان مثال، میانگین ضریب گیاهی مرحله میانی کلی یونجه علوفه‌ای ۱/۰۵ است، در حالیکه، مقدار این ضریب برای یک چین جداگانه، ۱/۲ است.

درختان میوه

ضریب گیاهی مراحل میانی و پایانی رشد در جدول ۱۲ ارائه شده است. همان طور که بیان شد، مقادیر جدول ۱۲، ارقام معمول در شرایط اقلیمی استاندارد می‌باشند و اگر حداقل رطوبت نسبی و سرعت باد (در ارتفاع دو متری) با شرایط استاندارد متفاوت باشد، باید ضرایب گیاهی با معادله‌های ۶۲ و ۶۵ اصلاح شوند. با توجه به طولانی بودن دوره مراحل میانی و پایانی رشد درختان خزان‌شونده، هنگام اصلاح ضریب

گیاهی برای حداقل رطوبت نسبی و سرعت باد محلی، باید تغییرات در طول فصل رشد در نظر گرفته شود. بنابراین، اگر مراحل میانی و پایانی رشد با فصل‌های متفاوت بهار، تابستان و پاییز یا فصل مرطوب و خشک مصادف باشند، ضرایب گیاهی باید چند بار اصلاح شوند. چنانچه، شرایط اقلیمی در کل فصل رشد مشابه اقلیم‌های استوایی بوده و تغییر چندانی نداشته باشند، اغلب، ضرایب گیاهی مراحل اولیه و پایانی رشد درختان و درختچه‌های همیشه سبز بدون دوره خواب، متفاوت نمی‌باشند. در این شرایط، اصلاح ضریب گیاهی فصلی برای اثر اقلیم ضروری نیست، زیرا تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد بیشتر به تبخیر - تعرق گیاه مرجع وابسته است.

محاسبه تبخیر - تعرق گیاه

ضریب گیاهی هر مرحله از رشد را می‌توان از منحنی ضریب گیاهی، به صورت نموداری یا روش عددی تعیین کرد. پس از استخراج مقادیر ضریب گیاهی، تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد از حاصل ضرب ضریب گیاهی در تبخیر - تعرق گیاه مرجع محاسبه می‌شود.

تعیین ضریب گیاهی به روش نمودار

برای محاسبه هفتگی، ده روزه یا ماهانه تبخیر - تعرق گیاه مرجع، مقادیر هفتگی، ده روزه یا ماهانه ضریب گیاهی مورد نیاز است. یک روش کلی برای محاسبه ET_c ، رسم منحنی ضریب گیاهی و تقسیم آن به دوره‌های مورد نظر هفته، ده روزه یا ماهانه و سپس انتخاب ضریب گیاهی مربوط به آن دوره‌ها می‌باشد (شکل ۳۶). با فرض ثابت بودن ضریب گیاهی در طول ده روز، محاسبه ساده شده و خطای محاسبه تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد، نیز، اندک است.

شکل ۳۶ با استفاده از منحنی ضریب گیاهی رسم شده در کادر ۱۵، برای دوره‌های ده روزه رسم شده است. ضرایب گیاهی مراحل اولیه، میانی و پایانی به ترتیب ۰/۱۵، ۱/۱۹ و ۰/۳۵ و طول واقعی مراحل چهارگانه رشد به ترتیب ۲۵، ۲۵، ۳۰ و ۲۰ روز، می‌باشد. کشت در ابتدای سومین دهه ماه مه انجام شده و محصول ۱۰۰ روز پس از آن، در پایان ماه اوت برداشت شد.

برای تمامی دوره‌های ده روزه، مقادیر ضریب گیاهی را می‌توان، به طور مستقیم، از این منحنی استخراج نمود. مقدار ضریب گیاهی در نیمه هر دوره ده روزه به عنوان میانگین ضریب گیاهی در همان دوره فرض می‌شود. تنها، در دومین ده روز از ماه ژوئن که در آن ضریب گیاهی تغییر ناگهانی دارد، باید محاسباتی انجام شود. در نیمه اول این ده روز، ضریب گیاهی ۰/۱۵ می‌باشد. در حالی که، ضریب گیاهی در نیمه دوم از ۰/۱۵ افزایش یافته و به ۰/۳۶ در پایان دهمین روز می‌رسد. میانگین ضریب گیاهی برای این دهه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\frac{5}{10} \times (0/15) + \frac{5}{10} \times (0/15 + 0/36)}{2} = 0/2$$

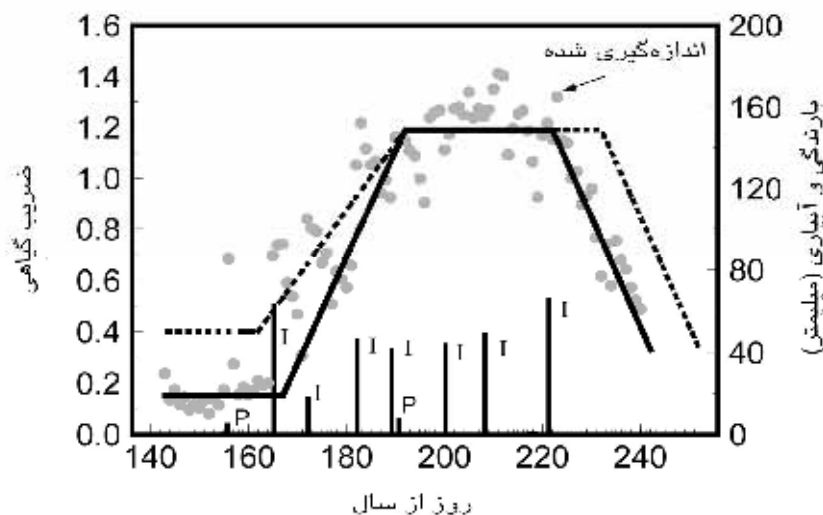
کادر ۱۵- ضریب گیاهی لویا (دانه‌ای) به روش یک جزیی (مطالعه موردی در کیمبرلی، آیداهو-ایالات متحده آمریکا)

در این مثال، کاربرد روش ضریب گیاهی یک جزیی برای لویا (دانه‌ای) ارائه می‌شود. کشت در ۲۳ مه سال ۱۹۷۴ در کیمبرلی-آیداهو، (ایالات متحده آمریکا) با عرض جغرافیایی ۴۲/۴ درجه شمالی انجام و سطح خاک به طور معمولی خیس می‌شود. طول مراحل اولیه، توسعه گیاه، میانی و پایانی رشد بر پایه ارقام جدول ۱۱ برای اقلیم قاره‌ای ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۲۰ روز است (در این مثال، برای نشان دادن تقریبی بودن مقادیر، ارقام طول مراحل رشد لویا برای جنوب آیداهو از جدول ۱۱ بکار نرفت). مقادیر اولیه $K_{c\ mid}$ ، $K_{c\ ini}$ و $K_{c\ end}$ انتخاب شده از جدول ۱۲ به ترتیب ۰/۴، ۱/۱۵ و ۰/۳۵ می‌باشند.

میانگین روزانه حداقل رطوبت نسبی و سرعت باد (در ارتفاع دو متری) در هر دو مرحله میانی و پایانی به ترتیب ۳۰ درصد و ۲/۲ متر بر ثانیه بود. حداکثر ارتفاع پیشنهاد شده در جدول ۱۲ برای لویا (دانه‌ای)، ۰/۴ متر می‌باشد. بنابراین، مقدار $K_{c\ mid}$ با استفاده از معادله ۶۲ به صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$K_{c\ mid} = 1/15 + [0.04 \times (2/2 - 2) - 0.04 \times (30 - 45)] \left(\frac{0.4}{3}\right)^{0.3} = 1/19$$

از آنجا که، $K_{c\ end} = 0/35$ و کمتر از ۰/۴۵ است، پس این ضریب نیازی به تعدیل ندارد. با توجه به اینکه سرعت باد واقعی تنها ۰/۲ متر بر ثانیه و حداقل رطوبت نسبی واقعی تنها ۱۵ درصد کمتر از مقدار استاندارد بوده و گیاه نیز نسبتاً کوتاه است، مقدار $K_{c\ mid}$ محاسبه شده با مقدار ارائه شده در جدول ۱۲ تفاوت چندانی ندارد. منحنی اولیه ضریب گیاهی لویا (دانه‌ای) در ایالت آیداهو برای اهداف برنامه‌ریزی مقدماتی می‌تواند به صورت شکل زیر (نقطه چین‌ها) رسم شود. در این شکل مقادیر $K_{c\ mid}$ ، $K_{c\ ini}$ و $K_{c\ end}$ به ترتیب ۰/۴، ۱/۱۹ و ۰/۳۵ و طول چهار مرحله رشد به ترتیب ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۲۰ روز است. تذکر: مقدار $K_{c\ ini} = 0/4$ از جدول ۱۲، تنها یک تقریب اولیه می‌باشد.



منحنی‌های ضریب گیاهی لویا دانه‌ای در کیمبرلی-آیداهو که با استفاده از مقادیر جداول ۱۱ و ۱۲ (خط چین‌ها) و مقادیر اصلاح شده $K_{c\ ini}$ از شکل ۲۹ برای $L_{ini}=25$ ، $L_{dev}=25$ ، $L_{min}=30$ و $L_{late}=20$ روز (خط ممتد) رسم شده است. مقادیر اندازه شده ضرایب گیاهی روزانه نیز نمایش داده شده است (داده‌های لیسیمتری به نقل از رایت، ۱۹۹۰).

ادامه کادر ۱۵-

مقدار $K_{c\ ini}$ با استفاده از روش بیان شده در این فصل، می‌تواند دقیق‌تر برآورد شود. در کیمبرلی، میانگین تبخیر - تعرق گیاه مرجع در مرحله اولیه رشد (اواخر ماه مه - اوایل ماه ژوئن ۱۹۷۴)، $5/3$ میلیمتر بر روز و فواصل خیس شدن سطح خاک در طول این دوره، حدود 14 روز بود (بعلاوه دو بارندگی با میانگین هر بار حدود 5 میلیمتر، واقع شد). با توجه به سبک بودن بارندگی‌ها (کمتر از 10 میلیمتر)، از شکل ۲۹ استفاده شده است. بافت خاک در کیمبرلی لوم سیلت است. در شکل ۲۹، برای فواصل خیس شدن 14 روز و تبخیر - تعرق گیاه مرجع $5/3$ میلیمتر بر روز، $K_{c\ ini}$ حدود $0/15$ می‌باشد. این مقدار، کمتر از رقم $0/4$ در جدول ۱۲ می‌باشد، بنابراین تأکید می‌شود برای تعیین ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد باید از داده‌های واقعی بارندگی و آبیاری استفاده شود.

مقایسه منحنی‌های رسم شده با اندازه‌گیری‌ها

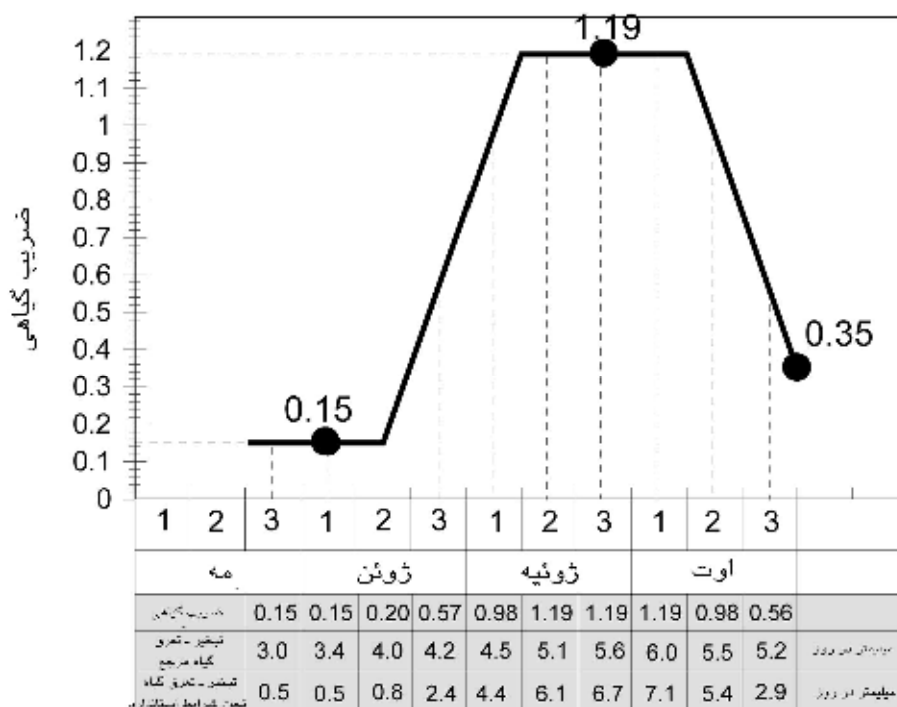
از آنجا که در سال ۱۹۷۴، رایت تبخیر - تعرق لوبیا (دانه‌ای) در کیمبرلی، آیداهو با استفاده از لیسیمترهای دقیق اندازه‌گیری کرد، بنابراین می‌توان داده‌های ضریب گیاهی واقعی را با منحنی‌های ضریب گیاهی رسم شده، مقایسه کرد. مقدار ضریب گیاهی واقعی با تقسیم مقادیر تبخیر - تعرق گیاه اندازه‌گیری شده با لیسیمتر تحت شرایط استاندارد تبخیر - تعرق روزانه گیاه مرجع برآورد شده با معادله پنمن - مونتیث فائو، بدست آمد.

همان‌طور که در نمودار نشان داده شده، طول مرحله میانی لوبیا (دانه‌ای) در جدول ۱۱ برای شرایط (کلی) اقلیم قاره‌ای 40 روز بوده که از طول واقعی این مرحله (به‌طور میانگین 30 روز) در جنوب آیداهو بیشتر است. این مقایسه، اهمیت بکارگیری داده‌های واقعی (30 روز) بجای مقدار پیشنهاد شده در جدول ۱۱، را نشان می‌دهد.

بهترین برآوردها برای رسم منحنی ضریب گیاهی لوبیا (دانه‌ای) در جنوب آیداهو (منحنی پایین در شکل کادر ۱۵) با ضرایب گیاهی $0/15$ ، $1/19$ و $0/35$ و طول دوره واقعی مراحل چهارگانه رشد به ترتیب 25 ، 30 و 20 روز، بدست آمده است. با توجه به اثر برآورد غیرواقعی طول دوره مرحله میانی رشد بر سطح زیر منحنی ضریب گیاهی، بر ضرورت استفاده از مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) تأکید می‌شود.

به نظر می‌رسد که در کیمبرلی، مقدار محاسبه شده $K_{c\ mid} = 0/19$ ، کمتر از مقدار اندازه‌گیری شده است که می‌تواند به دلیل اثر افزایش تبخیر خاک پس از چهار نوبت آبیاری در مرحله میانی رشد در آن سال باشد که موجب افزایش مقدار ضریب گیاهی شده است. این اثر در کادر ۱۶ و در بکارگیری روش ضریب گیاهی دو جزئی ($K_{cb} + K_e$) نشان داده شده است.

مقدار $K_{c\ ini} = 0/15$ محاسبه شده با استفاده از شکل ۲۹، با مقدار اندازه‌گیری شده در مرحله اولیه رشد همخوانی دارد. ضریب گیاهی اندازه‌گیری شده در مرحله توسعه گیاه، برای روزهای آبیاری و بارندگی و پس از آن، بیشتر از مقادیر K_c منحنی ضریب گیاهی نهایی بود. تغییر ضریب گیاهی روزانه که با لیسیمتر اندازه‌گیری شد، عادی بوده و ناشی از تغییر روزانه هوا و جهت باد و همچنین، خطا در برآورد مقدار تابش خالص و تبخیر - تعرق گیاه مرجع و نیز برخی خطاهای تصادفی در داده‌های لیسیمتری و اقلیمی است.



شکل ۳۶- منحنی و مقادیر ضریب گیاهی و ETC استخراج شده از منحنی برای لوبیا (دانه‌ای)
مثال کادر ۱۵ در دوره‌های ده روزه

تعیین ضریب گیاهی با روش عددی

ضریب گیاهی برای هر مرحله رشد را می‌توان با فرض ثابت بودن مقدار K_c مراحل اولیه و میانی رشد تحت شرایط مشخص، تعیین کرد. ضرایب گیاهی مرحله توسعه گیاه و پایانی رشد، بین دو مقدار، یعنی بین ضرایب گیاهی انتهای مرحله قبل ($K_{c \text{ prev}}$) و ابتدای مرحله بعد ($K_{c \text{ next}}$)، که همان $K_{c \text{ end}}$ مرحله پایانی رشد باشد، به صورت خطی تغییر می‌کند:

$$K_{c \text{ i}} = K_{c \text{ prev}} + \left[\frac{i - \sum(L_{\text{prev}})}{L_{\text{stage}}} \right] (K_{c \text{ next}} - K_{c \text{ prev}}) \quad (۶۶)$$

که در آن:

i = شماره روز از فصل رشد [از ۱ تا عددی که برابر کل فصل رشد است]،

$K_{c \text{ i}}$ = ضریب گیاهی در روز i

L_{stage} = طول دوره مرحله رشد مورد نظر [روز]

$\sum(L_{\text{prev}})$ = مجموع طول دوره‌های مراحل قبل [روز]، می‌باشد.

معادله ۶۶ برای تمامی مراحل چهارگانه رشد گیاه قابل استفاده است.

مثال ۲۸- تعیین ضریب گیاهی به روش عددی		
ضریب گیاهی لوبیا (دانه‌ای) در روزهای ۲۰، ۴۰، ۷۰ و ۹۵ را تعیین نمایید (شکل ۳۶).		
مرحله رشد گیاه	طول مرحله (روز)	ضریب گیاهی
اولیه	۲۵	$K_{c\ ini}=۰/۱۵$
توسعه گیاه	۲۵	۰/۱۵ تا ۱/۱۹
میانی	۳۰	$K_{c\ mid}=۱/۱۹$
پایانی	۲۰	۱/۱۹ تا ۰/۳۵
در $i=۲۰$ در $i=۴۰$	$K_c = K_{c\ ini} = ۰/۱۵$ $\sum(L_{prev}) = L_{ini} = ۲۵$ روز $L_{stage} = L_{dev} = ۲۵$ روز $K_c = ۰/۱۵ + (\frac{۴۰-۲۵}{۲۵}) \times (۱/۱۹-۰/۱۵) = ۰/۷۷$	
از معادله ۶۶:		
در $i=۷۰$ ؛ مرحله میانی رشد در $i=۹۵$ ؛ مرحله پایانی رشد	$K_c = K_{c\ mid} = ۱/۱۹$ $\sum(L_{prev}) = L_{ini} + L_{dev} + L_{mid}$ $= ۲۵ + ۲۵ + ۳۰ = ۸۰$ روز $L_{stage} = L_{late} = ۲۰$ روز	
از معادله ۶۶:		
	$K_c = ۱/۱۹ + (\frac{۹۵-۸۰}{۲۰}) \times (۰/۳۵-۱/۱۹) = ۰/۵۶$	
ضرایب گیاهی در روزهای ۲۰، ۴۰، ۷۰ و ۹۵ برای لوبیا (دانه‌ای) به ترتیب ۰/۱۵، ۰/۷۷، ۱/۱۹ و ۰/۵۶ است.		

ضرایب گیاهی بر مبنای سطح مرجع یونجه

از آنجا که در نقاط مختلف جهان، دو مفهوم (چمن و یونجه) برای گیاه مرجع استفاده می‌شود، دو گروه منحنی ضریب گیاهی برای محصولات کشاورزی ارائه شده است. منحنی‌های ضریب گیاهی بر پایه مرجع یونجه ارائه شده توسط رایت (۱۹۸۱ و ۱۹۸۲) و منحنی‌های ضریب گیاهی بر پایه مرجع چمن ارائه شده توسط پروت (جنسن و همکاران، ۱۹۹۰ و دورنباس و پروت، ۱۹۷۷) و منحنی‌های ارائه شده در این نشریه از جمله این منحنی‌ها می‌باشند. توجه شود که از ترکیب کردن مقادیر ضریب گیاهی مرجع چمن و یونجه و یا برعکس پرهیز شود. به طور معمول، ضریب گیاهی مرجع یونجه را می‌توان از طریق ضرب در یک ضریب تبدیل بین ۱/۰ تا ۱/۳، به ضریب گیاهی مرجع چمن تبدیل کرد. این ضریب به شرایط اقلیمی بستگی دارد (۱/۰۵ برای شرایط مرطوب و باد آرام، ۱/۲ برای شرایط نیمه خشک با باد ملایم و ۱/۳۵ برای شرایط خشک و باد شدید):

$$K_c (\text{grass}) = K_{\text{ratio}} K_c (\text{alfalfa}) \quad (۶۷)$$

که در آن:

$K_c (\text{grass})$ = ضریب گیاهی مرجع چمن (ارائه شده در این نشریه)،

$K_c (\text{alfalfa})$ = ضریب گیاهی مرجع یونجه، و

K_{ratio} = ضریب تبدیل (۱/۰ تا ۱/۳)، می باشد.

یک ضریب تبدیل برای هر اقلیم مشخص از بکارگیری رقم $K_{c \text{ mid}} = ۱/۲$ یونجه (از جدول ۱۲) و سپس تعدیل آن برای اثر اقلیم با معادله ۶۲، بدست می آید. برای مثال، در شهر کیمبرلی، آیداهو (ایالات متحده آمریکا) که میانگین روزانه برای حداقل رطوبت نسبی ۳۰ درصد و برای سرعت باد در ارتفاع دو متری ۲/۲ متر بر ثانیه است، میانگین تقریبی ضریب تبدیل بین مرجع یونجه و مرجع چمن با استفاده از معادله ۶۲، از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$K_{\text{ratio}} = 1.2 + [0.04(2.2 - 2) - 0.004(30 - 45)] \left(\frac{0.5}{3} \right)^{0.3} = 1.24 \quad (۶۸)$$

که در آن:

$h = ۰/۵$ است و ارتفاع استاندارد گیاه مرجع یونجه محسوب می شود.

قابلیت اعتبار مقادیر ضرایب گیاهی پیشین

بسیاری از ارقام $K_{c \text{ mid}}$ و $K_{c \text{ end}}$ جدول ۱۲ از مقادیر اولیه ارائه شده توسط فائو در نشریه های فنی شماره ۲۴ و ۳۳ آبیاری و زهکشی (فائو ۲۴ و فائو ۳۳) اقتباس شده و بر پایه یافته های جدید اصلاح و بازنگری شده اند. به طور مشابه، اصلاحاتی در $K_{c \text{ mid}}$ برای جبران تفاوت زبری آیرودینامیک و سطح برگ (همان طور که در معادله ۶۲ معرفی شد)، هنگام استخراج آن از K_c ارائه شده و برای شرایط سرعت باد و رطوبت نسبی متفاوت در فائو ۲۴، اعمال گردیده است. برخی اصلاحات برای انعکاس بهتر تبخیر - تعرق افزایش یافته تحت سرعت باد بالا و حداقل رطوبت نسبی پایین، هنگام بکارگیری معادله پنمن - مونتیت فائو، انجام شده است.

ضرایب گیاهی ارائه شده در نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو، ابتدا، بر پایه یک گیاه مرجع چمن فعال تعیین شد. روش پنمن - مونتیت فائو ارائه شده در این نشریه، نیز، گیاه مرجع چمن تحت شرایط استاندارد را به عنوان مبنا تعریف می کند، بنابراین ضرایب گیاهی ارائه شده در نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو و در این نشریه به جز در شرایط باد شدید و حداقل رطوبت نسبی کم، تفاوت چندانی ندارند.

بررسی‌های متعدد نشان داد که معادله پنمن اصلاح شده در نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو، شدت تبخیر - تعرق گیاه مرجع را تحت شرایط باد شدید و توانمندی پایین محیط برای تبخیر، حتی تا ۲۵ درصد بیشتر برآورد می‌کند و اغلب، نیازمند واسنجی برای شرایط محلی است (به فصل دوم مراجعه شود). بنابراین، ضرایب گیاهی استخراج شده از پژوهش‌های آب مصرفی گیاهان که در آن، تبخیر - تعرق گیاه مرجع چمن با معادله پنمن ارائه شده در نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو محاسبه شود، قابل استفاده نمی‌باشند. این ارقام باید بر مبنای تبخیر - تعرق گیاه مرجع برآورد شده با معادله پنمن - مونتیت سازمان خواربار و کشاورزی جهانی، تعدیل شوند. همچنین، ارقام نیاز آبی گیاهان که با معادله پنمن اصلاح شده (نشریه فنی شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو) برآورد شده‌اند، به دلیل تفاوت‌های موجود بین معادله‌های سطح مرجع پنمن و پنمن - مونتیت فائو، نیازمند ارزیابی مجدد هستند.

فصل هفتم

تبخیر - تعرق گیاهان و ضریب گیاهی دو جزئی

در این فصل نیز مشابه فصل ششم، روش محاسبه تبخیر - تعرق گیاه (ET_c) تحت شرایط استاندارد که در آن هیچ محدودیتی بر رشد و تبخیر - تعرق گیاه اعمال نشده، بررسی می‌شود. همچنین، روش برآورد تأثیر خیس شدن خاک سطحی بر ضریب گیاهی در این فصل بیان می‌گردد. ضریب گیاهی در روش دو جزئی، به دو ضریب جداگانه که یکی اثر تعرق گیاه را توصیف کرده و ضریب گیاهی پایه (K_{cb}) نامیده شده و دیگری اثر تبخیر از خاک (K_e) را بیان می‌کند، تفکیک شده و بنابراین، ضریب گیاهی دو جزئی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o \quad (69)$$

روش ضریب گیاهی دو جزئی به مراتب پیچیده‌تر از روش یک جزئی ارائه شده در فصل ششم بوده و دارای مراحل محاسباتی بیشتر است. در این روش برای انجام محاسباتها بر پایه داده‌های روزانه، استفاده از رایانه ضروری است. هنگامی که برآورد دقیق ضریب گیاهی به عنوان مثال، برای برنامه‌ریزی آبیاری روزآمد مزرعه مورد نیاز باشد، روش دو جزئی استفاده می‌شود.

محاسبه تبخیر - تعرق گیاه به روش ضریب گیاهی دو جزئی شامل مراحل زیر است:

۱. تعیین طول مراحل رشد گیاه و انتخاب ضرایب گیاهی پایه (K_{cb}) در هر مرحله،
۲. اصلاح ضرایب گیاهی پایه انتخاب شده برای شرایط اقلیم محلی،
۳. رسم منحنی ضریب گیاهی پایه (برای تعیین ضریب گیاهی پایه در هر زمان از مرحله رشد)،
۴. تعیین ضریب K_e روزانه برای تبخیر از خاک سطحی،
۵. محاسبه تبخیر - تعرق گیاه با ضرب کردن تبخیر - تعرق گیاه مرجع (ET_o) در ضریب گیاهی دو جزئی ($K_{cb}+K_e$).

جزء تعرق

ضریب گیاهی پایه

هنگامی که خاک سطح خشک بوده ولی تعرق به میزان پتانسیل است، به عبارتی مقدار آب محدودکننده تعرق نیست، ضریب گیاهی پایه به صورت نسبت تبخیر - تعرق گیاه به تبخیر - تعرق مرجع یعنی به صورت عبارت $\frac{ET_c}{ET_o}$ ، تعریف می‌شود (شکل ۲۲). بنابراین، در تبخیر - تعرق، عبارت ($K_{cb} \times ET_o$) جزء

تعرق گیاه را نشان می‌دهد. این عبارت شامل تبخیر آب از خاک (سطحی) نیز است که رطوبت مورد نیاز آن از آب لایه خاک خشک زیرین پوشش گیاهی تأمین می‌شود.

از آنجا که، مقادیر ضریب گیاهی ارائه شده در فصل ششم، میانگین اثر تبخیر از خاک را نیز شامل می‌شود، ضرایب گیاهی پایه کوچکتر از آن بوده (طبق شکل ۲۶) و جدول جداگانه‌ای مورد نیاز دارد. ضرایب گیاهی پایه در جدول ۱۷، برای گیاهانی بوده که نامبرده شده در جدول ۱۲ است. ضرایب گیاهی پایه در جدول ۱۷ مشابه ارقام جدول ۱۲، برای اقلیم نیمه مرطوب با باد ملایم ارائه شده است. در اقلیم‌های با حداقل رطوبت نسبی متفاوت از ۴۵ درصد و یا سرعت باد (در ارتفاع دو متری) متفاوت از ۲ متر بر ثانیه، مقادیر $K_{cb\ mid}$ و $K_{cb\ end}$ بزرگتر یا مساوی ۰/۴۵، باید با استفاده از معادله زیر اصلاح شوند:

$$K_{cb} = K_{cb(Tab)} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)]\left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (70)$$

که در آن:

$K_{cb(Tab)}$ = مقادیر $K_{cb\ mid}$ یا از جدول ۱۷ $K_{cb\ end}$ (اگر کوچکتر از ۰/۴۵ باشند، اصلاح لازم ندارند)،

u_2 = میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری بالای چمن در مرحله میانی یا پایانی رشد بین ۱ تا ۶ متر بر ثانیه،

RH_{min} = میانگین روزانه حداقل رطوبت نسبی در مرحله میانی یا پایانی رشد [درصد]، بین ۲۰ تا ۸۰٪،

h = میانگین ارتفاع گیاه در مراحل میانی یا پایانی رشد از جدول ۱۲ [متر] می‌باشند.

مشروح روش اصلاح ضریب گیاهی برای اثر اقلیم محلی و تعیین ضرایب گیاهی پایه در مراحل میانی و پایانی رشد، در فصل ششم ارائه شده است.

راهنمای کلی روش تعیین ضریب گیاهی پایه با استفاده از مقادیر جدول ۱۷، به طور خلاصه، در جدول ۱۸ بیان شده است. هنگامی که داده‌های اندازه‌گیری شده در دسترس باشد، ضرایب گیاهی پایه جدول ۱۷ را می‌توان بر پایه شرایط محلی، عملیات زراعی یا واریته (گونه) گیاهی اصلاح کرد. هر چند، تفاوت ضریب گیاهی اندازه‌گیری شده و مقادیر جدول ۱۷ نباید بیشتر از ۰/۲ باشد. تفاوت بیشتر بر بررسی و ارزیابی مجدد روش تحقیق، تجهیزات مورد استفاده و عملیات زراعی اجرا شده تأکید دارد. چنانچه، ضریب گیاهی پایه در شرایط محلی تعیین شود، اصلاح آن برای اثر اقلیم با استفاده از معادله ۷۰ ضرورت ندارد (به مثال ۲۹ مراجعه شود).

تعیین ضریب گیاهی پایه روزانه

همان طور که در فصل ششم بیان شد، برای توصیف و ترسیم منحنی ضریب گیاهی تنها، سه مقدار اصلی مورد نیاز است. پس از تقسیم دوره رشد به چهار مرحله و انتخاب ضریب گیاهی پایه در مراحل اولیه ($K_{cb\ ini}$)، میانی ($K_{cb\ mid}$) و پایانی رشد ($K_{cb\ end}$) و اصلاح ضرایب برای شرایط محلی، می‌توان منحنی ضریب گیاهی را رسم (شکل ۳۷) و ضرایب گیاهی پایه در هر زمان را در آن تعیین کرد (مثال ۳۰).

جدول ۱۷- ضرایب گیاهی پایه در مراحل مختلف رشد محصولات در شرایط بدون تنش و تحت مدیریت زراعی مطلوب و اقلیم نیمه مرطوب ($RH_{min} = 45$ درصد و $u_2 = 2$ متر بر ثانیه) برای محاسبه تبخیر - تعرق مرجع به روش پنمن - مونتیث فائو.

گیاه	$K_{cb\ ini}$	$K_{cb\ mid}$	$K_{cb\ end}$
الف- سبزیجات ریز	۰/۱۵	۰/۹۵	۰/۸۵
کلم بروکلی		۰/۹۵	۰/۸۵
کلم بروکسل		۰/۹۵	۰/۸۵
کلم		۰/۹۵	۰/۸۵
هویج		۰/۹۵	۰/۸۵
گل کلم		۰/۹۵	۰/۸۵
کرفس		۰/۹۵	۰/۹۰
سیر		۰/۹۰	۰/۶۰
کاهو		۰/۹۰	۰/۹۰
پیاز - انباری		۰/۹۵	۰/۶۵
- تازه		۰/۹۰	۰/۹۰
- بذری		۱/۰۵	۰/۷۰
اسفناج		۰/۹۰	۰/۸۵
تربچه		۰/۸۵	۰/۷۵
ب- سبزیجات- خانواده بادمجانیان (Solanaceae)	۰/۱۵	۱/۱۰	۰/۷۰
بادمجان		۱/۰۰	۰/۸۰
فلفل شیرین		۱/۰۰ ^۲	۰/۸۰
گوجه فرنگی		۱/۱۰ ^۲	۰/۶۰-۰/۸۰
پ- سبزیجات - خانواده فیار (Cucurbitaceae)	۰/۱۵	۰/۹۵	۰/۷۰
طالبی		۰/۷۵	۰/۵۰
خیار - تازه خوری		۰/۹۵ ^۲	۰/۷۰
- برداشت مکانیزه		۰/۹۵	۰/۸۰
کدو حلوائی، کدو زمستانی		۰/۹۵	۰/۷۰
کدو سبز، کدو زوکی		۰/۹۰	۰/۷۰
خربزه		۱/۰۰	۰/۷۰
هندوانه		۰/۹۵	۰/۷۰

۲- چنانچه، گیاهانی نظیر لوبیا، نخودفرنگی، بقولات، گوجهفرنگی، فلفل و خیار با داربست تا ارتفاع ۱/۵ تا ۲ متر رشد کنند، در این شرایط باید از ضریب گیاهی پایه بزرگتر استفاده شود. برای لوبیا سبز، فلفل و خیار از ۱/۱۰ و برای گوجهفرنگی، لوبیا (دانه‌ای) و نخودفرنگی از ۱/۱۵ استفاده گردد. تحت این شرایط، باید ارتفاع گیاه نیز افزایش یابد.

ادامه جدول ۱۷

$K_{cb\ end}$	$K_{cb\ mid}$	$K_{cb\ ini}$	گیاه
۰/۸۵	۱/۰۰	۰/۱۵	ت- گیاهان ریشه‌ای و غده‌ای
۰/۸۵	۰/۹۵		چغندر سالادی (لبو)
۰/۲۰ ۰/۴۵	۰/۷۰ ^۳ ۱/۰۰		کاساوا - یک ساله - دو ساله
۰/۸۵	۰/۹۵		هویج (زردک)
۰/۶۵ ^۴	۱/۱۰		سیب زمینی
۰/۵۵	۱/۱۰		سیب زمینی شیرین
۰/۸۵	۱/۰۰		شلغم
۰/۵۰ ^۵	۱/۱۵		چغندر قند
۰/۵۰	۱/۱۰	۰/۱۵	ث- بقولات (Legumes)
۰/۸۰	۱/۰۰ ^۲		لوبیا سبز
۰/۲۵	۱/۱۰ ^۲		لوبیا، خشک، دانه‌ای
۰/۲۵	۰/۹۵		نخود
۱/۰۵ ۰/۲۰	۱/۱۰ ^۲ ۱/۱۰ ^۲		باقلا - سبز - دانه‌ای و بذری
۰/۲۵	۱/۰۵		گراپزو
۰/۲۵-۰/۵۵ ^۶	۱/۰۰		لوبیا چشم بلبلی
۰/۵۰	۱/۱۰		بادام زمینی
۰/۲۰	۱/۰۵		عدس
۱/۰۵ ۰/۲۰	۱/۱۰ ^۲ ۱/۱۰		نخود - سبز - دانه‌ای، بذری
۰/۳۰	۱/۱۰		سویا
			ه- سبزیجات چند ساله (با دوره خواب و خاک بدون یا با پوشش مالچ)
۰/۹۰	۰/۹۵	۰/۱۵	کنگر

۳- ضریب گیاهی کاساوا در مرحله میانی رشد برای شرایط بدون تنش در طول فصل بارندگی یا پس از آن ارائه شده است. مقادیر $K_{cb\ end}$ با احتساب دوره خواب در فصل خشک محاسبه می‌شود.

۴- مقدار $K_{cb\ end}$ برای سیب‌زمینی دارای دوره رشد طولانی حدود ۰/۳۵ می‌باشد.

۵- این مقدار $K_{cb\ end}$ برای شرایطی است که آبیاری در ماه آخر دوره رشد انجام نشود. برای شرایطی که آبیاری انجام شود یا بارندگی کافی باشد، مقدار $K_{cb\ end}$ می‌تواند تا حدود ۰/۹ افزایش یابد.

۶- اولین مقدار $K_{cb\ end}$ برای دوره رشد لوبیا سبز و دومین مقدار برای دوره رشد لوبیا دانه‌ای (خشک) استفاده می‌شود.

ادامه جدول ۱۷

گیاه	$K_{cb\ ini}$	$K_{cb\ mid}$	$K_{cb\ end}$
مارچوبه	۰/۱۵	۰/۹۰ ^۷	۰/۲۰
نعناع	۰/۴۰	۱/۱۰	۱/۰۵
توت فرنگی	۰/۳۰	۰/۸۰	۰/۷۰
ج- گیاهان فیبری	۰/۱۵		
پنبه		۱/۱۰-۱/۱۵	۰/۴۰-۰/۵۰
کتان		۱/۰۵	۰/۲۰
کنف ^۸		۰/۴-۰/۷	۰/۴-۰/۷
ج- گیاهان روغنی	۰/۱۵	۱/۱۰	۰/۲۵
کرچک		۱/۱۰	۰/۴۵
کلزا		۰/۹۵-۱/۱۰ ^۹	۰/۲۵
گلرنگ		۰/۹۵-۱/۱۰ ^۹	۰/۲۰
کنجد		۱/۰۵	۰/۲۰
آفتابگردان		۰/۹۵-۱/۱۰ ^۹	۰/۲۵
ف- غلات	۰/۱۵	۱/۱۰	۰/۲۵
جو		۱/۱۰	۰/۱۵
جو دوسر (یولاف)		۱/۱۰	۰/۱۵
گندم بهاره		۱/۱۰	۰/۱۵-۰/۳۰ ^{۱۰}
گندم زمستانه	۰/۱۵-۰/۵ ^{۱۱}	۱/۱۰	۰/۱۵-۰/۳۰ ^{۱۰}
ذرت - دانه‌ای	۰/۱۵	۱/۱۵	۰/۱۵-۰/۵۰ ^{۱۲}
- شیرین		۱/۱۰	۱/۰۰ ^{۱۳}
ارزن		۰/۹۵	۰/۲۰
ذرت خوشه‌ای - دانه‌ای		۰/۹۵-۱/۰۵ ^۹	۰/۳۵
- علوفه‌ای			۱/۰۰
برنج	۱/۰۰	۱/۱۵	۰/۴۵-۰/۷۰

۷- به طور معمول، ضریب گیاهی پایه گیاه مارچوبه، تا پیش از اولین زمان برداشت محصول، به دلیل پوشش گیاهی غیر کامل، در حد $K_{cb\ ini}$ باقی می‌ماند. مقدار $K_{cb\ mid}$ برای دوره رشد مجدد گیاه که پس از پایان زمان اولین برداشت آغاز شده، قابل استفاده می‌باشد.

۸- مقدار K_{cb} برای گیاه کنف به تراکم کشت و مدیریت آب (یعنی اعمال مدیریت تنش آبی) بستگی دارد.

۹- مقدار کوچکتر برای شرایط دیم و تراکم کشت کم (کم پُشت) قابل استفاده می‌باشد.

۱۲- $K_{cb\ end}$ کوچکتر برای برداشت دانه با رطوبت بالا و $K_{cb\ end}$ بزرگتر برای برداشت محصول دانه خشک (با حدود ۱۸ درصد رطوبت نسبت به وزن تر)، می‌باشد.

۱۳- این رقم در شرایطی که محصول ذرت برای تازه‌خوری برداشت شده، استفاده می‌شود. برای برداشت محصول دانه خشک، از $K_{cb\ end}$ ذرت دانه‌ای استفاده می‌گردد.

ادامه جدول ۱۷

K _{cb} end	K _{cb} mid	K _{cb} ini	گیاه
			د- علوفه
			یونجه
۱/۱۰ ^{۱۴} ۰/۴۵	۱/۱۵ ^{۱۴} ۰/۴۵	۰/۳۰ ^{۱۴} ۰/۳۰	- علوفه‌ای (برای هر چین) - بذری
۰/۸۰ ۰/۶۰	۰/۹۵ ^{۱۵} ۰/۸۵	۰/۵۰ ۰/۱۵	برموداگراس - (میانگین چند چین) - بذری
۱/۰۵ ^{۱۴}	۱/۱۰ ^{۱۴}	۰/۳۰ ^{۱۴}	شبدر برسیم - علوفه‌ای
۰/۹۵	۱/۰۰ ^{۱۵}	۰/۸۵	چاودار - علوفه‌ای
۱/۰۵ ^{۱۴}	۱/۱۰ ^{۱۴}	۰/۳۰ ^{۱۴}	سودان گراس - (سالانه، میانگین چند چین)
۰/۸۰ ۰/۷۰	۰/۸۰-۱/۰۰ ۰/۷۰	۰/۳۰ ۰/۳۰	مرتع - چرای متناوب - چرای مفرط
۰/۹۰ ۰/۸۰	۰/۹۰ ۰/۸۰	۰/۸۵ ۰/۷۵	چمن تورف - فصل سرد ^{۱۴} - فصل گرم ^{۱۶}
۰/۷۰	۱/۲۰	۰/۱۵	ذ- نیشکر
			ر- میوه‌ها و درختان گرمسیری
۰/۹۰ ۱/۰۵	۱/۰۵ ۱/۱۰	۰/۱۵ ۰/۶۰	موز - یک ساله - دو ساله
۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۹۰	کاکائو
۰/۹۰ ۱/۰۵	۰/۹۰ ۱/۰۵	۰/۸۰ ۱/۰۰	قهوه - خاک بدون پوشش - خاک با پوشش علف‌هرز
۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۰	خرما

۱۴- این ارقام برای گیاهان علوفه‌ای به ترتیب بلافاصله پس از برداشت، در دوره پوشش گیاهی کامل و بلافاصله پیش از برداشت می‌باشند. دوره رشد شامل چندین دوره برداشت (چین) جداگانه است.

۱۵- این K_{cb} mid برای گیاهان برموداگراس و چاودار علوفه‌ای یک میانگین کلی از ضرایب گیاهی پایه در دو دوره پیش و پس از برداشت چند چین است. این ضریب برای دوره مابین آغاز اولین مرحله توسعه گیاه و آغاز آخرین مرحله پایانی رشد، استفاده می‌شود.

۱۶- گونه‌های چمن فصل سرد شامل گیاهان مرتعی متراکم، چاودار و علف نی می‌باشد. گونه‌های چمن فصل گرم شامل برموداگراس و چمن سنت آگوستین است. مقدار ۰/۹ برای چمن فصل سرد نمایانگر چمن در شرایط معمول با ارتفاع ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ متر است. هنگامی که مدیریت مناسب آب به طور دقیق اعمال شود و رشد سریع چمن مورد نظر نباشد، مقادیر ضریب گیاهی پایه چمن تورف می‌تواند بر اساس شرایط به ۰/۱ کاهش یابد.

ادامه جدول ۱۷

K _{cb} end	K _{cb} mid	K _{cb} ini	گیاه
۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۸۵	درختان نخل
۰/۲۵ ۰/۴۵	۰/۲۵ ۰/۴۵	۰/۱۵ ۰/۳۰	آناناس (چند ساله) ^{۱۷} - خاک بدون پوشش - خاک با پوشش چمن
۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۸۵	درختان کائوچو
۰/۹۰ ۱/۰۵	۰/۹۵ ۱/۱۰	۰/۹۰ ۱/۰۰	چای - بدون سایه انداز - با سایه انداز ^{۱۸}
			ز- انگور و توت
۰/۴۰	۱/۰۰	۰/۲۰	توت (بوته ای)
۰/۴۰	۰/۸۰	۰/۱۵	انگور - برای تازه خوری یا کشمش
۰/۸۰	۱/۰۰	۰/۱۵	رازک
			س- درختان میوه
۰/۶۰ ^{۱۹}	۰/۸۵	۰/۲۰	بادام- خاک بدون پوشش
۰/۶۵ ^{۱۹} ۰/۷۰ ^{۱۹} ۰/۹۰ ^{۱۹} ۰/۸۰ ^{۱۹}	۰/۹۰ ۰/۹۰ ۱/۱۵ ۱/۱۵	۰/۳۵ ۰/۵۰ ۰/۴۵ ۰/۷۵	سیب، آلبالو، گلابی ^{۲۰} - خاک بدون پوشش، در معرض یخبندان - خاک بدون پوشش، بدون یخبندان - پوشش گیاهی فعال، در معرض یخبندان شدید - پوشش گیاهی فعال، بدون یخبندان
۰/۶۰ ^{۱۹} ۰/۶۰ ^{۱۹} ۰/۸۵ ^{۱۹} ۰/۸۰ ^{۱۹}	۰/۸۵ ۰/۸۵ ۱/۱۰ ۱/۱۰	۰/۳۵ ۰/۴۵ ۰/۴۵ ۰/۷۵	زردآلو، هلو، میوه های هسته دار ^{۲۱-۲۰} - خاک بدون پوشش، در معرض یخبندان شدید - خاک بدون پوشش، بدون یخبندان - پوشش گیاهی فعال، در معرض یخبندان شدید - پوشش گیاهی فعال، بدون یخبندان

۱۷- تعرق آناناس خیلی پایین بوده زیرا، روزه های برگ آن در طول روز بسته بوده و در شب باز است. بنابراین، بیشترین جزء تبخیر - تعرق گیاه آناناس، به صورت تبخیر از خاک است.

۱۸- شامل نیاز آبی درختان سایه انداز نیز می باشد.

۱۹- مقادیر K_{cb} end، ضرایب گیاهی پایه پیش از ریزش برگ را نشان می دهد. پس از ریزش برگ، مقدار K_{cb} end برای خاک خشک بدون پوشش یا با پوشش غیر فعال حدود ۰/۱۵ و برای خاک های دارای پوشش گیاهی فعال حدود ۰/۴۵ تا ۰/۷۵ است (به فصل یازده مراجعه شود).

۲۰- برای برآورد ضریب گیاهی پایه در سطح کشت رشد نیافته، به معادله های ۹۴، ۹۷ یا ۹۸ و پی نوشت های ۲۲ و ۲۳ مراجعه شود.

۲۱- گروه میوه های هسته دار شامل هلو، زردآلو، گلابی، آلو و گردو است.

ادامه جدول ۱۷

K _{cb end}	K _{cb mid}	K _{cb ini}	گیاه
۰/۷۰	۰/۸۰	۰/۵۰	آوکادو - خاک بدون پوشش
۰/۶۵	۰/۶۰	۰/۶۵	مرکبات، خاک بدون پوشش ^{۲۲}
۰/۶۰	۰/۵۵	۰/۶۰	- پوشش گیاهی ۷۰ درصد
۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۴۵	- پوشش گیاهی ۵۰ درصد
			- پوشش گیاهی ۲۰ درصد
۰/۷۵	۰/۷۰	۰/۷۵	مرکبات، خاک با پوشش گیاهی فعال یا علف هرز ^{۲۳}
۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۵	- پوشش گیاهی ۷۰ درصد
۰/۸۵	۰/۸۰	۰/۸۰	- پوشش گیاهی ۵۰ درصد
			- پوشش گیاهی ۲۰ درصد
۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	درختان مخروطدار ^{۲۴}
۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۲۰	کیوی
۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۵۵	زیتون (با پوشش گیاهی ۴۰ تا ۶۰ درصد) ^{۲۵}
۰/۴۰	۱/۰۵	۰/۲۰	پسته، خاک بدون پوشش
۰/۶۰ ^{۱۹}	۱/۰۵	۰/۴۰	باغ گردو ^{۲۰}

۲۲- این مقادیر می‌توانند با استفاده از معادله ۹۸ محاسبه شده‌اند و در آن: $K_{c \min} = 0.15$ بوده و $K_{cb \text{ full}}$ مراحل اولیه، میانی و پایانی رشد به ترتیب ۰/۷۰، ۰/۶۵ و ۰/۷۰ و همچنین، $f_c f_{c \text{ eff}} = f_c$ کسر پوشش گیاهی درختان با فرض تابش مستقیم خورشید از بالا است) در نظر گرفته شده است. ضریب گیاهی مرحله میانی از ضرایب گیاهی مراحل اولیه و پایانی رشد به دلیل تأثیر بسته بودن روزنه‌ها در طول دوره‌های با حداکثر تبخیر-تعرق، کوچکتر می‌باشد. برای اقلیم‌های مرطوب و نیمه مرطوب که کنترل روزنه‌ای مرکبات کمتر است، می‌توان مقادیر $K_{cb \text{ ini}}$ ، $K_{cb \text{ mid}}$ و $K_{cb \text{ end}}$ را ۰/۱ تا ۰/۲ افزایش داد (Following Regers et al., 1983).

۲۳- این ضرایب گیاهی پایه را می‌توان به صورت معادله $K_{cb} = f_c \cdot K_{cb \text{ ngc}} + (1-f_c) \cdot K_{cb \text{ cover}}$ محاسبه کرد، که در آن: $K_{cb \text{ ngc}}$ ضرایب گیاهی پایه مرکبات در خاک بدون پوشش گیاهی فعال (که در پی‌نوشت ۲۴ محاسبه شده)، و $K_{cb \text{ cover}}$ ضریب گیاهی پایه برای خاک دارای پوشش گیاهی فعال (۰/۹) بوده و f_c در پی‌نوشت ۲۲ تعریف شده است. ضریب گیاهی پایه مرکبات در خاک با پوشش گیاهی فعال را می‌توان، به طور مستقیم، با استفاده از معادله ۹۸ و با فرض $K_{c \min} = K_{cb \text{ cover}}$ ، برآورد کرد. برای اقلیم‌های مرطوب و نیمه مرطوب که کنترل روزنه‌ای مرکبات کمتر است، مقادیر $K_{cb \text{ ini}}$ ، $K_{cb \text{ mid}}$ و $K_{cb \text{ end}}$ را می‌توان ۰/۱ - ۰/۲ افزایش داد (Following Regers et al., 1983).

برای خاک با پوشش گیاهی غیرفعال یا نسبتاً فعال، ضریب گیاهی پایه باید میانگین وزنی ضرایب گیاهی پایه خاک با و بدون پوشش گیاهی فعال با در نظر گرفتن سطح برگ‌های سبز باشد (پوشش گیاهی سبز در حال رشد با نمایه سطح برگ بیشتر از ۲ تا ۳ مشخصه فعال بودن است).

۲۴- کنترل روزنه‌ای درختان مخروطدار تحت تأثیر مقاومت آئرو‌دینامیک، قابل ملاحظه است. بنابراین، مقدار ضریب گیاهی پایه درختان مخروطدار، به طور معمول، کمتر از مقادیر جدول که برای جنگل‌های وسیع بدون کمبود آب ارائه شده، می‌باشد.

۲۵- این ضرایب و پی‌نوشت‌های ۲۲ و ۲۳، برای پوشش گیاهی حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد می‌باشند، برای برآورد ضریب گیاهی پایه درختان غیر بالغ به معادله ۹۸، مثال ۴۳ و پی‌نوشت‌های ۲۲ و ۲۳ مراجعه شود.

منبع مورد استفاده اصلی:

Doorenbos and Kassam (1979): $K_{cb \text{ mid}}$ and $K_{c \text{ end}}$; Doorenbos and Pruitt (1977); Pruitt (1981, 1982), Snyder et al. (1989)

مثال ۲۹- انتخاب و اصلاح ضرایب گیاهی پایه (K_{cb})	
ضرایب گیاهی پایه در مراحل مختلف رشد ($K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$ و $K_{cb\ end}$) لوبیا دانه‌ای (کادر ۱۵) را انتخاب کنید.	
$K_{cb\ ini}$, $K_{cb\ mid}$, $K_{cb\ end}$ لوبیا دانه‌ای را می‌توان، به طور مستقیم، از جدول ۱۷ به ترتیب ۰/۱۵، ۱/۱۰ و ۰/۲۵ انتخاب کرد. از آنجا که $K_{cb\ mid}$ بزرگتر از ۰/۴۵ برای اثر اقلیم محلی با استفاده از معادله ۷۰ اصلاح می‌شود. پس:	
$K_{cb\ mid} = ۰/۱۵$ $K_{cb\ mid} = ۱/۱۰ + [۰/۰۴ \times (۲/۲ - ۲) - ۰/۰۴ \times (۳۰ - ۴۵)] \times \left(\frac{۰/۴}{۳}\right)^{۰/۳} = ۱/۱۴$ $K_{cb\ end} = ۰/۲۵$	
از جدول ۱۲، ارتفاع لوبیا ۰/۴ متر است.	
منحنی ضریب گیاهی پایه متناظر با داده‌های فوق در شکل ۳۷ ارائه شده است.	

جدول ۱۸- راهنمای کلی تعیین ضریب گیاهی پایه از روی ضرایب گیاهی جدول ۱۲

مرحله رشد	شرایط خاک، عملیات آبیاری و زراعی	ضریب گیاهی پایه	تعدیل بعدی
اولیه	گیاهان سالانه - سطح خاک تقریباً بدون پوشش	۰/۱۵	-
	گیاهان چند ساله - سطح خاک تقریباً بدون پوشش	۰/۲۰-۰/۱۵	-
	چمن، بوته و درختان و در معرض یخبندان شدید	۰/۴۰-۰/۳۰	-
	گیاهان چند ساله - پوشش گیاهی یا برگ‌های کم پشت	$K_{c\ ini} (Tab12)^{-۰/۱}$	-
	- آبیاری با فاصله طولانی (زیتون، خرما، درختان میوه،...) - آبیاری با فاصله کوتاه (سبزی‌ها، باغ،...)	$K_{c\ ini} (Tab12)^{-۰/۲}$	-
میانی	خاک با پوشش بیشتر از ۸۰ درصد	$K_{c\ mid} (Tab12)^{-۰/۰۵}$	برای اقلیم* (معادله ۷۰)
	خاک با پوشش کمتر از ۸۰ درصد (سبزیجات)	$K_{c\ mid} (Tab12)^{-۰/۱}$	برای اقلیم* (معادله ۷۰)
پایانی	آبیاری یا خیس شدن غیر پیوسته	$\sim K_{c\ end}^{-۰/۰۵}$	-
	آبیاری یا خیس شدن پیوسته	$K_{c\ end}^{-۰/۱}$	برای اقلیم* (معادله ۷۰)

* اگر ضریب گیاهی پایه بزرگتر از ۰/۴۵ باشد، برای در نظر گرفتن تأثیر اقلیم محلی، با استفاده از معادله ۷۰ اصلاح می‌شود.

مثال ۳۰- تعیین ضریب گیاهی پایه روزانه

ضریب گیاهی پایه لوبیا دانه‌ای در نیمه هر یک از مراحل چهارگانه رشد را محاسبه کنید (مثال ۲۹، شکل ۳۷).

طول مرحله اولیه $L_{ini} = 25$ روز، پس نیمه این مرحله روز دوازدهم است. پس:

$$K_{cb} = K_{cb\ ini} = 0.15$$

طول مرحله توسعه گیاه $L_{dev} = 25$ روز و نیمه این مرحله، در روز $25 + (25 \div 2) = 37.5$ است. پس با استفاده از معادله ۶۶:

$$K_{cb} = 0.15 + \left[\left(\frac{27 - 25}{25} \right) \times (1/14 - 0.15) \right] = 0.63$$

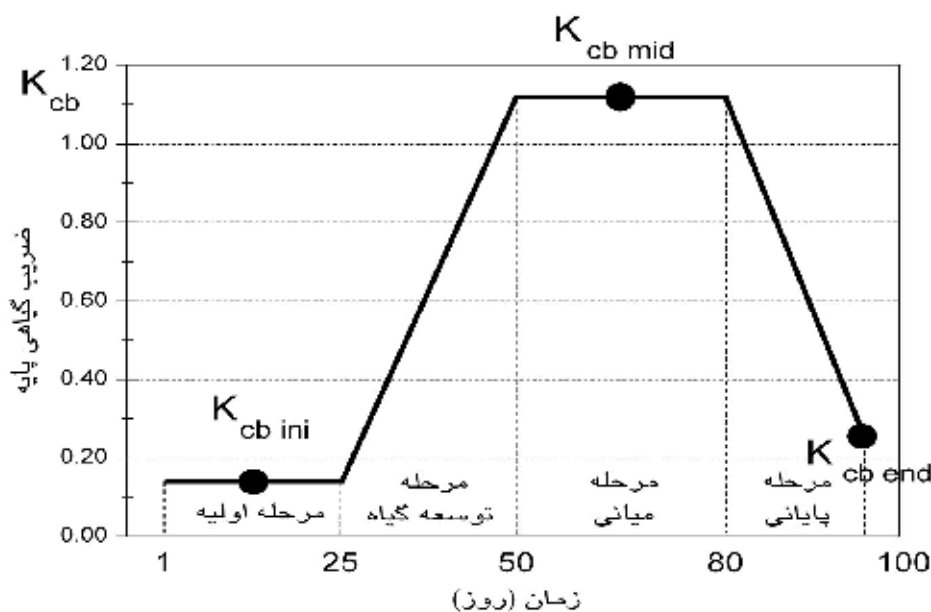
طول مرحله میانی $L_{mid} = 30$ روز و نیمه این مرحله، در روز $25 + 25 + (30 \div 2) = 62.5$ است. پس:

$$K_{cb} = K_{cb\ mid} = 1/14$$

طول مرحله پایانی $L_{late} = 20$ روز و نیمه این مرحله، در روز $25 + 25 + 30 + (20 \div 2) = 90$ است. پس با استفاده از معادله ۶۶:

$$K_{cb} = 1/14 + \left[\left(90 - \frac{25 + 25 + 30}{2} \right) \times (0.25 - 1/14) \right] = 0.70$$

در نیمه چهار مرحله رشد گیاه که به ترتیب مصادف با روزهای ۱۲، ۳۷، ۶۵ و ۹۰ام از کل دوره رشد بوده، ضرایب گیاهی پایه به ترتیب ۰/۱۵، ۰/۶۳، ۱/۱۴ و ۰/۷۰ است.



شکل ۳۷- منحنی ضریب گیاهی پایه لوبیا دانه‌ای در چهار مرحله رشد با طول

به ترتیب ۲۵، ۲۵، ۳۰ و ۲۰ روز (مثال ۲۹)

جزء تبخیر

ضریب تبخیر از خاک (K_e)، جزء تبخیر در ET_c را توصیف می‌کند. پس از خیس شدن لایه خاک سطحی با بارندگی یا آبیاری، ضریب تبخیر بیشترین مقدار است. با خشک شدن این لایه، ضریب تبخیر کاهش می‌یابد. در شرایطی که آبی در لایه خاک سطحی باقی نباشد، ضریب تبخیر می‌تواند صفر شود.

روش محاسبه

تبخیر از خاک خیس شده بیشترین مقدار است. هر چند، ضریب گیاهی دو جزئی ($K_c = K_{cb} + K_e$) بزرگتر از بیشترین مقدار این ضریب ($K_{c \max}$) نخواهد شد. ($K_{cb} + K_e \leq K_{c \max}$) یا ($K_e \leq K_{c \max} - K_{cb}$) حداکثر تبخیر از خاک تابع انرژی در دسترس می‌باشد. با خشک شدن لایه خاک سطحی، برای تبخیر آب کمتری در دسترس بوده و مقدار آن متناسب با آب باقیمانده در این لایه کاهش می‌یابد. بنابراین، رابطه زیر برقرار است:

$$K_e = K_r (K_{c \max} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c \max} \quad (۷۱)$$

که در آن:

K_e = ضریب تبخیر از خاک،

K_{cb} = ضریب گیاهی پایه،

$K_{c \max}$ = حداکثر مقدار ضریب گیاهی پس از بارندگی یا آبیاری،

K_r = ضریب کاهش تبخیر وابسته به عمق تخلیه (تبخیر) تجمعی از لایه خاک سطحی، و

f_{ew} = کسر خاک خیس شده و در معرض هوا یا کسر خاک دارای بیشترین مقدار تبخیر می‌باشند.

در زبان برنامه‌نویسی، معادله ۷۱ به صورت ($f_{ew} K_{c \max}$) و ($K_e = \min(K_r (K_{c \max} - K_{cb}), f_{ew} K_{c \max})$) نوشته می‌شود.

ضریب کاهش تبخیر (K_r) پس از بارندگی یا آبیاری ۱ است و شدت تبخیر، تنها، به انرژی در دسترس برای تبخیر بستگی دارد. با خشک شدن تدریجی لایه خاک سطحی، K_r کوچکتر از ۱ شده و تبخیر نیز کاهش می‌یابد. هنگامی که آبی در لایه خاک سطحی برای تبخیر باقی نباشد، مقدار K_r صفر است.

آب، به طور عمده، از خاک بدون پوشش تبخیر می‌شود. بنابراین، تبخیر در هر لحظه به انرژی در دسترس این لایه بستگی دارد و K_e نمی‌تواند بزرگتر از مقدار مشخص ($f_{ew} \times K_{c \max}$) باشد. عبارت f_{ew} ، کسر خاک سطحی دارای بیشترین شدت تبخیر است. یعنی، f_{ew} سطح خاک بدون پوشش گیاهی است که به وسیله آبیاری یا بارندگی خیس می‌شود. در محاسبه تبخیر، تعیین مقادیر زیر ضرورت دارد:

- کران بالای $K_{c \max}$
- ضریب کاهش تبخیر خاک (K_r)

• سطح خاک خیس و در معرض هوا (f_{ew})

برآورد ضریب کاهش تبخیر نیازمند محاسبه موازنه روزانه آب در لایه خاک سطحی است.

کران بالای ضریب گیاهی

مقدار $K_{c \max}$ نمایانگر کران بالای تبخیر - تعرق از یک سطح کشت است و اثر محدودیت‌های طبیعی مؤثر بر انرژی در دسترس که به صورت $R_n - G - H$ (معادله ۱) می‌باشد، را توصیف می‌کند. دامنه تغییر $K_{c \max}$ که به صورت زیر تعیین شده، تابع تبخیر - تعرق گیاه مرجع چمن بوده و حدود ۱/۰۵ تا ۱/۳ است:

$$K_{c \max} = \max \left(\left[1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right], \{K_{cb} + 0.05\} \right) \quad (72)$$

که:

h = میانگین حداکثر ارتفاع گیاه در دوره مورد نظر (مراحل اولیه، توسعه گیاه، میانی و پایانی رشد) [متر]،
 K_{cb} = ضریب گیاهی پایه، و

(Max) = حداکثر مقدار عوامل مندرج در داخل $\{ \}$ که به وسیله علامت $(,)$ از یکدیگر جدا شده‌اند.

معادله ۷۲ تأکید دارد که $K_{c \max}$ همواره مساوی یا بیشتر از مجموع ضریب گیاهی پایه و ۰/۰۵ است. به عبارتی، ضریب گیاهی پایه در خاک به طور کامل خیس شده حتی اگر دارای پوشش گیاهی کامل باشد، به مقدار ۰/۰۵ افزایش خواهد یافت. استفاده از عدد «۱/۲» در معادله ۷۲، برای در نظر گرفتن اثر افزایش زبری آئروپدینامیک گیاهان اطراف کشت مورد نظر در مراحل توسعه گیاه، میانی و پایانی رشد است که می‌تواند موجب انتقال متلاطم بخار از سطح خاک در معرض هوا شود. عدد «۱/۲»، همچنین، تأثیر کاهش ضریب بازتابش خاک خیس و اثر ذخیره گرما در خاک خشک پیش از خیس شدن، را در معادله می‌گنجاند. کلیه این عوامل می‌توانند در افزایش تبخیر از سطح تحت کشت یک محصول مشخص در مقایسه با سطح مرجع مؤثر باشند.

عدد «۱/۲» در معادله ۷۲، اثر خیس شدن خاک با فاصله طولانی‌تر از ۳ یا ۴ روز را توصیف می‌کند. اگر این فاصله کوتاه، و به طور مثال، روزانه یا یک روز در میان باشد، فرصت خاک برای جذب گرما کمتر است و عدد «۱/۲» می‌تواند به حدود «۱/۱» کاهش یابد. مقدار $K_{c \max}$ می‌تواند برای دوره روزانه تا ماهانه محاسبه شود.

ضریب کاهش تبخیر از خاک

فرآیند تبخیر از خاک (بدون پوشش گیاهی) در معرض هوا را می‌توان به دو مرحله تفکیک کرد: مرحله اول که در آن انرژی عامل محدودکننده می‌باشد. مرحله دوم که آب عامل محدودکننده بوده و روند تبخیر

نزولی است. هنگامی که سطح خاک خیس است، ضریب کاهش تبخیر (K_r)، ۱ می‌باشد. با کاهش آب در لایه خاک سطحی، K_r نیز کاهش یافته و با تخلیه کل آب قابل تبخیر از این لایه، ضریب کاهش تبخیر صفر می‌شود.

مداکثر مقدار آب قابل تبخیر

در یک روش ساده برای برآورد تبخیر از لایه خاک سطحی در معرض هوا، فرض می‌شود که اندکی پس از خیس شدن با یک آبیاری یا بارندگی سنگین، رطوبت این لایه به ظرفیت زراعی (θ_{FC}) می‌رسد و پس از آن رطوبت خاک می‌تواند تا نصف مقدار آب موجود بین دو حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی (θ_{WP}) کاهش یابد. بنابراین، مقدار آب قابل تبخیر در طول یک دوره کامل خشک شدن لایه خاک سطحی می‌تواند به صورت زیر برآورد شود:

$$TEW = 1000(\theta_{FC} - 0.5 \theta_{WP}) Z_e \quad (۷۳)$$

که در آن:

TEW = کل آب یا بیشترین عمق آب قابل تبخیر پس از خیس شدن کامل لایه خاک سطحی [میلی‌متر]،
 θ_{FC} = مقدار آب خاک در ظرفیت زراعی [مترمکعب بر مترمکعب]،
 θ_{WP} = مقدار آب خاک در نقطه پژمردگی [مترمکعب بر مترمکعب]، و
 Z_e = عمق لایه خاک سطحی در معرض تبخیر [۰/۱۰ تا ۰/۱۵ متر]، می‌باشند.
 آنجا که، اطلاعات کافی از مقدار Z_e (عمق مؤثر لایه تبخیر) در دسترس نمی‌باشد، استفاده از مقادیر ۰/۱ تا ۰/۱۵ توصیه می‌شود. مقادیر معمول θ_{FC} ، θ_{WP} و TEW در جدول ۱۹ ارائه شده‌اند.

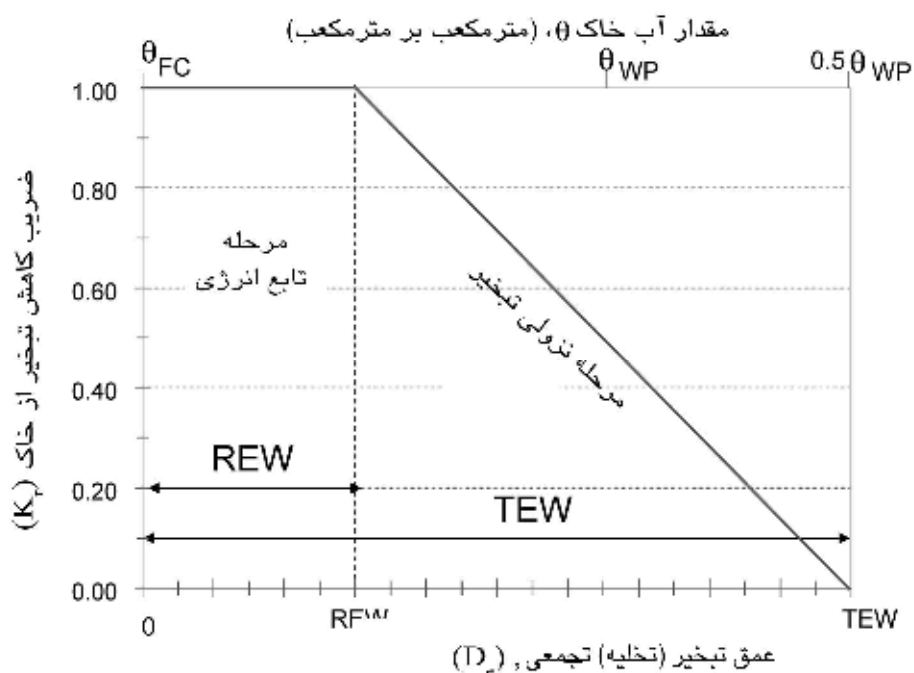
مرحله اول تبخیر: مرحله تابع انرژی^۱

در آغاز چرخه خشک شدن خاک پس از بارندگی یا آبیاری سنگین، مقدار آب لایه خاک سطحی در حد ظرفیت زراعی بوده و مقدار آب تخلیه شده از آن به صورت تبخیر (D_e)، صفر است. در مرحله اول تبخیر، لایه خاک سطحی خیس و تبخیر از آن حداکثر است که شدت آن، تنها، به مقدار انرژی در دسترس سطح بستگی دارد. این مرحله تا هنگامی ادامه می‌یابد که تبخیر تجمعی (D_e) موجب کاهش هدایت هیدرولیکی لایه خاک سطحی شده و سرعت حرکت آب به سمت این لایه کمتر از نیاز تبخیر می‌شود. ضریب کاهش تبخیر در مرحله اول $K_r = ۱$ می‌باشد.

جدول ۱۹- مقادیر معمول ظرفیت زراعی (θ_{FC})، نقطه پژمردگی (θ_{WP}) و آب قابل تبخیر خاک در انواع متفاوت بافت

پارامترهای تبخیر		مشخصه‌های آب خاک			نوع بافت (روش ایالات متحده آمریکا برای طبقه‌بندی بافت خاک)
مقدار آب قابل تخلیه به صورت تبخیر		$(\theta_{FC} - \theta_{WP})$	θ_{WP}	θ_{FC}	
مرحله اول و دوم تبخیر *TEW ($Z_e=0/10$ متر)	مرحله اول تبخیر REW				
میلی متر	میلی متر	مترمکعب بر مترمکعب	مترمکعب بر مترمکعب	مترمکعب بر مترمکعب	
۶-۱۲	۲-۷	۰/۰۵-۰/۱۱	۰/۰۲-۰/۰۷	۰/۰۷-۰/۱۷	شن
۹-۱۴	۴-۸	۰/۰۶-۰/۱۲	۰/۰۳-۰/۱۰	۰/۱۱-۰/۱۹	شن لومی
۱۵-۲۰	۱۰-۱۶	۰/۱۱-۰/۱۵	۰/۰۶-۰/۱۶	۰/۱۸-۰/۲۸	لوم شنی
۱۶-۲۲	۸-۱۰	۰/۱۳-۰/۱۸	۰/۱۷-۰/۰۷	۰/۲۲-۰/۳۰	لوم
۱۸-۲۵	۸-۱۱	۰/۱۳-۰/۱۹	۰/۰۹-۰/۲۱	۰/۲۲-۰/۳۶	لوم سیلت
۲۲-۲۶	۸-۱۱	۰/۱۶-۰/۲۰	۰/۱۲-۰/۲۲	۰/۲۸-۰/۳۶	سیلت
۲۲-۲۷	۸-۱۱	۰/۱۳-۰/۱۸	۰/۱۷-۰/۲۴	۰/۳۰-۰/۳۷	لوم رسی سیلت
۲۲-۲۸	۸-۱۲	۰/۱۳-۰/۱۹	۰/۱۷-۰/۲۹	۰/۳۰-۰/۴۲	رسی سیلتی
۲۲-۲۹	۸-۱۲	۰/۱۲-۰/۲۰	۰/۲۰-۰/۲۴	۰/۳۲-۰/۴۰	رسی

$$*TEW = (\theta_{FC} - 0.5 \theta_{WP}) Z_e$$



شکل ۳۸- ضریب کاهش تبخیر از خاک (K_r)

عمق تبخیر تجمعی در پایان مرحله اول تبخیر به اختصار آب با سهولت قابل تبخیر (REW) نامیده شده و برابر بیشترین عمق آب قابل تبخیر از لایه خاک سطحی در این مرحله است. این مقدار، به طور معمول، از ۵ تا ۱۲ میلی‌متر متغیر و به طور کلی، برای خاک با بافت متوسط یا سنگین بیشتر می‌باشد. مقادیر معمول REW برای انواع بافت خاک در جدول ۱۹ ارائه شده است.

مرحله دوم تبخیر: مرحله نزولی تبخیر^۱

مرحله دوم (که در آن سرعت تبخیر کاهش می‌یابد)، هنگامی شروع می‌شود که مقدار D_e بیش از REW باشد. در این مرحله، سطح خاک در ظاهر خشک است و تبخیر از خاک متناسب با مقدار آب باقی مانده در این لایه کاهش می‌یابد:

$$K_r = \frac{TEW - D_{e,i-1}}{TEW - REW} \quad D_{e,i-1} > REW \quad (74)$$

که در آن:

K_r = ضریب کاهش تبخیر که به تخلیه آب خاک از لایه خاک سطحی بستگی دارد، ($K_r=1$ برای $D_{e,i-1} \leq REW$)

$D_{e,i-1}$ = عمق تجمعی تبخیر (تخلیه) آب از لایه خاک سطحی در پایان روز $i-1$ ام (روز قبل)، [میلی‌متر]،

TEW = حداکثر عمق آب قابل تبخیر (تخلیه) از لایه خاک سطحی هنگام $K_r = 0$ [میلی‌متر] و

REW = عمق تجمعی آب با سهولت قابل تبخیر (تخلیه) در پایان مرحله اول تبخیر می‌باشند.

روش استفاده از ضریب کاهش تبخیر در مثال ۳۱ ارائه شده است.

کسر سطح خاک خیس و در معرض هوا

(روش مناسب):

تبخیر از پوشش گیاهی غیر کامل، اغلب، یکنواخت نیست. از سطح خاک بین گیاهان، که بیشتر در معرض نور خورشید قرار دارند و تهویه هوا در آن موجب انتقال سریع‌تر بخار آب به بالای پوشش گیاهی شده، تبخیر بیشتر است. این شرایط، به ویژه، هنگامی که تنها، کسری از سطح خاک با آبیاری خیس شده، مشاهده می‌شود. وضعیت سطح خاک و کسری از آن که در معرض نور خورشید قرار دارد، به زمان و جهت ردیف‌های کشت گیاه بستگی دارد. روش ارائه شده در این فصل، میانگین کسری از سطح خاک که بخش عمده تبخیر در آن صورت می‌پذیرد، را برآورد می‌کند. در این برآورد فرض شده که تبخیر از خاک زیرین پوشش گیاهی، به طور عمده، در ضریب گیاهی پایه (K_{cb}) گنجانده می‌شود.

مثال ۳۱ - تعیین تبخیر - تعرق از سطح خاک بدون پوشش							
تبخیر - تعرق از یک خاک لومی بدون پوشش ($K_{cb} \approx 0/15$) برای ۱۰ روز متوالی پس از یک بارندگی سنگین را تعیین کنید. تبخیر - تعرق مرجع منطقه در دوره خشک $ET_0 = 4/5$ میلی متر بر روز و اقلیم منطقه نیمه مرطوب با باد ملایم است.							
از جدول ۱۹ برای خاک لومی، $TEW \approx 20$ میلی متر و $REW \approx 9$ میلی متر است.							
برای بارندگی در خاک بدون پوشش: $f_{ew} = 1$ پس از معادله ۷۲: $K_{c\ max} = 1/2$							
(۸) ET_C میلی متر بر روز	(۷) $D_{e\ end}$ میلی متر	(۶) $K_e ET_0$ میلی متر بر روز	(۵) K_e	(۴) K_r	(۳) مرحله	(۲) $D_{e\ start}$ میلی متر	(۱) روز
۵/۴	۴/۷۳	۴/۷۳	۱/۰۵	۱	۱	۰/۰۰	۱
۵/۴	۹/۴۵	۴/۷۳	۱/۰۵	۱	۱	۴/۷۳	۲
۵/۲	۱۳/۹۸	۴/۵۳	۱/۰۱	$(20 - 9/45) + (20 - 9) = 0/96$	۲	۹/۴۵	۳
۳/۳	۱۶/۵۷	۲/۵۹	۰/۵۷	$(20 - 13/98) + (20 - 9) = 0/55$	۲	۱۳/۹۸	۴
۲/۱	۱۸/۰۴	۱/۴۷	۰/۳۳	$(20 - 16/57) + (20 - 9) = 0/31$	۲	۱۶/۵۷	۵
۱/۵	۱۸/۸۸	۰/۸۴	۰/۱۹	$(20 - 18/04) + (20 - 9) = 0/18$	۲	۱۸/۰۴	۶
۱/۲	۱۹/۳۶	۰/۴۸	۰/۱۱	$(20 - 18/88) + (20 - 9) = 0/10$	۲	۱۸/۸۸	۷
۰/۹	۱۹/۶۴	۰/۲۷	۰/۰۶	$(20 - 19/36) + (20 - 9) = 0/06$	۲	۱۹/۳۶	۸
۰/۸	۱۹/۷۹	۰/۱۶	۰/۰۳	$(20 - 19/64) + (20 - 9) = 0/03$	۲	۱۹/۶۴	۹
۰/۸	۱۹/۸۸	۰/۰۹	۰/۰۲	$(20 - 19/79) + (20 - 9) = 0/02$	۲	۱۹/۷۹	۱۰
(۱) شماره روز							
(۲) تخلیه در ابتدای روز (مساوی با تبخیر در پایان روز قبل)							
(۳) مرحله تبخیر (مرحله دوم هنگامی شروع می شود که: $D_e > REW = 9$ میلی متر باشد)							
(۴) K_r ($K_r = 1$ برای مرحله اول، K_r از معادله ۷۴ برای مرحله دوم)							
(۵) از معادله ۲۱: $K_e = K_r(K_{c\ max} - K_{cb}) = K_r(1/2 - 0/15) = K_r \times 1/05 \leq 1/20$							
(۶) جزء تبخیر: $K_e ET_0 = K_e \times (4/5)$ میلی متر بر روز							
(۷) تخلیه در پایان روز = ستون ۶ منهای ستون ۲							
(۸) میلی متر بر روز $ET_C = (K_{cb} + K_e) ET_0 = (0/15 + K_e) \times ET_0 = (0/15 + K_e) \times 4/5$							
که در آن؛ تبخیر از خاک (به عمق Z_e حدود ۰/۱ تا ۰/۱۵ متر)، $K_{cb} \times ET_0 = (0/15 \times ET_0) \approx 0/7$ ، میلی متر بر روز است. از آنجا که در این شرایط خاک بدون پوشش است، می توان K_{cb} را صفر فرض کرد. بنابراین، حداکثر K_e مساوی با: $K_e = K_{c\ max} = 0/20$ است. پس از آن، کل تبخیر از لایه خاک سطحی کاهش می یابد.							
این مثال نشان می دهد که محاسبه موازنه روزانه آب برای برآورد K_r مورد نیاز است. روش کار در بخش محاسبه K_e روزانه به طور مشروح بیان می شود.							

هنگامی که کل سطح خاک خیس شود (مشابه وضعیت بارندگی یا آبیاری بارانی)، کسر سطح خاک دارای بیشترین تبخیر (f_{ew})، به صورت عبارت $(1 - f_c)$ بوده و در آن ضریب f_c میانگین کسر سطح خاک دارای پوشش گیاهی و $(1 - f_c)$ کسر تقریبی سطح خاک در معرض هوا است. در روش های آبیاری که تنها،

کسری از سطح خاک خیس می‌شود، عبارت f_{ew} باید همان کسر خاک خیس شده با آبیاری (f_w) را نشان دهد (شکل ۳۹). بنابراین، به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad (75)$$

که در آن:

$1 - f_c$ = میانگین کسر خاک بدون پوشش گیاهی و در معرض هوا و (فاقد سایه‌انداز) $[0.1$ تا $1]$ ،

f_w = میانگین کسر خاک خیس شده با آبیاری یا بارندگی $[0.1$ تا $1]$ ، می‌باشد.

عبارت $\min()$ تأکید دارد که حداقل مقدار $(1 - f_c)$ یا f_w انتخاب شود. در شکل ۳۹ رابطه f_{ew} با $(1 - f_c)$ و f_w نشان داده شده است.

در معادله ۷۵، حدهای اعمال شده با این فرض است که کسر خاک خیس شده با آبیاری همان کسر خاک در معرض نور و تهویه است. به طور معمول، این وضعیت به جزء در روش آبیاری قطره‌ای در سایر روش‌های آبیاری مشاهده می‌شود (شکل ۳۹).

در روش آبیاری قطره‌ای بخش عمده سطح خاک خیس ممکن است، در زیر پوشش و سایه‌اندازی گیاهی باشد. در این حالت، برای تخمین دقیق تبخیر، مدل‌های پیچیده‌تری برای نمایش الگوی خیس شدن سطح خاک مورد نیاز است. برای در نظر گرفتن اثرات سایه‌اندازی پوشش گیاهی بر روی گسیلنده‌ها (قطره‌چکان‌ها) که موجب تغییر شدت تبخیر از سطح خاک خیس می‌شود، مقدار f_w می‌تواند با کاهش حدود یک دوم تا یک سوم از ارقام جدول ۲۰ بدست آید (مثال ۳۴). یک روش کلی در آبیاری قطره‌ای استفاده با ضرب کردن f_w در $[1 - (\frac{2}{3})f_c]$ می‌باشد.

کسر سطح خاک خیس شده با آبیاری یا بارندگی: f_w

مقادیر معمول f_w در جدول ۲۰ ارائه شده است. هنگام همزمان شدن آبیاری و بارندگی در یک دوره خشک یا در یک روز، مقدار f_w باید به صورت میانگین وزنی کسر خاک خیس شده با بارندگی (یعنی، $f_w=1$) و f_w کسر خاک خیس شده با آبیاری تعیین شود. میانگین وزنی باید به طور تقریبی، متناسب با عمق آب نفوذ یافته از هر منبع (بارندگی یا آبیاری) باشد.

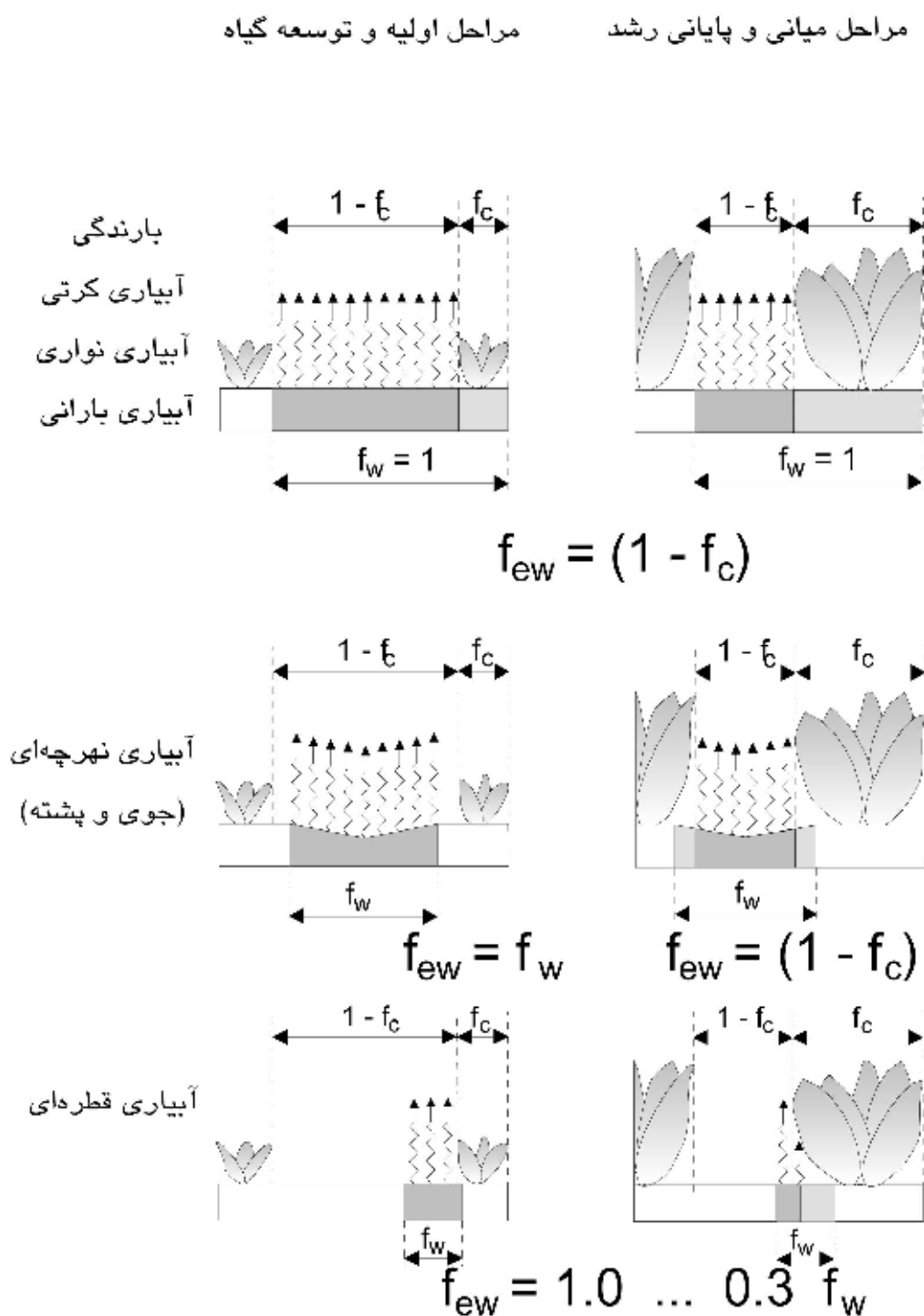
در روز آبیاری و روزهای پس از آن، برای حالت‌های متفاوت به صورت زیر تعیین می‌شود:

- اگر سطح خاک با آبیاری و بارندگی هر دو، خیس شود، باید f_w مربوط به آبیاری را در نظر گرفت.

- اگر سطح خاک با آبیاری خیس شود: f_w با توجه به روش آبیاری تعیین می‌شود.

- اگر سطح خاک تنها با بارندگی (بیشتر از ۳ تا ۴ میلی‌متر) خیس شود، $f_w=1$ در نظر گرفته می‌شود.

- اگر در یک روز بارندگی کافی یا آبیاری صورت نگیرد، f_w معادل f_w روز قبل در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳۹- تعیین کسر خاک خیس بدون پوشش (f_{ew}) بر مبنای کسر پوشش گیاهی (f_c) و کسر خاک خیس (f_w) با توجه به نوع آبیاری و مراحل رشد گیاه

جدول ۲۰- مقادیر معمول کسر خاک خیس شده با آبیاری و یا بارندگی (f_w)

f_w	وضعیت خیس شدن خاک
۱/۰	بارندگی
۱/۰	آبیاری بارانی
۱/۰	آبیاری کرتی
۱/۰	آبیاری نواری
۱/۰ تا ۰/۶	آبیاری نهرچه‌ای (آبیاری دائم)، جوی کم عرض
۰/۶ تا ۰/۴	آبیاری نهرچه‌ای (آبیاری دائم)، جوی عریض
۰/۳ تا ۰/۵	آبیاری نهرچه‌ای (نهرها یک در میان و به طور متناوب آبیاری می‌شوند)
۰/۳ تا ۰/۴	آبیاری قطره‌ای

کسر سطح خاک در معرض هوا: $1 - f_c$

کسر سطح خاک دارای پوشش گیاهی با f_c نشان داده می‌شود. بنابراین، عبارت $(1 - f_c)$ کسر سطح خاک در معرض تابش خورشید و تهویه هوا است که بیشترین مقدار تبخیر در آن انجام می‌شود. کران بالای f_c کوچکتر از ۰/۹۹ است. برای مراحل مختلف رشد گیاه، باید از مقادیر f_c مناسب استفاده شود. مقادیر معمول f_c و $(1 - f_c)$ در جدول ۲۱ ارائه شده است. هنگامی که f_c اندازه‌گیری نمی‌شود، می‌توان آن را با استفاده از رابطه زیر برآورد کرد:

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{cmin}}{K_{cmax} - K_{cmin}} \right)^{(1+0.5h)} \quad (76)$$

که در آن:

f_c = کسر پوشش گیاهی مؤثر [صفر تا ۰/۹۹]،

K_{cb} = ضریب گیاهی پایه برای یک روز یا یک دوره مشخص،

K_{cmin} = حداقل ضریب گیاهی برای خاک خشک بدون پوشش [حدود ۰/۱۵ تا ۰/۲۰]،

K_{cmax} = حداکثر ضریب گیاهی بلافاصله پس از خیس شدن سطح خاک (معادله ۷۲) و

h = میانگین ارتفاع گیاه [متر]، می‌باشد.

این معادله باید با احتیاط و پس از تأیید با اندازه‌گیری در مزرعه استفاده شود. K_{cmin} حداقل ضریب گیاهی خاک خشک بدون پوشش در هنگامی است که تعرق و تبخیر از خاک نزدیک به مقادیر پایه باشد. مقدار K_{cmin} حدود ۰/۱۵ تا ۰/۲۰ پیشنهاد شده و این ضریب یک جزء جدایی ناپذیر از ضرایب K_{cb} کلی است.

جدول ۲۱- مقادیر معمول کسر پوشش گیاهی (f_c) وکسر سطح خاک در معرض تابش $(1 - f_c)$

$1 - f_c$	f_c	مرحله رشد گیاه
۰/۹-۱/۰	۰/۰-۰/۱	مرحله اولیه
۰/۲-۰/۹	۰/۱-۰/۸	مرحله توسعه گیاه
۰/۰-۰/۲	۰/۸-۱/۰	مرحله میانی
۰/۲-۰/۸	۰/۲-۰/۸	مرحله پایانی

ضریب $K_{c \min}$ ، به طور معمول، مشابه $K_{cb \text{ ini}}$ محصولات سالانه در خاک به طور تقریبی، بدون پوشش است (۰/۱۵ تا ۰/۲۰).

در معادله ۷۶ فرض می‌شود که مقدار K_{cb} تا حد زیاد تحت تأثیر پوشش گیاهی سطح خاک است. این فرض برای اکثر شرایط و گیاهان قابل قبول می‌باشد. توان « $1+0.5h$ » در این معادله، اثر ارتفاع گیاه بر سایه‌اندازی سطح زمین و تأثیر افزایش K_{cb} داده شده برای یک مقدار مشخص f_c را نشان می‌دهد. مقدار $(K_{cb} - K_{c \min})$ باید ۰/۰۱ یا بیشتر باشد. مقدار f_c نیز مشابه K_{cb} به طور روزانه تغییر خواهد کرد. بنابراین، معادله ۷۶ برای محاسبه‌های روزانه قابل استفاده است.

بر طبق برآورد معادله ۷۶، مقدار f_c در مرحله پایانی رشد، علیرغم وجود پوشش گیاهی پلاسیده در سطح خاک، متناسب با K_{cb} کاهش می‌یابد. بدین ترتیب تأثیر انتقال موضعی گرمای محسوس از برگ‌های پلاسیده به سمت سطح خاک زیرین در نظر گرفته می‌شود.

مثال ۳۲- محاسبه ضریب گیاهی به روش دو جزئی ($K_{cb} + K_e$) در روش آبیاری بارانی

در یک مزرعه پنبه تحت آبیاری بارانی، مقدار K_{cb} برای یک روز مشخص (در مرحله توسعه گیاه) با استفاده از جدول ۱۷ و معادله ۷۰ و سپس میان‌یابی از منحنی K_{cb} مساوی با ۰/۹ محاسبه شده است. تبخیر - تعرق گیاه مرجع ۷ میلی‌متر بر روز، میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری و حداقل رطوبت نسبی به ترتیب ۳ متر بر ثانیه و ۲۰ درصد است. ضریب گیاهی را به روش دو جزئی ($K_{cb} + K_e$) برآورد کنید.

با فرض اینکه ارتفاع گیاه $h=1$ متر باشد، و با استفاده از معادله ۷۲، $K_{c \max}$ برای اقلیم خشک به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{c \max} = \max \left\{ \left\{ \frac{1}{2} + [0.04 \times (3 - 2) - 0.04 \times (20 - 45)] \times \left(\frac{1}{3}\right)^{0.73} \right\} \left\{ 0.9 + 0.05 \right\} \right\} = 1/3$$

از معادله ۷۶، هنگامی که $K_{c \min} = 0.15$ است، داریم:

$$f_c = [(K_{cb} - K_{c \min}) / (K_{c \max} - K_{c \min})]^{(1+0.5h)}$$

$$= [(0.9 - 0.15) / (1/3 - 0.15)]^{(1+0.5(1))} = 0.53$$

در آبیاری بارانی، $f_w = 1$ است و از معادله ۷۵ داریم:

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w)$$

$$= \min[(1 - 0.53) \text{ و } 1/0] = 0.47$$

با فرض کافی بودن آبیاری برای افزایش رطوبت خاک لایه تبخیر به حد ظرفیت زراعی، $K_t = 1$ بوده و فرآیند تبخیر در مرحله اول قرار دارد.

$$K_e = 1/0 \times (1/30 - 0.90) = 0.40$$

از معادله ۷۱:

این مقدار با کران بالای $f_{ew} K_{c \max} = 0.47 \times (1/30) = 0.61$ مقایسه می‌شود، از آنجا که، ۰/۶۱ از ۰/۴۰ K_e بیشتر است. بنابراین، اصلاح K_e ضرورت ندارد.

ضریب گیاهی کلی مزرعه پنبه، با فرض نبود تنش آبی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

$$= 0.9 + 0.40 = 1.30$$

این مقدار به دلیل خیس شدن متوالی سطح خاک تحت آبیاری بارانی، بلند بودن ارتفاع گیاه پنبه در مقایسه با گیاه مرجع چمن و خشک بودن اقلیم منطقه، بالا و همان بیشترین مقدار ضریب گیاهی $K_{c \max}$ است.

مثال ۳۳- محاسبه ضریب گیاهی به روش دو جزئی ($K_{cb} + K_e$) در روش آبیاری نهرچه‌ای

مزرعه پنبه مثال ۳۲ با روش آبیاری نهرچه‌ای یک در میان آبیاری شده و کسر خاک خیس شده ۰/۳ است.

مقدار f_{ew} در این حالت با استفاده از معادله ۷۵ مساوی است با:

$$f_w = \min[(1-f_c) \text{ و } f_w] = \min[(1-0/53) \text{ و } 0/3] = 0/3$$

با فرض کافی بودن آبیاری برای افزایش رطوبت خاک لایه تبخیر به حد ظرفیت زراعی، $K_r=1$ بوده و فرآیند تبخیر در مرحله اول می‌باشد.

با استفاده از معادله ۷۱ داریم:

$$K_e = 1/0 \times (1/3 - 0/9) = 0/40$$

این مقدار با کران بالای $K_{cmax} = 0/3 \times (1/30) = 0/39$ مقایسه می‌شود. از آنجا که، ۰/۴ بیشتر از ۰/۳۹ است پس قابل قبول نمی‌باشد و K_e بر مبنای سطح f_{ew} مساوی با ۰/۳۹ در نظر گرفته می‌شود.

ضریب گیاهی کلی مزرعه پنبه تحت آبیاری نهرچه‌ای و بدون تنش آبی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_c = K_{cb} + K_e = 0/9 + 0/39 = 1/29$$

این مقدار با ضریب گیاهی مثال ۳۲ یکسان است. در روش آبیاری نهرچه‌ای متناوب، کل سطح خاک مزرعه به طور دائم خیس شده یا دارای پوشش گیاهی است.

مثال ۳۴- محاسبه ضریب گیاهی به روش دو جزئی ($K_{cb} + K_e$) در روش آبیاری قطره‌ای

مزرعه پنبه مثال قبل با روش قطره‌ای آبیاری می‌شود. قطره‌چکان‌ها در زیر سایه‌انداز قرار داشته و کسر خاک خیس شده با آبیاری ۰/۳ است.

در این حالت، مقدار f_{ew} با استفاده از معادله ۷۵ به صورت $f_{ew} = \min(1-f_c, f_w)$ محاسبه می‌شود. از آنجا که قطره‌چکان‌ها در زیر سایه‌انداز گیاه قرار دارند، بنابراین انرژی کمتری برای تبخیر در دسترس است و مقدار f_w با ضرب در عبارت

$$\left[1 - \left(\frac{2}{3}\right)f_c\right] \text{ کاهش می‌یابد بنابراین:}$$

$$f_{ew} = \min[(1-f_c) \text{ و } (1-0/67f_c)f_w] \\ = \min[(1-0/53) \text{ و } (1-0/67 \times 0/53) \times (0/3)] = 0/19$$

با فرض کافی بودن آبیاری برای افزایش رطوبت خاک لایه تبخیر به حد ظرفیت زراعی، $K_r=1$ بوده و فرآیند تبخیر در مرحله اول است. با استفاده از معادله ۷۱ داریم:

$$K_e = 1/0 \times (1/3 - 0/90) = 0/40$$

این مقدار با کران بالای $K_{cmax} = 0/19 \times (1/30) = 0/25$ مقایسه می‌شود. از آنجا که، ۰/۴ بیشتر از ۰/۲۵ است، پس قابل قبول نمی‌باشد و K_e از کسر خاک خیس شده تابع انرژی در دسترس بوده و مساوی با ۰/۲۵ است.

ضریب گیاهی کلی مزرعه پنبه تحت آبیاری قطره‌ای و بدون تنش آبی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_c = K_{cb} + K_e = 0/9 + 0/25 = 1/15$$

این مقدار از مقادیر ضریب گیاهی مزرعه پنبه تحت آبیاری بارانی و نهرچه‌ای (مثال‌های ۳۲ و ۳۳) کمتر می‌باشد.

محاسبه ضریب تبخیر روزانه

موازنه آب روزانه

برآورد ضریب تبخیر (K_e) نیازمند بررسی موازنه روزانه آب در لایه خاک سطحی است که در آن تبخیر یا تخلیه تجمعی از خاک خیس محاسبه شود. این رابطه در خاک سطحی به طور کامل خیس شده و در معرض هوا (f_{ew})، به صورت زیر نوشته می‌شود (شکل ۴۰):

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_i - RO_i) - \frac{I_i}{f_w} + \frac{E_i}{f_{ew}} + T_{ew,i} + DP_{e,i} \quad (۷۷)$$

که در آن:

$D_{e,i-1}$ = تبخیر تجمعی از کسر خاک خیس و در معرض هوا در پایان روز $i-1$ ام [میلی‌متر]،

$D_{e,i}$ = تبخیر تجمعی در پایان روز i ام [میلی‌متر]،

P_i = بارندگی در روز i ام [میلی‌متر]،

RO_i = رواناب ناشی از بارندگی در روز i ام [میلی‌متر]،

I_i = آب آبیاری نفوذ یافته در روز i ام [میلی‌متر]،

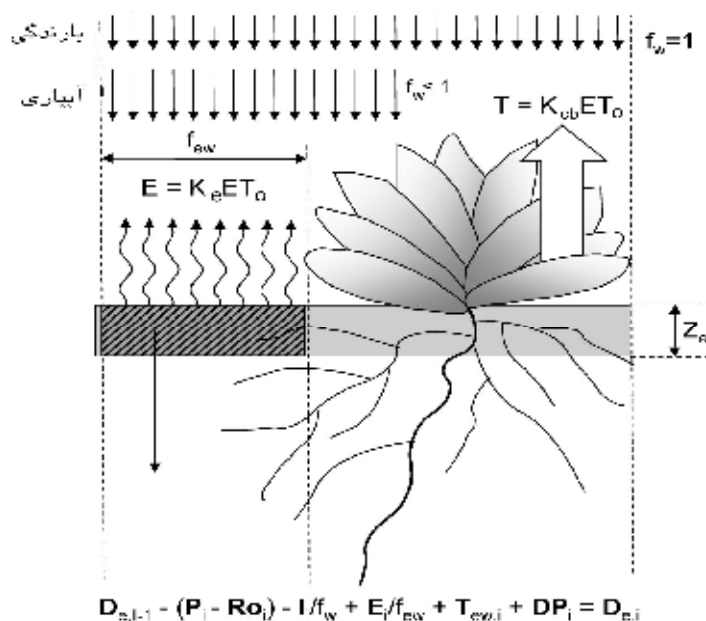
E_i = تبخیر در روز i ام (یعنی، $E_i = K_e \times ET_0$) [میلی‌متر]،

$T_{ew,i}$ = تعرق در خاک سطحی خیس و در معرض هوا در روز i ام [میلی‌متر]،

$DP_{e,i}$ = تلفات نفوذ عمقی در روز i ام، اگر رطوبت خاک بیشتر از حد ظرفیت زراعی باشد [میلی‌متر]،

f_w = کسر خاک خیس شده با آبیاری [۰/۰۱ تا ۱] و

f_{ew} = کسر خاک خیس در معرض هوا [۰/۰۱ تا ۱]، می‌باشد.



شکل ۴۰- موازنه آب در لایه خاک سطحی

محدود تفلیه آب خاک

با فرض اینکه رطوبت لایه خاک سطحی پس از بارندگی یا آبیاری سنگین در حد ظرفیت زراعی باشد، حداقل مقدار تخلیه آب به صورت تبخیر ($D_{e,i}$) صفر است. با خشک شدن سطح خاک در اثر کاهش رطوبت، $D_{e,i}$ افزایش می‌یابد و چنانچه خاک دوباره خیس نشود، به بیشترین مقدار خود یعنی TEW می‌رسد (معادله ۷۳). هنگامی که آبی برای تبخیر در لایه خاک سطحی باقی نباشد، ضریب کاهش تبخیر K_e صفر و مقدار تخلیه تجمعی تا خیس شدن این لایه در نوبت بعد، مساوی TEW تخلیه شده است. بنابراین، حدود تغییر $D_{e,i}$ به صورت زیر می‌باشد:

$$0 \leq D_{e,i} \leq TEW \quad (78)$$

مقدار تفلیه اولیه

در شروع دوره خشک شدن خاک، می‌توان فرض کرد که رطوبت در لایه خاک خیس بالایی پس از آبیاری یا باران سنگین به حد ظرفیت زراعی رسیده و $D_{e,i}=0$ است. اگر در شروع محاسبه‌ها، مدت زمان طولانی از آخرین نوبت خیس شدن خاک سپری شده باشد، می‌توان فرض کرد که تمامی آب قابل تبخیر از خاک سطحی تخلیه شده است (یعنی، $(D_{e,i-1} = TEW = 1000(\theta_{FC} - 0.5 \theta_{WP})Z_e$).

بارندگی و رواناب

P_i در معادله ۷۷، بارندگی روزانه است. به طور معمول، اگر بارندگی روزانه کمتر از ۰/۲ تبخیر - تعرق گیاه مرجع باشد، به طور کامل تبخیر شده و در محاسبه‌های K_e و موازنه آب می‌توان از آن، صرف‌نظر کرد. مقدار بارندگی تلف شده به صورت رواناب (RO_i) به شدت بارندگی، شیب زمین، نوع خاک، شرایط هیدرولیکی و مقدار رطوبت خاک در قبل از بارندگی، وضعیت بهره‌برداری از زمین و پوشش آن بستگی دارد. در حالت‌های کلی، RO_i را می‌توان صفر و یا درصدی از P_i فرض کرد. این فرض به ویژه در بررسی موازنه آب خاک سطحی معتبر است، زیرا بارندگی‌های که شدت یا عمق کافی برای ایجاد رواناب دارند، ابتدا مقدار رطوبت لایه خاک سطحی را تا حد ظرفیت زراعی افزایش می‌دهند. به طور معمول، مقدار رواناب بارندگی سبک صفر یا ناچیز خواهد بود و می‌توان از آن صرف‌نظر کرد.

آبیاری

عمق آبیاری I_i ، به طور معمول، میانگین عمق آبی است که در سطح کلی مزرعه آبیاری نفوذ می‌کند. بنابراین، کسر $\frac{I_i}{f_w}$ ، عمق آب آبیاری نفوذ یافته در کسر خاک خیس شده را نشان می‌دهد (شکل ۳۱).

تبخیر

فرض است که تبخیر از خاک زیرین پوشش گیاهی در K_{cb} گنجانده شده، و بنابراین به صورت مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود. تبخیر محاسبه شده، مربوط به لایه خاک خیس در معرض هوا می‌باشد. تبخیر E_i با

رابطه $(K_e \times ET_o)$ نشان داده شده است. عبارت $\frac{E_i}{f_{ew}}$ ، شدت تبخیر در کسر خاک خیس شده و در معرض هوا را نشان می‌دهد.

تعرق

مقدار تعرق (T_{ew})، در لایه خاک سطحی به جزء برای گیاهان با ریشه کم عمق (حداکثر کمتر از ۰/۵ تا ۰/۶ متر) ناچیز بوده و قابل اغماض است (یعنی $T_{ew}=0$). به علاوه، در گیاهان با کشت ردیفی، بخش عمده آب جذب شده توسط ریشه‌ها ممکن است از خاک لایه زیر پوشش گیاهی تأمین شود. بنابراین، تعرق در کسر سطح خاک خیس شده می‌تواند صفر فرض شود.

در محاسبه موازنه روزانه آب خاک سطحی، حتی برای گیاهان با ریشه کم عمق، به طور معمول، عامل تعرق چندان مؤثر نیست، زیرا در ۳ تا ۵ روز پس از خیس شدن خاک، تعرق گیاه بخش ناچیزی از شار جریان آب در عمق Z_e را تشکیل می‌دهد و قابل صرف‌نظر است (یعنی $T_{ew}=0$). هنگامی که بدلیل کاهش مقدار Z_e به عنوان مثال از ۰/۱۵ به ۰/۱۲ متر یا از ۰/۱۰ به ۰/۰۸ متر، مقدار T_{ew} صفر فرض می‌شود، پس اثر تعرق بر کاهش مقدار آب خاک لایه تبخیر کم اهمیت خواهد بود.

نفوذ عمقی

پس از یک بارندگی شدید یا آبیاری سنگین، مقدار آب لایه خاک سطحی (Z_e)، ممکن است، بیش از حد ظرفیت زراعی شود. هر چند در رابطه ۷۷ فرض است که مقدار آب خاک، بلافاصله پس از مرطوب شدن کامل، به حد ظرفیت زراعی افزایش یافته و مقدار تخلیه آب، $D_{e,i}$ در معادله ۷۷ صفر است. پس از بارندگی شدید یا آبیاری سنگین، نفوذ عمقی آب به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$DP_{e,i} = (P_i - RO_i) + \frac{I_i}{f_w} - D_{e,i-1} \geq 0 \quad (79)$$

تا زمانی که مقدار آب خاک لایه تبخیر کمتر از رطوبت ظرفیت زراعی است (یعنی، $D_{e,i} > 0$)، نفوذ عمقی صفر است ($DP_{e,i} = 0$).

مراحل محاسبه

در روش محاسبه ضریب گیاهی دو جزئی ($K_{cb} + K_e$)، به عنوان مثال، هنگامی که از یک صفحه گسترده استفاده شده، عوامل به ترتیب K_{cb} ، h ، $K_{c \max}$ ، f_{ew} ، f_w ، f_c ، K_e ، K_r ، E ، DP_e ، D_e ، I ، K_c و ET_c محاسبه شوند.

محاسبه تبخیر - تعرق گیاهان

مراحل محاسبه ET_c می‌تواند با رایانه و استفاده از صفحه گسترده (مثال ۳۵) یا زبان‌های برنامه‌نویسی، انجام شود. روش محاسبه شامل تعیین عوامل زیر است:

الف- تبخیر مرجع (ET_0)

بر آورد تبخیر مرجع: روش محاسبه در فصل چهارم ارائه شده است.

ب- طول مراحل رشد:

تعیین طول تعدیل شده مراحل چهار گانه رشد (اطلاعات کلی در جدول ۱۱ ارائه شده است):

— مرحله اولیه رشد: L_{ini}

— مرحله توسعه گیاه: L_{dev}

— مرحله میانی رشد: L_{mid}

— مرحله پایانی رشد: L_{late}

پ- ضریب گیاهی پایه (K_{cb}):

محاسبه ضرایب گیاهی پایه برای هر روز از دوره رشد، یعنی:

— انتخاب $K_{cb\ ini}$ ، $K_{cb\ mid}$ و $K_{cb\ end}$ را از جدول ۱۷،

— اصلاح $K_{cb\ mid}$ و $K_{cb\ end}$ برای شرایط اقلیم محل مورد نظر (معادله ۷۰)،

— تعیین مقادیر K_{cb} روزانه، یعنی:

- مرحله اولیه رشد: $K_{cb} = K_{cb\ ini}$
- مرحله توسعه گیاه: از $K_{cb\ ini}$ تا $K_{cb\ mid}$ (معادله ۶۶)
- مرحله میانی رشد: $K_{cb} = K_{cb\ mid}$
- مرحله پایانی رشد: از $K_{cb\ mid}$ تا $K_{cb\ end}$ (معادله ۶۶)

ج- ضریب تبخیر (K_e):

محاسبه بیشترین مقدار K_e ، یعنی محاسبه کران بالای $K_{e\ max}$ (معادله ۷۲) و تعیین عوامل زیر برای هر

روز از فصل رشد:

- کسر خاک زیرین پوشش گیاهی، f_c (جدول ۲۱ یا معادله ۷۶)،
- کسر خاک خیس شده با آبیاری یا بارندگی، f_w (جدول ۲۰)،
- کسر خاک دارای بیشترین مقدار تبخیر، f_{ew} (معادله ۷۵)،
- تخلیه تجمعی از لایه تبخیر، D_e ، که با موازنه روزانه آب لایه سطحی خاک (معادله ۷۷) تعیین می‌شود.
- ضریب کاهش تبخیر، K_r (معادله ۷۴)، و
- ضریب تبخیر از خاک، K_e (معادله ۷۱).

ج- تبخیر - تعرق گیاه (ET_c)

محاسبه ET_c از رابطه $ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_0$ (معادله ۶۹).

مثال ۳۵- برآورد تبخیر- تعرق گیاه با روش ضریب گیاهی دو جزئی

با اطلاعات زیر تبخیر - تعرق گیاه را برای ۱۰ روز متوالی برآورد کنید. فرض می شود که:

- بافت خاک لوم شنی، مقدار رطوبت خاک در حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی به ترتیب ۰/۳ و ۰/۱ مترمکعب آب در هر متر مکعب خاک است.

- عمق لایه خاک سطحی (Z_e)، ۰/۱ متر است.

- در طول دوره مورد نظر، ارتفاع گیاه $h = 0.3$ متر و میانگین سرعت باد $u_2 = 1/6$ متر بر ثانیه و حداقل رطوبت نسبی هوا $RH_{min} = 35$ درصد است.

- مقدار K_{cb} در اولین روز $0/3$ است و تا دهمین روز، به $0/4$ افزایش می یابد.

- کسر سطح خاک در معرض هوا ($1-f_c$)، از ۰/۹۲ در اولین روز به ۰/۸۶ در دهمین روز کاهش می‌یابد.

- کل، آب قابل، تاخیر در شروع محاسبه‌ها تخلیه شده است ($D_{e,i-1} = TEW$).

- آبیاری ($I = 40$ میلی متر)، در ابتدای اولین روز انجام شده و کسر خاک خیس شده با آبیاری (f_{ew}) با 0.8 است.

- در ابتدای ششمین روز، یک نوبت بارندگی به عمق ۶ میلی متر واقع شده است.

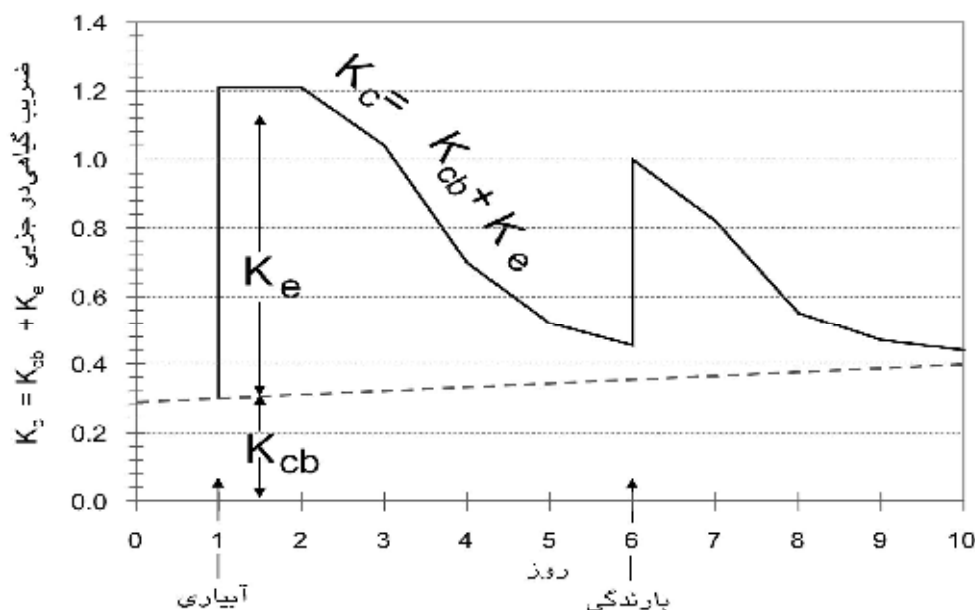
از جدول ۱۹: $REW \approx 8$ میلی متر

از معادله ۷۳: $TEW = 1.0 \times [0.23 - 0.5 \times (0.10)] \times 0.1 = 1.8$ میلی متر

از معادله ۷۲:

$$K_{c\max} = 1/2 + [\cdot / \cdot \cdot \cdot \times (1/6 - 2) - \cdot / \cdot \cdot \cdot \times (35 - 45)] \times \left(\frac{\cdot / 3}{3} \right)^{\cdot / 3}$$

در شروع محاسبه‌ها، کل آب قابل تبخیر تخلیه شده و $De_{i-1} = TEW = 18$ میلی متر است.



ادامه مثال ۳۵-

(۹) $D_{e,i}$ Start	(۸) K_{cb}	(۷) f_{ew}	(۶) f_w	(۵) $1-f_c$	(۴) $\frac{I}{f_w}$	(۳) P-RO	(۲) ET_0	(۱) روز
میلی متر					میلی متر	میلی متر	میلی متر بر روز	
-	-	-	-	-	-	-	-	Start
۰	۰/۳۰	۰/۸۰	۰/۸	۰/۹۲	۵۰	۰	۴/۵	۱
۵	۰/۳۱	۰/۸۰	۰/۸	۰/۹۱	۰	۰	۵/۰	۲
۱۱	۰/۳۲	۰/۸۰	۰/۸	۰/۹۱	۰	۰	۳/۹	۳
۱۴	۰/۳۳	۰/۸۰	۰/۸	۰/۹۰	۰	۰	۴/۲	۴
۱۶	۰/۳۴	۰/۸۰	۰/۸	۰/۸۹	۰	۰	۴/۸	۵
۱۱	۰/۳۶	۰/۸۹	۱	۰/۸۹	۰	۰	۲/۷	۶
۱۳	۰/۳۷	۰/۸۸	۱	۰/۸۸	۰	۰	۵/۸	۷
۱۶	۰/۳۸	۰/۸۷	۱	۰/۸۷	۰	۰	۵/۱	۸
۱۷	۰/۳۹	۰/۸۷	۱	۰/۸۷	۰	۰	۴/۷	۹
۱۸	۰/۴۰	۰/۸۶	۱	۰/۸۶	۰	۰	۵/۲	۱۰
(۱۷) ET_c		(۱۶) K_c	(۱۵) E	(۱۴) $D_{e,i \text{ end}}$	(۱۳) DP_e	(۱۲) $\frac{E}{f_{ew}}$	(۱۱) K_e	(۱۰) K_r
میلی متر بر روز			میلی متر بر روز	میلی متر	میلی متر	میلی متر		
-	-	-	-	۱۸	-	-	-	-
۵/۵		۱/۲۱	۴/۱	۵	۳۲	۵/۱	۰/۹۱	۱/۰۰
۶/۱		۱/۲۱	۴/۵	۱۱	۰	۵/۶	۰/۹۰	۱/۰۰
۴/۰		۱/۰۴	۲/۸	۱۴	۰	۳/۰	۰/۶۲	۰/۷۰
۲/۹		۰/۷۰	۱/۵	۱۶	۰	۱/۸	۰/۳۵	۰/۴۰
۲/۵		۰/۵۲	۰/۸	۱۷	۰	۱/۱	۰/۱۸	۰/۲۰
۲/۷		۱/۰۰	۱/۷	۱۳	۰	۲/۰	۰/۶۴	۰/۷۵
۴/۷		۰/۸۲	۲/۶	۱۶	۰	۳/۰	۰/۴۵	۰/۵۳
۲/۸		۰/۵۵	۰/۹	۱۷	۰	۱/۰	۰/۱۷	۰/۲۰
۲/۲		۰/۴۷	۰/۴	۱۸	۰	۰/۴	۰/۰۸	۰/۰۹
۲/۳		۰/۴۴	۰/۲	۱۸	۰	۰/۲	۰/۰۴	۰/۰۵

ادامه مثال ۳۵-

(۱) شماره روز

(۲) تبخیر - تعرق گیاه مرجع داده شده است.

تذکر: تبخیر - تعرق گیاه مرجع که در طرح آبیاری برآورد شده است، سپس، بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده، محاسبه می‌شود.

(۳) مقادیر (P-RO) در پایان هر روز معلوم بوده و ارقام روزآمد می‌شوند.

(۴) عمق خالص آب آبیاری در کسر خاک خیس شده.

(۵) مقدار $(1-f_c)$ داده شده است (میان‌یابی بین 0.92 متر در اولین روز و 0.86 متر در دهمین روز).(۶) اگر بارندگی قابل ملاحظه باشد؛ $f_{w,i}=1$ (جدول ۲۰)اگر آبیاری انجام شود؛ $f_{w,i}=0.8$ (که معلوم است) وبرای سایر شرایط؛ $f_{w,i}=f_{w,i-1}$

(۷) معادله ۷۵. کسری سطح خاک دارای بیشترین تبخیر.

(۸) K_{cb} داده شده است (میان‌یابی بین 0.3 در اولین روز و 0.4 در دهمین روز)(۹) $D_{e,i \text{ start}}$ (تخلیه در ابتدای هر روز)

اگر بارندگی و آبیاری در اوایل روز واقع شوند، وضعیت تخلیه آب از لایه خاک سطحی (در ابتدای هر روز) باید روزآمد شود:

$$D_{e,i \text{ start}} = \text{Max} \left(D_{e,i-1} - \frac{1}{f_{wi}} \frac{n_{wi}}{f_{wi}} (P - RO)_i, \text{ or } 0 \right)$$

که $D_{e,i-1}$ از ستون ۱۴ روز قبل بدست می‌آید.اگر بارندگی و آبیاری در اواخر روز واقع شوند، ستون ۶ باید مساوی با $D_{e,i}$ فرض شود (ستون ۱۴ روز قبل).(۱۰) اگر $D_{e,i} \leq REW$ باشد؛ $K_r=1$ و اگر $D_{e,i} > REW$ باشد؛ K_r از معادله ۷۴ محاسبه می‌شود.

(۱۱) معادله ۷۱ که در آن:

$$K_e = K_r (K_{c \text{ max}} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c \text{ max}} \cdot (\text{eg., } K_e = \min(K_r (K_{c \text{ max}} - K_{cb}), f_{ew} K_{c \text{ max}}))$$

(۱۲) میزان تبخیر از کسر سطح خاک خیس و در معرض هوا که از رابطه $\frac{(K_e \cdot ET_0)}{f_{ew}}$ محاسبه می‌شود.(۱۳) معادله ۷۹ که در آن $DP_e \geq 0$. DP_e نفوذ عمقی آب از لایه تبخیراست).(۱۴) $D_{e,i}$ (تخلیه در پایان روز) از معادله ۷۷ که در آن مقدار $D_{e,i-1}$ ستون ۱۴ روز قبل است.(۱۵) میانگین تبخیر از کل سطح مزرعه و مساوی با $(K_e \times ET_0)$.

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (16)$$

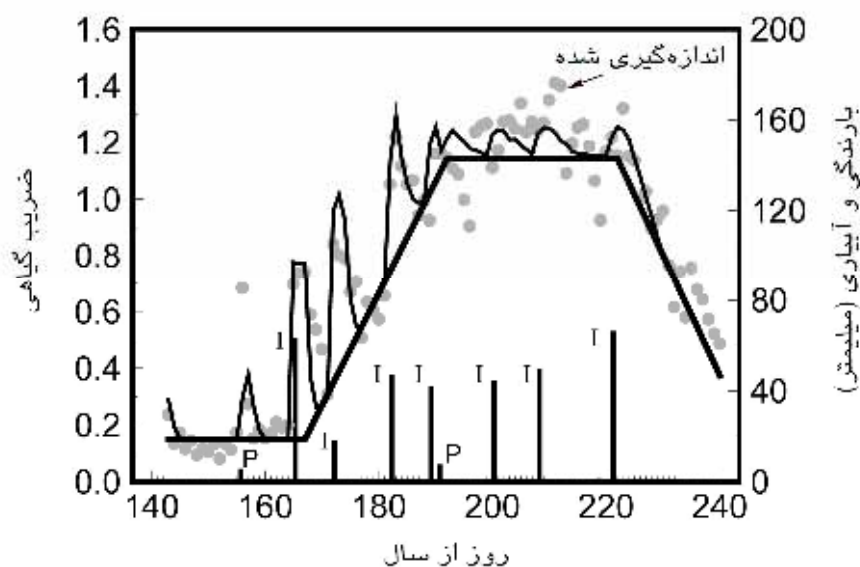
(۱۷) معادله ۶۹.

کادر ۱۶- محاسبه ضریب گیاهی لویا (دانه‌ای) به روش دو جزئی (مطالعه موردی در کیمبرلی-آیداهو، ایالات متحده آمریکا)

نتایج استفاده از روش ضریب گیاهی دو جزئی ($K_{cb}+K_e$) برای محصول لویا (دانه‌ای) در شکل پایین ارائه شده است. این مثال از همان داده‌های کادر ۱۵ استفاده می‌کند. داده‌های تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد با استفاده از یک لیسیمتر دقیق نصب شده در کیمبرلی-آیداهو (ایالات متحده آمریکا)، اندازه‌گیری شد. مقادیر $K_{cb\ ini}$ ، $K_{cb\ mid}$ و $K_{cb\ end}$ محاسبه شده در مثال ۲۹ به ترتیب ۰/۱۵، ۱/۱۴ و ۰/۲۵ و طول مراحل رشد به ترتیب ۲۵، ۳۰ و ۲۰ روز بود. شکل ۳۷ بر پایه مقادیر K_{cb} رسم شد. در کیمبرلی، میانگین $K_{c\ max}$ در مرحله میانی رشد گیاه از معادله ۷۲ برای شرایط میانگین روزانه $RH_{min}=30$ درصد و $u_2=2/2$ متر بر ثانیه، محاسبه شد. بافت خاک لوم سیلت بود. با فرض اینکه عمق لایه خاک سطحی در معرض تبخیر (Z_e)، حدود ۰/۱ متر بود، بر پایه معادله ۷۳ و استفاده از داده‌های جدول ۱۹، مقادیر TEW و REW به ترتیب ۲۲ و ۹ میلی‌متر محاسبه شد.

زمان و عمق خیس شدن سطح خاک در شکل پایین نشان داده شده است. به طور تقریبی، تمام نوبت‌های خیس شدن سطح خاک با آبیاری بود. مقدار f_w با توجه به روش آبیاری نه‌رچه‌ای یک در میان، ۰/۵ فرض و آبیاری در نیمه روز یا اوایل بعد از ظهر انجام شد.

همخوانی مقادیر $K_{cb}+K_e$ روزانه (خط نازک ممتد) برآورد و اندازه‌گیری شده (نقطه‌ها) به طور نسبی، خوب بود. همان طور که انتظار می‌رفت، مقدار $K_{cb}+K_e$ اندازه‌گیری و برآورد شده پس از آبیاری یا بارندگی بالا بود. دو نقطه اوج تبخیر از سطح خاک خیس در انتهای مرحله اولیه رشد و ابتدای مرحله توسعه گیاه (بین روزهای ۱۶۰ و ۱۸۰) که مشاهده می‌شود از $K_{c\ max}$ کوچک‌تر بود. این تبخیر حاصل خیس شدن سطح خاک با آبیاری نه‌رچه‌ای ($f_w=0/5$) است. مقدار f_{ew} در طول دوره بین این دو نقطه اوج همان مقدار f_w معادله ۷۵ است، زیرا در این دوره، $f_w < 1-f_c$ بود. بنابراین، نتیجه می‌شود که تمامی «انرژی پتانسیل» در دسترس صرف تبخیر نشده است زیرا، حداکثر تبخیر در واحد سطح نمی‌تواند بیشتر از مقدار محاسبه شده با معادله ۷۱ گردد.



ضرایب ($K_{cb}+K_e$) روزانه اندازه‌گیری شده (نقاط کم رنگ) و برآورد شده (خط نازک) و منحنی ضریب گیاهی پایه (خط پر رنگ) برای لویا (دانه‌ای) در کیمبرلی-آیداهو.

P و I به ترتیب بارندگی و آبیاری را نشان می‌دهند (داده‌ها از رایت، ۱۹۹۰).

بخش پ

تبخیر- تعرق گیاهان تحت شرایط غیر استاندارد

شرایط واقعی در مزارع تحت مدیریت زراعی مطلوب، به طور معمول، همان شرایط استاندارد است، تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد به روش ارائه شده در بخش ب، محاسبه می‌شود. هنگامی که شرایط مزرعه با استاندارد متفاوت است، اصلاح تبخیر - تعرق گیاه ضرورت دارد. حاصلخیزی پایین خاک، سمیت نمک‌های محلول، شرایط ماندابی، وجود سخت لایه غیرقابل نفوذ در محدوده توسعه ریشه گیاهان، آفت‌ها و بیماری‌های گیاهی می‌تواند موجب محدودیت رشد و کاهش تبخیر - تعرق گیاهان شود. کمبود آب و شوری خاک، جذب آب را کاهش داده و تبخیر - تعرق گیاهان را محدود می‌کند. تبخیر - تعرق محصولات کم وسعت، مزارع تحت کشت دو گیاه متفاوت در یک زمان (کشت مخلوط) و یا مزارع تحت پوشش مالچ با هدف کاهش تبخیر، ممکن است، متفاوت از تبخیر - تعرق استاندارد باشد. در این بخش، تأثیر شرایط محیطی و مدیریتی متفاوت با استاندارد بیان می‌شود. اثرات محیطی با معرفی ضرایب تنش و نیز، اصلاح ضریب گیاهی (K_c) برای شرایط واقعی مزرعه تشریح می‌شوند.

فصل هشتم

تبخیر - تعرق گیاهان تحت تنش آبی

نیروهای وارده بر آب خاک، انرژی پتانسیل آب و در نتیجه قابلیت جذب آن توسط ریشه گیاه را کاهش می‌دهند. در خاک مرطوب، انرژی پتانسیل آب بیشتر و حرکت آن، به طور نسبی، آزادانه‌تر است و بنابراین، با سهولت بیشتر جذب ریشه می‌شود. در خاک خشک، آب دارای انرژی پتانسیل کمتری است و تحت نیروهای جذب سطحی و مویینه‌ای به ذرات خاک چسبیده و به سختی جذب گیاه می‌شود. با کاهش انرژی پتانسیل آب خاک به پایین‌تر از مقدار آستانه^۱، گیاه تحت تنش آبی واقع می‌شود. اثر تنش آبی بر تبخیر - تعرق با ضرب کردن ضریب تنش آبی (K_s) در ضریب گیاهی پایه (K_{cb}) به صورت زیر نشان داده شده است:

$$ET_{c \text{ adj}} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o \quad (80)$$

ضریب K_s کوچکتر از ۱ بیانگر تنش آبی و در شرایط بدون تنش آبی، این ضریب ۱ می‌باشد. ضریب K_s که اثر تنش آبی بر تعرق گیاه را توصیف می‌کند. در روش ضریب گیاهی یک جزیی، همراه K_c آورده می‌شود:

$$ET_{c \text{ adj}} = K_s K_c ET_o \quad (81)$$

ضریب تنش آبی تنها بر تعرق گیاه تأثیر داشته، بنابراین کاربرد K_s با بکارگیری معادله ۸۰ بیشتر از معادله ۸۱ معتبر است. در شرایطی که تبخیر از خاک جزء قابل ملاحظه‌ای از تبخیر - تعرق گیاه را تشکیل ندهد، نتایج معادله ۸۱ نیز، قابل قبول است.

قابلیت استفاده آب خاک

کل آب قابل استفاده^۲

آب قابل استفاده خاک به ظرفیت نگهداری خاک برای تامین آب مورد نیاز گیاهان اشاره دارد. پس از یک آبیاری یا بارندگی سنگین، آب مازاد بر ظرفیت زراعی^۳ خاک به صورت نفوذ عمقی زهکشی می‌شود. ظرفیت زراعی، مقدار آب باقیمانده در یک خاک دارای زهکشی مناسب است که دیگر، تحت نیروی جاذبه از

1- Threshold value

2- Total Available Water (TAW)

3- Field Capacity(FC)

خاک خارج نمی‌شود یا مقدار آب باقیمانده در خاک در هنگام کاهش قابل ملاحظه جریان زهکشی عمقی است. اگر آبیاری یا بارندگی مجدد واقع نشود، مقدار آب خاک محدوده (عمق) توسعه ریشه با جذب توسط گیاه کاهش می‌یابد و آب باقیمانده با نیروی بیشتر جذب ذرات خاک می‌گردد. کاهش انرژی پتانسیل جذب آب را مشکل‌تر می‌کند و سرانجام، جذب متوقف می‌شود. نقطه پژمردگی^۱، مقدار آب خاک غیر قابل جذب گیاه است و در این رطوبت، گیاه به طور دائم پژمرده می‌شود. آب کاربردی بیشتر از ظرفیت زراعی خاک تحت نیروی جاذبه به زیر محدوده توسعه ریشه نفوذ می‌کند و آب کمتر از نقطه پژمردگی نیز قابل جذب ریشه گیاه نمی‌باشد بنابراین، کل آب قابل استفاده خاک در محدوده توسعه ریشه گیاه مساوی با تفاضل مقدار آب خاک در دو حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی است و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TAW=1000(\theta_{FC}-\theta_{WP})Z_r \quad (۸۲)$$

که در آن:

TAW = کل آب قابل استفاده خاک عمق توسعه ریشه گیاه [میلی‌متر]

θ_{FC} = مقدار آب خاک در ظرفیت زراعی [مترمکعب بر مترمکعب]

θ_{WP} = مقدار آب خاک در نقطه پژمردگی [مترمکعب بر مترمکعب]

Z_r = عمق (محدوده) توسعه ریشه گیاه [متر] می‌باشند.

کل آب قابل استفاده، که گیاه می‌تواند از خاک جذب کند به بافت خاک و عمق توسعه ریشه بستگی دارد. مقادیر معمول ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی برای انواع بافت خاک در جدول ۱۹ و بیشترین عمق مؤثر توسعه ریشه برای گیاهان مختلف در جدول ۲۲ ارائه شده است.

آب سهل‌الوصول^۲

هر چند، به لحاظ نظری، آب تا نقطه پژمردگی قابل استفاده گیاه می‌باشد، اما جذب آن پیش از این نقطه تا حد بسیار کاهش می‌یابد. هنگامی که رطوبت خاک کافی است، آب مورد نیاز تبخیر - تعرق به سرعت تأمین می‌شود. در این حالت، مقدار جذب آب مساوی با تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد است. با کاهش مقدار آب و خشک‌تر شدن خاک، آب با نیروی بیشتر جذب ذرات شده و جذب آن توسط ریشه گیاه دشوارتر می‌شود. در حالتی که آب خاک کمتر از مقدار آستانه تنش آبی شود، سرعت جریان به سمت ریشه گیاه برای تأمین آب مورد نیاز تعرق کافی نیست و شرایط تنش آبی ایجاد می‌شود. کسری از کل آب قابل استفاده خاک که بدون ایجاد تنش آبی قابل جذب گیاه است، آب سهل‌الوصول خاک (RAW) نامیده

1- Wilting Point (WP)

2- Readily Available Water (RAW)

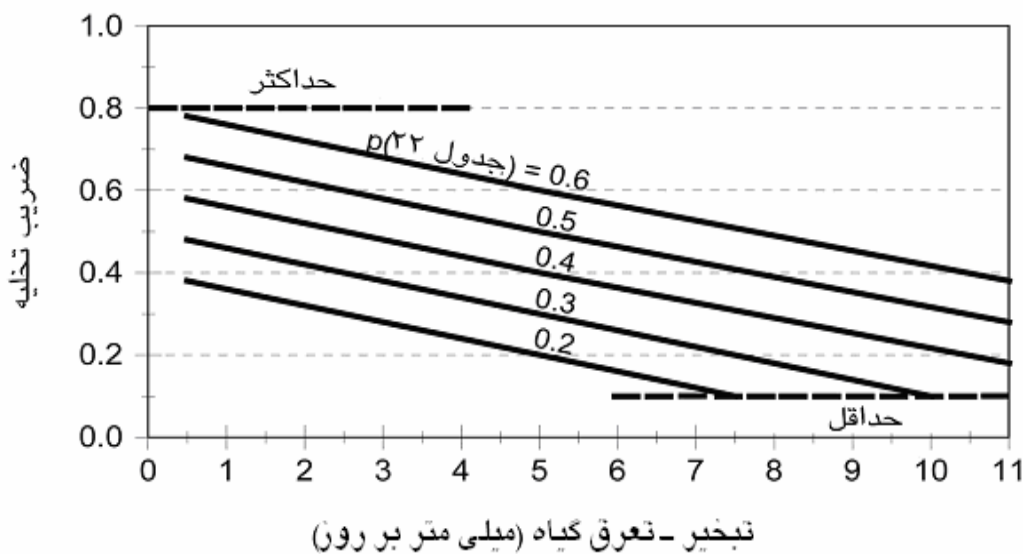
می‌شود. آب سهل‌الوصول خاک به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$RAW = p \text{ TAW} \quad (۸۳)$$

که:

RAW = آب سهل‌الوصول خاک در عمق توسعه ریشه گیاه [میلی‌متر]،
 p = میانگین کسری از کل آب قابل استفاده که قبل از ایجاد تنش آبی (کاهش تبخیر - تعرق) از عمق توسعه ریشه گیاه قابل تخلیه بوده و مقدار آن بین صفر و ۱ متغیر است.
 ضریب p (یا ضریب تخلیه) برای انواع گیاهان، متفاوت است (جدول ۲۲). این ضریب، به طور معمول، از ۰/۳ برای گیاهان با ریشه کم عمق و تبخیر - تعرق بالا (بیشتر از ۸ میلی‌متر بر روز)، تا ۰/۷ برای گیاهان با ریشه عمیق و تبخیر - تعرق پایین (کمتر از ۳ میلی‌متر بر روز) متغیر می‌باشد. استفاده از مقدار $p=0.5$ ، برای بسیاری از محصولات عمومیت دارد.

ضریب p تابع توان تبخیرکنندگی آتمسفر است. در جدول ۲۲، مقادیر p به تبخیر - تعرق بستگی دارد. در اقلیم خشک و گرم که شدت تبخیر - تعرق گیاه بالا است، p بین ۱۰ تا ۲۵ درصد کمتر از ارقام جدول ۲۲ می‌باشد و تنش آبی، علیرغم مرطوب بودن خاک، مشاهده می‌شود. هنگامی که تبخیر - تعرق گیاه پایین بوده، p حدود ۲۰ درصد بیشتر از مقادیر جدول ۲۲ است. اغلب، برای یک مدت مشخص از دوره رشد، از میانگین به جای p روزانه استفاده می‌شود. برای اصلاح p رابطه تقریبی $p = p_{Table\ 22} + 0.04(5 - ET_c)$ بر حسب تبخیر - تعرق گیاه ارائه شده که در آن، p اصلاح شده بین ۰/۱ تا ۰/۸ و تبخیر - تعرق بر حسب میلی‌متر بر روز است. اثر اصلاح p در شکل ۴۱ نشان داده شده است.



شکل ۴۱- ضریب تخلیه آب برای سطوح مختلف تبخیر - تعرق

جدول ۲۲- حداکثر عمق مؤثر توسعه ریشه (Z_r) و ضریب تخلیه آب خاک (p) برای محصولات متداول تحت شرایط بدون تنش آبی

گیاه	Z_r (متر)	p (تبخیر - تعرق ۵ میلی متر بر روز)
الف- سبزیجات ریز		
کلم بروکلی	۰/۴-۰/۶	۰/۴۵
کلم بروکسل	۰/۴-۰/۶	۰/۴۵
کلم	۰/۵-۰/۸	۰/۴۵
هویج	۰/۵-۱/۰	۰/۳۵
گل کلم	۰/۴-۰/۷	۰/۴۵
کرفس	۰/۳-۰/۵	۰/۲۰
سیر	۰/۳-۰/۵	۰/۳۰
کاهو	۰/۳-۰/۵	۰/۳۰
پیاز		
- خشک	۰/۳-۰/۶	۰/۳۰
- تازه	۰/۳-۰/۶	۰/۳۰
- بذری	۰/۳-۰/۶	۰/۳۵
اسفناج	۰/۳-۰/۵	۰/۲۰
تربیچه	۰/۳-۰/۵	۰/۳۰
ب- سبزیجات، خانواده بادمجانیان (Solanaceae)		
بادمجان	۰/۷-۱/۲	۰/۴۵
فلفل شیرین (دلمه‌ای)	۰/۵-۱/۰	۰/۳۰
گوجه‌فرنگی	۰/۷-۱/۵	۰/۴۰
پ- سبزیجات، خانواده فیار (Cucurbitaceae)		
گرمک - طالبی	۰/۹-۱/۵	۰/۴۵
خیار - تازه خوری	۰/۷-۱/۲	۰/۵۰
- برداشت مکانیزه	۰/۷-۱/۲	۰/۵۰

۱- مقادیر بزرگتر (Z_r) برای خاک با لایه‌بندی یکنواخت و بدون محدودیت برای توسعه عمق ریشه گیاه ارائه شده است. در برنامه‌ریزی آبیاری از مقادیر کوچک‌تر Z_r و در مدل‌سازی تنش آبی خاک یا شرایط دیم از مقادیر بزرگتر آن استفاده می‌شود.

۲- مقادیر p برای تبخیر - تعرق ۵ میلی متر بر روز ارائه شده است و برای تبخیر - تعرق متفاوت با آن، p به صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$p = p_{Table22} + 0.04(5 - ET_c)$$

در این رابطه، p بین صفر تا ۱ و ET_c برحسب میلی متر بر روز می‌باشد.

ادامه جدول ۲۲

گیاه	Z _r (متر)	p (تبخیر - تعرق ۵ میلی متر بر روز)
کدو تنبل، کدو زمستانه	۱/۰-۱/۵	۰/۳۵
کدو سبز، کدو زوکینی	۰/۶-۱/۰	۰/۵۰
خریزه	۰/۸-۱/۵	۰/۴۰
هندوانه	۰/۸-۱/۵	۰/۴۰
ت- محصولات ریشه‌ای و غده‌ای		
چغندر سالادی (لبو)	۱/۰-۰/۶	۰/۵۰
کاساوا - یک ساله	۰/۵-۰/۸	۰/۳۵
- دو ساله	۱/۰-۰/۷	۰/۴۰
ترب	۰/۵-۰/۶	۰/۴۰
سیب زمینی	۰/۴-۰/۶	۰/۳۵
سیب زمینی شیرین	۱/۰-۱/۵	۰/۶۵
شلغم (و شلغم زرد)	۰/۵-۱/۰	۰/۵۰
چغندر قند	۰/۷-۱/۰	۰/۵۵ ^۳
ث- بقولات (Leguminosae)		
لوبیا سبز	۰/۵-۰/۷	۰/۴۵
لوبیا خشک	۰/۶-۰/۹	۰/۴۵
نخود	۰/۶-۱/۰	۰/۵۰
باقلا		
- تازه	۰/۵-۰/۷	۰/۴۵
- خشک یا بذری	۰/۵-۰/۷	۰/۴۵
گراپنزو	۰/۶-۱/۰	۰/۴۵
لوبیا چشم بلبلی	۰/۶-۱/۰	۰/۴۵
بادام زمینی	۰/۵-۱/۰	۰/۵۰
عدس	۰/۶-۰/۸	۰/۵۰
نخودفرنگی - تازه	۰/۶-۱/۰	۰/۳۵
- خشک یا بذری	۰/۶-۱/۰	۰/۴۰
سویا	۰/۶-۱/۳	۰/۵۰
ج- سبزیجات چند ساله (با دوره خواب زمستانه و خاک بدون پوشش یا دارای مالچ)		
آرتیشو	۰/۶-۰/۹	۰/۴۵
مارچوبه	۱/۲-۱/۸	۰/۴۵
نعناع	۰/۴-۰/۸	۰/۴۰

۳- در اقلیم‌های خشک، در اواخر بعد از ظهر، چغندر قند (حتی در شرایطی که p کوچک‌تر از ۰/۵۵ باشد)، اغلب به طور موقت پژمرده می‌شود که به طور معمول، اثر قابل ملاحظه بر عملکرد محصول شکر ندارد.

ادامه جدول ۲۲

گیاه	Z_r (متر)	p (تبخیر - تعرق ۵ میلی متر بر روز)
توت فرنگی	۰/۲-۰/۳	۰/۲۰
ح- گیاهان فیبری		
پنبه	۱/۰-۱/۷	۰/۶۵
کتان	۱/۰-۱/۵	۰/۵۰
کنف	۰/۵-۱/۰	۰/۸۰
ح- گیاهان روغنی		
کرچک	۱/۰-۲/۰	۰/۵۰
کلزا	۱/۰-۱/۵	۰/۶۰
گلرنگ	۱/۰-۲/۰	۰/۶۰
کنجد	۱/۰-۱/۵	۰/۶۰
آفتابگردان	۰/۸-۱/۵	۰/۴۵
غ- غلات		
جو	۱/۰-۱/۵	۰/۵۵
جو دوسر - یولاف	۱/۰-۱/۵	۰/۵۵
گندم بهاره	۱/۰-۱/۵	۰/۵۵
گندم زمستانه	۱/۵-۱/۸	۰/۵۵
ذرت دانه‌ای	۰/۷-۱/۷	۰/۵۵
ذرت شیرین	۰/۸-۱/۲	۰/۵۰
ارزن	۱/۰-۲/۰	۰/۵۵
سرگوم (ذرت خوشه‌ای) - دانه‌ای	۱/۰-۲/۰	۰/۵۰
- علوفه	۱/۰-۲/۰	۰/۵۵
برنج	۰/۵-۱/۰	۰/۲۰ ^۴
د- گیاهان علوفه‌ای		
یونجه - علوفه‌ای	۱/۰-۲/۰	۰/۵۵
- بذری	۱/۰-۳/۰	۰/۶۰
برموداگراس - علوفه	۱/۰-۱/۵	۰/۵۵
- کشت بهاره (بذری)	۱/۰-۱/۵	۰/۶۰
شبدر برسیم	۰/۶-۰/۹	۰/۵۰
چاودار علوفه‌ای	۰/۶-۱/۰	۰/۶۰
سودان گراس - سالانه	۱/۰-۱/۵	۰/۵۵
مرتع - چرای متناوب	۰/۵-۱/۵	۰/۶۰
- چرای مفرط	۰/۵-۱/۵	۰/۶۰
چمن - فصل سرد ^۵	۰/۵-۱/۰	۰/۴۰
- فصل گرم ^۵	۰/۵-۱/۰	۰/۵

۴- مقدار p برای برنج ۰/۲۰ رطوبت اشیاع خاک می‌باشد.

۵- گونه‌های چمن برای فصل سرد شامل bluegrass، ryegrass و fescue و برای فصل گرم شامل bermuda grass، buffalo grass و St. Augustine grass می‌باشد. چمن‌ها دارای عمق ریشه متفاوت می‌باشند. ریشه برخی از گونه‌ها عمیق (بیشتر از ۱/۲ متر) و ریشه برخی کم عمق است. عمیق بودن ریشه چمن شرایطی را نشان می‌دهد که در آن مدیریت آبیاری دقیق و p کوچک (یعنی فاصله آبیاری کوتاه) بوده است.

ادامہ جدول ۲۲

گیاه	Z _r (متر)	p (تبخیر - تعرق ۵ میلی متر بر روز)
نیشکر	۱/۲-۲/۰	۰/۶۵
ذ- میوه‌ها و درختان گرمسیری		
موز - یک ساله	۰/۵-۰/۹	۰/۳۵
- دو ساله	۰/۵-۰/۹	۰/۳۵
کاکائو	۰/۷-۱/۰	۰/۳۰
قهوه	۰/۹-۱/۵	۰/۴۰
نخل	۲/۵-۱/۵	۰/۵۰
درختان خرما	۰/۷-۱/۱	۰/۶۵
آناناس	۰/۳-۰/۶	۰/۵۰
درختان کائوچو	۱/۰-۱/۵	۰/۴۰
چای - بدون سایه‌اندازی	۰/۹-۱/۵	۰/۴۰
- با سایه‌اندازی	۰/۹-۱/۵	۰/۴۵
ر- انگور و توت		
توت‌ها	۰/۶-۱/۲	۰/۵۰
انگور - تازه	۱/۰-۲/۰	۰/۳۵
- کشمش	۱/۰-۲/۰	۰/۴۵
رازک	۱/۰-۱/۲	۰/۵۰
ز- درختان میوه		
بادام	۱/۰-۲/۰	۰/۴۰
سیب، گیلان و گلابی	۱/۰-۲/۰	۰/۵۰
هلو، زردآلو و میوه‌های هسته‌دار	۱/۰-۲/۰	۰/۵۰
آووکادو	۰/۵-۱/۰	۰/۷۰
مرکبات		
- با پوشش گیاهی ۷۰ درصد	۱/۲-۱/۵	۰/۵۰
- با پوشش گیاهی ۵۰ درصد	۱/۱-۱/۵	۰/۵۰
- با پوشش گیاهی ۲۰ درصد	۰/۸-۱/۲	۰/۵۰
درختان مخروط‌دار	۱/۰-۱/۵	۰/۷۰
کیوی	۰/۷-۱/۳	۰/۳۵
زیتون (با پوشش گیاهی ۴۰ تا ۶۰ درصد)	۱/۲-۱/۷	۰/۶۵
پسته	۱/۰-۱/۵	۰/۴۰
باغ گردو	۱/۷-۲/۴	۰/۵۰

مثال ۳۶- تعیین مقدار آب سهل الوصول خاک برای بافت و گیاهان مختلف						
آب سهل الوصول خاک را برای پیاز، گوجه‌فرنگی و ذرت دارای رشد کامل برآورد کنید. فرض شود که این گیاهان به ترتیب در خاک با بافت شن لومی، سیلت و رس سیلتی کشت شده‌اند.						
از جدول ۲۳:		برای پیاز: $p = 0/30$ $Z_r \approx 0/4$ متر برای گوجه‌فرنگی: $p = 0/40$ $Z_r \approx 0/8$ متر برای ذرت: $p = 0/55$ $Z_r \approx 1/2$ متر				
از جدول ۱۹:		برای خاک شن لومی: $\theta_{FC} = 0/15$ و $\theta_{WP} = 0/06$ بر حسب مترمکعب بر مترمکعب، پس: میلی‌متر آب بر متر عمق خاک $TAW = 1000 \times (\theta_{FC} - \theta_{WP}) = 90$ برای خاک سیلت: $\theta_{FC} = 0/32$ و $\theta_{WP} = 0/15$ بر حسب مترمکعب بر مترمکعب، پس: میلی‌متر آب بر متر عمق خاک $TAW = 1000 \times (\theta_{FC} - \theta_{WP}) = 170$ برای خاک رس سیلتی: $\theta_{FC} = 0/35$ و $\theta_{WP} = 0/23$ بر حسب مترمکعب بر مترمکعب، پس: میلی‌متر آب بر متر عمق خاک $TAW = 1000 \times (\theta_{FC} - \theta_{WP}) = 120$				
گیاه	شن لومی		سیلت		رس سیلتی	
	RAW (معادله ۸۳) میلی‌متر	TAW (معادله ۸۲) میلی‌متر	RAW (معادله ۸۳) میلی‌متر	TAW (معادله ۸۲) میلی‌متر	RAW (معادله ۸۳) میلی‌متر	TAW (معادله ۸۲) میلی‌متر
پیاز	۱۱	۳۶	۲۰	۶۸	۱۴	۴۸
گوجه‌فرنگی	۲۹	۷۲	۵۴	۱۳۶	۳۸	۹۶
ذرت	۵۹	۱۰۸	۱۱۲	۲۰۴	۷۹	۱۴۴

تحمل تنش آبی توسط گیاهان تنها، تابع مقدار آب قابل استفاده خاک نمی‌باشد، زیرا میزان جذب آب توسط ریشه گیاه به انرژی پتانسیل آب خاک (پتانسیل ماتریک خاک و هدایت آبی مرتبط با آن) و نه مقدار آب خاک وابسته است. از آنجا که، یک مقدار مشخص پتانسیل ماتریک در خاک‌های متفاوت، متناظر با مقادیر مختلف رطوبت بوده، p تابع بافت خاک نیز است. ضرایب p در جدول ۲۲ برای خاک ریز بافت (رسی)، ۵ تا ۱۰ درصد کاهش و برای خاک با بافت درشت‌تر (شنی) حدود ۵ تا ۱۰ درصد افزایش دارد.

مفهوم آب سهل الوصول خاک (RAW) مشابه تخلیه مجاز مدیریتی^۱ (MAD) ارائه شده توسط میریام^۲ است. هر چند، تخلیه مجاز مدیریتی علاوه بر عوامل فیزیکی مؤثر بر p ، تابع عوامل مدیریت زراعی و اقتصادی نیز می‌باشد. به طور معمول، چنانچه تخلیه مجاز مدیریتی کمتر از آب سهل الوصول در نظر گرفته شود ($MAD < RAW$)، شرایط تنش آبی برای گیاه ایجاد نمی‌شود. هنگامی که اعمال تنش آبی هدف مدیریت آبیاری باشد (کم‌آبیاری)، تخلیه مجاز مدیریتی بیشتر از آب سهل الوصول ($MAD > RAW$) خواهد بود.

1- Management Allowed Depletion (MAD)

2- Merriam

ضریب تنش آبی

اثر تنش آبی خاک بر تبخیر - تعرق گیاه با کاهش مقدار ضریب گیاهی متأثر از ضریب تنش آبی (K_s)، توصیف می‌شود (معادله‌های ۸۰ و ۸۱).

آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه (D_r) به صورت مقدار تخلیه، یعنی مقدار کمبود نسبت به ظرفیت زراعی، نیز، بیان می‌شود. در ظرفیت زراعی، تخلیه آب از خاک عمق توسعه ریشه گیاه صفر است ($D_r=0$). با کاهش آب به صورت تبخیر - تعرق، تخلیه افزایش می‌یابد و آنگاه که تخلیه مساوی با آب سهل‌الوصول شده، شرایط تنش آبی ایجاد می‌شود. با افزایش تخلیه آب خاک به بیشتر از آب سهل‌الوصول، به عبارتی، با کاهش آب خاک به پایین‌تر از مقدار آستانه تنش (θ_t)، تبخیر - تعرق گیاه متناسب با آب باقیمانده به کمتر از حد پتانسیل کاهش می‌یابد (شکل ۴۲).

برای حالتی که $D_r > RAW$ باشد، ضریب تنش آبی از رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$K_s = \frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} = \frac{TAW - D_r}{(1-p)TAW} \quad (۸۴)$$

که:

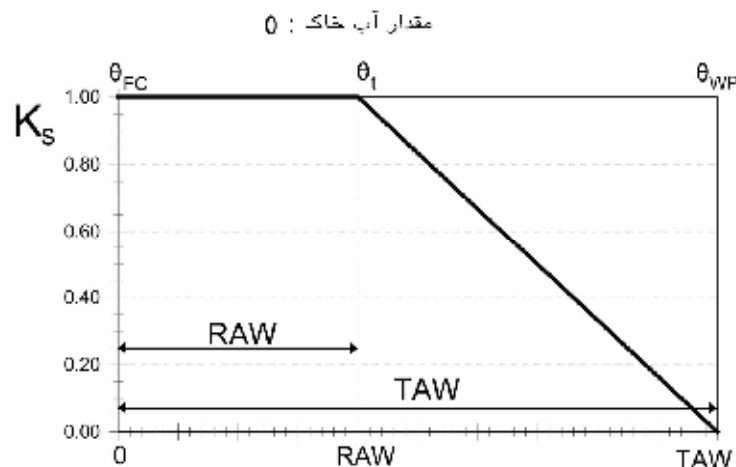
K_s = ضریب تنش آبی یا ضریب کاهش تعرق تابع آب قابل استفاده خاک [بین صفر تا ۱]،

D_r = مقدار تخلیه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه [میلی‌متر]،

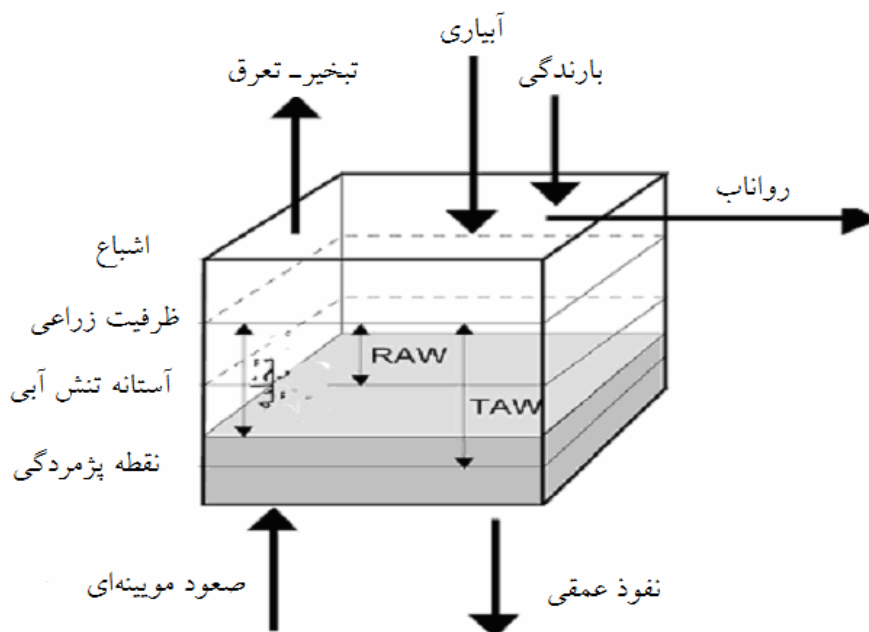
TAW = کل آب قابل استفاده خاک عمق توسعه ریشه گیاه [میلی‌متر] و

p = کسری (ضریبی) از TAW که گیاه بدون تحمل تنش آبی از خاک جذب می‌کند [بدون واحد].

پس از تعیین ضریب تنش آبی، تبخیر - تعرق اصلاح شده با بکارگیری معادله ۸۰ یا ۸۱ محاسبه می‌شود. چنانچه مقدار تخلیه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه کمتر از آب سهل‌الوصول باشد، $K_s=1$ است.



شکل ۴۲- ضریب تنش آبی (K_s)



شکل ۴۳- موازنه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه

موازنه آب خاک

برآورد ضریب تنش آبی نیازمند بررسی موازنه روزانه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه است. خاک می‌تواند به صورت یک ظرف که آب در آن نوسان دارد، فرض گردد (شکل ۴۳). بیان مقدار آب خاک بر حسب مقدار تخلیه، که به طور معمول به صورت عمق آب بیان می‌شود، برای بررسی جریان آب ورودی و خروجی به عنوان اجزای رابطه موازنه آب سودمند می‌باشد. بارندگی، آبیاری و صعود مویینه‌ای آب موجب افزایش و تبخیر از خاک، تعرق گیاه و تلفات نفوذ عمقی موجب کاهش آب خاک می‌شود. موازنه روزانه آب خاک بر حسب مقدار تخلیه در پایان هر روز، به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

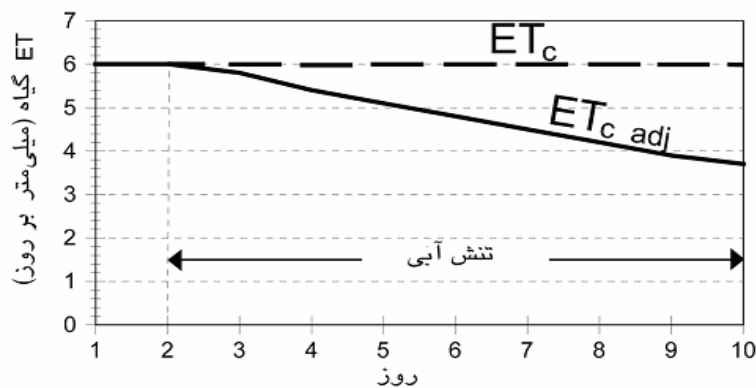
$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P-RO)_i - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (۸۵)$$

که در آن:

- $D_{r,i}$ = تخلیه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه در پایان روز i ام [میلی‌متر]،
- $D_{r,i-1}$ = مقدار آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه در پایان روز قبل $i-1$ ام [میلی‌متر]،
- P_i = بارندگی در روز i ام [میلی‌متر]،
- RO_i = رواناب در روز i ام [میلی‌متر]،
- I_i = عمق خالص آبیاری نفوذ یافته در خاک در روز i ام [میلی‌متر]،
- CR_i = صعود مویینه‌ای از سطح ایستابی در روز i ام [میلی‌متر]،
- $ET_{c,i}$ = تبخیر - تعرق گیاه در روز i ام [میلی‌متر] و
- DP_i = نفوذ عمقی به پایین عمق توسعه ریشه گیاه در روز i ام [میلی‌متر] می‌باشد.

مثال ۳۷- اثر تنش آبی بر تبخیر - تعرق گیاه

اثر تنش آبی بر تبخیر - تعرق گوجه فرنگی با رشد کامل ($p=0/40$ و $Z_r=0/8$ متر)، که در خاک سیلتی ($\theta_{wp}=0/12$) و $\theta_{FC}=0/32$) کشت شده است، را برای ده روز متوالی برآورد کنید. فرض شود که مقدار تخلیه اولیه آب از عمق توسعه ریشه گیاه ۵۵ میلی متر بوده و هیچ بارندگی یا آبیاری پیش‌بینی یا برنامه‌ریزی نشده است. تبخیر - تعرق گیاه مرجع در این مدت ۵ میلی متر بر روز و ضریب گیاهی $1/2$ می‌باشد.



$$TAW = 1000 \times (0/32 - 0/12) \times 0/8 = 160$$

از معادله ۸۲ میلی متر

$$RAW = 0/40 \times (160) = 64$$

از معادله ۸۳ میلی متر

(۸)	(۷)	(۶)	(۵)	(۴)	(۳)	(۲)	(۱)
$D_{i,r \text{ end}}$	$ET_{c \text{ adj}}$	K_s	$D_{r,i \text{ start}}$	ET_c	K_c	ET_0	روز
(میلی متر)	(میلی متر بر روز)		(میلی متر)	(میلی متر بر روز)		(میلی متر بر روز)	
۵۵/۰	-	-	-	-	-	-	شروع
۶۱/۰	۶/۰	۱/۰۰	۵۵/۰	۶/۰	۱/۲	۵/۰	۱
۶۷/۰	۶/۰	۱/۰۰	۶۱/۰	۶/۰	۱/۲	۵/۰	۲
۷۲/۸	۵/۸	۰/۹۷	۶۷/۰	۶/۰	۱/۲	۵/۰	۳
۷۸/۳	۵/۴	۰/۹۱	۷۲/۸	۶/۰	۱/۲	۵/۰	۴
۸۳/۴	۵/۱	۰/۸۵	۷۸/۳	۶/۰	۱/۲	۵/۰	۵
۸۸/۲	۴/۸	۰/۸۰	۸۳/۴	۶/۰	۱/۲	۵/۰	۶
۹۲/۶	۴/۵	۰/۷۵	۸۸/۲	۶/۰	۱/۲	۵/۰	۷
۹۶/۹	۴/۲	۰/۷۰	۹۲/۶	۶/۰	۱/۲	۵/۰	۸
۱۰۰/۸	۳/۹	۰/۶۶	۹۶/۹	۶/۰	۱/۲	۵/۰	۹
۱۰۴/۵	۳/۷	۰/۶۲	۱۰۰/۸	۶/۰	۱/۲	۵/۰	۱۰
شماره روز							(۱)
تبخیر - تعرق گیاه مرجع							(۲)
ضریب گیاهی							(۳)
معادله ۵۸، تبخیر - تعرق گیاه بدون تنش آبی							(۴)
مقدار تخلیه از عمق توسعه ریشه گیاه در آغاز روز (از ستون ۸ مربوط به روز قبل)							(۵)
معادله ۸۴ که در آن اگر $D_{r,i} < RAW$ باشد، $K_s = 1$ است.							(۶)
معادله ۸۱، تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط تنش آبی							(۷)
مقدار تخلیه در پایان روز							(۸)

مثال فوق نشان می‌دهد که برآورد ضریب تنش آبی نیازمند بررسی موازنه روزانه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه است. مشروح این روش در بخش بعد ارائه می‌شود.

حدود تخلیه آب خاک

در شکل ۴۳ فرض شده که آب در خاک عمق توسعه ریشه گیاه تا حد ظرفیت زراعی قابل ذخیره می‌باشد. هر چند، مقدار آب خاک، ممکن است، پس از بارندگی یا آبیاری سنگین بیشتر از ظرفیت زراعی گردد. لیکن، فرض است که آب مازاد بر ظرفیت زراعی در همان روز به صورت نفوذ عمقی و تبخیر - تعرق از دست می‌رود. بنابراین، با فرض آن که پس از یک آبیاری یا بارندگی سنگین، آب در خاک عمق توسعه ریشه گیاه در حد ظرفیت زراعی است، در این شرایط کمترین مقدار تخلیه $D_{r,i}$ صفر می‌باشد. آب خاک به تدریج، به صورت نفوذ عمقی و تبخیر - تعرق کاهش یافته و به عبارتی، مقدار تخلیه افزایش می‌یابد. در شرایط عدم آبیاری و بارندگی مجدد، مقدار آب خاک به پایین‌ترین مقدار می‌رسد. در این حالت، تبخیر - تعرق و ضریب تنش آبی صفر بوده و تخلیه آب خاک بیشترین مقدار و مساوی کل آب قابل استفاده خاک است. بنابراین، حدود تغییر $D_{r,i}$ به صورت زیر است:

$$0 \leq D_{r,i} \leq TAW \quad (۸۶)$$

تخلیه اولیه آب از خاک

در شروع محاسبه موازنه آب خاک عمق مؤثر توسعه ریشه گیاه، باید مقدار تخلیه اولیه ($D_{r,i-1}$) برآورد شود. مقدار تخلیه اولیه را می‌توان با اندازه‌گیری مقدار آب خاک از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$D_{r,i-1} = 1000(\theta_{FC} - \theta_{i-1})Z_r \quad (۸۷)$$

که در آن، θ_{i-1} میانگین مقدار آب خاک عمق مؤثر توسعه ریشه گیاه است. پس از بارندگی یا آبیاری سنگین، می‌توان فرض کرد که مقدار آب خاک در حدود ظرفیت زراعی بوده و تخلیه اولیه صفر است:

$$D_{r,i-1} \approx 0$$

بارندگی، رواناب و آبیاری

در رابطه موازنه آب خاک، عبارت P_i بارندگی روزانه است. بارندگی روزانه کمتر از 0.5 تبخیر - تعرق مرجع، به طور معمول، تبخیر شده و از محاسبه‌ها به ویژه در روش ضریب گیاهی یک جزیی، حذف می‌شود. عبارت I_i میانگین عمق آبیاری یکنواخت در کل سطح مزرعه است. مقدار رواناب (RO) ناشی از بارندگی را می‌توان با استفاده از روش‌های استاندارد معرفی شده در کتاب‌های هیدرولوژی برآورد کرد.

صعود مویینه‌ای آب

مقدار جریان به سمت بالای آب از سطح ایستابی (CR) به نوع (بافت) خاک، عمق سطح ایستابی و رطوبت خاک بستگی دارد. چنانچه فاصله سطح ایستابی از عمق توسعه ریشه گیاه بیشتر از ۱ متر باشد،

می توان مقدار صعود مویینه‌ای آب را صفر فرض کرد. اطلاعات بیشتر در زمینه صعود مویینه‌ای در نشریه فنی شماره ۲۴ فائو بیان شده است. صعود مویینه‌ای آب در نشریه‌های آینده این سازمان توصیف خواهد شد.

تبخیر - تعرق گیاه

هر گاه تخلیه آب خاک کمتر از آب سهل‌الوصول باشد، تبخیر - تعرق گیاه $ET_c = K_c \times ET_0$ است. پس از تخلیه آب سهل‌الوصول، تبخیر - تعرق گیاه کاهش یافته و مقدار آن می‌تواند با بکارگیری معادله ۸۰ یا ۸۱ محاسبه گردد.

نفوذ عمقی

در پی بارندگی یا آبیاری سنگین، ممکن است، مقدار آب خاک بیشتر از ظرفیت زراعی شود. در این روش ساده فرض است، که مقدار آب خاک در همان روز اتفاق بارندگی یا انجام آبیاری به θ_{FC} می‌رسد. در نتیجه، مقدار تخلیه $(D_{r,i})$ در معادله ۸۵، صفر است $(D_{r,i} = 0)$. در این شرایط، نفوذ عمقی (DP) در پی یک آبیاری یا بارندگی سنگین از معادله ۸۵ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$DP_i = (P_i - RO_i) + I_i - ET_{c,i} - D_{r,i-1} \geq 0 \quad (88)$$

تا هنگامی که آب خاک کمتر از ظرفیت زراعی باشد $(D_{r,i} > 0)$ ، نفوذ عمقی آب صفر است $(DP_i = 0)$. تذکر: عبارت DP_i در معادله‌های ۸۵ و ۸۸ با عبارت $DP_{e,i}$ که در معادله‌های ۷۷ و ۷۹ برای لایه تبخیر استفاده شده، اشتباه نشود. هر دو عبارت در یک زمان قابل محاسبه بوده ولی از یکدیگر مستقل هستند.

پیش‌بینی و تخصیص آبیاری

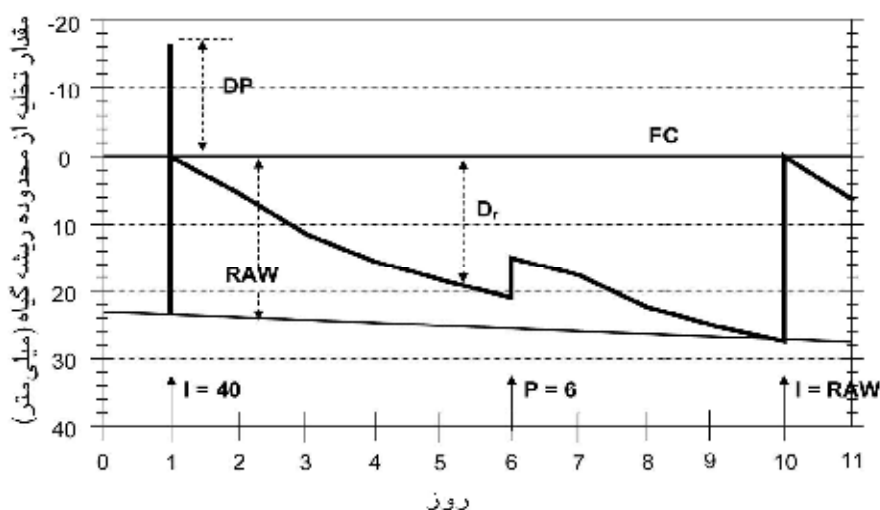
هنگامی که مقدار بارندگی کافی نباشد، آب مورد نیاز تبخیر - تعرق گیاه با آبیاری تأمین می‌شود. هدف اولیه انجام آبیاری، کاربرد آب در زمان لازم و به مقدار مناسب است. زمان و عمق آبیاری با محاسبه موازنه روزانه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه (معادله ۸۵)، قابل تعیین است. برای پرهیز از تنش آبی، آبیاری باید پیش یا در هنگام تخلیه آب سهل‌الوصول انجام شود $(D_{r,i} \leq RAW)$. برای جلوگیری از نفوذ عمقی که موجب آبشویی مواد غذایی خاک است، عمق خالص آبیاری باید مساوی یا کمتر از مقدار تخلیه آب باشد $(I_i \leq D_{r,i})$. مثال ۳۸، کاربرد روش موازنه آب خاک در پیش‌بینی زمان آبیاری با هدف پرهیز از تنش آبی را نشان می‌دهد. در این کادر از اطلاعات مثال ۳۵ استفاده می‌شود. نمونه‌ای از یک صفحه گسترده کامل شامل تمامی محاسبه‌های مورد نیاز برنامه‌ریزی آبیاری و برآورد ضریب گیاهی روزانه به روش دو جزئی $(K_c = K_{cb} + K_e)$ در پیوست هشت ارائه شده است.

مثال ۳۸- برنامه‌ریزی آبیاری برای پرهیز از تنش آبی

برنامه آبیاری برای اطلاعات مثال ۳۵ را تعیین کنید. فرض شود:

- آبیاری پس از تخلیه آب سهل‌الوصول انجام می‌گردد.
 - ضریب تخلیه (p)، $۰/۶$ است.
 - آبیاری در ابتدای روز انجام شده و بارندگی، نیز، در ابتدای روز واقع می‌شود.
 - عمق توسعه ریشه گیاه (Z_r) از $۰/۳۰$ متر در اولین روز به $۰/۳۵$ متر در دهمین روز افزایش می‌یابد.
- مقدار تخلیه آب از خاک عمق توسعه ریشه گیاه در ابتدای اولین روز $D_{r,i-1}$ مساوی با آب سهل‌الوصول (RAW) است.

از معادله ۸۲:	میلی متر	$TAW = ۱۰۰۰ (۰/۲۳ - ۰/۱۰) \times Z_{r,i} = ۱۳۰ Z_{r,i}$
از معادله ۸۳:	میلی متر	$TAW = ۰/۶ \times TAW = ۷۸ \times Z_{r,i}$
در روز اول:	برای $Z_{r,i} = ۰/۳$ متر، $D_{r,i} = RAW = ۷۸ \times (۰/۳) = ۲۳$ میلی متر است.	



روز	ET_0	Z_r	RAW	$D_{r,i \text{ start}}$	P-RO	I	K_s	K_{cb}	K_e	K_c	ET_c	DP	$D_{r,i \text{ end}}$
شروع	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۳
۱	۴/۵	۰/۳۰	۲۳	۰	۰	۴۰	۱	۰/۳۰	۰/۹۱	۱/۲۱	۵/۵	۱۷	۵
۲	۵/۰	۰/۳۱	۲۴	۵	۰	۰	۱	۰/۳۱	۰/۹۰	۱/۲۱	۶/۱	۰	۱۲
۳	۳/۹	۰/۳۱	۲۴	۱۲	۰	۰	۱	۰/۳۲	۰/۷۲	۱/۰۴	۴/۰	۰	۱۶
۴	۴/۲	۰/۳۲	۲۵	۱۶	۰	۰	۱	۰/۳۳	۰/۳۷	۰/۷۰	۲/۹	۰	۱۸
۵	۴/۸	۰/۳۲	۲۵	۱۸	۰	۰	۱	۰/۳۴	۰/۱۸	۰/۵۲	۲/۵	۰	۲۱
۶	۲/۷	۰/۳۳	۲۶	۱۵	۶	۰	۱	۰/۳۶	۰/۶۴	۱/۰۰	۲/۷	۰	۱۸
۷	۵/۸	۰/۳۳	۲۶	۱۸	۰	۰	۱	۰/۳۷	۰/۴۵	۰/۸۲	۴/۷	۰	۲۲
۸	۵/۱	۰/۳۴	۲۶	۲۲	۰	۰	۱	۰/۳۸	۰/۱۷	۰/۵۵	۲/۸	۰	۲۵
۹	۴/۷	۰/۳۴	۲۷	۲۵	۰	۰	۱	۰/۳۹	۰/۰۸	۰/۴۷	۲/۲	۰	۲۷

ادامہ مثال ۳۸-

۶	۰	۶/۳	۱/۲۱	۰/۸۱	۰/۴۰	۱	۲۷	۰	۰	۲۷	۰/۳۵	۵/۲	۱۰
شماره روز													(۱)
از مثال ۳۵													(۲)
مقدار Z_r داده شده است (بین ۰/۳ متر در روز اول و ۰/۳۵ متر در روز دهم)													(۳)
معادله ۸۳													(۴)
$D_{r,i \text{ start}}$ (مقدار تخلیه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه در ابتدای روز)، اگر بارندگی و آبیاری در ابتدای روز واقع شود: صفر یا $D_{r,i \text{ start}} = \max(D_{r,i-1 \text{ end}} - 1 - (P - DP))$ اگر بارندگی و آبیاری در پایان روز واقع شود: $D_{r,i-1 \text{ start}} = D_{r,i-1 \text{ end}}$ که در آن، $D_{r,i-1 \text{ end}}$ از ستون ۱۴ برای روز پیش است. از آنجا که، عمق توسعه ریشه گیاه هر روز افزایش می‌یابد، مقدار آب خاک لایه عمقی (θ_{sub}) باید برای تعیین مقدار $D_{r,i}$ واقعی در نظر گرفته شود: $D_{r,i} = D_{r,i-1} + 1000(\theta_{\text{FC}} - \theta_{\text{sub},i-1}) \Delta Z_{r,i}$ در این مثال، فرض شده است که θ_{sub} (به دلیل آبیاری اضافی نوبت پیش و بارندگی مازاد روزهای گذشته) در حد ظرفیت زراعی است. بنابراین، ترکیبی از معادله‌ها برای $D_{r,i}$ قابل استفاده است.													(۵)
از مثال ۳۵													(۶)
هنگامی که $D_{r,i} \geq \text{RAW}$ باشد، انجام آبیاری ضروری است. در اولین روز، عمق آبیاری (نفوذ یافته در خاک) معلوم است (از مثال ۳۵، $I=40$ میلی‌متر). در دهمین روز، یک نوبت آبیاری مورد نیاز است. انجام آبیاری با عمق خالص ۲۷ میلی‌متر، عمق توسعه ریشه گیاه را مرطوب و از اتلاف آب به صورت نفوذ عمقی جلوگیری می‌کند ($DP=0$).													(۷)
معادله ۸۴ که در آن برای $K_s=1$ داریم: $D_{r,i} \leq \text{RAW}$													(۸)
از مثال ۳۵													(۹)
اولین تا نهمین روز: از مثال ۳۵ روز دهم: لایه خاک سطحی پس از آبیاری در ابتدای روز خیس بوده و $K_r=1$ است، یا از معادله ۷۱: $K_e=(1/21-0/40)=0/81$													(۱۰)
$K_c = K_s K_{cb} + K_e$													(۱۱)
معادله ۸۰													(۱۲)
معادله ۸۸ که در آن $D_{r,i-1}$ مقدار ستون ۱۴ مربوط به روز قبل.													(۱۳)
$D_{r,i}$ (مقدار تخلیه آب خاک عمق توسعه ریشه گیاه در پایان اولین روز) مساوی $D_{r,i \text{ start}}$ در ابتدای روز بعد است (به پی‌نوشت ۵ مراجعه شود). از معادله ۸۵ که در آن $D_{r,i-1}$ از ستون ۱۴ در روز قبل بوده، استفاده شده است.													(۱۴)

اثر شوری خاک

نمک‌های محلول خاک با کاهش قابلیت جذب آب، تبخیر - تعرق را کاهش می‌دهند. این نمک‌ها مولکول‌های آب را جذب کرده و انرژی پتانسیل کل محلول خاک را کاهش می‌دهند. در نتیجه آن، برای جذب آب شور توسط گیاه نیروی بیشتر مورد نیاز است. به علاوه، برخی نمک‌ها اثر سمیت ویژه داشته و می‌توانند انرژی سوخت و ساز^۱ و رشد گیاه را کاهش دهند. معادله‌ای که در این بخش بیان شده است، مقدار کاهش تبخیر - تعرق متأثر از شوری آب خاک را برآورد می‌کند. این معادله، از ترکیب رابطه عملکرد با شوری و رابطه عملکرد با تبخیر - تعرق بدست آمده که، به ترتیب در نشریه‌های فنی شماره ۲۹ و ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو معرفی شده است. این معادله، یک تقریب اولیه از کاهش تبخیر - تعرق مورد انتظار تحت شرایط شور می‌باشد. شواهد نشان می‌دهد که عملکرد محصول و تعرق گیاه به پتانسیل ماتریک بیشتر از پتانسیل اسمزی حساس می‌باشد. در شرایط شور، با افزایش مقدار نمک‌های محلول در سلول‌های گیاهی بسیاری از گیاهان، به طور جزئی، پتانسیل اسمزی تعدیل می‌شود. این تعدیل تحت دو فرآیند جذب یون از محلول خاک و تشکیل مواد آلی مؤثر بر فشار اسمزی صورت می‌گیرد. این واکنش‌ها اثر پتانسیل اسمزی بر کاهش قابلیت استفاده آب را کمتر می‌کند. هرچند، فرآیند تشکیل مواد آلی مؤثر بر تعدیل فشار اسمزی، نیازمند مصرف انرژی سوخت و ساز است و بنا بر آن رشد گیاه، اغلب، در شرایط شور تقلیل می‌یابد. کاهش رشد گیاه با کاهش پوشش گیاهی و بسته شدن جزیی روزنه‌ها در برخی اوقات روز، بر شدت تعرق مؤثر است.

سایر اثر نمک‌های محلول در خاک شامل ایجاد سمیت ناشی از یون‌های کلرید و سدیم و مختل شدن تعادل مواد غذایی است. کمبود مواد غذایی با کاهش رشد و تقسیم سلولی در برگ‌ها موجب کاهش رشد گیاه می‌شود. اثر شوری به روش آبیاری بستگی دارد. جذب یون‌های کلرید و سدیم آب از سطح برگ در تحت روش آبیاری بارانی، می‌تواند در تمامی گونه‌های گیاهی شرایط سمیت را ایجاد کند. به طور معمول، در تاکستان‌ها و باغ‌های تحت آبیاری سطحی یا قطره‌ای، شرایط سمیت مستقیم این یون‌ها قابل مشاهده است. بالا بودن مقدار سدیم در خاک موجب کمبود کلسیم در انواع گونه‌های گیاهی نیز، می‌شود.

از آنجا که، غلظت نمک با تغییر مقدار آب خاک تغییر می‌کند، به طور معمول، شوری خاک بر حسب هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e) اندازه‌گیری و بر حسب دسی زیمنس بر متر ($dS\ m^{-1}$) بیان می‌شود. عصاره اشباع محلول خاک پس از افزودن مقدار کافی آب مقطر به نمونه خاک و اشباع شدن آن، تهیه می‌شود. عملکرد محصول گیاهان با افزایش هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک تا حد مشخص که هدایت الکتریکی آستانه شوری ($EC_e\ threshold$) نامیده شده، در حد پتانسیل است. تحت مدیریت زراعی

1- Metabolic energy

مطلوب، با افزایش شوری به بیشتر از آستانه، عملکرد محصول متناسب با افزایش شوری خاک عمق ریشه به صورت خطی کاهش می‌یابد. میزان کاهش عملکرد محصول با افزایش شوری، به طور معمول، تحت یک شیب کاهش عملکرد (b) بر حسب درصد به ازای هر دسی‌زیمنس بر متر افزایش شوری، بیان می‌شود. واکنش گیاهان به شوری متفاوت است. برخی گیاهان در شرایط بسیار شور، نیز، عملکرد قابل قبول دارند. این گیاهان با تعدیل اسمزی قادر به جذب آب بیشتر از خاک شور بوده یا تحمل شوری^۱ بالا دارند. تحمل شوری بسیاری از محصولات متداول در نشریه‌های فنی شماره ۳۳ و ۴۸ فائو ارائه شده است. مقادیر EC_e threshold و b به نقل از این نشریه‌ها در جدول ۲۳ این نشریه ارائه شده است.

مقادیر EC_e threshold و b ارائه شده در جدول ۲۳ حاصل تحقیقات آبیاری تحت شرایط ماندگار و یکنواخت است. در این شرایط، آب خاک به طور دائم نزدیک به حد ظرفیت زراعی نگاه داشته می‌شد. هر چند، تحت انواع برنامه‌ریزی آبیاری به روش سطحی و بارانی، تخلیه آب از خاک بیشتر است و رطوبت به کمتر از حد ظرفیت زراعی می‌رسد. بنابراین، در شرایط مزرعه، هدایت الکتریکی محلول خاک (EC_{sw}) پیش از آبیاری افزایش داشته (یعنی خاک شورتر شده) در حالی که هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک مقدار ثابت است. افزایش غلظت نمک در محلول خاک، پتانسیل اسمزی را کاهش می‌دهد (بیشتر منفی می‌شود) بنابراین، گیاه باید انرژی سوخت و ساز بیشتر برای جذب آب صرف کرده و، ممکن است، نیروی مکانیکی بیشتری اعمال کند. به علاوه، تأثیر نمک‌ها بر سوخت و ساز گیاه و اثر سمیت آنها، ممکن است، با خشک‌تر شدن خاک و افزایش غلظت نمک‌ها، بیشتر نمایان شود. هر چند تأثیر شدید تغییر آب خاک در طول یک فاصله آبیاری بر تبخیر - تعرق گیاه مشاهده نشده است. این مسئله ناشی از بالاتر بودن سطوح آب خاک مزرعه پس از آبیاری با فاصله طولانی (کاربرد عمق آب بیشتر) در مقایسه با شرایط تحقیقاتی (آبیاری با فاصله کوتاه و عمق کمتر) می‌باشد. برعکس، مقدار آب خاک مزرعه در انتهای فاصله آبیاری کمتر از شرایط تحقیقاتی می‌باشد. آبیاری پیوسته، اثر شوری محلول خاک بر گیاه را به ویژه در نیمه اول یک فاصله آبیاری کاهش می‌دهد. لیکن، در این شرایط تلفات آب به صورت تبخیر از خاک سطحی بالا می‌باشد. در نتیجه، راندمان آبشویی (برای همان مقدار آب کاربردی) کاهش می‌یابد. به این دلایل، هنگامی که عمق‌های یکسان آب به خاک محدوده توسعه ریشه گیاه نفوذ کند، مشاهده نشده است که طول فاصله آبیاری و تغییر هدایت الکتریکی آب خاک در این مدت، عوامل مؤثر بر کاهش تبخیر - تعرق باشند.

در برخی شرایط، افزایش تبخیر خاک سطحی متأثر از آبیاری با فاصله کوتاه می‌تواند اثر کاهش ضریب گیاهی ناشی از افزایش شوری عصاره اشباع خاک را به دلیل افزایش ضریب تبخیر جبران کند. در این حالت، علیرغم کاهش عملکرد محصول و تعرق گیاه، ضریب گیاهی کل و تبخیر - تعرق مورد انتظار در

دو شرایط استاندارد (غیر شور) و آبیاری طولانی چندان متفاوت نیستند. بنابراین، در شرایط شور، ضریب کاهش تنش آبی باید، تنها، در روش ضریب گیاهی دو جزیی استفاده شود.

در بازنگری مقالات مربوط به اثر شوری بر عملکرد محصول گیاهان، لتی و همکاران^۱ (۱۹۸۵) و شالیهوت^۲ (۱۹۹۴) نتیجه‌گیری کردند که شوری خاک و تنش آبی، به طور معمول، اثر یکدیگر بر تبخیر - تعرق گیاه را تشدید می‌کنند. بنابراین، همان توابع عملکرد با تبخیر - تعرق، ممکن است، برای بررسی اثر تنش آبی و شوری که هر دو جذب آب را کاهش می‌دهند، بهتر قابل بکارگیری باشد.

رابطه عملکرد - شوری

در نشریه فنی شماره ۲۹ آبیاری و زهکشی فائو، یک روش برای پیش‌بینی کاهش عملکرد محصول در شرایط شور معرفی شده است. در این روش فرض می‌شود که تحت شرایط مدیریت زراعی مطلوب و تا هنگامی که هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک به مقدار آستانه شوری کاهش نداشته، عملکرد محصول در حد پتانسیل است. پس از آن، عملکرد متناسب با افزایش شوری به صورت خطی کاهش می‌یابد. روش ارائه شده در نشریه فنی شماره ۲۹ آبیاری و زهکشی فائو برای شرایط $EC_e > EC_{e \text{ threshold}}$ به صورت معادله زیر است:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - (EC_e - EC_{e \text{ threshold}}) \frac{b}{100} \quad (۸۹)$$

که در آن:

Y_a = عملکرد محصول واقعی،

Y_m = حداکثر عملکرد محصول مورد انتظار تحت شرایط $EC_e < EC_{e \text{ threshold}}$ ،

EC_e = میانگین هدایت الکتریکی عصاره اشباع در محدوده توسعه ریشه گیاه [دسی زیمنس بر متر]،

$EC_{e \text{ threshold}}$ = هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در آستانه کاهش عملکرد محصول به پایین‌تر از حداکثر مقدار مورد انتظار [دسی زیمنس بر متر]، و

b = شیب کاهش عملکرد محصول بر حسب درصد به ازای افزایش یک دسی زیمنس بر متر هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، می‌باشد.

مقادیر EC_e و b برای بسیاری از محصولات از نشریه‌های فنی شماره ۲۹ و ۴۸ آبیاری و زهکشی فائو اقتباس و در جدول ۲۳ این فصل ارائه شده است. این مقادیر، اغلب، نتایج بررسی‌های انجام شده در

1- Letey et al.

2- Shalhevet

شرایطی است که پتانسیل آب در عمق ۰/۳ تا ۰/۶ متر خاک، حدود ۳- متر (۳۰- کیلو پاسکال) یا بالاتر نگاه داشته می‌شد. هر چند، در این نشریه‌ها تاکید می‌شود که این داده‌ها برای اغلب گیاهان، تحت شرایطی که آبیاری پس از تخلیه آب سهل‌الوصول خاک انجام شده، قابل استفاده بوده است.

رابطه عملکرد - تنش آبی

در نشریه فنی شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو، برای برآورد کاهش عملکرد محصول تحت تنش آبی در خاک، تابع تولید عملکرد - آب به صورت رابطه ساده خطی (۹۰) نوشته می‌شود.

$$\left[1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right] = K_y \left[1 - \frac{ET_{cadj}}{ET_c}\right] \quad (90)$$

که در آن:

K_y = ضریب حساسیت^۱ به شوری [بدون واحد]،

ET_{cadj} = تبخیر - تعرق اصلاح شده (واقعی) گیاه [میلی‌متر بر روز] و

ET_c = تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط استاندارد [میلی‌متر بر روز] می‌باشد.

K_y ضریب کاهش نسبی عملکرد متأثر از کاهش تبخیر - تعرق گیاه تحت تنش آبی است. مقادیر K_y ارائه شده در نشریه فنی شماره ۳۳ فائو به گیاه وابسته بوده و ممکن است در طول دوره رشد تغییر کند. به طور کلی، کاهش عملکرد تحت تنش آبی در دوره رشد رویشی و رسیدن محصول، کمتر و در دوره‌های گل‌دهی و تشکیل میوه بیشتر است. مقادیر K_y در هر مرحله جداگانه و کل دوره رشد گیاهان در نشریه فنی شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو آمده که خلاصه آن به صورت میانگین برای کل دوره رشد در جدول ۲۴ این نشریه ارائه شده است.

ترکیب رابطه شوری با تبخیر - تعرق

بدون تنش آبی ($D_r < RAW$)

هنگامی که تنش شوری بدون تنش آبی ایجاد شود، می‌توان معادله‌های ۸۹ و ۹۰ را ترکیب و نتیجه را

با اعمال فرض $K_s = \frac{ET_{cadj}}{ET_c}$ ، به صورت زیر نوشت:

$$K_s = 1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e \text{ threshold}}) \quad (91)$$

که در آن؛ $EC_e > EC_{e \text{ threshold}}$ بوده و مقدار تخلیه کمتر از آب سهل الوصول ($D_r < RAW$) است، RAW و D_r در بخش‌های پیش تعریف شده‌اند.

با تنش آبی ($D_r > RAW$)

در شرایط تنش آبی و شوری، ترکیب معادله ۸۴ فصل هشت و معادله‌های ۸۹ و ۹۰ این فصل به صورت زیر است:

$$K_s = \left[1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_{e \text{ threshold}}) \right] \left[\frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \right] \quad (92)$$

که در آن؛ $EC_e > EC_{e \text{ threshold}}$ و $D_r > RAW$ است. اثر شوری خاک بر K_s در شکل ۴۴ نشان داده شده است. توجه شود که، در این روش فرض است آب سهل الوصول خاک (p) با افزایش شوری تغییر ندارد. اعتبار این فرض برای همه گیاهان قطعی نیست.

محدودیت‌ها

اثر شوری بر رشد، عملکرد محصول و نیز بر تبخیر - تعرق گیاه به زمان وقوع تنش بستگی دارد. به طور معمول، از میانگین ضریب K_y در دوره رشد برای برآورد کاهش تبخیر - تعرق گیاه استفاده می‌شود. در نشریه فنی شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو مقادیر K_y برای ۲۳ محصول ارائه شده که میانگین این ارقام برای دوره رشد گیاهان در جدول ۲۴ این نشریه آمده است. میانگین K_y برای دوره رشد بسیاری از گیاهان حدود ۱ است. برای گیاهانی که K_y آنها معلوم نباشد، می‌توان در معادله‌های ۹۱ و ۹۲ از مقدار $K_y=1$ استفاده یا گیاهان مشابه را انتخاب کرد.

معادله‌های ۹۱ و ۹۲ تنها، برای برآورد تقریبی اثر شوری بر تبخیر - تعرق گیاه پیشنهاد شده‌اند و اثر کلی شوری بر تبخیر - تعرق در دوره‌های طولانی (هفتگی یا ماهانه) را نشان می‌دهند. انتظار نمی‌رود دقت برآورد تبخیر - تعرق روزانه گیاه با معادله‌های ۹۱ و ۹۲ بالا باشد. همچنین، سایر اثرات پیچیده از جمله سمیت ویژه یون‌ها را، نیز، نشان نمی‌دهند. عبارت EC_e در معادله‌های ۹۱ و ۹۲ میانگین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک عمق توسعه ریشه گیاه می‌باشد.

معادله‌های ۹۱ و ۹۲ برای شرایط بسیار شور که روابط بین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، عملکرد محصول و ضریب K_s خطی نیست، ممکن است، معتبر نباشند. استفاده از آنها باید محدود به فرض؛ $EC_e < (EC_{e \text{ threshold}} + \frac{50}{b})$ باشد. به علاوه، معادله‌های ۹۱ و ۹۲ برای $K_y > 1$ ، پیش از صفر شدن K_s ، عبارت Y_a را صفر برآورد می‌کنند. همان طور که بیان شد، کاهش تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط

شور، اغلب، ناشی از کاهش اندازه گیاه و کسر پوشش گیاهی است. در ضرایب جدول ۲۳، به طور عمده، این اثرات در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین، چنانچه رشد گیاه متأثر از شوری بوده و از معادله‌های ۹۱ و ۹۲ استفاده شود، کاهش ضریب گیاهی بر مبنای عواملی نظیر نمایه سطح برگ یا کسر پوشش گیاهی، همان طور که در فصل نهم بیان شده است، ضرورت ندارد.

جدول ۲۳- آستانه تحمل شوری (EC_e threshold) محصولات متداول بر حسب از هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک که پس از آن عملکرد پتانسیل با شیب (b) کاهش می‌یابد.

گیاه ^۱	EC_e threshold ^۲ (دسی زیمنس بر متر) ^۳	b ^۴ (درصد کاهش عملکرد برای هر دسی زیمنس بر متر افزایش شوری)	طبقه‌بندی توصیفی ^۵
الف- سبزیجات ریز			
کلم بروکلی	۲/۸	۹/۲	MS
کلم بروکسل	۱/۸	۹/۷	MS
کلم	۱/۰-۱/۸	۹/۸-۱۴/۰	MS
هویج	۱/۰	۱۴/۰	S
گل کلم	۱/۸	۶/۲	MS
کرفس	۱/۸-۲/۵	۶/۲-۱۳/۰	MS
کاهو	۱/۳-۱/۷	۱۲/۰	MS
پیاز	۱/۲	۱۶/۰	S
اسفناج	۲/۰-۳/۲	۷/۷-۱۶/۰	MS
ترپچه	۱/۲-۲/۰	۷/۶-۱۳/۰	MS
ب- سبزیجات خانواده بادمجان، (Solanaceae)			
بادمجان	-	-	MS
فلفل	۱/۵-۱/۷	۱۲/۰-۱۴/۰	MS
گوجه فرنگی	۰/۹-۲/۵	۹/۰	MS
پ- سبزیجات، خانواده فیار (Cucurbitaceae)			
خیار	۱/۱-۲/۵	۷/۰-۱۳/۰	MS
خریزه	-	-	MS
کدو تنبل، کدو زمستانه	۱/۲	۱۳/۰	MS
کدو زوکی	۴/۷	۱۰/۰	MT
کدو اسکالپ	۳/۲	۱۶/۰	MS
هندوانه	-	-	MS

۱- این ارقام تنها برای راهنمایی ارائه شده‌اند. آستانه تحمل شوری محصولات بر حسب اقلیم، شرایط خاک و عملیات زراعی متغیر است. گیاهان، اغلب، در مرحله جوانه‌زنی به شوری مقاومت کمتری دارند.

۲- میانگین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک محدوده توسعه ریشه گیاه در آستانه کاهش عملکرد محصول.

۳- شوری محدوده توسعه ریشه گیاه با اندازه‌گیری هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک، بر حسب دسی زیمنس بر متر در دمای ۲۵ درجه سلسیوس بیان می‌شود.

۴- درصد کاهش عملکرد محصول به ازای یک واحد افزایش هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک محدوده توسعه ریشه گیاه بر حسب دسی زیمنس بر متر.

۵- طبقه‌بندی توصیفی شامل: T=مقاوم، MT=نسبتاً مقاوم، MS=نسبتاً حساس و S=حساس می‌باشد.

ادامه جدول ۲۳

گیاه	EC_e threshold (دسی زیمنس بر متر)	b (درصد کاهش عملکرد برای هر دسی زیمنس بر متر افزایش شوری)	طبقه‌بندی توصیفی
ت- گیاهان غده‌ای و ریشه‌ای			
چغندر سالادی (لبو)	۴/۰	۹/۰	MT
هویج	-	-	S
سیب‌زمینی	۱/۷	۱۲/۰	MS
سیب‌زمینی شیرین	۱/۵-۲/۵	۱۰/۰	MS
شلغم	۰/۹	۹/۰	MS
چغندر قند	۷/۰	۵/۹	T
ث- بقولات			
لویزا	۱/۰	۱۹/۰	S
باقلا	۱/۵-۱/۶	۹/۶	MS
نخود	۴/۹	۱۲/۰	MT
بادام زمینی	۳/۲	۲۹/۰	MS
نخودفرنگی	۱/۵	۱۴/۰	S
سویا	۵/۰	۲۰/۰	MT
ج- سبزیجات چند ساله (با قوای زمستانه و خاک بدون پوشش یا با مالچ)			
کنگر	-	-	MT
مارچوبه	۴/۱	۲/۰	T
نعنا	-	-	-
توت‌فرنگی	۱/۰-۱/۵	۱۱/۰-۳۳/۰	S
ج- گیاهان فیبری			
پنبه	۷/۷	۵/۲	T
کتان	۱/۷	۱۲/۰	MS
ج- گیاهان روغنی			
کرچک	-	-	MS
گلرنگ	-	-	MT
آفتابگردان	-	-	MS
ح- غلات			
جو	۸/۰	۵/۰	T
جو دوسر - یولاف	-	-	MT
ذرت	۱/۷	۱۲/۰	MS
ذرت شیرین	۱/۷	۱۲/۰	MS

ادامه جدول ۲۳

گیاه	EC _e threshold (دسی زیمنس بر متر)	b (درصد کاهش عملکرد برای هر دسی زیمنس بر متر افزایش شوری)	طبقه‌بندی توصیفی
ارزن	-	-	MS
ذرت خوشه‌ای (سرگوم)	۶/۸	۱۶/۰	MT
برنج ^۶	۳/۰	۱۲/۰	S
گندم	۶/۰	۷/۱	MT
گندم پاکوتاه	۸/۶	۳/۰	T
گندم دوروم	۵/۷-۵/۹	۳/۸-۵/۵	T
د- گیاهان علوفه‌ای			
یونجه	۲/۰	۷/۳	MS
جو	۶/۰	۷/۱	MT
برموداگراس	۶/۹	۶/۴	T
شبدر، برسیم	۱/۵	۵/۷	MS
شبدر	۱/۵	۱۲/۰	MS
لوبیای چشم بلبلی (علوفه‌ای)	۲/۵	۱۱/۰	MS
علف نی	۳/۹	۵/۳-۶/۲	MT
علف دم‌روپاهی	۱/۵	۹/۶	MS
هاردینگ گراس ^۷	۴/۶	۷/۶	MT
لاوگراس ^۸	۲/۰	۸/۴	MS
ذرت علوفه‌ای	۱/۸	۷/۴	MS
اورکاردگراس ^۹	۱/۵	۶/۲	MS
چاودار علوفه‌ای (چند ساله)	۵/۶	۷/۶	MT
نوعی علف ^{۱۰}	۲/۳	۷/۰	MS
نوعی علف ^{۱۱}	۲/۲	۷/۰	MS
سودان گراس	۲/۸	۴/۳	MT
شبدر باریک برگ، پنجه مرغی	۵/۰	۱۰/۰	MT
شبدر پهن برگ ^{۱۲}	۲/۳	۱۹/۰	MS
ماش	۳/۰	۱۱/۰	MS
علف گندم ^{۱۳}	۷/۵	۴/۲	T
علف گندم ^{۱۴}	۷/۵	۶/۹	T
علف گندم ^{۱۵}	۳/۵	۴/۰	MT
چاودار وحشی	۲/۷	۶/۰	MT
ذ- نیشکر	۱/۷	۵/۹	MS

۶- از آنجا که، برنج تحت شرایط مانداب رشد می‌کند، مقادیر جدول به هدایت الکتریکی آب خاک در شرایط اشباع اشاره دارد.

7- Hardinggrass

8- Lovegrass

9- Orchardgrass

10- Sesbania

11- Shpaerophysa

12- Trefoil, big

13- Wheatgrass, tall

14- Wheatgrass, fairway crested

15- Wheatgrass, standard crested

ادامه جدول ۲۳

گیاه	EC_e threshold (دسی زیمنس بر متر)	b (درصد کاهش عملکرد برای هر دسی زیمنس بر متر افزایش شوری)	طبقه‌بندی توصیفی
ر- میوه‌ها و درختان گرمسیری			
موز	-	-	MS
قهوه	-	-	-
نخل	۴/۰	۳/۶	T
درختان خرما	-	-	T
آناناس چند ساله	-	-	MT
چای	-	-	-
ز- انگور و توت			
توت سیاه	۱/۵	۲۲/۰	S
توت	۱/۵	۲۲/۰	S
انگور	۱/۵	۹/۶	MS
رازک	-	-	-
ث- درختان میوه			
بادام	۱/۵	۱۹/۰	S
آووکادو	-	-	S
گریپ فروت	۱/۸	۱۶/۰	S
پرتقال	۱/۷	۱۶/۰	S
لیموترش ^{۱۶}	-	-	S
لیموترش ^{۱۷}	-	-	S
پوملو ^{۱۸}	-	-	S
تانه‌جین ^{۱۹}	-	-	S
درختان مخروط‌دار	-	-	MS-MT
درختان میوه خزان‌شونده	-	-	
- سیب	-	-	S
- هلو	۱/۷	۲۱/۰	S
- گیلان	-	-	S
- گلابی	-	-	S
- آلو	۱/۶	۲۴/۰	S
- گوجه	۱/۵	۱۸/۰	S
- انار	-	-	MT
- زیتون	-	-	MT

منبع مورد استفاده اصلی:

Ayers and Westcot, 1985. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29. Water quality for agriculture;
Rhoades, Kandiah and Mashali, 1992. FAO Irrigation and Drainage Paper No 48. The use of saline
waters for crop productions.

- 16- Lemon
17- Lime
18- Pummelo
19- Tangerine

کاربرد

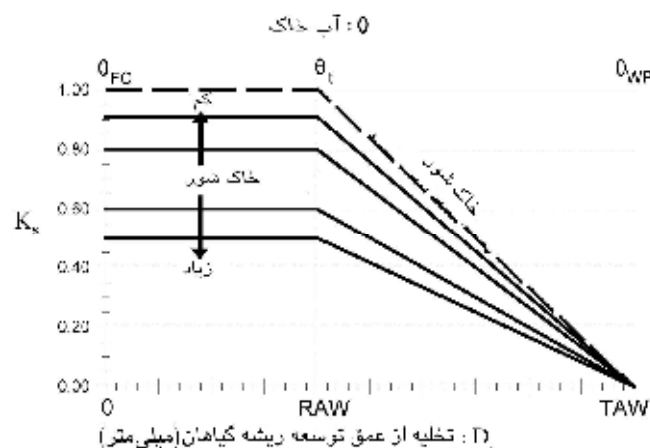
تحت شرایط ماندگار، مقدار هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e) می‌تواند با استفاده از روابط ارائه شده که در آنها، آبشویی تابع هدایت الکتریکی آب آبیاری (EC_{iw}) و نسبت (برخه) آبشویی^۱ است، برآورد گردد. به عنوان مثال، در نشریه فنی شماره ۲۹ آبیاری و زهکشی فائو، رابطه

$$LR = \frac{EC_{iw}}{(5EC_e - EC_{iw})}$$

برای برآورد نیاز آبشویی (LR) پیشنهاد شده است. این رابطه هنگامی معتبر است که فرض شود، عمق توسعه ریشه گیاه به چهار لایه مساوی تقسیم شده و الگوی جذب آب در این لایه‌ها به ترتیب از بالا به پایین ۴۰، ۳۰، ۲۰ و ۱۰ درصد کل آب جذب شده توسط ریشه باشد. مقدار EC_{iw} ، هدایت الکتریکی آب آبیاری می‌باشد. مقدار EC_e با استفاده از این معادله به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$EC_e = \frac{1+LF}{LF} \frac{EC_{iw}}{5} \quad (۹۳)$$

که در آن، LF کسر (نسبت) آبشویی واقعی است که جایگزین نیاز آبشویی (LR) شده است. معادله ۹۳ برای شرایطی که کسر آبشویی ۱۵ تا ۲۰ درصد باشد، هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک را به صورت $EC_e = 1.5EC_{iw}$ برآورد می‌کند. سایر معادله‌های آبشویی متناسب با ویژگی‌های محلی نیز، قابل استفاده می‌باشند. معادله ۹۳ در شرایطی معتبر است که، کیفیت آب آبیاری و کسر آبشویی در طول دوره رشد گیاه ثابت باشند. برقراری تعادل نمک در خاک مستلزم سپری شدن زمان است. چنانچه بارش‌های زمستان موجب آبشویی مؤثر نمک‌های خاک شوند، موازنه نمک در ابتدای دوره رشد گیاه متفاوت است و میانگین هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک عمق توسعه ریشه گیاه پایین‌تر از مقدار برآورد شده با معادله ۹۳ خواهد بود. بنابراین، باید معادله ۹۳ در شرایط محلی واسنجی شود.



شکل ۴۴- اثر شوری خاک بر K_s

مثال ۳۹- اثر شوری خاک بر تبخیر - تعرق گیاه

لوبیا در مرحله میانی رشد با آبی دارای $EC_{iw}=1/0$ دسی زیمنس بر متر، آبیاری می‌شود. خاک مزرعه لوم سیلت و کسر آبشویی ۱۵ درصد است. مقدار EC_e threshold و شیب کاهش عملکرد (b) از جدول ۲۳ به ترتیب ۱ دسی زیمنس بر متر و ۱۹ درصد (به ازای هر دسی زیمنس بر متر افزایش شوری) و میانگین K_y لوبیا از نشریه فنی شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو یا از جدول ۲۴ این فصل $1/15$ می‌باشد. اثر شوری بر تبخیر - تعرق گیاه برای سطوح مختلف تخلیه آب از خاک عمق توسعه ریشه در دو شرایط (خاک) شور و غیر شور را مقایسه کنید. RAW و TAW برای لوبیا (با $p=0/40$)، به ترتیب ۱۱۰ و ۴۴ میلی‌متر است.

از آنجا که، کسر آبشویی $0/15$ می‌باشد، EC_e با معادله ۹۳ به صورت $EC_e=1/5 \times EC_w=1/5 \times 1/0=1/5$ دسی زیمنس بر متر محاسبه شده، ضریب K_s در شرایط تنش شوری و بدون تنش آبی به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$K_s = \left[1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_e \text{ threshold}) \right]$$

$$K_s = \left[1 - \frac{19}{1/15 \times 100} \times (1/5 - 1) \right] = 0/92$$

ضریب K_s تحت تنش آبی و بدون تنش شوری به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$K_s = \left[\frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \right] = \left[\frac{110 - D_r}{100 - 44} \right] = \left[\frac{110 - D_r}{66} \right]$$

ضریب K_s در شرایط هر دو تنش شوری و آبی عبارت است از:

$$K_s = \left[1 - \frac{b}{K_y 100} (EC_e - EC_e \text{ threshold}) \right] \left[\frac{TAW - D_r}{TAW - RAW} \right] = 0.92 \left[\frac{110 - D_r}{66} \right]$$

اثر شوری بر تبخیر - تعرق گیاه در سطوح مختلف تخلیه آب خاک (D_r)، به صورت زیر می‌باشد:

کاهش اضافی ET_c پتانسیل ناشی از شوری (درصد)	K_s با شوری خاک ($EC_e = 1.5 \text{ dS m}^{-1}$) (معادله ۹۲)	K_s خاک غیرشور	D_r (میلی‌متر)
۸	۸ درصد کاهش ET_c	بدون کاهش ET_c	۰
۸	۸ درصد کاهش ET_c	بدون کاهش ET_c	۳۵
۸	۸ درصد کاهش ET_c	بدون کاهش ET_c	۴۰
۸	۸ درصد کاهش ET_c	بدون کاهش ET_c	۴۴
۸	۱۷ درصد کاهش ET_c	۹ درصد کاهش	۵۰
۷	۳۱ درصد کاهش ET_c	۲۴ درصد کاهش	۶۰
۵	۴۴ درصد کاهش ET_c	۳۹ درصد کاهش	۷۰
۳	۵۸ درصد کاهش ET_c	۵۵ درصد کاهش	۸۰
۲	۷۲ درصد کاهش ET_c	۷۰ درصد کاهش	۹۰
۱	۸۶ درصد کاهش ET_c	۸۰ درصد کاهش	۱۰۰
--	$ET_c = 0$	$ET_c = 0$	۱۱۰

جدول ۲۴- میانگین K_y در دوره رشد گیاهان تحت تنش آبی*

گیاه	K_y	گیاه	K_y
یونجه	۱/۱۰	سیب زمینی	۱/۱۰
موز	۱/۳۵-۱/۲۰	گلرنگ	۰/۸۰
لوبیا	۱/۱۵	ذرت خوشه‌ای	۰/۹۰
کلم	۰/۹۵	سویا	۰/۸۵
مرکبات	۱/۳۰-۱/۱۰	گندم بهاره	۱/۱۵
پنبه	۰/۸۵	چغندر قند	۱/۰۰
انگور	۰/۸۵	نیشکر	۱/۲۰
بادام زمینی	۰/۷۰	آفتابگردان	۰/۹۵
ذرت	۱/۲۵	گوجه فرنگی	۱/۰۵
پیاز	۱/۱۰	هندوانه	۱/۱۰
نخودفرنگی	۱/۱۵	گندم زمستانه	۱/۰۵
فلفل	۱/۱۰		

* به نقل از نشریه فنی شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو

فصل نهم

تبخیر - تعرق پوشش‌های گیاهی طبیعی، محصولات غیرمتداول و گیاهان کم‌پشت

محصولات غیرمتداول به آن گروه از گیاهان کشاورزی اشاره دارد که، کشت آنها معمول نبوده و اسامی آنها در جداول ۱۲ و ۱۷ ارائه نشده است. گیاهانی که دارای رشد کمتر (یعنی دارای تراکم کشت، ارتفاع، سطح برگ، تغذیه و شادابی نامناسب‌تر) از شرایط استاندارد هستند، گیاهان کم‌پشت (تُنک) نامیده می‌شوند. روش ضریب گیاهی که در آن، ویژگی‌های گیاه با یک ضریب مشخص شده و تبخیر - تعرق گیاه از ضرب کردن این ضریب در تبخیر - تعرق مرجع محاسبه می‌شود، برای تعیین تبخیر - تعرق پوشش گیاهی گیاهان طبیعی (خود سبز) و گیاهان تحت عملیات مدیریت زراعی غیراستاندارد نیز، یک روش ساده و مناسب است. روش برآورد ضریب گیاهی پوشش (گیاهی) طبیعی و نیز محصولاتی که ضرایب گیاهی آنها در دسترس نیست، در این فصل بیان می‌شود.

روش محاسبه

اولین مرحله در تعیین تبخیر - تعرق پوشش‌های (گیاهی) طبیعی و سایر پوشش‌های گیاهی به روش ضریب گیاهی $(K_c \times ET_0)$ ، برآورد طول مراحل رشد است (شکل ۲۷). در مرحله بعدی، منحنی‌های ضریب گیاهی که نسبت‌های ET_c به ET_0 در مراحل متفاوت رشد را نشان می‌دهند، رسم می‌شوند.

مرحله اولیه رشد

روش برآورد ضریب گیاهی در مرحله اولیه رشد برای پوشش گیاهی طبیعی، محصولات غیرمتداول و گیاهان کم‌پشت مشابه روش ضریب گیاهی یک جزیی $(K_{c \text{ ini}})$ فصل ششم) یا دو جزیی $(K_{c \text{ ini}} + K_e)$ فصل هفتم) است. به طور عمده، ضریب گیاهی در این مرحله بر اساس فاصله خیس شدن سطح خاک تعیین می‌شود.

مراحل میانی و پایانی رشد

ضریب گیاهی در مرحله میانی رشد $(K_{c \text{ mid}}$ و $K_{cb \text{ mid}}$) و تا حد کمتر در مرحله پایانی رشد $(K_{c \text{ end}})$ ، با آنچه تاکنون در فصل‌های پیش بیان شد، متفاوت است. میزان پوشش (گیاهی) گیاهان طبیعی یا کم‌پشت، اغلب، با زمان کاهش می‌یابد. بنابراین، ضرایب گیاهی تا حد بسیار به فاصله بارندگی یا آبیاری، سطح برگ و پوشش گیاهی وابسته هستند.

روش ضریب گیاهی دو جزئی

ضریب گیاهی پوشش‌های طبیعی، محصولات غیرمتداول و گیاهان کم‌پشت، در ابتدا، به روش بیان شده در فصل هفتم که در آن از دو ضریب جداگانه تعرق (K_{cb}) و تبخیر (K_e) استفاده شده، تعیین می‌شود. اثر تبخیر خاک در ضریب گیاهی، به طور مستقیم در این روش قابل برآورد است.

در این فصل، دو روش برای تعدیل ضریب گیاهی پایه پوشش‌های (گیاهی) با تراکم پایین و غیراستاندارد (کم‌پشت) در مرحله میانی رشد ($K_{cb \text{ mid adj}}$) ارائه می‌شود. در این روش‌ها، $K_{cb \text{ mid adj}}$ با استفاده از نمایه سطح برگ (معادله ۹۷) یا پوشش مؤثر سطح خاک (معادله ۹۸) برآورد می‌شود. پس از تعیین $K_{cb \text{ mid adj}}$ ، باید ضریب تبخیر خاک (K_e) تعیین و ضریب گیاهی اصلاح شده برای مرحله میانی رشد ($K_{c \text{ mid adj}}$) به صورت $K_{c \text{ mid adj}} = K_{cb \text{ mid adj}} + K_e$ محاسبه شود. روش‌های محاسبه ضریب تبخیر در فصل هفتم ارائه شده است.

پس از بارندگی، ضریب گیاهی تعدیل شده (مجموع $K_{cb \text{ adj}}$ و K_e) برای پوشش گیاهی با تراکم کشت پایین، حتی هنگامی که مقدار $K_{cb \text{ mid adj}}$ برآورد شده کوچک باشد ممکن است، به دلیل افزایش تبخیر از سطح خاک، مساوی با ضریب گیاهی گیاهان دارای رشد استاندارد شده یا حتی بیشتر از آن شود.

روش ضریب گیاهی یک جزئی

هنگامی که از روش ضریب گیاهی یک جزئی (فصل ششم) استفاده می‌شود، میانگین اثر فاصله خیس شدن سطح خاک در تعیین (میانگین) ضریب گیاهی کل لحاظ می‌شود. برخی روش‌های برآورد ضریب گیاهی (اصلاح شده) در بخش‌های بعدی ارائه می‌گردد. ضریب گیاهی یک جزئی، همچنین، با استفاده از ضریب گیاهی پایه اصلاح شده برپایه فاصله خیس شدن خاک، قابل تعیین است. یعنی، در مرحله میانی رشد هنگام خیس شدن خاک با فاصله طولانی از رابطه $K_{c \text{ adj}} = K_{cb \text{ adj}} + 0.05$ و برای خیس شدن هفتگی خاک از رابطه $K_{c \text{ adj}} = K_{cb \text{ adj}} + 0.10$ استفاده می‌گردد. تحت شرایطی که خاک به طور دائم خیس شده، باید از روش ضریب گیاهی دو جزئی استفاده شود.

برای تعیین ضریب گیاهی (K_c) می‌توان به جای ضریب گیاهی پایه (K_{cb})، از معادله‌های ۹۷ و ۹۸ استفاده کرد. سپس، ضریب گیاهی حداقل در معادله‌های ۹۷ و ۹۸ مساوی ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد فرض شده، که ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد از شکل ۲۹ یا ۳۰ برآورد می‌شود. استفاده از ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد، اثر تبخیر از سطح خاک را در نظر می‌گیرد و بنابراین، به عنوان، کران پایین $K_{c \text{ mid}}$ برآورد شده، محسوب می‌شود.

تنش آبی

تنش آبی در شرایطی که مقدار بارندگی کم است یا آبیاری انجام نمی‌شود، تبخیر - تعرق را به حد پایین‌تر از استاندارد کاهش می‌دهد. در این شرایط، کاهش ضریب گیاهی با استفاده از ضریب تنش آبی به روشی که در فصل هشت بیان شد، تعیین می‌شود.

اصلاح مرحله میانی رشد برای پوشش گیاهی کمپشت

اصلاح از روی مشاهدات ساده مزرعه‌ای

پوشش گیاهی، به طور معمول، در مرحله میانی رشد کامل می‌شود. چنانچه، تحت تأثیر بیماری، تنش، آفات گیاهی یا تراکم کشت پایین، رشد گیاهان در مرحله میانی کامل نشود، این گیاهان کمپشت نامیده می‌شوند. در یک تقریب اولیه، مقادیر $K_{c \text{ mid}}$ و $K_{cb \text{ mid}}$ گیاهان کمپشت را می‌توان با استفاده از یک ضریب، متناسب با مقدار واقعی پوشش گیاهی، کاهش داد:

$$K_{c \text{ adj}} = K_c - A_{cm} \quad (94)$$

که در آن:

$K_{c \text{ adj}}$ = ضریب گیاهی اصلاح شده ($K_{c \text{ mid adj}}$ یا $K_{cd \text{ mid adj}}$).

K_c = ضریب گیاهی از جدول ۱۲ ($K_{c \text{ mid}}$) یا جدول ۱۷ ($K_{cb \text{ mid}}$)، پس از اصلاح برای اقلیم واقعی (معادله ۶۲ یا ۷۰)، و

A_{cm} = ضریب تعدیل [بدون واحد] می‌باشند.

در شرایطی که گیاهان کمپشت در مرحله میانی رشد پی در پی خیس شوند و تبخیر از خاک افزایش یابد، معادله ۹۴ برای اصلاح ضریب گیاهی کاربرد ندارد. تحت این شرایط، باید ضریب گیاهی پایه با استفاده از معادله ۹۴ برآورد شود.

ضریب اصلاح (A_{cm}) به صورت زیر قابل برآورد است:

$$A_{cm} = 1 - \left[\frac{LAI}{LAI_{dense}} \right]^{0.5} \quad (95)$$

که در آن، LAI نمایه واقعی سطح برگ (کادر ۱۷)، و LAI_{dense} ، نمایه سطح برگ تحت شرایط استاندارد است. نمایه واقعی سطح برگ در معادله فوق می‌تواند با کسر پوشش گیاهی (f_c)، جایگزین شود:

$$A_{cm} = 1 - \left[\frac{f_c}{f_{c \text{ dense}}} \right]^{0.5} \quad (96)$$

در مثال ۴۰، تقریب اولیه ضریب گیاهی در مرحله میانی رشد برای پوشش گیاهی کمپشت ارائه شده است.

برآورد $K_{cb \text{ mid}}$ از روی نمایه سطح برگ

سطح برگ و کسر پوشش گیاهی طبیعی، به طور معمول، از پوشش گیاهی محصولات که تحت شرایط مدیریت زراعی مطلوب و رطوبت کافی دارای رشد مناسب و پوشش کامل شده، کمتر است. این وضعیت اغلب، و به ویژه، در اقلیم‌های نیمه‌خشک و خشک مشاهده می‌شود. هنگامی که تراکم کشت و یا سطح برگ پوشش‌های گیاهی گیاهان طبیعی یا کمپشت، کمتر از یک پوشش گیاهی استاندارد (یعنی نمایه سطح برگ

آنها پایین‌تر از ۳) است، باید $K_{cb\ mid}$ آنها کاهش یابد. هرگاه، نمایه سطح برگ قابل اندازه‌گیری یا برآورد باشد، بیشترین مقدار تقریبی ضریب گیاهی پایه در مرحله میانی رشد برای پوشش طبیعی، گیاهان کمپشت مشابه روش ریچی^۱ به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$K_{cb\ mid} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min})(1 - \exp[-0.07 LAI]) \quad (97)$$

که در آن:

$K_{cb\ mid}$ = ضریب گیاهی پایه برآورد شده در مرحله میانی رشد برای کشت با تراکم یا سطح برگ پایین و غیراستاندارد (استاندارد)،

$K_{cb\ Full}$ = ضریب گیاهی پایه برآورد شده در مرحله میانی رشد (با حداکثر اندازه و ارتفاع گیاه)، برای پوشش گیاهی کامل با نمایه سطح برگ بیشتر از ۳، (معادله‌های ۹۹ و ۱۰۰)،

$K_{c\ min}$ = حداقل ضریب گیاهی برای خاک بدون پوشش گیاهی [بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۰]

LAI = نمایه سطح برگ واقعی برحسب میانگین نسبت سطح برگ به سطح کشت کل در یک محدوده وسیع [مترمربع بر مترمربع]، می‌باشند.

معادله ۹۷ برای انواع گیاهان سالانه در هر دو حالت که رشد عادی داشته یا به دلیل کشت پراکنده و برخی تنش‌های محیطی، رشد هستند، پیشنهاد می‌شود. رابطه بیان شده در معادله ۹۷، مشابه نتایج ارائه شده توسط ریچی (۱۹۷۴) می‌باشد. برای شرایطی که نمایه سطح برگ بیشتر از ۳ بوده، $K_{cb\ mid} \approx K_{cb\ full}$ است. عبارت LAI در معادله ۹۷، باید نمایه سطح برگ‌های "سبز" یعنی برگ‌های سالم فعال در انتقال بخار را نشان دهد.

برآورد $K_{cb\ mid}$ از روی پوشش مؤثر زمین

اگر مقادیر تقریبی کسر پوشش گیاهی مؤثر در دسترس باشد، مقدار $K_{cb\ mid\ adj}$ با استفاده از رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$K_{cb\ mid} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min}) \left[\min \left(1, 2f_c, (f_{c\ eff})^{\left[\frac{1}{1+h} \right]} \right) \right] \quad (98)$$

که در آن:

$K_{cb\ mid}$ = ضریب گیاهی پایه برآورد شده در مرحله میانی رشد برای تراکم کشت و سطح برگ کمتر از پوشش کامل،

$K_{cb\ full}$ = ضریب گیاهی پایه برآورد شده در مرحله میانی رشد برای پوشش گیاهی کامل و نمایه سطح برگ بیشتر از ۳، (معادله‌های ۹۹ و ۱۰۰).

$K_{c\ min}$ = حداقل ضریب گیاهی برای خاک بدون پوشش گیاهی [بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۰]

f_c = کسر پوشش گیاهی هنگامی که سطح خاک از بالا مشاهده شود [بین ۰/۰۱ تا ۱]

$f_{c\ eff}$ = کسر پوشش گیاهی مؤثر [بین ۰/۰۱ تا ۱] (به کادر ۱۸ مراجعه شود) و

h = ارتفاع گیاه [متر] می‌باشند.

مثال ۴۰- تقریب اولیه ضریب گیاهی در مرحله میانی رشد برای پوشش گیاهی کمپشت

در سال ۱۹۸۰، در یک آزمایش در کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)، پوشش گیاهی گوجه‌فرنگی در مرحله میانی رشد تنها ۵۰ درصد و ارتفاع بوته حدود ۷۵ سانتی‌متر بود (پروت و همکاران، ۱۹۸۴). پوشش گیاهی مؤثر کامل گوجه‌فرنگی در این منطقه به طور عادی، ۸۵ تا ۹۰ درصد بوده که با $K_{cb\ mid}$ این گیاه در جدول ۱۷ متناظر است. در مرحله میانی رشد، میانگین سرعت باد (در ارتفاع دو متری)، $1/1$ متر بر ثانیه و حداقل رطوبت نسبی ۳۰ درصد اندازه‌گیری شد. عرض جغرافیایی منطقه دیویس $38/5$ درجه شمالی و 20 ژوئیه، نیمه مرحله میانی رشد گیاه محسوب می‌شود. ضریب $K_{cb\ mid}$ اصلاح شده گوجه‌فرنگی برای پوشش گیاهی ۵۰ درصد را تعیین کنید.

از جداول ۱۲ و ۱۷ داریم:

$$K_{c\ mid} = 1/2 \text{ و } K_{cb\ mid} = 1/15$$

مقدار K_c برای شرایط $u_2 = 1/1$ متر بر ثانیه و $RH_{min} = 30\%$ و $h = 0/75$ متر با استفاده از معادله‌های ۶۲ و ۷۰ به صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$K_c = K_{c, Table} + [0/04 \times (1/1 - 2) - 0/04 \times (30 - 54)] \left(\frac{0/75}{3} \right)^{1/3} = K_{c, Table} + 0/02$$

$$K_{c\ mid} = 1/22 \text{ و } K_{cb\ mid} = 1/17$$

کسر پوشش گیاهی برای گوجه‌فرنگی در شرایط استاندارد و با رشد عادی، حدود ۸۵ درصد می‌باشد ($f_{c\ dense} = 0/85$). برای گوجه‌فرنگی کمپشت با رشد کمتر از استاندارد (یعنی $f_c = 0/50$) از معادله ۹۶ داریم:

$$A_m = 1 - \left(\frac{0/50}{0/85} \right)^{1/5} = 0/23$$

$K_{cb\ mid\ adj}$ و $K_{c\ mid\ adj}$ برای پوشش گیاهی ۵۰ درصد (از معادله ۹۴) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$K_{cb\ mid\ adj} = 1/17 - 0/23 = 0/94$$

$$K_{c\ mid\ adj} = 1/22 - 0/23 = 0/99$$

این نتایج با برآورد دقیق‌تر $K_{cb\ mid\ adj}$ در مثال ۴۲ مقایسه شود.

به عنوان یک تقریب اولیه، انتظار می‌رود ضریب گیاهی حدود ۲۰ درصد کمتر از مقدار آن تحت شرایط استاندارد باشد.

کادر ۱۷- اندازه‌گیری و برآورد نمایه سطح برگ

نمایه سطح برگ را، به طور مستقیم، می‌توان با برداشت تمامی برگ‌های سبز سالم پوشش گیاهی واقع در یک کادر مشخص (به عنوان مثال، ۱ یا ۱۰ مترمربع) و اندازه‌گیری مساحت هر یک از برگ‌ها با استفاده از روش‌های فتومتریک (رنگ‌سنجی) و جمع مساحت‌ها یا با اندازه‌گیری مساحت تعدادی از نمونه برگ‌های گیاه، و سپس ضرب میانگین مساحت یک برگ در تعداد کل برگ‌های شمارش شده، تعیین کرد.

اگر تجهیزات اندازه‌گیری نمایه سطح برگ در دسترس نباشد، مقدار آن برای گیاهان زراعی سالانه کم‌پشت با رش غیراستاندارد به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$LAI = LAI_{dense} \left(\frac{P}{P_{dense}} \right)^a$$

که:

LAI_{dense} = نمایه سطح برگ برای یک گونه گیاهی مشخص با تراکم کشت و رشد عادی استاندارد (LAI_{dense} در منابع و مراجع مختلف ارائه شده است)،

P = تعداد بوته در واحد سطح تحت شرایط رشد واقعی [تعداد بر مترمربع]،

P_{dense} = تعداد بوته در واحد سطح تحت شرایط استاندارد تراکم کشت و رشد [تعداد بر مترمربع] و

a = مقدار ۰/۵ برای جمعیت گیاهی شاداب و تراکم کشت مطلوب و مقدار ۱ برای گیاهانی که شادابی کمتری دارند.

توان ۰/۵ در معادله فوق نشان می‌دهد که، در شرایط کشت با تراکم غیراستاندارد، پوشش گیاهی به دلیل افزایش اندازه هر بوته و بزرگتر شدن برگ‌ها به طور نمایی افزایش می‌یابد که در نتیجه آن، کاهش پوشش گیاهی با تراکم غیراستاندارد کمتر از مقدار مورد انتظار خواهد شد. بنابراین، نمایه سطح برگ با تعداد بوته (جمعیت گیاه) نسبت مستقیم ندارد. تحت شرایطی که اندازه گیاه با کاهش تراکم کشت افزایش نداشته باشد، باید توان a در معادله بالا ۱ فرض شود. این شرایط، ممکن است، هنگامی مشاهده شود که حاصلخیزی خاک پایین باشد یا شوری خاک، تنش آبی یا ماندابی موجب کاهش رشد و تراکم کشت شوند. در نتیجه، رشد بوته‌ها نیز دچار تاخیر می‌گردد.

کادر ۱۸- اندازه‌گیری و برآورد کسر پوشش گیاهی مؤثر

$f_{c\ eff}$ ، کسر سطح خاک زیر سایه‌انداز پوشش گیاهی است. این مقدار، به طور معمول، بیشتر از f_c می‌باشد و به صورت نسبت سطح پوشش گیاهی واقعی به سطح کل زمین، چنانچه به طور مستقیم از بالا مشاهده شده، بیان می‌شود. مقدار سایه‌اندازی بیانگر تابش خورشیدی دریافتی توسط گیاه برای فرآیند تبخیر - تعرق است. کل کسر سایه‌اندازی پوشش گیاهی تابع زاویه خورشید، اندازه افقی و شکل بوته‌های جداگانه (ردیف‌ها) نسبت به ارتفاع آنها می‌باشد.

$f_{c\ eff}$ برای پوشش گیاهی مستطیل شکل مشابه اغلب محصولات ردیفی به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$f_{c\ eff} = f_c \left[1 + \frac{HWR}{\tan(\eta)} \right] \leq 1$$

که:

f_c = کسر سطح پوشش گیاهی هنگامی که از بالا مشاهده شود [بین ۰/۱ تا ۱]،

HWR = نسبت ارتفاع به پهنای کشت شامل بوته‌های جداگانه یا گروهی هنگامی که از شرق یا غرب دیده شوند [بدون واحد]،

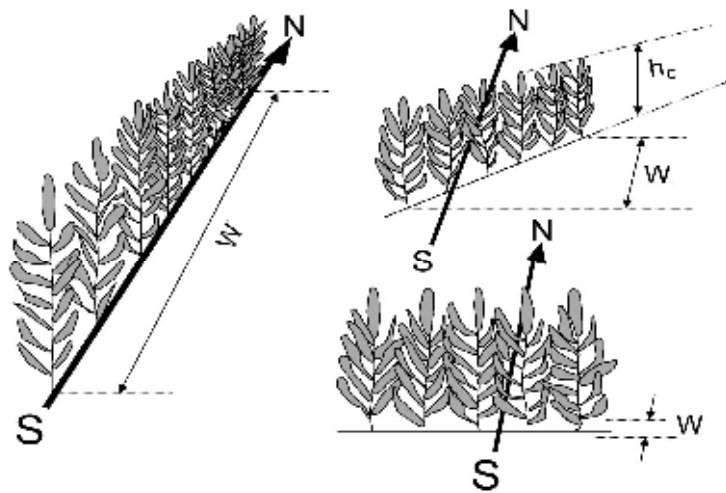
$\tan(\eta)$ = تانژانت میانگین زاویه خورشید بالای افق (η) در دوره حداکثر تبخیر - تعرق (اغلب بین ساعت ۱۱/۰۰ و ۱۵/۰۰). بیشتر اوقات زاویه η در ظهر خورشید (ساعت ۱۲/۰۰)، قابل محاسبه است.

ادامه کادر ۱۸-

HWR به صورت زیر محاسبه می شود:

$$HWR = \frac{h_{\text{canopy}} (\cos(\Gamma))}{\text{Width}}$$

که در آن:

 h_{canopy} = میانگین ارتفاع پوشش گیاهی [متر]، Width = میانگین پهنا (عرض) پوشش گیاهی بوته های جداگانه یا گروهی (به عنوان مثال یک ردیف) کشت [متر] و Γ = زاویه ردیف گیاهان در جهت غرب به شرق [رادیان]، می باشند.برای ردیف های کشت شرق به غرب $\Gamma = 0$ ، و برای ردیف های کشت شمال به جنوب $\Gamma = \frac{\pi}{2}$ ، است.

مقدار HWR برای ردیف های کشت شمال به جنوب صفر می باشد زیرا $\cos(\frac{\pi}{2}) = 0$ بوده و در نتیجه، $f_{c\text{ eff}} = f_c$ است. یعنی سطح خاک در تمام اوقات روز در معرض تابش خورشید قرار داشته و در وسط روز، سطح سایه اندازی شده همان کسر پوشش گیاهی است.

برای درختان یا گیاهانی که پوشش گیاهی آنها بر روی زمین گسترده نمی شود، h_{canopy} شامل طول تنه زیرتاج نبوده و تنها پوشش گیاهی فعال دارای سایه انداز است. بنابراین، در این شرایط h_{canopy} بزرگتر از h (میانگین ارتفاع گیاه) می باشد.

نسبت $f_{c\text{ eff}}$ برای پوشش های گیاهی کروی شکل نظیر درختان به صورت زیر برآورد می شود:

$$f_{c\text{ eff}} = \frac{f_c}{\sin(\eta)} \leq 1$$

که در رابطه فوق، $\sin(\eta)$ سینوس میانگین زاویه خورشید بالای افق در زمان حداکثر تبخیر - تعرق (بین ساعت ۱۱ و ۱۵) است.

ادامه کادر ۱۸-

میانگین زاویه خورشید بالای افق در طول دوره با حداکثر تبخیر - تعرق (η)سینوس η برای هر زمان مشخص از روز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sin(\eta) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega)$$

که در آن:

 φ = عرض جغرافیایی [رادیان]، (برای عرض‌های جنوبی مقدار آن منفی است)، δ = زاویه میل خورشید [رادیان]، (معادله ۲۴) و ω = زاویه زمان خورشید [رادیان]، (معادله ۳۱)، می‌باشند.به طور معمول، $f_{c \text{ eff}}$ در ظهر (ساعت ۱۲/۰۰) قابل محاسبه است که در آن، $\omega = 0$ و معادله فوق به صورت زیر می‌باشد:

$$\sin(\eta) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta)$$

مقدار η را می‌توان با تعیین arc سینوس معادله فوق تعیین کرد.

برآورد $K_{cb \text{ full}}$

ممصولات کشاورزی:

محصولات کشاورزی تحت تنش‌های محیطی ناشی از کمبود آب خاک، حاصلخیزی پایین، بیماری‌های گیاهی، چرا توسط دام، آفات گیاهی یا تراکم کشت کم و غیراستاندارد، رشد پتانسیل و کامل نداشته، و گیاهان کم‌پشت نامیده می‌شوند. مقدار $K_{cb \text{ full}}$ در معادله‌های ۹۷ و ۹۸ را می‌توان پس از اصلاح برای اقلیمی (معادله ۷۰)، همان ضریب $K_{cb \text{ mid}}$ پوشش گیاهی کامل ($f_{c \text{ eff}}$ حدود ۱) فرض کرد که در جدول ۱۷ آمده است:

$$K_{cb \text{ full}} = K_{cb \text{ mid, Table}} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \quad (99)$$

که در آن:

 u_2 = میانگین سرعت باد روزانه در ارتفاع دو متری در مرحله میانی رشد گیاه [متر بر ثانیه]، $RH_{\min}$ = میانگین حداقل رطوبت نسبی روزانه در مرحله میانی رشد گیاه [درصد] و h = میانگین حداکثر ارتفاع گیاهان [متر] می‌باشند.

پوشش گیاهی طبیعی و محصولات ارائه نشده در جدول ۱۷:

مقدار $K_{cb \text{ full}}$ پوشش‌های گیاهی طبیعی، گیاهان کم‌پشت یا محصولات ارائه نشده در جدول ۱۷ که در سطوح بیشتر از چند هکتار کشت شوند، را می‌توان برحسب اقلیم و میانگین ارتفاع گیاه به صورت زیر برآورد کرد:

$$K_{cb \text{ full}} = K_{cb, h} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \quad (100)$$

که در آن:

$K_{cb\ mid} = K_{cb,h}$ پوشش گیاهی کامل (نمایه سطح برگ بیشتر از ۳) در اقلیم نیمه مرطوب و باد آرام
 $(u_2 = 2 \text{ متر بر ثانیه و } RH_{min} = 45 \text{ درصد})$ ، (معادله ۱۰۱)
 u_2 = میانگین سرعت باد روزانه در ارتفاع دو متری در مرحله میانی رشد گیاه [متر بر ثانیه]،
 RH_{min} = میانگین حداقل رطوبت نسبی روزانه در مرحله میانی رشد گیاه [درصد] و
 h = میانگین حداکثر ارتفاع گیاه [متر] می‌باشند.
 مقدار $K_{cb,h}$ از رابطه زیر برآورد می‌شود:

$$K_{cb,h} = 1 + 0.1 h \quad \text{متر } h \leq 2 \quad (101)$$

هنگامی که ارتفاع گیاه بیشتر از ۲ متر بوده، مقدار $K_{cb,h}$ مساوی با ۱/۲ یا کوچک‌تر از آن است. عدد ۱/۲، نمایانگر کران بالای $K_{cb\ mid}$ گیاهان بلند با پوشش گیاهی کامل و نمایه سطح برگ بیشتر از ۳ و تحت اقلیم نیمه مرطوب و باد آرام می‌باشد. این کران در معادله ۱۰۰ برای سایر اقلیم‌ها اصلاح شده است. معادله‌های ۱۰۰ و ۱۰۱، یک تقریب کلی از افزایش $K_{cb\ full}$ در ارتباط با ارتفاع گیاه و شرایط اقلیمی را نشان می‌دهند.

ضریب $K_{cb\ full}$ برای سطوح کشت کم وسعت و محدود همان طور که در فصل دهم بحث شد، ممکن است، بیشتر از مقدار ارائه شده با معادله ۹۹ یا ۱۰۰ باشد.

نتیجه‌گیری

معادله‌های ۹۷ و ۹۸ برای برآورد یا کاهش K_{cb} محصولات کم‌پشت قابل استفاده می‌باشند. توان‌های معادله‌های ۹۷ و ۹۸، اثر همرفت (جابجایی) گرمای محسوس از سطوح خاک خشک بین بوته‌ها به سمت برگ‌ها و در نتیجه افزایش تبخیر - تعرق برگ در واحد سطح خاک و اثر افزایش زبری آئروپدینامیک ناشی از کاهش نمایه سطح برگ را منعکس می‌کنند. معادله ۹۸ رابطه افزایش کل سطح برگ و زبری پوشش گیاهی مؤثر با افزایش میانگین حداکثر ارتفاع (h) گیاه را نشان می‌دهد که در نتیجه آن، ضریب گیاهی افزایش می‌یابد. به علاوه، با افزایش ارتفاع گیاه، وضعیت مناسب‌تری برای جابجایی موضعی گرما از خاک به سمت پوشش گیاهی به وجود آمده و تبادل تلاطمی هوا در پوشش گیاهی بیشتر می‌شود. تمامی این عوامل در مقدار نسبی $K_{cb\ mid}$ مؤثر می‌باشند.

معادله‌های ۹۷ و ۹۸ باید با احتیاط استفاده شوند. زیرا، این معادله‌ها تنها یک تخمین از بیشترین مقدار K_{cb} مورد انتظار برای پوشش گیاهی سالم با حداکثر رشد در یک خاک خشک است. هرگاه، کنترل روزنه‌ای پوشش گیاهی بیشتر از مقدار آن برای محصولات متداول باشد، باید ضریب K_{cb} بر پایه روش‌های پیشنهاد شده در بخش بعدی، مجدد کاهش یابد (معادله ۱۰۲).

مثال ۴۱- برآورد ضریب گیاهی در مرحله میانی رشد

در عرض جغرافیایی ۴۰ درجه شمالی با میانگین روزانه حداقل رطوبت نسبی ۵۵ درصد و سرعت باد (در ارتفاع دو متری) ۲ متر بر ثانیه، ضرایب $K_{cb\ mid}$ و $K_{c\ mid}$ در مرحله میانی رشد برای پوشش گیاهی مستطیل شکل که در آن ارتفاع گیاه و پهنای کشت ۲ متر، کسر پوشش گیاهی $f_c = 0.30$ است، را در روز ۱۹ ژوئیه برآورد کنید.

در ۱۹ ژوئیه $J = 200$ و در عرض جغرافیایی ۴۰ درجه شمالی یا $\phi = 40 \times (\frac{\pi}{180}) = 0.70$ رادیان، زاویه میل خورشید با استفاده از معادله ۲۴ برابر $\delta = 0.36$ رادیان است.

در ظهر خورشید ($\omega = 0$)، داریم:

$$\sin(\eta) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) = 0.94$$

مقدار η با محاسبه $\arccos$ سینوس از رابطه فوق، $1/24$ رادیان و $\tan(\eta) = 2/8$ است. اگر $f_c = 0.30$ و HWR برای پوشش گیاهی ۱ باشد، پس $f_{c\ eff}$ از کادر ۱۸ برابر $0.41 = 0.30 \times (1 + (\frac{1}{2/8}))$ خواهد بود.

$$K_{cb,h} = 1 + 0.1(2) = 1.2 \quad \text{از معادله ۱۰۱:}$$

$$K_{cb\ full} = 1/2 + [0.04 \times (1/5 - 2/0) - 0.04 \times (55 - 45)] \times (\frac{2}{3})^{1/3} = 1/15 \quad \text{از معادله ۱۰۰:}$$

بنابراین، ضریب $K_{cb\ mid}$ از معادله ۹۸ برای $K_{c\ min} = 0.15$ به صورت زیر برآورد می شود:

$$K_{cb\ mid} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min}) \min[1, 2f_c (f_{c\ eff})^{\frac{1}{1+h}}]$$

$$= 0.15 + (1/15 - 0.15) \min[1, 2(0.3), (0.4)^{\frac{1}{1+2}}] = 0.75$$

اصلاح مقدار فوق برای اقلیم ضروری نمی باشد.

ضریب $K_{c\ mid}$ (هنگامی که میانگین اثرات خیس شدن سطح خاک در آن گنجانده شود)، را می توان با استفاده از روش های محاسباتی که در ابتدای این فصل بیان شد، از ضریب $K_{cb\ mid}$ بدست آورد.

$$K_{c\ mid} = K_{cb\ mid} + (0.05 \dots 0.10) = 0.80 \dots 0.85$$

که مقدار آن به فاصله خیس شدن سطح خاک بستگی دارد.

ضرایب گیاهی برآورد شده برای مرحله میانی رشد $K_{cb\ mid} = 0.75$ و ضریب $K_{c\ mid}$ از 0.80 تا 0.85 متغیر است.

مثال ۴۲- برآورد ضریب گیاهی در مرحله میانی رشد برای پوشش گیاهی کم‌پشترشد

در دیویس کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)، می‌توان برآورد دقیق‌تری از ضریب $K_{cb \text{ mid}}$ گوجه‌فرنگی مثال ۴۰ با پوشش گیاهی ۵۰ درصد، فاصله کشت ۱/۵۲ متر در جهت شرق به غرب، ارتفاع ۰/۷۵ متر، نسبت ارتفاع به پهنای ردیف‌های کشت (در جهت شرق به غرب) مساوی با ۱، را ارائه کرد. عرض جغرافیایی دیویس- کالیفرنیا، ۳۸/۵ درجه شمالی و ۲۰ ژوئیه، نیمه مرحله میانی رشد گیاه است.

ضریب $K_{cb \text{ mid}}$ اصلاح شده برای گوجه‌فرنگی با پوشش گیاهی ۵۰ درصد، را تعیین کنید.

در ۲۰ ژوئیه $J=201$ و در عرض جغرافیایی ۳۸/۵ درجه شمالی یا $\phi = 38.5 \times (\frac{\pi}{180}) = 0.67$ رادیان، زاویه میل خورشید با استفاده از معادله ۲۴، برابر $\delta = 0.36$ رادیان است.

در ظهر خورشید که $\omega = 0$ است، داریم:

$$\sin \eta = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) = 0.95$$

مقدار η ، با محاسبه arc سینوس رابطه فوق برابر ۱/۲۶ رادیان است. بنابراین، برای $HWR=1$ و $f_c=0.50$ ، پوشش گیاهی مؤثر برای ردیف‌های کشت شرق به غرب (کادر ۱۸) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f_{c \text{ eff}} = 0.50 \times [1 + (\frac{1}{\tan(1/26)})] = 0.66$$

برای گوجه‌فرنگی با پوشش گیاهی کامل، ضریب $K_{cb \text{ mid}}$ در جدول ۱۷ برابر ۱/۱۵ و میانگین h حدود ۰/۷۵ متر است. اصلاح ضریب گیاهی برای اقلیم (با استفاده از معادله ۹۹) به صورت زیر می‌باشد:

$$K_{cb \text{ full}} = 1/15 + [0.4 \times (1/1 - 2) - 0.04 \times (30 - 45)] \times (\frac{0.75}{3})^{0.30} = 1/17$$

از معادله ۹۸ و با استفاده از $K_{c \text{ min}} = 0.15$ ، ضریب $K_{cb \text{ mid}}$ اصلاح شده برای پوشش گیاهی ۵۰ درصد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{cb \text{ mid adj}} = 0.15 + (1/17 - 0.15) \min[1, 2(0.5), 66(\frac{1}{1 + 0.76})] = 0.95$$

ضریب $K_{cb \text{ mid adj}} = 0.95$ برای پوشش گیاهی ۵۰ درصد، مشابه برآورد اولیه در مثال ۴۰ بوده و قابل مقایسه با مقادیر ۰/۹۰ تا ۱/۰۰ برای ضریب $K_{cb \text{ mid}}$ است که در لایسمترهای دقیق توسط پروت و همکاران (۱۹۸۴) اندازه‌گیری شده‌اند.

اصلاح مرحله میانی رشد برای کنترل روزه‌ای

ضریب $K_{cb \text{ full}}$ در معادله‌های ۹۷ و ۹۸، ممکن است، برای پوشش گیاهی با کنترل روزه‌ای بالا، مورد نیاز باشد. برای پوشش گیاهی بیابانی یا درختان با مقاومت (سطح) برگ بیشتر از محصولات کشاورزی (به طور معمول، با r_l حدود ۱۰۰ ثانیه بر متر)، $K_{cb \text{ mid}}$ برآورد شده با معادله‌های ۹۷ و ۹۸ می‌تواند با ضرب در یک ضریب اصلاح مقاومت (F_r)، تعدیل شود. ضریب اصلاح مقاومت بر پایه معادله پنمن - مانتیت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_r \approx \frac{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}{\Delta + \gamma \left[1 + 0.34u_2 \frac{r_l}{100} \right]} \quad (102)$$

که در آن، I_1 میانگین مقاومت برگ برای پوشش گیاهی مورد نظر [ثانیه بر متر] می‌باشد. میانگین مقاومت برگ برای گیاه مرجع چمن و بسیاری از محصولات ۱۰۰ ثانیه بر متر است. مقادیر I_1 بسیاری از گیاهان کشاورزی و غیرکشاورزی را می‌توان در نتایج بررسی‌های کرنر و همکاران^۱ (۱۹۷۸) و آلن و همکاران^۲ (۱۹۹۶) یافت. معادله ۱۰۲، تنها اثر زبری آئرودینامیک ثابت چمن را منعکس می‌کنند. زیرا، ضریب گیاهی اصلاح شده که قبلاً در تبخیر - تعرق گیاه مرجع چمن ضرب شده، اثرات زبری آئرودینامیک پوشش گیاهی مشخص را منعکس کرده است (به مثال ۴۳ مراجعه شود).

مثال ۴۳- برآورد ضریب گیاهی پایه در مرحله میانی رشد ($K_{cb\ mid}$) از روی پوشش گیاهی سطح زمین با کاهش آن برای کنترل روزنه‌ای

در یک باغ زیتون، فاصله کشت، قطر سایه‌انداز از بالا به ترتیب ۱۰ و ۵ متر است. ۱/۵ متر بخش پایین تنه درختان بدون شاخ و برگ می‌باشد. سطح خاک بین درختان فاقد پوشش گیاهی است. در مرحله میانی دوره رشد، میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری، ۲۰ متر بر ثانیه و میانگین حداقل رطوبت نسبی ۲۵ درصد است. ۲۹ ژوئن ($J=180$) نیمه مرحله میانی رشد گیاه بوده و عرض جغرافیایی محل مورد نظر ۳۰ درجه شمالی است. ضریب $K_{cb\ mid}$ با استفاده از معادله ۹۸ برای دو فاصله کشت ۱۰×۱۰ و ۵×۱۰ متر را برآورد کنید.

در ۲۹ ژوئن $J=180$ و در عرض جغرافیایی ۳۰ درجه شمالی که معادل $\phi = 30 \times (\frac{\pi}{180}) = 0.52$ رادیان بوده، زاویه میل خورشید با استفاده از معادله ۲۴ برابر $\delta = 0.405$ رادیان است. در ظهر خورشید که $\omega = 0$ است، داریم:

$$\sin \eta = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) = 0.99$$

از آنجا که، سایه‌انداز درختان زیتون کروی شکل هستند، کسر پوشش گیاهی مؤثر (کادر ۱۸) را می‌توان به صورت

$$\text{معادله } f_{c\ eff} = \frac{f_c}{(\sin(\eta))} \text{ برآورد کرد.}$$

f_c = کسر پوشش گیاهی که به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$f_c = \left(\frac{\pi \times (5)^2}{10 \times 10} \right) = 0.196$$

$$f_{c\ eff} = \frac{0.196}{0.99} = 0.20$$

از معادله ۱۰۱ برای گیاهی به ارتفاع ۲ متر، حداکثر مقدار $K_{cb,h}$ باید ۱/۲ یا کمتر باشد، پس در این مثال:

$$K_{cb,h} = 1 + 0.1 \times (5) > 1/2$$

$$K_{cb,h} = 1/2$$

1- Körner et al.

2- Allen et al.

$$K_{cb \text{ full}} = 1/2 + [0 - 0.004 \times (25 - 45)] \times \left(\frac{5}{3}\right)^{0.3} = 1/29 \quad \text{از معادله ۱۰۰:}$$

از معادله ۹۸ و با استفاده از $K_{c \text{ min}} = 0/15$:

$$K_{cb \text{ mid}} = 0/15 + (1/29 - 0/15) \min[1, 2 \times (0/196), (0/20)^{\left(\frac{1}{1+5}\right)}] = 0/60$$

کررر و همکاران (۱۹۷۹)، میانگین مقاومت برگ درختان زیتون (*Olea europaea*) را حدود ۴۲۰ ثانیه بر متر تعیین کردند. بنابراین، با فرض اینکه میانگین دمای هوا ۲۵ درجه سلسیوس و ارتفاع باغ از سطح دریا صفر و در نتیجه $\Delta = 0/189$ کیلوپاسکال (معادله ۱۳) و $\gamma = 0/067$ کیلوپاسکال (معادله ۸) باشد، ضریب اصلاح مقاومت با استفاده از معادله ۱۰۲ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$F_r \approx \frac{0/189 + 0/0676 \times [1 + 0/34(2)]}{0/189 + 0/0676 \times \left(1 + 0/34 \times (2) \times \left(\frac{420}{100}\right)\right)} = 0/67$$

بنابراین، مقدار $K_{cb \text{ mid}}$ اصلاح شده برای کنترل روزنه‌ای گیاه با استفاده از ضریب اصلاح مقاومت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$K_{cb \text{ mid adj}} = F_r \cdot K_{cb \text{ mid}} = 0/76 \times (0/60) = 0/40$$

مقدار $K_{cb \text{ mid adj}} = 0/40$ تعدیل شده برای $f_c = 0/2$ ، کمتر از مقدار $K_{cb \text{ mid}}$ جدول ۱۷ برای زیتون با کسر پوشش گیاهی (f_c)، $0/4$ تا $0/67$ است که حاصل تفاوت f_c ها می‌باشد. رقم ارائه شده $K_{cb \text{ mid}}$ در جدول ۱۷ مساوی با $0/70$ بوده که پس از اصلاح برای اقلیم با استفاده از معادله ۷۰ برابر $0/79$ است.

چنانچه، فاصله درختان زیتون 5×10 متر باشد (همان طور که در کالیفرنیا کشت می‌شوند)، از آنجا که مقادیر K_{cb} زیتون در جدول ۱۷ بر پایه این فاصله‌های کشت تعیین شده است بنابراین برای، $f_c = 0/39$ و $f_{c \text{ eff}} = 0/40$ و با استفاده از معادله ۹۸، ضریب گیاهی پایه مرحله میانی رشد $K_{cb \text{ mid}} = 1/04$ است. پس، $K_{cb \text{ mid}}$ اصلاح شده با استفاده از ضریب اصلاح مقاومت (یعنی، $F_r = 0/67$) برای افزایش کنترل روزنه‌ای، به صورت $K_{cb \text{ mid adj}} = 0/76 \times (1/04) = 0/70$ برآورد می‌شود. این رقم با عدد $0/79$ درختان بالغ در جدول ۱۷ پس از اصلاح برای اقلیم، قابل مقایسه می‌باشد.

ضریب گیاهی پایه در مرحله میانی رشد ($K_{cb \text{ mid}}$) با در نظر گرفتن تراکم کشت پایین (غیراستاندارد)، شرایط اقلیم و کنترل روزنه‌ای معادل $0/4$ است. این مقدار برای فاصله کشت 5×10 متر تا $0/7$ افزایش می‌یابد.

معادله ۱۰۲ چنانچه با زبری واقعی پوشش گیاهی یعنی هنگامی که مقاومت سطح برگ بیشتر از ۱۰۰ متر بر ثانیه است، استفاده شود، ضریب اصلاح مقاومت را کمتر (یعنی کاهش ضریب گیاهی پایه را بیشتر) از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. زیرا، اثر کاهش تبخیر - تفرق گیاه بر دما و نیمرخ کمبود فشار بخار در

هوای بالای سطح گیاه که در ادامه فرآیند تبخیر - تعرق بر شدت آن مؤثر خواهد بود، را نظر نمی‌گیرد. این پارامترها به طور معمول، با کاهش شدت تبخیر - تعرق گیاه افزایش یافته و در نتیجه کاهش ET_c را تعدیل می‌کنند.

مرحله پایانی رشد

در طول مرحله پایانی رشد گیاه، ضریب گیاهی پایه کاهش یافته و در انتهای دوره رشد مساوی با $K_{cb\ end}$ می‌شود. مقادیر $K_{cb\ end}$ را می‌توان متناسب با سالم بودن برگ‌های در پایان دوره رشد گیاه و بر پایه طول مرحله پایانی رشد (یعنی برگ‌ها به تدریج پلاسیده یا به سرما به طور هم زمان خشک شده)، با استفاده از $K_{cb\ mid}$ تعیین کرد. مقادیر $K_{cb\ end}$ ، به طور مشابه از $K_{cb\ mid}$ قابل محاسبه است هرچند، کاهش ضریب $K_{cb\ end}$ تحت متأثر از فاصله خیس شدن سطح خاک با آبیاری یا بارندگی ممکن است، به طور نسبی، پایین باشد.

برای انعکاس اثر کنترل روزنه‌ای گیاهان دارای I_1 بیشتر از محصولات کشاورزی (با I_1 حدود ۱۰۰ ثانیه بر متر) یا برگ‌های پلاسیده، باید ضریب $K_{cb\ end}$ برآورد شده با معادله‌های ۹۷ و ۹۸ کاهش یابد. در این حالت، مقادیر برآوردی $K_{cb\ end}$ باید در ضریب اصلاح مقاومت از معادله ۱۰۲ ضرب شوند. همچنین، باید ضرایب I_1 بالاتر از ۱۰۰ ثانیه بر متر کاهش یابند. به ازای دو برابر شدن این ضرایب نسبت به I_1 محصولات کشاورزی، مقدار آنها باید تحت دمای روزانه حدود ۳۰ درجه سلسیوس، ۱۰ درصد و تحت دمای ۱۵ درجه سلسیوس، ۲۰ درصد کاهش یابند.

ضریب گیاهی پایه در مرحله پایانی رشد می‌تواند نسبت به ضریب گیاهی پایه محاسبه شده در مرحله میانی و متناسب با نسبت برگ‌های سبز سالم باقیمانده در انتهای این دو مرحله، کاهش یابد که این اصلاح، اغلب، بر مبنای یک بررسی مشاهده‌ای در مزرعه صورت می‌پذیرد.

کسر پوشش گیاهی و ارتفاع گیاه، به طور احتمال، ساده‌ترین نمایه ارائه شده برای برآورد ضریب $K_{cb\ end}$ در مزرعه می‌باشد. تأکید می‌شود که برای برآورد اولیه ضریب گیاهی پایه در مرحله پایانی رشد، باید از معادله‌های ۹۷ و ۹۸ استفاده شود.

برآورد تبخیر - تعرق تحت شرایط غیراستاندارد با استفاده از عملکرد محصول

یک رابطه خطی ساده از تابع تولید محصول - آب برای برآورد کاهش عملکرد محصول تحت تنش آبی در نشریه فنی شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو معرفی شده است. این تابع در بخش‌های قبل این نشریه، به عنوان معادله ۹۰ آمده که در اینجا برای یادآوری ارائه می‌شود:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_{c\ adj}}{ET_c}\right) \quad (90)$$

که در آن:

$$Y_a = \text{عملکرد محصول واقعی [کیلوگرم بر هکتار]},$$

$$Y_m = \text{حداکثر عملکرد محصول (مورد انتظار) در شرایط بدون تنش‌های محیطی یا آبی},$$

$$K_y = \text{ضریب حساسیت عملکرد محصول [بدون واحد]},$$

$$ET_c = \text{تبخیر - تعرق بالقوه (مورد انتظار) گیاه در شرایط بدون تنش محیطی یا آبی (} K_c ET_o \text{) و}$$

$$ET_{c \text{ adj}} = \text{تبخیر - تعرق واقعی (اصلاح شده) گیاه تحت تنش‌های محیطی یا آبی، می‌باشند.}$$

در نشریه فنی ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو، برای برآورد اثر تنش آبی بر کاهش تبخیر - تعرق گیاه و در نتیجه برآورد کاهش عملکرد، K_y محصولات ارائه شده است. این ضرایب هنگامی که تنها در یک مرحله از رشد یا به طور یکنواخت در تمامی دوره رشد تنش آبی وجود داشته، برای برآورد کاهش عملکرد محصول قابل استفاده است. کاهش عملکرد فصلی، به صورت خلاصه، در جدول ۲۴ ارائه شده‌اند.

بسیاری از تنش‌ها نظیر کمبود آب، شوری، حاصلخیزی پایین و بیماری‌های گیاهی با کاهش شدت تبخیر - تعرق گیاه به کمتر از مقدار پتانسیل، بر عملکرد محصول اثر دارند. این اثر در شرایطی که عملکرد گیاهان تحت تراکم کشت پایین و غیراستاندارد کاهش دارد نیز، مشاهده می‌شود. بنابراین، برای یک برآورد کلی از تبخیر - تعرق (اصلاح شده) گیاه می‌توان معادله ۹۰ را بر حسب ضریب تنش (K_s)، به صورت زیر حل کرد:

$$K_s = 1 - \frac{1}{K_y} \left[1 - \frac{Y_a}{Y_m} \right] \quad (۱۰۳)$$

برای برآورد تبخیر - تعرق اصلاح شده گیاه تحت تنش آبی یا سایر تنش‌های محیطی یا تراکم کشت و حاصلخیزی پایین، ضریب K_s در K_{cb} یا K_c معادله‌های ۸۰ یا ۸۱ ضرب شده است. مقدار $ET_{c \text{ adj}}$ برآورد شده با استفاده از ضریب K_s از معادله ۱۰۳، تنها یک مقدار تقریبی از تبخیر - تعرق ماهانه یا حتی فصلی را برآورد می‌کند. معادله ۱۰۳ برای گیاهان علوفه‌ای و سایر محصولات مشابه که مقدار K_y آنها در طول دوره رشد، به طور تقریبی، ثابت است، نتیجه بهتری خواهد داشت.

معادله ۱۰۳ برای برآورد تبخیر - تعرق واقعی گیاه مورد استفاده در بررسی‌های موازنه آب منطقه، مطالعات تخلیه و تغذیه آب زیرزمینی یا برآورد آب مصرفی معتبر است. این روش برای برآورد تبخیر - تعرق گیاه روزانه یا هفتگی به دلیل کلی بودن ضریب K_y و اینکه مقدار عملکرد محصول، تنها، در انتهای فصل رشد گیاه قابل اندازه‌گیری است، اعتبار ندارد. روش‌هایی که در بخش‌های پیش برای اصلاح ET_c بر پایه موازنه روزانه آب خاک، توابع شوری یا کاهش ضریب گیاهی از روی سطح برگ یا کسر پوشش گیاهی ارائه شده‌اند، مناسب‌تر از معادله ۱۰۳ می‌باشند.

مثال ۴۴- برآورد تقریبی ضریب تنش (K_s) از روی عملکرد محصول

در یک طرح آبیاری برای کشت لوبیای خوراکی، کم آبیاری و کاهش عملکرد محصول پیش‌بینی شده است. میانگین عملکرد محصول گزارش شده در این طرح ۱۱۰۰ کیلوگرم بر هکتار و در این منطقه، حداکثر عملکرد برای این رقم لوبیا بدون تنش آبی یا محیطی و در خاک حاصلخیز، ۱۸۰۰ کیلوگرم بر هکتار می‌باشد.

ضریب K_y لوبیا از جدول ۲۴ یا از نشریه فنی شماره ۳۳ آبیاری و زهکشی فائو با فرض یکنواخت بودن تنش در طول فصل رشد، ۱/۱۵ است. بنابراین، ضریب K_s در طول فصل رشد گیاه از معادله ۱۰۳ برای کاربرد در معادله ۸، به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$K_s = 1 - \frac{1}{1/15} \times \left[1 - \frac{1100}{1800} \right] = 0/66$$

بنابراین، تبخیر - تعرق تعدیل شده برای فصل رشد گیاه، ۰/۶۶ حداکثر تبخیر - تعرق گیاه تحت شرایط بدون تنش آبی برآورد می‌شود.

پس، $ET_c = 0/66 ET_{c \text{ adj}}$ (فصلی) است و ET_c به صورت $ET_c = K_c \times ET_0$ محاسبه می‌گردد.

فصل دهم

تبخیر - تعرق گیاهان تحت انواع عملیات مدیریت زراعی

در این فصل، عوامل مختلف که، ممکن است، موجب تفاوت ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق گیاهان از مقادیر استاندارد ارائه شده در فصل‌های ششم و هفتم شده، بررسی می‌شود. این عوامل، به اثر مالچ‌های سطح خاک، کشت مخلوط، پوشش گیاهی کم وسعت و عملیات زراعی خاص اشاره دارند. در این فصل، روش برآورد ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق گیاه برای شرایطی که عملیات زراعی در آنها با فرض‌های جداول ۱۲ و ۱۷ متفاوت بوده، بیان شده است. هر چند مطالب (ارائه شده) جامع نمی‌باشند. هدف از ارائه این فصل، معرفی برخی روش‌های اصلاح ضریب گیاهی برای در نظر گرفتن اثر انحراف شرایط واقعی از استاندارد است.

اثر مالچ‌های سطحی

در تولید محصولات سبزی و صیفی، به طور وسیع، مالچ‌ها برای کاهش تبخیر از سطح خاک، افزایش رشد گیاه از طریق افزایش دمای خاک در اقلیم‌های سرد، کاهش فرسایش خاک یا کنترل علف‌های هرز استفاده می‌شوند. مالچ‌ها، ممکن است، مواد آلی گیاهی یا مصنوعی مانند ورقه‌های پلاستیک باشند.

مالچ‌های پلاستیک

مالچ‌های پلاستیک، به طور معمول، شامل ورقه‌های نازک از جنس پلی‌اتیلن و یا مواد مشابه هستند که سطح زمین، به ویژه، در امتداد ردیف‌های کشت را می‌پوشانند. سوراخ‌هایی در فواصل مشخص بر روی ورقه‌های پلاستیک تعبیه می‌شوند به نحوی که، جوانه‌های گیاه از آن خارج شوند و رشد کنند. مالچ‌های پلاستیک می‌توانند شفاف، سفید یا سیاه باشند. رنگ مالچ، به ویژه، در مراحل اولیه رشد گیاه بر شدت بازتابش نور مؤثر است. برای ساده شدن محاسبه، تفاوت انواع مالچ‌های پلاستیک در اصلاح ضریب گیاهی در نظر گرفته نمی‌شود.

مالچ‌های پلاستیک تبخیر از سطح خاک را، به ویژه، در سامانه‌های آبیاری قطره‌ای به طور قابل ملاحظه کاهش می‌دهند. همراه با کاهش تبخیر، تعرق گیاه به دلیل انتقال گرمای محسوس و گرمای تابشی از پوشش پلاستیک به پوشش گیاهی افزایش می‌یابد. هر چند، شدت تعرق گیاه در فصل رشد تحت شرایط استفاده از مالچ در مقایسه با عدم استفاده از آن، به طور میانگین، ۱۰ تا ۳۰ درصد افزایش دارد. لیکن، ضریب گیاهی به دلیل کاهش ۵۰ تا ۸۰ درصد تبخیر از سطح خاک، به طور میانگین، ۱۰ تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. خلاصه‌ای از مقادیر کاهش ضریب گیاهی حاصل از کاهش تبخیر و افزایش تعرق در دوره رشد

برای پنج نوع محصول سبزی و صیفی در جدول ۲۵ ارائه شده است. میزان رشد گیاه و عملکرد محصول سبزی و صیفی با استفاده از مالچ‌های پلاستیک، افزایش می‌یابد.

ضرب گیاهی یک جزئی

برای در نظر گرفتن اثر کاربرد مالچ پلاستیک بر تبخیر - تعرق گیاه، ضرایب گیاهی مراحل میانی و پایانی رشد محصولات سبزی و صیفی ارائه شده در جدول ۱۲، می‌تواند بر پایه فاصله آبیاری، حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد کاهش یابد (عدد بزرگتر برای فاصله آبیاری کوتاه مشابه آبیاری قطره‌ای). ضرب گیاهی مرحله اولیه رشد تحت شرایط استفاده از مالچ، اغلب، کم و حدود ۰/۱۰ است. هنگامی که مالچ پلاستیک سطح خاک مرطوب شده توسط گسیلنده‌ها را، به طور کامل، نپوشاند یا مقدار بارندگی قابل ملاحظه باشد، ضرایب گیاهی مراحل میانی و پایانی رشد متناسب با کسر سطح خاک خیس شده تحت پوشش مالچ، کاهش کمتری خواهند داشت.

ضرب گیاهی دوجزئی

به طور معمول، هنگام برآورد ضرب گیاهی پایه، در شرایطی که از مالچ استفاده می‌شود، تعدیل کمتری برای ارقام منحنی ضرب گیاهی پایه به صورت کاهش حدود ۵ تا ۱۵ درصد، مورد نیاز است. زیرا، مالچ پلاستیک تبخیر پایه از سطح خاک را کاهش و تعرق گیاه را افزایش می‌دهد. اثر مالچ بر ضرب گیاهی پایه در بعضی شرایط و برای برخی گیاهان با تراکم کشت کم، می‌تواند قابل ملاحظه باشد. واسنجی محلی ضرب گیاهی پایه (و ضرب گیاهی) تحت شرایط استفاده از مالچ توصیه می‌شود.

جدول ۲۵- مقادیر تقریبی کاهش ضرب گیاهی و تبخیر از سطح خاک و افزایش تعرق برای چند نوع سبزی و صیفی تحت آبیاری قطره‌ای از دو شرایط بدون و با استفاده کامل از مالچ پلاستیک.

منبع	افزایش* تعرق (درصد)	کاهش* تبخیر (درصد)	کاهش* ضرب گیاهی (درصد)	محصول
صفادی ^۱ (۱۹۹۱)	۱۰-۳۰	۴۰-۷۰	۵-۱۵	اسفناج
صفادی (۱۹۹۱)	۱۵-۳۰	۴۰-۶۰	۱۵-۲۰	خیار
بتیخی و هیل ^۲ (۱۹۹۸)	۳۵	۸۰	۵-۱۰	طالبی
بتیخی و هیل (۱۹۹۸) قاوی و بتیخی ^۳ (۱۹۸۶)	-۱۰	۹۰	۲۵-۳۰	هندوانه
حدادین و قاوی ^۴ (۱۹۸۳)	گزارش نشده	گزارش نشده	۳۵	گوجه‌فرنگی
	۱۰-۳۰	۵۰-۸۰	۱۰-۳۰	میانگین

* نسبت به شرایط بدون کاربرد مالچ

1-Safadi

2-Battikhi & Hill

3-Battikhi & Ghawi

4-Haddadin & Ghawi

در محاسبه ضریب تبخیر خاک تحت مالچ پلاستیک، کسر سطح خاک خیس شده (f_w) باید نشان‌دهنده نسبت مجموع سطح خاک خیس زیر سوراخ‌ها و سهم تبخیر و سطح خاک خیس بدون پوشش مالچ باشد. سطح مؤثر سوراخ‌های تهویه برای انتقال بخار آب زیر سطح مالچ، به طور معمول، دو تا چهار برابر سطح هندسی آنها (یا حتی بیشتر از آن) است.

مالچ‌های آلی

مالچ‌های آلی، اغلب، در باغ‌ها و گیاهان ردیفی با عملیات شخم و شیار کمینه^۱ استفاده می‌شود. مالچ‌های آلی، ممکن است، شامل بقایای گیاهی کشت پیشین یا مواد آورده شده به محل نظیر کاه و گُلش باشد. عمق مالچ آلی و کسر سطح خاک تحت پوشش آن، بسیار متغیر است. این دو عامل بر مقدار کاهش تبخیر از سطح خاک مؤثر می‌باشند. اثر مالچ سطحی بر ضرایب گیاهی در مثال ۴۵ ارائه شده است.

مثال ۴۵- اثر مالچ سطحی

سطح یک مزرعه خیار با مالچ پلاستیک شفاف دارای یک سوراخ برای هر بوته، پوشانده شده است و با سامانه قطره‌ای آبیاری می‌شود. ضرایب گیاهی میانگین و پایه خیار برای شرایطی که تأثیر مالچ را نشان دهد، تعیین کنید.

مقادیر $K_{c\ ini}$ ، $K_{c\ mid}$ و $K_{c\ end}$ خیار در جدول ۱۲ به ترتیب ۰/۴، ۱/۰ و ۰/۷۵ است.

از آنجا که، مالچ پلاستیک یکپارچه بوده و تنها، دارای سوراخ‌های کوچک برای هر بوته است، ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد ۰/۱۰ فرض می‌شود (این مقدار در صورت بارندگی، باید افزایش یابد).
مقادیر $K_{c\ mid}$ و $K_{c\ end}$ به صورت زیر برآورد می‌شوند:

$$K_{c\ mid} = 0/85 \times (1/00) = 0/85$$

$$K_{c\ end} = 0/85 \times (0/75) = 0/64$$

از جدول ۲۵، کاهش تبخیر - تعرق گیاه تحت تأثیر پوشش مالچ ۱۵ درصد بوده که در نتیجه ضریب تعدیل ۰/۸۵ می‌باشد. فاصله آبیاری ۷ روز فرض شده است.

ضرایب $K_{c\ ini}$ ، $K_{c\ mid}$ و $K_{c\ end}$ برای خیار از جدول ۱۷ به ترتیب ۰/۱۵، ۰/۹۵ و ۰/۷ می‌باشند. فرض شده که مقدار $K_{cb\ ini}$ مشابه مقدار $K_{c\ ini}$ در شرایط استفاده از مالچ بوده و بنابراین ۰/۱ است. پیش بینی می‌شود که ضرایب $K_{cb\ mid}$ و $K_{c\ end}$ حدود ۱۰ درصد کاهش یابند. پس:

$$K_{cb\ mid} = 0/9 \times 0/95 = 0/86$$

$$K_{cb\ end} = 0/9 \times 0/70 = 0/63$$

این مقادیر، مشابه ضرایب گیاهی اصلاح شده می‌باشند. این نتیجه، همان طور که انتظار می‌رفت، نشان می‌دهد که تبخیر از سطح خاک تحت مالچ ناچیز است. اصلاح این ضرایب برای اثر اقلیم واقعی با استفاده از معادله‌های ۶۲ و ۷۰ ضروری است.

میانگین ضریب گیاهی مشابه ضریب گیاهی پایه است. ضرایب گیاهی مراحل اولیه ۰/۱۰، میانی ۰/۸۵ و پایانی رشد ۰/۶۴ می‌باشند.

ضریب گیاهی یک جزئی

هنگام استفاده از ضرایب گیاهی جدول ۱۲، در یک قاعده کلی، به ازای هر ۱۰ درصد از سطح خاک که به طور مؤثر تحت پوشش مالچ آلی باشد، تبخیر حدود ۵ درصد کاهش می‌یابد. برای مثال، اگر ۵۰ درصد سطح خاک با بقایای گیاهی پوشیده شده باشد، تبخیر خاک حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

- در مورد ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد که، به طور عمده، نمایانگر تبخیر خاک است، در شرایط استفاده از مالچ، می‌توان آن را حدود ۲۵ درصد کاهش داد.
- در مورد ضرایب گیاهی مراحل میانی و پایانی رشد، می‌توان آنها را به مقدار ۲۵ درصد تفاوت میان ارقام $(K_{c\ mid} - K_{cb\ mid})$ و $(K_{c\ end} - K_{cb\ end})$ از جداول ۱۲ و ۱۷، کاهش داد. به طور کلی، تفاوت بین مقادیر جداول ۱۲ و ۱۷ تنها ۵ تا ۱۰ درصد است بنابراین، مقدار اصلاح ضرایب گیاهی مراحل میانی و پایانی رشد برای در نظر گرفتن اثر مالچ آلی، ممکن است، چندان زیاد نباشد.

ضریب گیاهی دوجزئی

هنگام بکارگیری روش ضریب گیاهی دو جزئی با استفاده از روش موازنه آب لایه خاک سطحی، مقدار جزء تبخیر $(K_e ET)$ ، به ازای هر ۱۰ درصد سطح خاک تحت پوشش مالچ آلی، باید حدود ۵ درصد کاهش یابد. ضریب گیاهی پایه تغییر نمی‌کند.

این پیشنهادات تخمینی است و برای توجه به اثر انعکاس جزئی^۱ تابش خورشید از سطح بقایای گیاهی، همرفت گرما خرد مقیاس^۲ از بقایای گیاهی به سمت خاک، حرکت افقی آب خاک از زیر بقایای گیاهی به سمت سطح خاک بدون پوشش و اثر عایق بودن مالچ آلی ارائه شده‌اند. با توجه به تغییرات وسیع این عوامل، در صورت نیاز به برآوردهای دقیق، بررسی و اندازه‌گیری محلی ضروری است.

کشت مخلوط

کشت مخلوط، کشت توأم دو گیاه متفاوت در داخل یک مزرعه است که برای برآورد ضریب گیاهی آن، حالت‌های زیر در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴۵):

- پوشش گیاهی پیوسته^۳، که در آن پوشش گیاهی دو محصول در یک ارتفاع مشخص تداخل می‌یابند و پیوسته می‌شوند (مانند کشت مخلوط ذرت و لوبیا).
- پوشش گیاهی همپوشان^۴، که در آن ارتفاع دو گیاه متفاوت است و پوشش گیاهی یک محصول بر بالای دیگری سایه‌اندازی دارد لیکن، پوشش گیاهی را نمی‌توان پیوسته فرض کرد (نظیر درختان خرما که در یک واحه^۵ بر روی درختان انار سایه‌اندازی دارند).

1-Partial reflection

2-Microadvection

3- Contiguous vegetation

4- Overlapping crops

5- Oasis

- پوشش گیاهی نواری^۱، که در آن بادشکن‌ها یا درختان بلند در حاشیه محصولات کوتاه کشت شده‌اند.

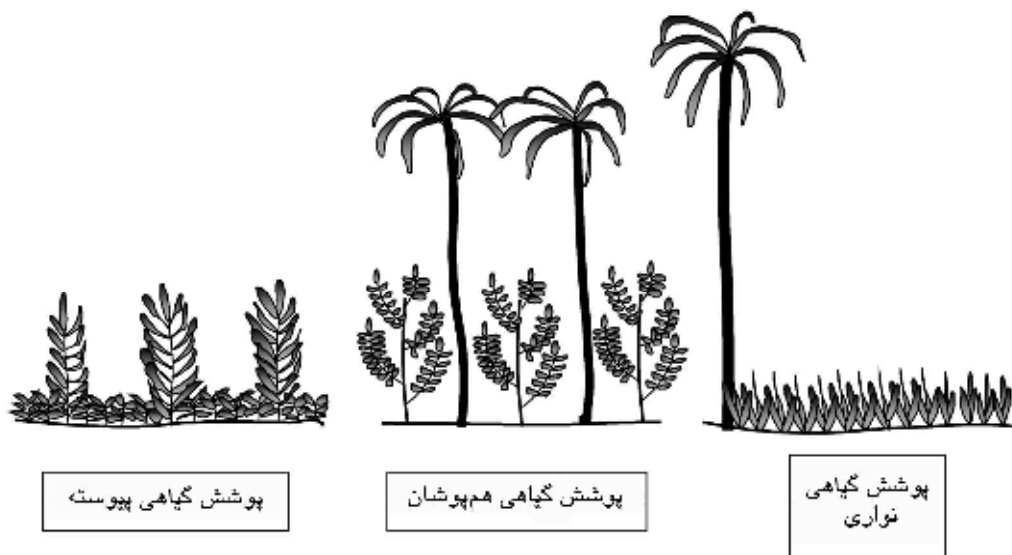
یک کران بالا از انرژی قابل دسترس برای تبخیر آب وجود دارد. این مقدار با نماد $K_{c \max}$ (معادله ۷۲ فصل هفتم) برای تمامی محصولات دارای سطح کشت بیشتر از ۳ تا ۵ هکتار نشان داده شده است.

$$K_{c \max} = \max \left\{ \left\{ 1.2 + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)] \left(\frac{h}{3} \right)^{0.3} \right\}, \{K_{cb} + 0.05\} \right\} \quad (72)$$

که در آن، h ارتفاع گیاه بلندتر است. ضریب گیاهی کشت مخلوط کمتر یا مساوی حداکثر ضریب گیاهی باشد ($K_c \leq K_{c \max}$).

پوشش گیاهی پیوسته

هنگامی که شاخ و برگ‌های پایین گیاه بلندتر هم ردیف تاج گیاه کوتاه‌تر قرار گیرد، پوشش گیاهی پیوسته فرض می‌شود. به عنوان مثال، در آفریقا و آمریکا، یک ردیف ذرت با یک یا چند ردیف لوبیا یک نمونه از پوشش گیاهی پیوسته می‌باشد. کشت مخلوط پنج تا هفت ردیف گندم با سه ردیف ذرت در بسیاری از مناطق چین نیز مثال دیگری از پوشش گیاهی پیوسته است.



شکل ۴۵- انواع مختلف کشت مخلوط

پوشش گیاهی پیوسته یکنواخت

هنگامی که در کشت مخلوط، سطح برگ یا کسر پوشش گیاهی دو محصول، مشابه باشند، ضریب گیاهی برای گیاه بلندتر از جداول ۱۲ و ۱۷ تعیین شده و (اگر مقدار آن بزرگتر باشد) به عنوان ضریب گیاهی کشت مخلوط در کل مزرعه در نظر گرفته می‌شود. گیاه بلندتر، در برخی شرایط، اثر کلاس لاین^۱ داشته و ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق آن در واحد سطح بیشتر از ارقام جداول ۱۲ و ۱۷ خواهد بود. هرچند، ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق گیاه کوتاه‌تر، ممکن است، به دلیل تأثیر بادشکن گیاه بلندتر کاهش یابد. در نتیجه، ضریب گیاهی کل کشت مخلوط برابر میانگین وزنی دو ضریب گیاهی دو محصول از جداول ۱۲ و ۱۷ یا، به طور تقریبی، نزدیک به ضریب گیاهی مزرعه در شرایطی است که تنها گیاه بلندتر در آن کشت شود ($K_{c \text{ field}} \approx K_{c \text{ taller crop}}$). گیاه کوتاه‌تر، ممکن است، به دلیل اثر سایه‌اندازی گیاه بلندتر و رقابت در جذب آب، عملکرد کمتری نسبت به شرایط کشت یکنواخت آن داشته باشد.

پوشش گیاهی پیوسته غیریکنواخت

هرگاه، کسر پوشش گیاهی دو محصول متفاوت باشد، ضریب گیاهی کشت مخلوط بر حسب میانگین وزنی ضرایب گیاهی دو محصول بر پایه کسر پوشش گیاهی و ارتفاع هر گیاه، محاسبه می‌شود:

$$K_{c \text{ field}} = \frac{f_1 h_1 K_{c1} + f_2 h_2 K_{c2}}{f_1 h_1 + f_2 h_2} \quad (۱۰۴)$$

که در آن f_1 و f_2 به ترتیب کسر پوشش گیاهی دو محصول و h_1 ، h_2 و K_{c1} ، K_{c2} به ترتیب ارتفاع و ضرایب گیاهی آنها می‌باشند (به مثال ۴۶ مراجعه شود).

پوشش گیاهی هم‌پوشان

در این کشت مخلوط، پوشش گیاهی یک گیاه شاخ و برگ گیاه دیگر را می‌پوشاند. به عنوان مثال در جنوب کالیفرنیا، درختان مرکبات در زیر درختان خرما کاشته می‌شوند. چنانچه تراکم کشت درختان مرکبات و خرما عادی باشد، ضریب گیاهی کشت مخلوط با افزایش تراکم کشت و متناسب با افزایش نمایه سطح برگ (مثال ۴۷)، تا حداکثر ضریب گیاهی یعنی $K_{c \text{ max}}$ (معادله ۷۲) یا $K_{cb \text{ full}}$ (معادله ۹۹ و ۱۰۰)، افزایش می‌یابد. مگر آن که، کل سطح مزرعه تا حدی کوچک باشد که اثر کلاس لاین یا اثر واحه (که در بخش بعد بررسی شده)، مشاهده شود.

1- Clothesline

مثال ۴۶ - کشت مخلوط ذرت و کدو

برای یک کشت مخلوط ذرت و کدو که در آن ذرت با فاصله یک متر و کدو با فاصله دو متر به صورت ردیفی کشت شده‌اند، ضریب گیاهی مرحله میانی رشد کشت مخلوط را تعیین کنید. حداقل رطوبت نسبی ۴۵ درصد و سرعت باد در ارتفاع دو متری، ۲ متر بر ثانیه می‌باشد.

در جدول ۱۲، K_c mid و h برای ذرت به ترتیب ۱/۲ و ۲ متر و برای کدو به ترتیب ۰/۹۵ و ۳ متر است. اصلاح ضریب گیاهی کشت مخلوط برای اقلیم مورد نیاز نمی‌باشد. میانگین وزنی K_c mid کشت مخلوط، بر پایه مقادیر K_c mid گیاهان و به تناسب نسبت سطح کشت (f_1 ذرت ۰/۳ و f_2 کدو ۰/۷) و ارتفاع هر گیاه و با استفاده از معادله (۱۰۴) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$K_{c\text{ mid}} = \frac{0/3 \times (2) \times (1/20) + 0/7 \times (0/3) \times (0/95)}{0/3 \times (2) + 0/7 \times (0/3)} = 1/14$$

ضریب گیاهی روزانه کشت مخلوط را نیز می‌توان، با ترسیم منحنی‌های جداگانه ضریب گیاهی دو محصول و انتخاب ضرایب گیاهی جداگانه از روی این منحنی‌ها برای هر روز مشخص و سپس تعیین میانگین وزنی ارقام بدست آمده با استفاده از معادله ۱۰۴، تعیین کرد.

ضریب گیاهی کشت مخلوط در مرحله میانی رشد ۱/۱۴ می‌باشد.

پوشش گیاهی نواری

هنگامی که گیاهان بلند مانند بادشکن‌ها یا درختان خرما در حاشیه مزارع دارای گیاهان کوتاه‌تر قرار داشته باشند، بخش بالایی گیاهان بلند، انرژی گرمای محسوس بیشتری را دریافت می‌کنند و در این شرایط، ضریب گیاهی این پوشش گیاهی نواری، بر پایه میانگین وزنی کسر سطح کشت هر گیاه تعیین می‌شود. قبل از آن، باید ضریب گیاهی نوار حاشیه که بلندتر از گیاهان داخل مزرعه می‌باشد، برای اثر کلاس لاین بالقوه، اصلاح شود (به توضیحات بخش بعد مراجعه شود).

سطوح پوشش گیاهی کم وسعت

پوشش گیاهی طبیعی و برخی محصولات معیشی کشاورزان، به طور معمول، در تناوب با سایر گیاهان زراعی و سطوح گیاهی گسترده واقع می‌شوند. مقدار ضریب گیاهی این کشت‌های کم وسعت به نوع و وضعیت پوشش گیاهی مناطق اطراف بستگی دارد.

سطوح پوشش گیاهی محصور در گیاهان با زبری و رطوبت مشابه

اغلب، در مناطق با وسعت بیشتر از ۲۰۰۰ مترمربع، تبخیر - تعرق تابع اصول تبادل یک بعدی انرژی و، همچنین، اصل بقای انرژی است، ضریب گیاهی پوشش‌های طبیعی یا محصولات با تراکم کشت پایین باید به کران‌های بالای ضریب گیاهی (یعنی، ۱/۲ تا ۱/۴) نزدیک شود. تبخیر - تعرق از سطوح کشت کوچک‌تر از ۲۰۰۰ مترمربع، نیز، هنگامی که ارتفاع پوشش گیاهی، سطح برگ و آب قابل استفاده خاک با محیط اطراف مشابه باشند، تابع همین اصول و مقادیر کران‌ها می‌باشد.

مثال ۴۷- گیاهان هم پوشان

در صحرای پالم-کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)، ۲۰ هکتار درخت نخل کشت شده و فاصله درختان از یکدیگر ۶ متر است. در بین درختان خرما، درختان کوتاه پرتقال (پوشش گیاهی ۵۰ درصد) با فاصله ۶ متر کشت شده‌اند. بنابراین، فاصله درختان خرما و پرتقال از یکدیگر ۳ متر می‌باشد. ارتفاع درختان نخل و پرتقال به ترتیب ۱۰ و ۳ متر است. پوشش گیاهی درختان نخل در بالای تاج درختان پرتقال سایه‌اندازی دارد لیکن، پوشش گیاهی را نمی‌توان پیوسته فرض کرد. در مرحله میانی رشد، میانگین حداقل رطوبت نسبی ۲۰ درصد و سرعت باد در ارتفاع دو متری، ۲ متر بر ثانیه است. مقدار $K_c \text{ mid}$ از جدول ۱۲ برای درخت خرما ۰/۹۵ بوده و پس از اصلاح برای اثر رطوبت و باد با استفاده از معادله ۶۲ برابر ۱/۰۹ است. از جدول ۱۲، مقدار $K_c \text{ mid}$ مرکبات برای پوشش گیاهی ۵۰ درصد و خاک بدون پوشش ۰/۶ و پس از اصلاح برای اثر رطوبت و باد با استفاده از معادله ۶۲ برابر ۰/۷ است.

کشت مخلوط درختان مرکبات و نخل، کل سطح برگ مزرعه را افزایش می‌دهد و تبخیر - تعرق کشت مخلوط (نخل و مرکبات) بیشتر از کشت جداگانه آنها خواهد بود. مقدار $K_c \text{ mid}$ کشت مخلوط به عنوان تابعی از نمایه سطح برگ کشت مخلوط، قابل برآورد است. ابتدا، نمایه سطح برگ با حل معادله ۹۷ برای LAI کشت‌های جداگانه برآورد می‌شود:

$$LAI = -1.4 \ln \left[1 - \frac{K_{cb} - K_{c \min}}{K_{cb \text{ full}} - K_{c \min}} \right]$$

که در آن، $K_{c \min}$ ، حداقل ضریب گیاهی پایه برای خاک بدون پوشش (حدود ۰/۱۵ تا ۰/۲۰)، $K_{cb \text{ full}}$ حداکثر ضریب گیاهی مورد انتظار برای مرحله میانی رشد در هنگامی است که پوشش گیاهی هر دو کشت کامل باشد و با استفاده از معادله ۹۹ محاسبه می‌شود. بر پایه این معادله، برای درختان نخل و مرکبات با ارتفاع به ترتیب ۱۰ و ۳ متر، مقادیر $K_{cb \text{ full}}$ ، با فرض کامل بودن پوشش گیاهی هر دو کشت، به ترتیب ۱/۳۴ و ۱/۳۰ است در حداقل رطوبت نسبی ۲۰ درصد و میانگین سرعت باد ۲ متر بر ثانیه). در این برآورد از اثر کنترل روزنه ای در شرایط غیرعادی صرف نظر می‌شود. بنابراین، مقادیر LAI مؤثر برای درختان نخل و مرکبات با استفاده از معادله فوق، به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$LAI_{\text{palms}} = -1/4 \ln \left[1 - \frac{1/09 - 0/15}{1/34 - 0/15} \right] = 2/2$$

$$LAI_{\text{citrus}} = -1/4 \ln \left[1 - \frac{0/70 - 0/15}{1/30 - 0/15} \right] = 0/9$$

بنابراین، LAI مؤثر برای پوشش کشت مخلوط درختان خرما و مرکبات عبارت است از:

$$LAI_{\text{کشت مخلوط}} = LAI_{\text{palms}} + LAI_{\text{citrus}} = 2/2 + 0/9 = 3/1$$

ادامه مثال ۴۷-

مقدار افزایش $K_{c\ mid}$ کشت مخلوط، که نتیجه افزایش نمایه سطح برگ باغ مخلوط نخل - مرکبات می باشد، با استفاده از معادله ۹۷ به صورت زیر برآورد می شود:

$$K_{c\ mid} = K_{c\ mid, single\ crop} \left[\frac{1 - \exp(-0.7LAI_{combined})}{1 - \exp(-0.7LAI_{single\ crop})} \right]$$

که در آن، $LAI_{combined}$ نمایه سطح برگ پوشش گیاهی کشت مخلوط، $LAI_{single\ crop}$ نمایه سطح برگ گیاه بلندتر و $K_{c\ mid}$ ، $K_{c\ single\ crop}$ ضریب گیاهی گیاه بلندتر (در اینجا نخل)، در مرحله میانی رشد می باشد. حل معادله فوق در این مثال به صورت زیر ارائه می شود:

$$K_{c\ mid} = ۱/۰۹ \left[\frac{1 - \exp(-۰/۷ \times (۳/۱))}{1 - \exp(-۰/۷ \times (۲/۲))} \right] = ۱/۲۳$$

بنابراین، مقدار ضریب گیاهی کشت مخلوط نخل - مرکبات در مرحله میانی رشد، $۱/۲۳$ برآورد می شود. این مقدار، با حداکثر ضریب گیاهی مورد انتظار بر مبنای انرژی قابل دسترس، که با استفاده از معادله ۷۲ محاسبه و با $K_{c\ max}$ نشان داده شده، مقایسه می شود. این ضریب برای درختان با ارتفاع ۱۰ متر در این مثال، $۱/۳۴$ است. از آنجا که $K_{c\ mid} < K_{c\ max}$ (یعنی $۱/۲۳ < ۱/۳۴$) می باشد پس، مقدار $۱/۲۳$ به عنوان یک تقریب از ضریب گیاهی مرحله میانی رشد کشت مخلوط قابل قبول است.

اثر کلاس لاین و اثر واحه

در سطوح کشت کم وسعت، چنانچه به دلیل بلندتر بودن گیاهان (تفاوت زبری) یا تفاوت آب قابل استفاده خاک (تفاوت رطوبت)، اثرات کلاس لاین و اثر واحه بوجود آید، ممکن است ضریب گیاهی بیشتر از $۱/۲۰ - ۱/۴۰$ شود. بنابراین، تعمیم این مقادیر به مناطق سطوح کشت وسیع تر، ممکن است، موجب برآورد بیشتر از واقع تبخیر - تعرق شود.

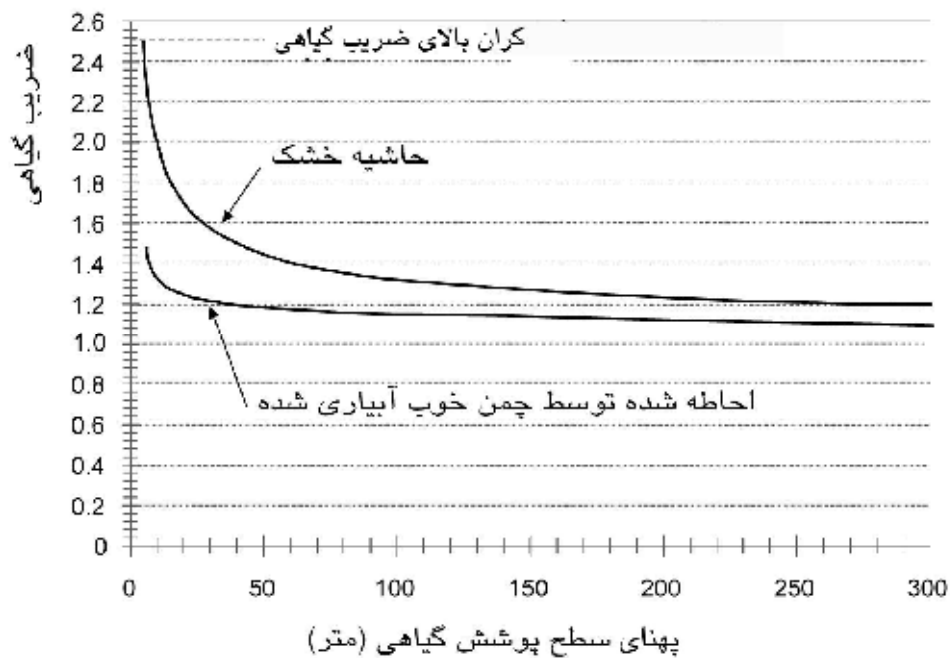
سطوح کشت کم وسعت گیاهان بلند که با گیاهان کوتاه تر احاطه شده باشند، تحت اثر کلاس لاین واقع می شوند. این اثر به صورت افزایش انتقال متلاطم گرمای محسوس به سمت گیاهان بلند و انتقال بخار از آنها توسط باد به سمت پوشش گیاهی کوتاه تر می باشد. بنابراین، تبخیر - تعرق این سطوح کشت در واحد سطح، ممکن است، به طور معنی داری، بیش از تبخیر - تعرق گیاه مرجع چمن گردد. تبخیر - تعرق یک ردیف درختان احاطه شده با پوشش گیاهی کوتاه یا منطقه خشک آیش یا تبخیر - تعرق یک ردیف باریک

گیاهان آبرزی^۱ روییده در حاشیه آبراهه‌ها، مثال‌های از تغییر تبخیر - تعرق تحت اثر کلاس لاین و اثر واحه می‌باشند. برای این شرایط، ضرایب گیاهی بیشتر از دو، نیز، گزارش شده‌اند.

در شرایطی که برآورد تبخیر - تعرق سطوح کشت کم وسعت احاطه شده با گیاهان کوتاه‌تر (اثر کلاس لاین) یا اراضی خشک (اثر واحه) مورد نظر باشد، ممکن است، ضریب گیاهی نسبت به سطح مرجع چمن ۱۰۰ درصد یا حتی بیشتر افزایش یابد. برآورد ضریب گیاهی و اصلاح آن در این شرایط مستلزم توجه به عوامل حداقل رطوبت نسبی، میانگین سرعت باد، میانگین ارتفاع و پوشش گیاهی، همچنین، سایر عوامل بیانگر اثر خشکی مناطق حاشیه، عرض کل پوشش گیاهی و نفوذ باد به داخل پوشش گیاهی می‌باشد. در معادله، همچنین، باید نمایه سطح برگ برای تأثیر قابلیت پوشش گیاهی در هدایت و تعرق آب تحت اثر کلاس لاین، در نظر گرفته شود. به طور معمول، ضریب گیاهی $2/5$ حداکثر ظرفیت روزنه‌ای پوشش گیاهی برای انتقال بخار آب از گیاه به سمت هوای اطراف تحت اثر کلاس لاین یا اثر واحه را نشان می‌دهد. برای پوشش گیاهی با مقاومت بالا سطح برگ مشابه برخی گیاهان بیابانی و درختان صحرایی، کران بالای ضریب گیاهی باید در ضریب اصلاح مقاومت (F_r)، که با استفاده از معادله ۱۰۲ فصل نهم محاسبه می‌شود، ضرب گردد.

شکل ۴۶، مثالی از منحنی‌های ضریب گیاهی سطوح کم وسعت را در رابطه با عرض کل پوشش گیاهی تحت شرایطی که میانگین سرعت باد ۲ متر بر ثانیه و حداقل رطوبت نسبی ۳۰ درصد، میانگین ارتفاع پوشش گیاهی ۲ متر و نمایه سطح برگ ۳ است، را ارائه می‌کند. منحنی بالایی، شرایطی را نشان می‌دهد که در آن پوشش گیاهی توسط بقای گیاهی غیرزنده، خاک خشک آیش یا حتی شن و اسفالت، احاطه شده است. تحت این شرایط، گرمای محسوس زیادی در مناطق حاشیه‌ای بدون گیاه وجود دارد. باد بخشی از این گرمای محسوس را به سمت پوشش گیاهی پایین‌دست در جهت باد انتقال می‌دهد. منحنی پایین، شرایطی را نشان می‌دهد که پوشش گیاهی توسط چمن خوب آبیاری شده، احاطه شده است. در این حالت، گرمای محسوس مناطق حاشیه که می‌تواند تبخیر - تعرق (و ضریب گیاهی) پوشش گیاهی پایین دست در جهت باد را افزایش دهد، بسیار کمتر است. اثر خشکی مناطق حاشیه‌ای بر روی ضریب گیاهی پوشش گیاهی کم وسعت بسیار واضح است. دو منحنی ارائه شده با تغییر میانگین سرعت باد، حداقل رطوبت نسبی و نمایه سطح برگ تغییر می‌کنند. توجه شود که شکل ۴۶، برآورد تقریبی از ضریب گیاه تحت اثر کلاس لاین و اثر واحه را ارائه می‌دهد. این برآورد، در صورت امکان، باید با استفاده از داده‌های واقعی ارزیابی شوند.

تبخیر - تعرق پوشش‌های گیاهی وسیع یا کم وسعت که توسط پوشش‌های گیاهی دارای شرایط زبری و رطوبت یکنواخت احاطه شده‌اند، حتی در شرایط خشک، باید مساوی ET_0 ۸/۴، یا کمتر از آن باشد.



شکل ۴۶- رابطه منحنی ضریب گیاهی و پهنای سطح کشت کم وسعت تحت اثر واحه و حداقل رطوبت
 نسبی ۳۰ درصد، سرعت باد ۲ متر بر ثانیه، ارتفاع پوشش گیاهی ۲ متر و نمایه سطح برگ ۳

برای بادشکن‌های بلند نظیر درختان، برآورد تقریبی ضریب گیاهی به صورت زیر است:

$$K_c = \min \left[1.2 + \frac{F_r h_{\text{canopy}}}{\text{Width}}, 2.5 \right] \quad (105)$$

که در آن:

F_r = ضریب اصلاح مقاومت روزنه‌ای [معادله ۱۰۲]،

h_{canopy} = میانگین ارتفاع پوشش گیاهی [متر] و

Width = پهنای (عرض) بادشکن [متر] می‌باشند.

عدد ۲/۵ در معادله (۱۰۵)، نمایانگر کران بالای تبخیر - تعرق درختان در واحد سطح می‌باشد. هرچند، این مقدار بسیار تقریبی است. از آنجا که مقدار آب قابل استفاده خاک می‌تواند تبخیر - تعرق بادشکن‌ها را محدود کند، در این حالت، باید موازنه آب خاک بررسی و ضریب K_s محاسبه شود.

مدیریت تشدید تنش محیطی

در بسیاری از گیاهان زراعی برای تغییر برخی کیفیت‌های محصول، مدیریت تنش آبی اعمال می‌شود. تنش آبی در طول دوره‌های مشخص از دوره رشد، ممکن است با افزایش فاصله آبیاری و یا مصرف آب کمتر ایجاد شود. در این شرایط، ضریب گیاهی باید کاهش یابد تا کاهش تبخیر - تعرق در نظر گرفته شود. تنش آبی، حاصلخیزی پایین یا شوری خاک می‌تواند دوره زایشی برخی گیاهان را کوتاه کند. در این شرایط، دروه رشد گیاه، به ویژه طول مرحله میانی، ممکن است، کاهش یابد. تنش در مرحله توسعه گیاه ممکن است، باعث افزایش طول این مرحله شود. بنابراین، ضروری است طول مرحله میانی رشد و شاید، مراحل توسعه و پایانی رشد برای پوشش گیاهی تحت تنش محیطی یا آسیب دیده، اصلاح شود. تحقیقات و مشاهدات محلی برای تعیین مقدار و دامنه اصلاح بسیار مهم می‌باشد. در اینجا، مثال‌هایی از اصلاح ضریب گیاهی و طول مراحل رشد ارائه شده است.

یونجه بذری

با ایجاد تنش آبی در برخی از گیاهان علوفه‌ای مانند یونجه، هنگامی که برای تولید بذر کشت می‌شوند، مقدار پوشش گیاهی را کاهش و تولید گل و بذر را افزایش می‌دهند. در مناطق سرد با زمستان دارای یخبندان، کاهش ضریب گیاهی در گیاهانی مانند یونجه با ریشه‌دوانی عمیق، به مقدار بارش^۱ در فصل خواب^۲ (زمستان) و مقدار بارندگی و آبیاری تکمیلی در فصل رشد بستگی دارد. بنابراین، اثر تنش‌های مدیریت زراعی بر ضریب گیاهی باید با استفاده از روش ضریب گیاهی (فصل هفتم)، ضریب K_s و روش موازنه آب خاک (فصل هشتم)، مدلسازی شوند.

پنبه

تنش آبی در مرحله توسعه گیاه پنبه برای تأخیر در شروع گل‌دهی و تسریع در غوزه‌دهی، ایجاد می‌شود. این تنش موجب تأخیر در رشد گیاه و در زمان کامل شدن پوشش گیاهی می‌شود. پوشش گیاهی پنبه، به طور معمول، با نمایه سطح برگ حدود ۳، کامل شده و پس از آن مرحله میانی رشد آن شروع می‌شود. در شرایط تنش آبی که موجب تأخیر رشد گیاه شده، ممکن است، پوشش گیاهی بعد از شروع گل‌دهی کامل شود. اثر تنش آبی بر تبخیر - تعرق پنبه در مرحله توسعه گیاه می‌تواند با ادغام مرحله توسعه گیاه و مرحله میانی رشد در منحنی ضریب گیاهی مشاهده شود. به طور معمول، طول دوره رشد گیاه ثابت است.

چغندر قند

برای چغندر قند، اغلب، در مرحله پایانی رشد تنش آبی ملایم اعمال می‌شود. که، در نتیجه، رطوبت ریشه‌ها کاهش و غلظت قند آنها افزایش می‌یابد. برای عصاره‌گیری آسان‌تر از ریشه ممکن است قبل از برداشت محصول، یک نوبت آبیاری انجام شود. با اعمال این نوع تنش آبی، مقدار ضریب گیاهی مرحله پایانی رشد، از ۱ به ۰/۶ کاهش می‌یابد (جدول ۱۲ پی‌نوشت ۵).

1-Precipitation

2-Dormant season

قهوه

اغلب، تنش آبی در گیاه قهوه به منظور کاهش رشد رویشی و تسریع در تبدیل دانه به میوه اعمال می‌شود. در این شرایط، ضریب گیاهی جدول ۱۲ باید کاهش یابد. علاوه بر این، ممکن است، مزارع قهوه توسط درختانی که به عنوان بادشکن عمل می‌کنند، احاطه شده باشند. بادشکن‌ها با کاهش سرعت باد و تابش خورشید ضریب گیاهی قهوه را کاهش می‌دهند. کاهش مقدار ضریب گیاهی، در شرایطی که درختان بادشکن بلند و دائمی باشند، می‌تواند مهم باشد. هر چند ممکن است، مقدار کل ضریب گیاهی مزرعه قهوه و بادشکن‌ها به دلیل افزایش سطح برگ و نیز، افزایش زبری آئرودینامیک بیشتر از ضریب گیاهی درختان قهوه ارائه شده در جدول ۱۲ شود.

چای

اغلب، جوانه‌زنی و رشد برگ‌های تازه گیاه چای متعاقب آغاز فصل بارندگی اتفاق می‌افتد. جوانه‌زنی برگ‌های تازه در طی فصل خشک کاهش یافته و یا متوقف می‌شود. تعرق برگ‌های پیرتر بدلیل کاهش هدایت روزنه‌ای، کمتر از برگ‌های جوان است. بنابراین مقدار ضریب گیاهی برگ‌های پیر (بیشتر از ۲ تا ۳ ماهه) ممکن است، حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد کمتر از مقادیر ضریب گیاهی چای در جداول ۱۲ و ۱۷ باشد. مزارع چای مشابه قهوه، ممکن است، با درختانی که به صورت بادشکن عمل می‌کنند، احاطه شده باشند. بادشکن‌ها ضریب گیاهی مزرعه چای را، کاهش می‌دهند. به طور بالقوه، افزایش مقدار کل ضریب گیاهی (شامل مزرعه قهوه و بادشکن‌ها)، مشابه ضریب گیاهی کشت مخلوط قهوه و بادشکن‌ها می‌باشد.

زیتون

کشاورزان در مناطق کم باران، ممکن است، فواصل کشت درختان زیتون دیم را افزایش دهند. در این حالت، سطح خاک تحت پوشش هر درخت و باران نفوذ یافته در آن افزایش و در نتیجه آن، تعرق درختان نیز افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در تونس، فاصله کشت درختان زیتون را از شمال به جنوب، متناسب با میزان بارندگی سالانه تغییر می‌دهند. فاصله درختان بر عملکرد محصول مؤثر است (مثال ۴۳).

فصل یازدهم

تبخیر - تعرق گیاهان در دوره‌های غیررشد

در این فصل، روش‌های برآورد تبخیر - تعرق گیاهان در دوره‌های غیررشد بیان می‌شوند. دوره غیررشد به دوره‌ای گفته شده که در آن محصولات کشت نمی‌شوند لیکن، گیاهان کشت پیشین موجود هستند. در اقلیم معتدل، دوره‌های غیررشد، ممکن است، شامل دوره‌های یخبندان و شرایط یخ‌زدگی مداوم باشند.

انواع شرایط سطح زمین

نوع و وضعیت سطح زمین در دوره‌های غیررشد، دامنه تغییرات تبخیر - تعرق گیاه را تعیین می‌کند. چنانچه سطح خاک بدون پوشش باشد، آنگاه ضریب گیاهی مشابه روش فصل ششم برای برآورد ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد محاسبه می‌شود. اگر سطح خاک با پوشش گیاهی غیرزنده، مالچ آلی یا بقایای گیاهی پوشیده شده باشد، ضریب گیاهی مشابه حالتی محاسبه می‌شود که خاک زراعی تحت مالچ سطحی باشد. در شرایطی که علف‌های هرز سطح خاک را می‌پوشاند، ضریب گیاهی متناسب با کسر سطح برگ یا پوشش گیاهی و مقدار آب قابل استفاده خاک، تغییر خواهد کرد. چنانچه، سطح خاک زیر پوشش برف یا یخ‌زده باشد، پیش‌بینی ضریب گیاهی مشکل بوده و، ممکن است، تبخیر - تعرق گیاه یک مقدار ثابت فرض شود.

خاک بدون پوشش

ضریب گیاهی یک جزیی

خاک پس از برداشت محصول، اغلب، بدون پوشش است. در این حالت مقدار ضریب گیاهی به شدت تحت تأثیر تعداد و مقدار بارندگی می‌باشد. ضریب گیاهی در خاک بدون پوشش را می‌توان با فرض مساوی بودن آن با ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد گیاه، به روش ارائه شده در فصل ششم محاسبه کرد.

ضریب گیاهی دو جزیی

هنگام استفاده از موازنه روزانه آب خاک، ممکن است، روش ضریب گیاهی دو جزیی ارائه شده در فصل هفتم بکار رود. در این حالت، رطوبت لایه خاک سطحی در دوره غیربارندگی بسیار پایین است. بنابراین، ضرایب گیاهی پایه و حداقل در معادله‌های ۷۱ و ۷۶ باید مساوی صفر فرض شوند. این فرض موجب می‌شود که در یک دوره طولانی بدون بارندگی، تبخیر - تعرق گیاه نیز، صفر برآورد شود که این فرض برای حفظ موازنه آب خاک کل لایه تبخیر به علاوه محدوده توسعه ریشه گیاه ضروری است. محاسبه تبخیر - تعرق گیاهان در دوره‌های غیررشد بر مبنای موازنه روزانه آب خاک و با فرض صفر بودن ضریب گیاهی پایه، دقیق‌ترین برآورد است.

خاک با پوشش گیاهی غیرزنده

ضریب گیاهی یک جزئی

هرگاه، سطح خاک تحت بقایای گیاهی یا مالچ آلی غیرزنده بوده یا، بخشی از محصول برداشت نشده در سطح زمین به حالت غیرزنده یا پلاسیده باقیمانده باشد، وضعیت سطح مشابه خاک تحت پوشش مالچ است. در این حالت، ضریب گیاهی می‌تواند مساوی با ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد بدست آمده از شکل‌های ۲۹ و ۳۰ گردد، لیکن مقدار آن به ازای هر ۱۰ درصد سطح خاک تحت پوشش مؤثر مالچ آلی، می‌تواند حدود ۵ درصد کاهش یابد.

ضریب گیاهی دو جزئی

تا چند روز پس از بارندگی، تبخیر از خاک خیس تحت پوشش گیاهی غیرزنده، قابل ملاحظه است. بنابراین، در روش ضریب گیاهی دو جزئی، کسر سطح خاک تحت مالچ (f_c) باید صفر فرض شود تا اثر نبودن پوشش سبز را منعکس کند. کسر سطح خاک خیس (f_w) نیز، باید ۱/۰ فرض شده تا اثر خیس شدن خاک تحت مالچ آلی با بارندگی نشان داده شود.

مالچ یا پوشش گیاهی غیرزنده و در معرض هوا سریع‌تر از خاک بدون مالچ و در معرض هوا، خشک می‌شود. به علاوه، پوشش گیاهی یا مالچ غیرزنده، تبخیر از خاک را کاهش می‌دهد. بنابراین، کل تلفات تبخیر کمتر از کل آب قابل تبخیر بوده که با معادله ۷۳ قابل برآورد است. این تفاوت را می‌توان به صورت کاهش حدود ۵ درصد از کل آب قابل تبخیر به ازای هر ۱۰ درصد سطح خاک تحت پوشش مؤثر مالچ آلی، برآورد کرد. آب با سهولت قابل تبخیر (REW) همواره کمتر یا مساوی با کل مقدار آب قابل تبخیر (TEW) است.

خاک با پوشش گیاهی زنده

در دوره‌های غیریخبندان، علف‌های هرز، ممکن است، پس از برداشت محصول جوانه زده و رشد کنند. ذخیره رطوبت نیمرخ خاک و بارندگی‌های بعدی، آب مورد نیاز این پوشش گیاهی را تأمین می‌کند. به علاوه، بذره‌های باقیمانده از محصول برداشت شده، پس از بارندگی ممکن است، جوانه زده و به پوشش گیاهی زمین اضافه شوند. وسعت پوشش گیاهی به میزان بذر و تراکم علف‌های هرز، تعداد دفعات و عمق شخم، مقدار آب خاک یا باران قابل استفاده و خسارت ناشی از یخبندان بستگی دارد.

ضریب گیاهی پایه در دوره غیررشد را می‌توان در هر زمان برپایه مقدار پوشش گیاهی برآورد کرد. این برآورد می‌تواند با محاسبه نمایه سطح برگ (معادله ۹۷) یا کسر سطح خاک تحت پوشش مالچ (معادله ۹۸) انجام پذیرد.

ضریب گیاهی یک جزیی

در روش ضریب گیاهی یک جزیی، می‌توان ضریب گیاهی پایه که با استفاده از روش‌های ارائه شده در فصل نهم تعیین می‌شود، را با افزایش ۵ تا ۱۵ درصد (برپایه فاصله بارندگی و خیس شدن سطح خاک)، به ضریب گیاهی معادل تبدیل کرد.

ضریب گیاهی پوشش سبز در دوره غیررشد به مقدار آب قابل استفاده برای تبخیر - تعرق بستگی دارد و به عبارتی، تابع قانون بقای جرم^۱ است. در این شرایط، حاصل عبارت $(K_c \times ET_0)$ در کل دوره غیررشد نمی‌تواند بیشتر از مجموع بارندگی این دوره و ذخیره رطوبت باقیمانده در خاک محدوده توسعه ریشه گیاه پس از برداشت محصول (که قابل استفاده پوشش گیاهی بعدی است)، باشد. محدوده توسعه ریشه گیاه در این حالت، شامل عمق ریشه‌دوانی علف‌های هرز و سایر گیاهان خودسبز است. موازنه روزانه آب خاک، ممکن است بهترین روش برآورد اثر تنش رطوبتی بر کاهش ضریب گیاهی و تبخیر - تعرق گیاه مرتبط با آن باشد.

ضریب گیاهی دو جزیی

در روش ضریب گیاهی دو جزیی، ضریب گیاهی پایه می‌تواند برپایه کسر خاک تحت پوشش گیاهی با بکارگیری معادله ۹۷ یا ۹۸ برآورد شود. سپس، موازنه کامل روزانه آب لایه خاک سطحی همراه با رابطه موازنه روزانه آب خاک محدوده توسعه ریشه گیاه (همان طور که در فصل هفتم بیان شده است)، می‌تواند استفاده شود. از آنجا که، موازنه آب خاک تابع قانون بقای جرم است، کل تبخیر - تعرق علف‌های هرز یا گیاهان خودسبز بیشتر از مقدار واقعی برآورد نمی‌شود. همچنین، در شرایط غیربارندگی، با کاهش رطوبت لایه خاک سطحی به پایین‌تر از نقطه پژمردگی، باید ضرایب گیاهی پایه و حداقل در معادله‌های ۷۱ و ۷۶ صفر فرض شوند. در این حالت، استفاده از رابطه موازنه روزانه آب خاک همراه با محاسبه ضریب گیاهی در کل دوره غیررشد، نتایج مناسب خواهد داشت.

خاک یخ‌زده یا پوشیده از برف

هنگامی که سطح خاک از برف پوشیده شده یا یخ‌زده است، شدت تبخیر - تعرق به پوشش گیاهی بستگی ندارد و مقدار آن، به طور کامل، به آب قابل استفاده خاک و ضریب بازتابش (آلبیرو) سطح وابسته است.

ضریب بازتابش سطح از ۰/۴ برای برف کهنه و کثیف تا ۰/۹ برای برف تازه و خشک متغیر است. بنابراین، ET_c در شرایطی که خاک پوشیده از برف است، کمتر از تبخیر - تعرق مرجع چمن بوده و به عبارتی، انرژی طول موج کوتاه از سطح برف ۲۵ تا ۸۵ درصد کمتر است. به علاوه، کسری از انرژی نیز باید پیش از انجام فرآیند تبخیر، صرف ذوب شدن برف شود.

1-Law of conservation of mass

کاربرد مفهوم تبخیر - تعرق گیاه مرجع در شرایط فوق معتبر نبوده زیرا، فرض شرایط مناسب برای نگهداری چمن سبز برقرار نیست. در برخی روزهای زمستان که مقدار تابش طول موج بلند از سطح خاک بالا و کمبود فشار بخار اشباع پایین بوده ممکن است، تبخیر - تعرق گیاه مرجع منفی شود. در این شرایط، احتمال تراکم (میعان) بخار آب در آتمسفر فراهم است.

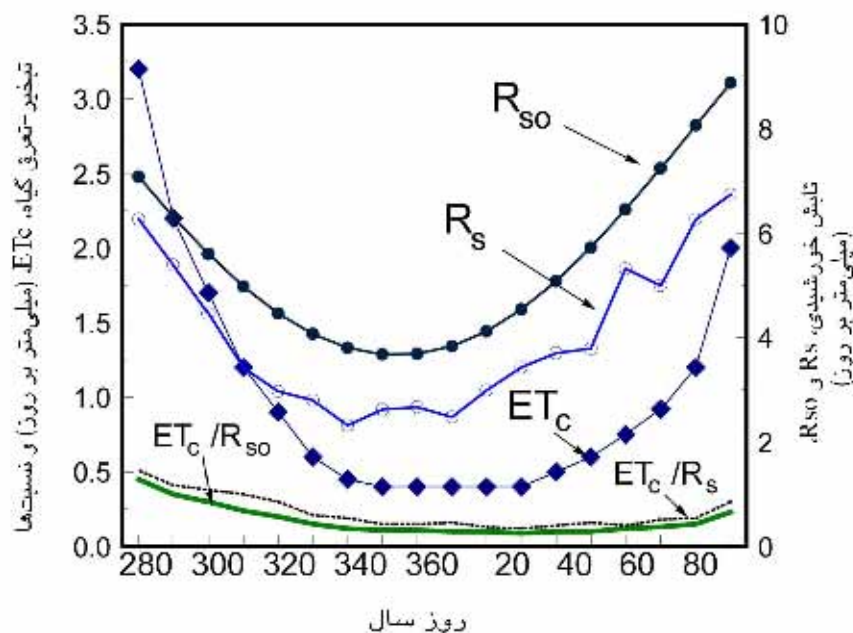
برپایه محدود شدن فرآیند تبخیر - تعرق گیاه مرجع (یا حتی ET_c) در شرایطی که سطح زمین از برف پوشیده شده یا یخ زده است، تبخیر - تعرق گیاهان با استفاده از میانگین ET_0 ، بهتر برآورد می شود. رایت^۱ (۱۹۹۳) در کیمبرلی - آیداهو (ایالات متحده آمریکا)، با عرض جغرافیایی ۴۲ درجه شمالی و ارتفاع حدود ۱۲۰۰ متر از سطح دریا، میانگین تبخیر - تعرق گیاه در شش ماه سرد سال از ۱ اکتبر تا ۳۰ مارس (۹ مهر تا ۱۰ فروردین)، را یک میلی متر بر روز اندازه گیری کرد. نتایج شش سال بررسی وی نشان داد که در فاصله بین اول اکتبر تا ۳۰ مارس، در ۲۵ درصد اوقات، ۵۰ درصد سطح زمین از برف پوشیده شده و در ۵۰ درصد اوقات، زمین بدون پوشش برف لیکن، یخ زده بود. در دوره ای که خاک یخ زده نبود لیکن، به شرایط یخبندان نزدیک می شد (در اکتبر و اوایل نوامبر)، میانگین ضریب گیاهی ۰/۲۵ بود. هنگامی که ۵۰ درصد سطح زمین یا بیشتر با برف پوشیده شده بود، میانگین تبخیر - تعرق تنها، ۰/۴ میلی متر بر روز اندازه گیری شد. بر پایه این نتایج، تبخیر - تعرق جمعی گیاه در شش ماه دوره غیررشد تنها، ۵۰ میلی متر بیشتر از بارندگی بود.

شکل ۴۷، میانگین ET_c اندازه گیری شده در سال های ۱۹۸۵ تا ۱۹۹۱ را نشان می دهد. اندازه گیری ها با کل انرژی تابشی طول موج کوتاه قابل دسترس در روزهای صاف (R_{s0})، که معادل ۰/۷۵ تابش فرازمینی برآورد می شود، همبستگی بسیار داشت. به دلیل دمای سردتر ژانویه تا مارس در مقایسه با سرمای اکتبر تا دسامبر، روند تغییرات ET_c ، R_{s0} و R_s ، تأخیر زمانی داشتند. میانگین نسبت ET_c به R_{s0} در شش ماه تنها، ۰/۱۷ و از اول دسامبر تا دهم مارس، ۰/۱۱ بود. میانگین نسبت ET_c به R_s در این مدت ۰/۲۳ و از اول دسامبر تا ۱۰ مارس، ۰/۱۵ بود.

در یک دوره هشت ساله تحقیق در لوگان - یوتا واقع در ایالات متحده آمریکا با عرض جغرافیایی ۴۱/۶ درجه شمالی و ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریا، نتایج بررسی های مشابه نشان داد که تغییر تبخیر - تعرق گیاه در زمستان، به طور عمده، به خیس شدن سطح خاک و دمای هوا وابسته است. میانگین ضریب گیاهی در ماه های نوامبر تا مارس برای روزهایی که خاک بدون پوشش برف بود، ۰/۵ و تبخیر - تعرق گیاه در روزهای با پوشش برف، از صفر تا ۱/۵ میلی متر بر روز متغیر بود. در شمال چین (عرض جغرافیایی نزدیک به ۳۹/۰ درجه شمالی)، به طور مشابه ضریب گیاهی گندم زمستانه برای دوره های یخبندان حدود ۰/۴ بود.

ضریب گیاهی یک جزیی

روش ضریب گیاهی یک جزیی، یک روش برآورد این ضریب در دوره‌های غیررشد تحت شرایط یخبندان یا پوشش برف است. هر چند، ضریب گیاهی یک جزیی واقعی بسیار متغیر است و در شرایطی که آب قابل استفاده لایه خاک سطحی پایین باشد، کاهش می‌یابد.



شکل ۴۷- میانگین تبخیر - تعرق در دوره‌های غیررشد (زمستان) در کیمبرلی-آیداهو (ایالات متحده آمریکا)، (اندازه‌گیری در لایسمیترهای وزنی دقیق توسط رایت، ۱۹۹۳)

ضریب گیاهی دو جزیی

برای پیش‌بینی دقیق تبخیر - تعرق گیاه در شرایط یخبندان و پوشش برف، استفاده از موازنه روزانه آب خاک و روش ضریب گیاهی دو جزیی، ضروری است. در روش ضریب گیاهی دو جزیی، موازنه روزانه آب لایه خاک سطحی بررسی شده و ضریب گیاهی برآورد شده بر مبنای آب قابل استفاده خاک می‌تواند کاهش یابد. هر چند، علاوه بر این که مفهوم تبخیر - تعرق گیاه مرجع تحت شرایط پوشش برف و یخ‌زدگی سطح خاک معتبر نیست، ضریب تبخیر خاک (K_e) نیز، ممکن است، به دلیل یخ‌زدگی آب کاهش یابد.

مدل‌های پیچیده‌تری برای برآورد دقیق‌تر تبخیر - تعرق گیاه در دوره غیررشد، وجود پوشش برف و یخبندان ارائه شده است که پس از ارزیابی قابل بکارگیری می‌باشند. برخی از این مدل‌ها در بخش K منابع مورد استفاده این نشریه آمده است.

پیوست یک

واحدها و علامتها

پیشوندها

واحدها به صورت مضرب‌های زیر بکار می‌روند:

10^{-2}	: سانتی (C)	10^{12}	: ترا (T)
10^{-3}	: میلی (m)	10^9	: گیگا (G)
10^{-6}	: میکرو (μ)	10^6	: مگا (M)
10^{-9}	: نانو (n)	10^3	: کیلو (K)
10^{-12}	: پیکو (p)	10^2	: هکتو (h)
10^{-15}	: فمتو (f)	10^1	: دکا (da)
10^{-18}	: اتو (a)	10^{-1}	: دسی (d)

دما

واحد استاندارد: درجه سلسیوس ($^{\circ}\text{C}$)

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times \frac{5}{9}$$
$$^{\circ}\text{K} = (^{\circ}\text{C}) + 273/16$$

درجه فارنهایت ($^{\circ}\text{F}$)
کلون (K)

فشار

(فشار هوا، فشار بخار آب)

واحد استاندارد: کیلوپاسکال (kPa)

$1 \text{ میلی بار} = 0/1 \text{ کیلوپاسکال}$	میلی بار (mbar)
$1 \text{ بار} = 100 \text{ کیلوپاسکال}$	بار
$1 \text{ سانتی متر آب} = 0/9807 \text{ کیلوپاسکال}$	سانتی متر آب (cm)
$1 \text{ میلی متر جیوه} = 0/1333 \text{ کیلوپاسکال}$	میلی متر جیوه (mmHg)
$1 \text{ اتمسفر} = 101/325 \text{ کیلوپاسکال}$	آتمسفر (atm)
$1 \text{ پاند بر اینچ مربع} = 6/896 \text{ کیلوپاسکال}$	پاند بر اینچ مربع (psi)

سرعت باد

واحد استاندارد: متر بر ثانیه (m s^{-1})

۱ کیلومتر بر روز (km day^{-1})	۰/۱۱۵۷ متر بر ثانیه
۱ نات (knot)	۰/۵۱۴۴ متر بر ثانیه
۱ فوت بر ثانیه (ft s^{-1})	۰/۳۰۴۸ فوت بر ثانیه

تابش

واحد استاندارد: مگاژول بر مترمربع بر روز ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$)
یا به صورت تبخیر معادل بر حسب میلی متر بر روز (mm day^{-1})

تبخیر معادل (میلی متر بر روز)	۱ میلی متر بر روز = ۲/۴۵ مگاژول بر متر مربع بر روز
ژول بر سانتی متر مربع بر روز ($\text{J cm}^{-2} \text{day}^{-1}$)	۱ ژول بر سانتی متر مربع بر روز = ۰/۱ مگاژول بر متر مربع بر روز
کالری بر سانتی متر مربع بر روز ($\text{cal cm}^{-2} \text{day}^{-1}$)	۱ کالری = ۴/۱۸۶۸ ژول = $۴/۱۸۶۸ \times ۱۰^{-۶}$ مگاژول
وات بر مترمربع (Wm^{-2})	۱ وات = ۱ ژول بر ثانیه
	۱ وات بر مترمربع = ۰/۰۸۶۴ مگاژول بر مترمربع بر روز

تبخیر - تعرق

واحد استاندارد: میلی متر بر روز

مترمکعب بر هکتار بر روز ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{day}^{-1}$)	۱ متر مکعب بر هکتار بر روز = ۰/۱ میلی متر بر روز
لیتر بر ثانیه بر هکتار ($\text{l s}^{-1} \text{ha}^{-1}$)	۱ لیتر بر ثانیه بر هکتار = ۸/۶۴۰ میلی متر بر روز
تابش معادل به مگاژول بر مترمربع بر روز ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$)	۱ مگاژول بر متر مربع بر روز = ۰/۴۰۸ میلی متر بر روز

پیوست دو

جدول‌های هواشناسی

- ۱-۲- فشار آتمسفر (P) در ارتفاع مشخص از سطح دریا (z)
- ۲-۲- ضریب ثابت سایکرومتری (γ) در ارتفاع مشخص از سطح دریا (z)
- ۳-۲- فشار بخار اشباع ($e^0(T)$) در دمای مشخص (T)
- ۴-۲- شیب منحنی فشار بخار (Δ) در دمای مشخص (T)
- ۵-۲- شماره روز از سال (J)
- ۶-۲- تابش فرازمینی روزانه (R_a) در عرض جغرافیایی مشخص
- ۷-۲- میانگین ساعات آفتابی (N) در عرض جغرافیایی مشخص
- ۸-۲- مقادیر σ_{TK}^4 (قانون استفان - بولتزمن) در دمای مشخص (T)
- ۹-۲- ضرایب تبدیل سرعت باد اندازه‌گیری شده در ارتفاع مشخص به سرعت باد در ارتفاع استاندارد دو متری بالای سطح زمین

جدول ۱-۲- فشار آتمسفر (P برحسب کیلوپاسکال) در ارتفاع مشخص (Z بر حسب متر)

$P = 101.3 \left[\frac{293 - 0.0065z}{293} \right]^{5.26} \quad (\text{معادله ۷})$							
Z (m)	P (kPa)	Z (m)	P (kPa)	Z (m)	P (kPa)	Z (m)	P (kPa)
0	101.3	1000	90.0	2000	79.8	3000	70.5
50	100.7	1050	89.5	2050	79.3	3050	70.1
100	100.1	1100	89.0	2100	78.8	3100	69.6
150	99.5	1150	88.4	2150	78.3	3150	69.2
200	99.0	1200	87.9	2200	77.9	3200	68.8
250	98.4	1250	87.4	2250	77.4	3250	68.3
300	97.8	1300	86.8	2300	76.9	3300	67.9
350	97.2	1350	86.3	2350	76.4	3350	67.5
400	96.7	1400	85.8	2400	76.0	3400	67.1
450	96.1	1450	85.3	2450	75.5	3450	66.6
500	95.5	1500	84.8	2500	75.0	3500	66.2
550	95.0	1550	84.3	2550	74.6	3550	65.8
600	94.4	1600	83.8	2600	74.1	3600	65.4
650	93.8	1650	83.3	2650	73.7	3650	65.0
700	93.3	1700	82.8	2700	73.2	3700	64.6
750	92.7	1750	82.3	2750	72.7	3750	64.1
800	92.2	1800	81.8	2800	72.3	3800	63.7
850	91.6	1850	81.3	2850	71.8	3850	63.3
900	91.1	1900	80.8	2900	71.4	3900	62.9
950	90.6	1950	80.3	2950	71.0	3950	62.5
1000	90.0	2000	79.8	3000	70.5	4000	62.1

جدول ۲-۲- ضریب سایکرومتری (γ) برحسب کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس) در ارتفاع مشخص بالای سطح زمین (Z برحسب متر)

$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} P \quad (\text{معادله ۸})$							
z (m)	γ kPa/°C	z (m)	γ kPa/°C	z (m)	γ kPa/°C	z (m)	γ kPa/°C
0	0.067	1000	0.060	2000	0.053	3000	0.047
100	0.067	1100	0.059	2100	0.052	3100	0.046
200	0.066	1200	0.058	2200	0.052	3200	0.046
300	0.065	1300	0.058	2300	0.051	3300	0.045
400	0.064	1400	0.057	2400	0.051	3400	0.045
500	0.064	1500	0.056	2500	0.050	3500	0.044
600	0.063	1600	0.056	2600	0.049	3600	0.043
700	0.062	1700	0.055	2700	0.049	3700	0.043
800	0.061	1800	0.054	2800	0.048	3800	0.042
900	0.061	1900	0.054	2900	0.047	3900	0.042
1000	0.060	2000	0.053	3000	0.047	4000	0.041

برای $\lambda = 2/45$ مگاژول بر کیلوگرم در ۲۰ درجه سلسیوس

جدول ۲-۳- فشار بخار اشباع ($e^o(T)$ برحسب کیلوپاسکال) در دمای مشخص T برحسب درجه سلسیوس)

$e^o(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27T}{T + 237.3} \right] \quad (\text{معادله ۱۱})$							
T °C	e_s kPa	T °C	$e^o(T)$ kPa	T °C	$e^o(T)$ kPa	T °C	e_s kPa
1.0	0.657	13.0	1.498	25.0	3.168	37.0	6.275
1.5	0.681	13.5	1.547	25.5	3.263	37.5	6.448
2.0	0.706	14.0	1.599	26.0	3.361	38.0	6.625
2.5	0.731	14.5	1.651	26.5	3.462	38.5	6.806
3.0	0.758	15.0	1.705	27.0	3.565	39.0	6.991
3.5	0.785	15.5	1.761	27.5	3.671	39.5	7.181
4.0	0.813	16.0	1.818	28.0	3.780	40.0	7.376
4.5	0.842	16.5	1.877	28.5	3.891	40.5	7.574
5.0	0.872	17.0	1.938	29.0	4.006	41.0	7.778
5.5	0.903	17.5	2.000	29.5	4.123	41.5	7.986
6.0	0.935	18.0	2.064	30.0	4.243	42.0	8.199
6.5	0.968	18.5	2.130	30.5	4.366	42.5	8.417
7.0	1.002	19.0	2.197	31.0	4.493	43.0	8.640
7.5	1.037	19.5	2.267	31.5	4.622	43.5	8.867
8.0	1.073	20.0	2.338	32.0	4.755	44.0	9.101
8.5	1.110	20.5	2.412	32.5	4.891	44.5	9.339
9.0	1.148	21.0	2.487	33.0	5.030	45.0	9.582
9.5	1.187	21.5	2.564	33.5	5.173	45.5	9.832
10.0	1.228	22.0	2.644	34.0	5.319	46.0	10.086
10.5	1.270	22.5	2.726	34.5	5.469	46.5	10.347
11.0	1.313	23.0	2.809	35.0	5.623	47.0	10.613
11.5	1.357	23.5	2.896	35.5	5.780	47.5	10.885
12.0	1.403	24.0	2.984	36.0	5.941	48.0	11.163
12.5	1.449	24.5	3.075	36.5	6.106	48.5	11.447

جدول ۲-۴- شیب منحنی فشار بخار (Δ) برحسب کیلوپاسکال بر
درجه سلسیوس) در دمای مشخص (T برحسب درجه سلسیوس)

$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (\text{معادله ۱۳})$							
T °C	Δ kPa/°C	T °C	Δ kPa/°C	T °C	Δ kPa/°C	T °C	Δ kPa/°C
1.0	0.047	13.0	0.098	25.0	0.189	37.0	0.342
1.5	0.049	13.5	0.101	25.5	0.194	37.5	0.350
2.0	0.050	14.0	0.104	26.0	0.199	38.0	0.358
2.5	0.052	14.5	0.107	26.5	0.204	38.5	0.367
3.0	0.054	15.0	0.110	27.0	0.209	39.0	0.375
3.5	0.055	15.5	0.113	27.5	0.215	39.5	0.384
4.0	0.057	16.0	0.116	28.0	0.220	40.0	0.393
4.5	0.059	16.5	0.119	28.5	0.226	40.5	0.402
5.0	0.061	17.0	0.123	29.0	0.231	41.0	0.412
5.5	0.063	17.5	0.126	29.5	0.237	41.5	0.421
6.0	0.065	18.0	0.130	30.0	0.243	42.0	0.431
6.5	0.067	18.5	0.133	30.5	0.249	42.5	0.441
7.0	0.069	19.0	0.137	31.0	0.256	43.0	0.451
7.5	0.071	19.5	0.141	31.5	0.262	43.5	0.461
8.0	0.073	20.0	0.145	32.0	0.269	44.0	0.471
8.5	0.075	20.5	0.149	32.5	0.275	44.5	0.482
9.0	0.078	21.0	0.153	33.0	0.282	45.0	0.493
9.5	0.080	21.5	0.157	33.5	0.289	45.5	0.504
10.0	0.082	22.0	0.161	34.0	0.296	46.0	0.515
10.5	0.085	22.5	0.165	34.5	0.303	46.5	0.526
11.0	0.087	23.0	0.170	35.0	0.311	47.0	0.538
11.5	0.090	23.5	0.174	35.5	0.318	47.5	0.550
12.0	0.092	24.0	0.179	36.0	0.326	48.0	0.562
12.5	0.095	24.5	0.184	36.5	0.334	48.5	0.574

جدول ۲-۵- شماره روز از سال (J)

day	January	February	March*	April*	May*	June*
1	1	32	60	91	121	152
2	2	33	61	92	122	153
3	3	34	62	93	123	154
4	4	35	63	94	124	155
5	5	36	64	95	125	156
6	6	37	65	96	126	157
7	7	38	66	97	127	158
8	8	39	67	98	128	159
9	9	40	68	99	129	160
10	10	41	69	100	130	161
11	11	42	70	101	131	162
12	12	43	71	102	132	163
13	13	44	72	103	133	164
14	14	45	73	104	134	165
15	15	46	74	105	135	166
16	16	47	75	106	136	167
17	17	48	76	107	137	168
18	18	49	77	108	138	169
19	19	50	78	109	139	170
20	20	51	79	110	140	171
21	21	52	80	111	141	172
22	22	53	81	112	142	173
23	23	54	82	113	143	174
24	24	55	83	114	144	175
25	25	56	84	115	145	176
26	26	57	85	116	146	177
27	27	58	86	117	147	178
28	28	59	87	118	148	179
29	29	(60)	88	119	149	180
30	30	-	89	120	150	181
31	31	-	90	-	151	-

• برای سال کبیسه یک روز اضافه شود.

J برای هر روز (D) از ماه (M) از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$J = \text{INTEGER}\left(275 \times \frac{M}{9} - 30 + D\right) - 2$$

$$J = J + 2$$

اگر $M < 3$ باشد، پس:

$$J = J + 1$$

همچنین، اگر سال کبیسه و $M > 2$ باشد، پس:

در دوره‌های ده روزه، J برای روزهای (D): ۵، ۱۰ و ۱۵ محاسبه می‌شود.

در دوره‌های ماهانه، J برای روز نیمه ماه، به طور تقریبی، از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$J = \text{INTEGER}(30.4 M - 15)$$

ادامه جدول ۲-۵-

day	July*	August*	September*	October*	November*	December*
1	182	213	244	274	305	335
2	183	214	245	275	306	336
3	184	215	246	276	307	337
4	185	216	247	277	308	338
5	186	217	248	278	309	339
6	187	218	249	279	310	340
7	188	219	250	280	311	341
8	189	220	251	281	312	342
9	190	221	252	282	313	343
10	191	222	253	283	314	344
11	192	223	254	284	315	345
12	193	224	255	285	316	346
13	194	225	256	286	317	347
14	195	226	257	287	318	348
15	196	227	258	288	319	349
16	197	228	259	289	320	350
17	198	229	260	290	321	351
18	199	230	261	291	322	352
19	200	231	262	292	323	353
20	201	232	263	293	324	354
21	202	233	264	294	325	355
22	203	234	265	295	326	356
23	204	235	266	296	327	357
24	205	236	267	297	328	358
25	206	237	268	298	329	359
26	207	238	269	299	330	360
27	208	239	270	300	331	361
28	209	240	271	301	332	362
29	210	241	272	302	333	363
30	211	242	273	303	334	364
31	212	243	-	304	-	365

* برای سال کبیسه یک روز اضافه شود.

جدول ۲-۵- تابش خورشیدی روزانه (R_n) برای عرض‌های جغرافیایی متفاوت در پانزدهمین روز ان ماه

$$R_n = \frac{24(60)}{\pi} G_c d [w_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(w_s)] \quad (\text{معادله } ۲)$$

(مقادیر بر حسب مگاژول بر متر مربع بر روز)

Northern Hemisphere												Lat.	Southern Hemisphere											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.0	2.6	10.4	23.0	35.2	42.5	39.4	26.0	14.9	4.9	0.1	0.0	70	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.1	3.7	11.7	23.9	35.3	42.0	38.9	26.6	16.1	6.0	0.7	0.0	68	41.4	28.6	15.8	4.9	0.2	0.0	0.0	0.0	2.2	10.7	23.5	45.3
0.6	4.8	12.9	24.8	35.6	41.4	38.8	29.3	17.3	7.2	1.5	0.1	66	41.0	29.3	16.9	6.0	0.8	0.0	0.0	3.2	11.9	24.4	37.4	44.7
1.4	5.9	14.1	25.8	35.9	41.2	38.8	30.0	18.4	8.5	2.4	0.6	64	40.9	30.0	18.1	7.2	1.5	0.1	0.5	4.2	13.1	25.4	37.6	44.1
2.3	7.1	15.4	26.6	36.6	41.2	39.0	30.6	19.5	9.7	3.4	1.3	62	41.2	30.8	19.3	8.4	2.4	0.6	1.2	5.3	14.4	26.3	38.0	43.9
3.3	8.3	16.6	27.5	36.6	41.2	39.2	31.3	20.6	10.9	4.4	2.2	60	41.5	32.3	21.5	10.8	4.4	2.0	2.9	7.6	16.7	28.1	38.7	43.9
4.3	9.6	17.7	28.4	37.0	41.3	39.4	32.0	21.7	12.1	5.5	3.1	58	41.7	33.0	22.6	12.0	5.5	2.9	3.9	8.7	17.9	28.9	39.1	44.0
5.4	10.8	18.9	29.2	37.4	41.4	39.6	32.6	22.7	13.3	6.7	4.2	56	42.0	33.7	23.6	13.2	6.6	3.9	4.9	9.9	19.0	29.8	39.5	44.1
6.5	12.0	20.0	30.0	37.8	41.5	39.8	33.2	23.7	14.5	7.8	5.2	54	42.2	34.3	24.6	14.4	7.7	4.9	6.0	11.1	20.1	30.6	39.9	44.3
7.7	13.2	21.1	30.8	38.2	41.6	40.1	33.8	24.7	15.7	9.0	6.4	52	42.5	35.0	25.6	15.6	8.8	6.0	7.1	12.2	21.2	31.4	40.2	44.4
8.9	14.4	22.2	31.5	38.5	41.7	40.2	34.4	25.7	16.6	10.2	7.5	50	42.7	35.6	26.6	16.7	10.0	7.1	8.2	13.4	22.2	32.1	40.6	44.5
10.1	15.7	23.3	32.2	38.8	41.8	40.4	34.9	26.6	18.1	11.4	8.7	48	42.9	36.2	27.5	17.9	11.1	8.2	9.3	14.6	23.3	32.8	40.9	44.5
11.3	16.9	24.3	32.9	39.1	41.9	40.6	35.4	27.5	19.2	12.6	9.9	46	43.0	36.7	28.4	19.0	12.3	9.3	10.4	15.7	24.3	33.5	41.1	44.6
12.5	18.0	25.3	33.5	39.3	41.9	40.7	35.9	28.4	20.3	13.9	11.1	44	43.2	37.2	29.3	20.1	13.5	10.5	11.6	16.8	25.2	34.1	41.4	44.6
13.8	19.2	26.3	34.1	39.5	41.9	40.8	36.3	29.2	21.4	15.1	12.4	42	43.3	37.7	30.1	21.2	14.6	11.6	12.8	18.0	26.2	34.7	41.6	44.6
15.0	20.4	27.2	34.7	39.7	41.9	40.8	36.7	30.0	22.5	16.3	13.6	40	43.4	38.1	30.9	22.3	15.8	12.8	13.9	19.1	27.1	35.3	41.8	44.6
16.2	21.5	28.1	35.2	39.9	41.8	40.8	37.0	30.7	23.6	17.5	14.8	38	43.4	38.5	31.7	23.3	16.9	13.9	15.1	20.2	28.0	35.8	41.9	44.5
17.5	22.6	29.0	35.7	40.0	41.7	40.8	37.4	31.5	24.6	18.7	16.1	36	43.4	38.9	32.4	24.3	18.1	15.1	16.2	21.2	28.8	36.3	42.0	44.4
18.7	23.7	29.9	36.1	40.0	41.6	40.8	37.6	32.1	25.6	19.9	17.3	34	43.4	39.2	33.0	25.3	19.2	16.2	17.4	22.3	29.6	36.7	42.0	44.3
19.9	24.8	30.7	36.5	40.0	41.4	40.7	37.9	32.8	26.6	21.1	18.5	32	43.4	39.4	33.7	26.3	20.3	17.4	18.5	23.3	30.4	37.1	42.0	44.1
21.1	25.8	31.4	36.8	40.0	41.2	40.6	38.0	33.4	27.6	22.2	19.8	30	43.1	39.6	34.3	27.2	21.4	18.5	19.6	24.3	31.1	37.5	42.0	43.9
22.3	26.8	32.2	37.1	40.0	40.9	40.4	38.2	33.9	28.5	23.5	21.0	28	43.0	39.8	34.8	28.1	22.5	19.7	20.7	25.3	31.8	37.8	41.9	43.8
23.4	27.8	32.8	37.4	39.9	40.6	40.2	38.3	34.5	29.3	24.5	22.2	26	42.8	39.9	35.3	29.0	23.5	20.8	21.8	26.3	32.5	38.0	41.8	43.3
24.6	28.8	33.5	37.6	39.7	40.3	39.9	38.3	34.9	30.2	25.5	23.3	24	42.5	40.0	35.8	29.8	24.6	21.9	22.9	27.2	33.1	38.3	41.7	42.6
25.7	29.7	34.1	37.8	39.5	40.0	39.6	38.4	35.4	31.0	26.6	24.5	22	42.2	40.1	36.2	30.6	25.6	23.0	24.0	28.1	33.7	38.4	41.4	42.1
26.8	30.6	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.3	35.8	31.8	27.7	25.6	20	41.9	40.0	36.6	31.3	26.6	24.1	25.0	28.9	34.7	38.7	40.9	41.7
27.9	31.5	35.2	38.0	39.0	39.1	38.9	38.2	36.1	32.5	28.7	26.8	18	41.5	40.0	37.0	32.1	27.5	25.1	26.0	29.8	35.2	38.7	40.6	41.2
28.9	32.3	35.7	38.1	38.7	38.6	38.5	38.1	36.4	33.2	29.6	27.9	16	41.1	39.9	37.5	32.8	28.5	26.2	27.0	30.6	35.6	38.7	40.2	40.6
29.9	33.1	36.1	38.1	38.4	38.1	38.1	38.0	36.7	33.9	30.6	28.9	14	40.6	39.7	37.7	33.4	29.4	27.2	27.9	31.3	36.0	38.6	39.8	40.0
30.9	33.8	36.5	38.0	38.0	37.6	37.6	37.8	36.9	34.5	31.5	30.0	12	40.1	39.6	37.7	34.0	30.2	28.1	28.9	32.1	36.0	38.6	39.8	40.0
31.9	34.5	36.9	37.9	37.6	37.0	37.1	37.5	37.1	35.1	32.4	31.0	10	39.5	39.3	37.8	34.6	31.1	29.1	29.8	32.8	36.3	38.5	39.3	39.4
32.8	35.2	37.2	37.8	37.1	36.3	36.5	37.2	37.2	35.6	33.3	32.0	8	38.9	39.0	37.9	35.1	31.9	30.0	30.7	33.4	36.6	38.4	38.8	38.7
33.7	35.8	37.4	37.6	36.6	35.7	35.9	36.9	37.3	36.1	34.1	32.9	6	38.3	38.7	38.0	35.6	32.7	30.9	31.5	34.0	36.8	38.2	38.2	38.0
34.6	36.4	37.6	37.4	36.0	35.0	35.2	36.5	37.3	36.6	34.9	33.9	4	37.6	38.3	38.0	36.0	32.4	31.6	32.3	34.6	37.0	38.0	37.6	37.2
35.4	37.0	37.8	37.1	35.4	34.2	34.6	36.1	37.3	37.0	35.6	34.8	2	36.9	37.9	38.0	36.4	34.1	32.6	33.1	35.2	37.1	37.7	37.0	36.4
36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6	0	36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6

۱- مقادیر R_n بر پانزدهمین روز از ماه آورده گردید (با میزان خطای کمتر از ۱٪) از میانگین آن در طول ماه است. تنها برای عرض جغرافیایی بالاتر از ۵۵ (درجه شمالی یا جنوبی) در ماه‌های زمستان ممکن است مقدار خطای بیش از ۱٪ باشد.

۲- مقادیر موجود یا تقسیم بر ۲.۴۵ در $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ به تغییر معادل بر حسب میلی‌متر بر روز تبدیل می‌شود.

جدول ۲-۷- میانگین ساعات آفتابی (N) در عرض‌های جغرافیایی متفاوت در پانزدهمین روز از ماه^۱

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

Northern Hemisphere											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
0.0	6.6	11.0	15.6	21.3	24.0	24.0	17.6	12.8	8.3	2.3	0.0
2.1	7.3	11.1	15.3	19.7	24.0	22.3	17.0	12.7	8.7	4.1	0.0
3.9	7.8	11.2	14.9	18.7	22.0	20.3	16.4	12.7	9.0	5.2	1.9
5.0	8.2	11.2	14.7	17.9	20.3	19.2	16.0	12.6	9.3	6.0	3.7
5.7	8.5	11.3	14.4	17.3	19.2	18.4	15.7	12.6	9.5	6.6	4.8
6.4	8.8	11.4	14.2	16.8	18.4	17.7	15.3	12.5	9.7	7.1	5.6
6.9	9.1	11.4	14.1	16.4	17.8	17.2	15.1	12.5	9.9	7.5	6.2
7.3	9.3	11.5	13.9	16.0	17.3	16.8	14.8	12.4	10.1	7.9	6.7
7.7	9.5	11.5	13.8	15.7	16.8	16.4	14.6	12.4	10.2	8.2	7.1
8.0	9.7	11.5	13.6	15.4	16.5	16.0	14.4	12.4	10.3	8.5	7.5
8.3	9.8	11.6	13.5	15.2	16.1	15.7	14.3	12.3	10.4	8.7	7.9
8.6	10.0	11.6	13.4	15.0	15.8	15.5	14.1	12.3	10.6	9.0	8.2
8.8	10.1	11.6	13.3	14.8	15.5	15.2	14.0	12.3	10.7	9.2	8.5
9.1	10.3	11.6	13.2	14.6	15.3	15.0	13.8	12.3	10.7	9.4	8.7
9.3	10.4	11.7	13.2	14.4	15.0	14.8	13.7	12.3	10.8	9.6	9.0
9.5	10.5	11.7	13.1	14.2	14.8	14.6	13.6	12.2	10.9	9.7	9.2
9.6	10.6	11.7	13.0	14.1	14.6	14.4	13.5	12.2	11.0	9.9	9.4
9.8	10.7	11.7	12.9	13.9	14.4	14.2	13.4	12.2	11.1	10.1	9.6
10.0	10.8	11.8	12.9	13.8	14.3	14.1	13.3	12.2	11.1	10.2	9.7
10.1	10.9	11.8	12.8	13.6	14.1	13.9	13.2	12.2	11.2	10.3	9.9
10.3	11.0	11.8	12.7	13.5	13.9	13.8	13.1	12.2	11.3	10.5	10.1
10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2
10.5	11.1	11.8	12.6	13.3	13.6	13.5	12.9	12.1	11.4	10.7	10.4
10.7	11.2	11.8	12.6	13.2	13.5	13.3	12.8	12.1	11.4	10.8	10.5
10.8	11.3	11.9	12.5	13.1	13.3	13.2	12.8	12.1	11.5	10.9	10.7
10.9	11.3	11.9	12.5	12.9	13.2	13.1	12.7	12.1	11.5	11.0	10.8
11.0	11.4	11.9	12.4	12.8	13.1	13.0	12.6	12.1	11.6	11.1	10.9
11.1	11.5	11.9	12.4	12.7	12.9	12.9	12.5	12.1	11.6	11.2	11.1
11.3	11.6	11.9	12.3	12.6	12.8	12.8	12.5	12.1	11.7	11.3	11.2
11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3
11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4
11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	12.4	12.3	12.0	11.8	11.6	11.5
11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.6
11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.7
11.9	11.9	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9
12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0
Southern Hemisphere											
Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	July	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
24.0	17.4	13.0	8.4	2.7	0.0	0.0	6.4	11.2	15.7	21.7	24.0
21.9	16.7	12.9	8.7	4.3	0.0	1.7	7.0	11.3	15.3	19.9	24.0
16.2	12.8	9.1	5.3	2.0	3.7	7.6	11.3	15.0	18.8	22.1	
9.3	6.1	3.7	4.8	8.0	11.4	14.7	18.0	20.3			
18.3	15.5	12.7	9.6	6.7	4.8	5.6	8.3	11.4	14.5	17.4	19.2
17.6	15.2	12.6	9.8	7.2	5.6	6.3	8.7	11.5	14.3	16.9	18.4
14.9	12.6	9.9	7.6	6.2	6.8	8.9	11.5	14.1	16.5	17.8	
10.1	12.5	10.1	8.0	6.7	7.2	9.2	11.6	13.9	16.1	17.3	
10.2	12.5	10.2	8.3	7.2	7.6	9.4	11.6	13.8	15.8	16.9	
14.3	12.5	10.4	8.6	7.5	8.0	9.6	11.6	13.7	15.5	16.5	
14.2	12.4	10.5	8.8	7.9	8.3	9.7	11.7	13.6	15.3	16.1	
10.6	12.4	10.6	9.0	8.2	8.5	9.9	11.7	13.4	15.0	15.8	
10.7	12.4	10.7	9.2	8.5	8.8	10.0	11.7	13.3	14.8	15.5	
10.8	12.4	10.8	9.4	8.7	9.0	10.2	11.7	13.3	14.6	15.3	
13.6	12.3	10.8	9.6	9.0	9.2	10.3	11.7	13.2	14.4	15.0	
13.5	12.3	10.9	9.8	9.2	9.4	10.4	11.8	13.1	14.3	14.8	
13.4	12.3	11.0	9.9	9.4	9.6	10.5	11.8	13.0	14.1	14.6	
13.3	12.3	11.1	10.1	9.6	9.8	10.6	11.8	12.9	13.9	14.4	
13.2	12.2	11.1	10.2	9.7	9.9	10.7	11.8	12.9	13.8	14.3	
13.1	12.2	11.2	10.4	9.9	10.1	10.8	11.8	12.8	13.7	14.1	
13.0	12.2	11.3	10.5	10.1	10.2	10.9	11.8	12.7	13.5	13.9	
13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	
12.9	12.2	11.4	10.7	10.4	10.5	11.1	11.9	12.6	13.3	13.6	
12.8	12.2	11.4	10.8	10.5	10.7	11.2	11.9	12.6	13.2	13.5	
12.7	12.1	11.5	10.9	10.7	10.8	11.2	11.9	12.5	13.1	13.3	
12.7	12.1	11.5	11.1	10.8	10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.2	
12.6	12.1	11.6	11.2	10.9	11.0	11.4	11.9	12.4	12.9	13.1	
12.6	12.1	11.6	11.3	11.1	11.1	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9	
12.4	12.1	11.7	11.4	11.2	11.2	11.5	11.9	12.3	12.7	12.8	
12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	
12.5	12.1	11.8	11.5	11.4	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	
12.4	12.1	11.8	11.6	11.5	11.6	11.7	11.9	12.2	12.4	12.5	
12.3	12.1	11.9	11.7	11.7	11.7	11.8	11.9	12.2	12.3	12.3	
12.2	12.0	11.9	11.8	11.8	11.8	11.8	11.9	12.2	12.1	12.2	
12.1	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.1	12.1	12.1	
12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	

۱- مقادیر حداکثر ساعات آفتابی (N) برای پانزدهمین روز برآورد مناسبی (با خطای کمتر از ۱ درصد) از میانگین N در طول ماه می‌باشد. تنها برای عرض جغرافیایی بالاتر از ۵۵ درجه (شمالی یا جنوبی) در ماه‌های زمستان، ممکن است، مقدار خطا بیش از ۱ درصد باشد.

جدول ۲-۸- مقادیر σT_k^4 قانون استفان - بولتزمن (برحسب مگاژول بر متر مربع بر روز)
در دمای مشخص T (برحسب درجه سلسیوس)

$\sigma = 4.903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ $T_k = T[^\circ\text{C}] + 273.16$					
T (°C)	σT_k^4 (MJ m ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	σT_k^4 (MJ m ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	σT_k^4 (MJ m ⁻² d ⁻¹)
1.0	27.70	17.0	34.75	33.0	43.08
1.5	27.90	17.5	34.99	33.5	43.36
2.0	28.11	18.0	35.24	34.0	43.64
2.5	28.31	18.5	35.48	34.5	43.93
3.0	28.52	19.0	35.72	35.0	44.21
3.5	28.72	19.5	35.97	35.5	44.50
4.0	28.93	20.0	36.21	36.0	44.79
4.5	29.14	20.5	36.46	36.5	45.08
5.0	29.35	21.0	36.71	37.0	45.37
5.5	29.56	21.5	36.96	37.5	45.67
6.0	29.78	22.0	37.21	38.0	45.96
6.5	29.99	22.5	37.47	38.5	46.26
7.0	30.21	23.0	37.72	39.0	46.56
7.5	30.42	23.5	37.98	39.5	46.85
8.0	30.64	24.0	38.23	40.0	47.15
8.5	30.86	24.5	38.49	40.5	47.46
9.0	31.08	25.0	38.75	41.0	47.76
9.5	31.30	25.5	39.01	41.5	48.06
10.0	31.52	26.0	39.27	42.0	48.37
10.5	31.74	26.5	39.53	42.5	48.68
11.0	31.97	27.0	39.80	43.0	48.99
11.5	32.19	27.5	40.06	43.5	49.30
12.0	32.42	28.0	40.33	44.0	49.61
12.5	32.65	28.5	40.60	44.5	49.92
13.0	32.88	29.0	40.87	45.0	50.24
13.5	33.11	29.5	41.14	45.5	50.56
14.0	33.34	30.0	41.41	46.0	50.87
14.5	33.57	30.5	41.69	46.5	51.19
15.0	33.81	31.0	41.96	47.0	51.51
15.5	34.04	31.5	42.24	47.5	51.84
16.0	34.28	32.0	42.52	48.0	52.16
16.5	34.52	32.5	42.80	48.5	52.49

جدول ۲-۹- ضرایب تبدیل سرعت باد اندازه‌گیری شده در ارتفاع مشخص (بالای سطح چمن)

به سرعت باد در ارتفاع استاندارد دو متری

Conversion Factor = $\frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$ (معادله ۴۷)							
Conversion Factor	z height (m)	Conversion Factor	z height (m)	Conversion Factor	z height (m)	Conversion Factor	z height (m)
0.812	6.0	0.865	4.2	0.980	2.2	-	-
0.802	6.5	0.857	4.4	0.963	2.4	-	-
0.792	7.0	0.851	4.6	0.947	2.6	-	-
0.783	7.5	0.844	4.8	0.933	2.8	-	-
0.775	8.0	0.838	5.0	0.921	3.0	1.178	1.0
0.767	8.5	0.833	5.2	0.910	3.2	1.125	1.2
0.760	9.0	0.827	5.4	0.899	3.4	1.084	1.4
0.754	9.5	0.822	5.6	0.889	3.6	1.051	1.6
0.748	10.0	0.817	5.8	0.881	3.8	1.023	1.8
0.742	10.5	0.812	6.0	0.872	4.0	1.000	2.0

پیوست سه

محاسبه پارامترهای فیزیکی مورد نیاز تعیین تبخیر – تفرق گیاهان

گرمای نهان تبخیر (λ) ^۱

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3}) T \quad (1-3)$$

که در آن:

λ = گرمای نهان تبخیر [مگاژول بر کیلوگرم]

T = دمای هوا [درجه سلسیوس]

مقدار گرمای نهان در هوای با دمای عادی به طور تقریبی، ثابت است. بنابراین، می‌توان از مقدار ثابت $\lambda = 2.45$ مگاژول بر کیلوگرم (برای $T = 20$ درجه سلسیوس) استفاده کرد:

فشار آتمسفر (P) ^۲

$$P = P_0 \left(\frac{T_{K0} - \alpha_1 (Z - Z_0)}{T_{K0}} \right)^{\frac{g}{\alpha_1 R}} \quad (2-3)$$

که در آن:

P = فشار آتمسفر در ارتفاع مشخص [کیلوپاسکال]،

P_0 = فشار آتمسفر در سطح دریا مساوی با 1013 [کیلوپاسکال]،

Z = ارتفاع [متر]،

Z_0 = ارتفاع مرجع [متر]،

g = شتاب ثقل زمین مساوی با 9.807 [متر بر مربع ثانیه]،

R = ثابت ویژه گازها مساوی با 287 [ژول بر کیلوگرم بر کلوین]،

a_1 = ثابت آهنگ کاهش (افتاهنگ)^۳ هوای مرطوب مساوی با 0.0065 [کلوین بر متر] و

T_{K0} = دمای مرجع [کلوین] در ارتفاع Z_0 ، که به صورت زیر تعیین می‌شود:

1- Reference: Harrison (1963)

2- Reference: Burman et al. (1987)

3-Constant lapse rate

$$T_{K0} = 273/16 + T \quad (3-3)$$

T = میانگین دمای هوا در طول دوره مورد نظر [درجه سلسیوس]، می باشد.
معادله (۳-۳) با فرض: $P_0 = 101/3$ [کیلوپاسکال] در $Z_0 = 0$ و $T_{k0} = 293$ [کلوین] در $T = 20$ [درجه سلسیوس] به صورت زیر تغییر می یابد:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 z}{293} \right)^{5.26} \quad (4-3)$$

جرم مخصوص ρ

$$\rho = \frac{1000P}{T_{Kv} R} = 3.486 \frac{P}{T_{Kv}} \quad (5-3)$$

که در آن:

ρ = جرم مخصوص هوا [کیلوگرم بر مترمکعب]،
 R = ثابت ویژه گازها مساوی با ۲۸۷ [ژول بر کیلوگرم بر کلوین] و
 T_{Kv} = دمای واقعی [کلوین]، می باشد.

$$T_{Kv} = T_K \left(1 - 0.378 \frac{e_a}{p} \right)^{-1} \quad (6-3)$$

که در آن:

T_K = دمای مطلق [کلوین] مساوی با $T_K = 273/16 + T$ [°C]، و
 e_a = فشار بخار واقعی [کیلوپاسکال]، می باشد.
برای شرایط میانگین (یعنی فشار بخار واقعی بین ۱ تا ۵ کیلوپاسکال و فشار هوا بین ۸۰ تا ۱۰۰ کیلوپاسکال)، معادله زیر جایگزین معادله (۶-۳) می شود:

$$T_{Kv} \approx 1.01(T + 273) \quad (7-3)$$

برای دوره زمانی ۲۴ ساعته، T همان میانگین دمای روزانه می باشد.

فشار بخار اشباع (e_s) ^۱

$$e^o(T) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \quad (۸-۳)$$

که در آن:

$e^o(T)$ = تابع فشار بخار اشباع [کیلوپاسکال] و

T = دمای هوا [درجه سلسیوس]، می باشد.

شیب منحنی فشار بخار (Δ) ^۲

$$\Delta = \frac{4098 e^o(T)}{(T + 237.3)^2} = \frac{2504 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.2}\right)}{(T + 237.2)^2} \quad (۹-۳)$$

که در آن:

Δ = شیب منحنی فشار بخار [کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس]،

T = دمای هوا [درجه سلسیوس]

$e^o(T)$ = فشار بخار اشباع در دمای T [کیلوپاسکال]، می باشد.

برای محاسبه روزانه، Δ با استفاده از میانگین دمای روزانه (۲۴ ساعت) تعیین می شود. در محاسبه

ساعتی، T مساوی با میانگین دمای ساعتی یعنی T_{hr} است.

ضریب ثابت سایکرومتری (γ) ^۳

$$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} \times 10^{-3} = 0.00163 \frac{P}{\lambda} \quad (۱۰-۳)$$

که در آن:

γ = ضریب ثابت سایکرومتری [کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس]،

C_p = گرمای ویژه هوای مرطوب مساوی با $۱/۰۱۳$ [کیلوژول بر کیلوگرم بر درجه سلسیوس]،

P = فشار آتمسفر [کیلوپاسکال]: معادله (۲-۳) یا (۴-۳)،

ϵ = نسبت وزن ملکولی بخار آب به وزن مولکولی هوای خشک و مساوی با $۰/۶۲۲$ ،

λ = گرمای نهان تبخیر [مگاژول بر کیلوگرم]، می باشد.

1- Reference: Tetens (1930)

2- Reference: Tetens (1930), Murray (1967)

3- Reference: Brunt (1952)

دمای نقطه شبنم $(T_{dew})^1$

دمای نقطه شبنم (T_{dew}) در شرایطی که تشکیل شبنم قابل مشاهده نباشد، با استفاده از e_a به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{dew} = \frac{116.91 + 237.31 \ln(e_a)}{16.78 - \ln(e_a)} \quad (11-3)$$

که در آن:

T_{dew} = دمای نقطه شبنم [درجه سلسیوس]، و

e_a = فشار بخار واقعی [کیلوپاسکال]، می‌باشد.

در شرایطی که رطوبت با سایکرومتر آسمن اندازه‌گیری شود، دمای نقطه شبنم را می‌توان با معادله زیر محاسبه کرد:

$$T_{dew} = (112 + 0.9 T_{wet}) \left(\frac{e_a}{e^o(T_{wet})} \right)^{\frac{1}{8}} - 112 + 0.1 T_{wet} \quad (12-3)$$

تابش طول موج کوتاه در یک روز آفتابی $(R_{so})^2$

محاسبه R_{so} برای تعیین تابش طول موج بلند خالص و کنترل واسنجی دستگاه‌های پیرانومتر و ارزیابی صحت داده‌های R_{so} ، ضروری می‌باشد. با استفاده از معادله زیر تقریب مناسب از R_{so} روزانه و ساعتی بدست می‌آید:

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (13-3)$$

که در آن:

z = ارتفاع ایستگاه از سطح دریا [متر]، و

R_a = تابش فرازمینی [مگاژول بر مترمربع بر روز]، می‌باشد.

معادله (۱۳-۳) برای ایستگاه‌های با ارتفاع کمتر از ۶۰۰۰ متر از سطح دریا و در شرایط پایین بودن کدورت هوا اعتبار دارد. این معادله بر مبنای قانون تغییر خطی تابش (قانون بیر^۳) به صورت تابعی از ارتفاع ایستگاه و با این فرض که میانگین زاویه تابش خورشید بالای سطح افق حدود ۵۰ درجه بوده، ارائه شده است.

1- Reference: Bosen (1958), Jensen et al. (1990)

2- Reference: Allen (1996)

3- Beer's law

در نواحی که کدورت هوا به علت آلودگی یا غبار بالا بوده یا در مناطقی که زاویه تابش خورشید بالای افق، به طور معنی‌داری، کمتر از ۵۰ درجه است و در نتیجه طول مسیر تابش از درون آتمسفر افزایش می‌یابد، قانون بیر به صورت زیر استفاده می‌شود که در آن P برای نشان دادن جرم آتمسفر بکار می‌رود:

$$R_{so} = R_a \exp\left(\frac{-0.0018 P}{K_t \sin \phi}\right) \quad (۱۴-۳)$$

که در آن:

K_t = ضریب کدورت و مقدار آن: $0 < K_t \leq 1/0$ ، [صفر برای هوای صاف و ۱ برای هوای فوق‌العاده متلاطم، غبارآلود یا آلوده]،

P = فشار آتمسفر [کیلوپاسکال]،

ϕ = زاویه خورشید با افق [رادیان]، و

R_a = تابش فرازمینی [مگاژول بر متر مربع بر روز]، می‌باشد.

برای دوره زمانی ساعتی یا کوتاه‌تر، ϕ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$= \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \sin \phi \quad (۱۵-۳)$$

که در آن:

ϕ = عرض جغرافیایی [رادیان]،

δ = زاویه میل خورشید [رادیان]، (معادله (۲۴) در فصل سوم) و

ω = زاویه زمان خورشید در نیمه دوره زمانی ساعتی یا کوتاه‌تر [رادیان]، (معادله ۳۱ در فصل سوم)، می‌باشد.

به طور تقریبی، میانگین روزانه زاویه خورشید بالای افق بر حسب R_a ، به صورت زیر برآورد می‌شود:

$$\sin \phi_{24} = \sin \left[0.85 + 0.3 \phi \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39 \right) - 0.42 \phi^2 \right] \quad (۱۶-۳)$$

که در آن:

ϕ_{24} = میانگین زاویه خورشید در طول ساعات آفتابی، میانگین وزنی بر طبق R_a ، [رادیان]،

ϕ = عرض جغرافیایی [رادیان] و

J = شماره روز از سال، می‌باشد.

عبارت ϕ_{24} بکار رفته در معادله (۱۴-۳) یا (۱۸-۳) میانگین زاویه خورشید در طول روشنایی روز (ساعات آفتابی) می‌باشد و اثر پخشیدگی تابش خورشید در آتمسفر بر روی R_{so} روزانه را نشان می‌دهد. عبارت ϕ_{24} در معادله (۱۶-۳) باید صفر یا بیشتر از آن باشد.

در برخی شرایط، با تعدیل معادله (۱۴-۳) برای در نظر گرفتن اثر بخار آب بر جذب تابش طول موج کوتاه، می‌توان دقت برآورد R_{so} را افزایش داد. بنابراین:

$$R_{so} = (K_B + K_D) R_a \quad (۱۷-۳)$$

که در آن:

K_B = نمایه صافی هوا برای تابش مستقیم خورشید، [بدون واحد]،

K_D = نمایه متناظر با پخشیدگی تابش خورشید [بدون واحد] و

R_a = تابش فرازمینی [مگاژول بر متر مربع بر روز]، می باشد.

$$K_B = 0.98 \exp \left[\frac{-0.00146 P}{K_t + \sin \phi} - 0.091 \left(\frac{W}{\sin \phi} \right)^{0.25} \right] \quad (۱۸-۳)$$

که در آن:

K_t = ضریب کدورت و مقدار آن: $0 < K_t \leq 1/0$ [صفر برای هوای صاف و ۱ برای هوای فوق العاده کدر، غبار آلود یا آلوده]،

P = فشار آتمسفر [کیلو پاسکال]،

ϕ = زاویه خورشید بالای افق [رادیان] و

W = آب قابل بارش در آتمسفر [میلی متر]، می باشد.

$$W = 0.14 e_a P + 2.1 \quad (۱۹-۳)$$

که در آن:

W = آب قابل بارش در آتمسفر [میلی متر]،

e_a = فشار بخار واقعی [کیلو پاسکال]، و

P = فشار آتمسفر [کیلو پاسکال]، می باشد.

نمایه پخشیدگی تابش با استفاده از K_B به صورت زیر برآورد می شود:

$$K_D = 0.35 - 0.33 K_B \quad K_B \geq 0.15 \quad (۲۰-۳)$$

$$K_D = 0.18 + 0.82 K_B \quad K_B < 0.15$$

متغیر ϕ_{24} از معادله (۱۶-۳) تعیین و برای محاسبه ϕ در معادله (۱۸-۳) بکار می رود. بر مبنای ϕ بدست آمده، R_{so} روزانه از معادله (۱۴-۳) برآورد می شود.

به طور معمول، R_{so} محاسبه شده با استفاده از معادله های (۱۳-۳)، (۱۴-۳) یا (۱۶-۳) باید به عنوان کران بالای R_s اندازه گیری شده، رسم و برای کنترل دقت واسنجی دستگاه های اندازه گیری استفاده شود. این روش در پیوست پنج ارائه شده است.

پیوست چهار

تحلیل آماری داده‌های هواشناسی^۱

اغلب اوقات، مجموعه داده‌های یک متغیر اقلیمی، Y_i ، در یک ایستگاه هواشناسی، به دلیل بروز وقفه‌هایی در اندازه‌گیری داده‌ها، کامل نمی‌باشند. دلایل بسیاری موجب این وقفه‌ها بوده و به طور عمده شامل خرابی یا کارکرد غیر صحیح دستگاه‌های اندازه‌گیری در یک دوره زمانی مشخص است.

در شرایط فوق که داده‌ها غیرموجود^۲ محسوب می‌شوند، با استفاده از داده‌های در دسترس از ایستگاه هواشناسی مجاور محل مورد نظر، X_i ، چنانچه قابل اطمینان باشند، مجموعه داده‌ها را می‌توان کامل کرد. هر چند، قبل از جایگزین کردن بخشی از مجموعه داده‌های X_i در مجموعه داده‌های Y_i ، باید همگنی دو مجموعه اثبات شود. به عبارت دیگر، هر دو مجموعه داده‌ها باید نمایانگر شرایط مشابه باشند. روش تکمیل مجموعه داده‌های غیرموجود پس از آزمون همگنی یا اصلاح همگنی، قابل بکارگیری می‌باشد. در این فصل، نحوه استفاده از تحلیل رگرسیون به عنوان یک روش مناسب برای تکمیل مجموعه داده‌های غیرموجود، بیان می‌شود.

روش تکمیل مجموعه داده‌های غیر کامل با استفاده از مجموعه داده‌های کامل از ایستگاه مجاور محل مورد نظر را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- یک ایستگاه هواشناسی مجاور محل مورد نظر را انتخاب کنید به نحوی که مجموعه داده‌های در دسترس آن، دوره‌های مورد نظر را پوشش دهد.

۲- مجموعه داده‌های کامل متغیر مورد نظر ایستگاه مجاور (X_i) و مجموعه داده‌های غیر کامل ایستگاه مورد نظر (Y_i) را مشخص و میانگین و انحراف معیار هر دو مجموعه را محاسبه کنید. میانگین ($\bar{x}$) و انحراف معیار (s_x) برای مجموعه داده‌های کامل (X_i) عبارتند از:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-4)$$

$$s_x = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2-4)$$

میانگین ($\bar{y}$) و انحراف معیار (s_y) برای مجموعه داده‌های غیر کامل (Y_i) عبارتند از:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (3-4)$$

1- With contribution from J.L.Teixeria, Instituto Superior de Agronomia, Lisbon, Portugal.

2- Missing data

$$s_y = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۴-۴)$$

محاسبه‌های فوق در دوره‌هایی انجام شوند که داده‌های هر دو مجموعه کامل باشند و در آنها؛ y_i و x_i یک عضو به ترتیب از مجموعه Y_i و X_i بوده و n تعداد مشاهده‌ها است.

۳- معادله رگرسیون y بر حسب x برای دوره‌هایی که هر دو مجموعه دارای داده‌های کامل هستند، را تشکیل دهید:

$$\hat{y}_i = a + bx_i \quad (۵-۴)$$

با:

$$b = \frac{\text{cov}_{xy}}{s_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (۶-۴)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (۷-۴)$$

که در آن؛ a و b ضرایب ثابت تجربی و cov_{xy} کووریانس بین X_i و Y_i می‌باشد. تمامی نقاط x_i و y_i و خط رگرسیون نقطه‌ها را در دامنه داده‌های مشاهده شده رسم کنید. اگر فاصله نقطه‌ها از خط رگرسیون با افزایش y افزایش یابد، این روش برای تکمیل داده‌ها پیشنهاد نمی‌شود زیرا، روند تغییر متغیر اقلیمی در دو ایستگاه مشابه نمی‌باشد و ممکن است، دو مجموعه داده‌ها همگن نباشند. بنابراین، باید ایستگاه مجاور دیگری انتخاب شود.

۴- ضریب همبستگی (r) را محاسبه کنید:

$$r = \frac{\text{cov}_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (۸-۴)$$

چنانچه، r^2 بالا بوده ($r^2 \geq 0.7$) و مقدار b در دامنه $0.7 \leq b \leq 1.3$ باشد، شرایط همگنی برای تکمیل مجموعه داده‌های غیرموجود با استفاده از مجموعه داده‌های کامل ایستگاه مجاور فراهم می‌باشد. می‌توان از پارامترهای r^2 و b به عنوان معیارهای انتخاب بهترین ایستگاه مجاور استفاده کرد.

۵- داده‌ها برای دوره‌های فاقد آمار $k = n+1, n+2, \dots, m$ با استفاده از معادله رگرسیون که با پارامترهای a و b (معادله‌های (۶-۴) و (۷-۴)) مشخص می‌شود، را محاسبه نمایید. بنابراین:

$$\hat{y}_k = a + b x_k \quad (9-4)$$

ع- حال، مجموعه داده‌های کامل به صورت زیر خواهند بود:

$$Y_j = y_i \quad (j=i=1, \dots, n) \quad (10-4)$$

$$Y_j = \hat{y}_k \quad (j=k=n+1, n+2, \dots, m)$$

توجه شود که $Y_j = \hat{y}_k$ برآورد شده از معادله رگرسیون برای پیش‌بینی تبخیر - تعرق سودمند است. هرچند، نمی‌توان این مقادیر را به عنوان متغیرهای تصادفی^۱ فرض کرد.

تحلیل همگنی مجموعه داده‌ها

در طول یک دوره چند ساله، داده‌های اقلیمی جمع‌آوری شده در یک ایستگاه هواشناسی مشخص ممکن است، همگن نباشند به عبارت دیگر، در مجموعه داده‌هایی که یک متغیر اقلیمی را نشان می‌دهد، ممکن است، تغییر ناگهانی میانگین و واریانس مشاهده شود. این پدیده ممکن است، حاصل علت‌های مختلف باشد که برخی به تغییر تجهیزات و روش اندازه‌گیری و برخی به تغییر شرایط محیطی محل ایستگاه نظیر توسعه سریع محدوده شهرها یا اراضی تحت آبیاری، بستگی دارد. تغییر مربوط به مجموعه داده‌ها ممکن است به علت‌های زیر باشند:

- تغییر در نوع قطعات حساس (سنسور) یا تجهیزات اندازه‌گیری
- تغییر دیده‌بان و یا تغییر زمان اندازه‌گیری‌ها
- عدم ثبت داده‌ها توسط دیده‌بان
- خرابی سنسورهایی مانند بعضی انواع پیرانومترها و سنسورهای رطوبت‌سنج یا خرابی تجهیزات مکانیکی نظیر باران‌سنج معمولی، پاره یا کوتاه شده سیم‌های رطوبت‌سنج
- کهنه شدن قطعات متحرک (بلبرینگ‌های) بادسنج‌ها
- استفاده از ضرایب واسنجی غیرصحيح
- تغییر در منبع انرژی یا کارکرد تجهیزات الکتریکی
- افزایش ارتفاع درختان، کاشت گیاهان بلند و احداث ساختمان یا ایجاد حفاظ‌ها در مجاورت محل نصب تجهیزات باران‌سنج، بادسنج یا تشت تبخیر
- تغییر محل ایستگاه هواشناسی یا تغییر در نوع پناهگاه‌هایی محافظ سنسورهای اندازه‌گیری دما و رطوبت
- تغییر در رطوبت، نوع یا نگهداری پوشش گیاهی داخل ایستگاه هواشناسی
- تغییر قابل ملاحظه در رطوبت یا نوع پوشش گیاهی مناطق اطراف ایستگاه هواشناسی

۱- برای تولید مقادیر تصادفی می‌توان باقیمانده‌های $\mathcal{E}_k$ که از جمعیت $N(0, S_{y,x})$ بدست آمده‌اند، را به $\hat{y}_k$ (معادله ۹-۴) اضافه کرد. باقیمانده‌ها برپایه جداول اعداد تصادفی تولید می‌شوند. در این حالت، Y_j برآوردی را می‌توان یک متغیر تصادفی فرض کرد.

چنانچه، داده‌های اندازه‌گیری شده متأثر از عوامل فوق تغییر یافته و از لحاظ آماری، ادامه مجموعه داده‌های پیش نباشند، لازم است برای ارزیابی همگنی داده‌های مورد نظر از روش مناسب استفاده شده یا ضرایب اصلاحی مناسب معرفی شوند. برای این ارزیابی باید زیر مجموعه داده‌های قابل اطمینان در مجموعه داده‌ها مشخص شود که برای آن تعیین اطلاعات محلی مورد نیاز است.

روش‌های پیشنهادی برای اصلاح داده‌ها در این پیوست ساده بوده لیکن، دقت آن به طور تجربی ثابت شده است. این روش‌ها بر مبنای مقایسه آماری دو مجموعه داده ارائه شده‌اند. مجموعه داده‌های یک متغیر اقلیمی X_i (به عنوان مثال: RH_{max} , u_2 , T_{min} , T_{max}) همگن و مجموعه داده‌های همان متغیر اقلیمی، Y_i ، غیر همگن فرض می‌شود. هر دو مجموعه X_i و Y_i باید از ایستگاه‌های دارای اقلیمی مشابه در منطقه، جمع‌آوری شوند. به عبارت دیگر، باید X_i و Y_i علیرغم تفاوت در مکان اندازه‌گیری، در دوره‌های زمانی کوتاه مدت (روزانه، هفتگی یا ده روزه) روند تغییر مشابه داشته باشند.

داده‌های مرجع X_i از یک ایستگاه هواشناسی انتخاب می‌شوند که در آن، مجموعه داده‌ها همگن فرض کرد^۱. مجموعه داده‌های X_i و Y_i باید در دوره و فاصله مشابه اندازه‌گیری شده باشند.

روش باقیمانده‌های تجمعی^۲

در روش مقایسه دو مجموعه داده‌های اقلیمی اندازه‌گیری شده در دو ایستگاه هواشناسی که یک مجموعه همگن فرض شده است، هنگامی می‌توان مجموعه دیگر را نیز همگن فرض کرد که باقیمانده‌های تجمعی داده‌ها از خط رگرسیون برازش شده بر مجموعه داده‌های همگن، چولگی (اریب)^۳ نداشته باشند. فرض چولگی را می‌توان برای سطح احتمال مشخص p بررسی کرد. این بررسی با اثبات این که آیا باقیمانده‌ها در یک بیضی با قطرهای α و β واقع شده، انجام می‌شود. مقادیر α و β به اندازه مجموعه داده‌ها، انحراف معیار نمونه آزمون شده و سطح احتمال p مورد استفاده برای آزمون فرض‌ها^۴ بستگی دارد.

روش بررسی همگنی مجموعه داده‌های اقلیمی Y_i جمع‌آوری شده در یک ایستگاه هواشناسی مشخص را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- یک ایستگاه هواشناسی مرجع واقع در همان اقلیم را انتخاب کنید که دارای مجموعه داده‌های همگن X_i برای متغیر اقلیمی مورد نظر باشد. به عنوان یک پیشنهاد، میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده در تعدادی از ایستگاه هواشناسی منطقه را به عنوان مجموعه داده‌های همگن منطقه محاسبه و استفاده کنید.

۱- هنگامی که در یک منطقه اقلیمی مشخص، هیچگونه اطلاعاتی از همگنی داده‌ها در دسترس نباشد، میانگین مشاهده‌های متغیر اقلیمی در تمامی

ایستگاه‌های منطقه (به جز ایستگاه مورد بررسی) به صورت معادله $X_i = \frac{\sum X_{j,i}}{m}$ به عنوان مجموعه داده‌های همگن قابل استفاده است.

2- Method of cumulative residuals

3- Biased

۴- این آزمون، از نتایج باقیمانده‌ها از رگرسیون خطی بین Y و X استفاده می‌کند. باقیمانده‌ها باید از یک توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار $s_{y,x}$ یعنی خطای $\varepsilon_i \in N(0, s_{y,x})$ تبعیت کند. باقیمانده‌ها (فاصله) از خطر رگرسیون باید متغیرهای تصادفی مستقل فرض شوند (یعنی باید فرض همگنی را نمایش دهند).

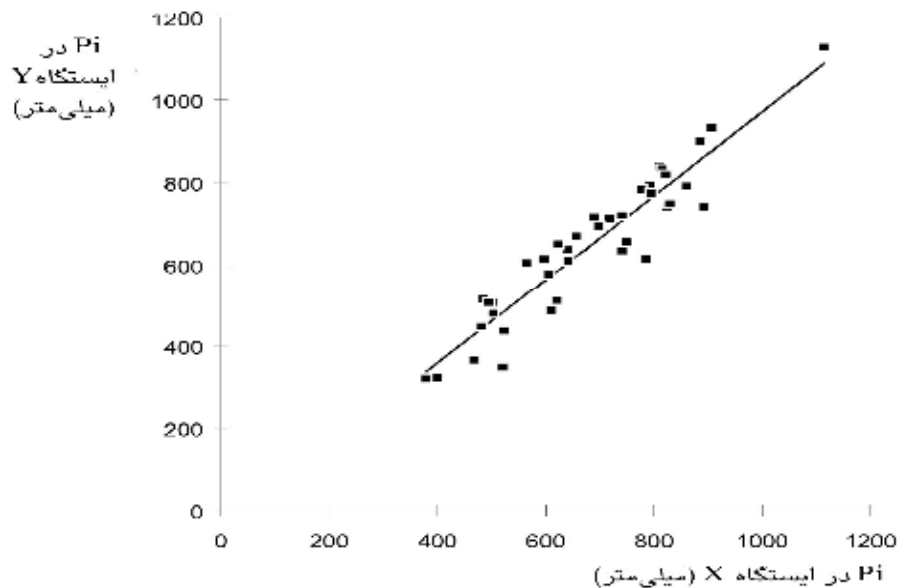
۲- هر دو مجموعه داده‌های X_i و Y_i را به ترتیب زمانی i یعنی به صورت $i=1, 2, \dots, n$ مرتب کنید. در آن، باید زمان شروع و فواصل اندازه‌گیری‌ها هر دو مجموعه یکسان باشند.

۳- برای هر دو مجموعه، میانگین و انحراف معیار (معادله‌های ۱ تا ۴ این بخش) متغیر همگن (X_i) و متغیر مورد آزمون (Y_i) را محاسبه کنید.

۴- معادله خط رگرسیون بین دو متغیر Y_i و X_i و ضریب همبستگی (معادله‌های ۵-۴ تا ۸-۴) را محاسبه کنید. معادله رگرسیون بین داده‌های مجموعه کامل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\hat{y}_i = a_f + b_f x_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (۱۱-۴)$$

که در آن، اندیس f به مجموعه کامل اشاره دارد. در صورت امکان، نقاط (X_i, Y_i) و خط رگرسیون را رسم کنید تا اعتبار فرض همگنی داده‌ها^۱ مشاهده شود (شکل ۱-۴).^۲



شکل ۱-۴- رگرسیون بین دو مجموعه داده‌های اقلیمی، مجموعه داده‌های X همگن می‌باشد. این مثال نشان می‌دهد که شرایط همگنی مناسب بوده است.

۱- هنگامی فرض همگنی معتبر است که باقیمانده‌های ε_i متغیر وابسته از خط رگرسیون (معادله ۵-۴) را بتوان متغیرهای تصادفی مستقل فرض کرد. هنگامی که انحراف‌های Y_i مشاهده شده از $\hat{Y}_i$ برآورد شده با رگرسیون برای تمامی X_i ها در یک دامنه قرار گیرند یعنی، مقدار این انحراف‌ها با افزایش مقادیر X_i افزایش (یا کاهش) نداشته باشند، فرض همگنی را می‌توان به صورت نمودار مشاهده و ارزیابی کرد.

۲- داده‌های این مثال توسط J.L.Teixeira ارائه شده است (مکاتبات شخصی، ۱۹۹۵).

۵- باقیمانده مقادیر مشاهده شده y_i نسبت به خط رگرسیون (معادله ۴-۵)، انحراف معیار ($s_{y,x}$) باقیمانده‌ها و باقیمانده تجمعی متناظر، E_i را محاسبه کنید.

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i \quad (12-4)$$

$$s_{y,x} = s_y \left(1 - r^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (13-4)$$

$$E_i = \varepsilon_i + \sum_{j=1}^{i-1} \varepsilon_j \quad (j=1, \dots, i-1) \quad (14-4)$$

۶- سطح احتمال p را برای اثبات فرض همگنی انتخاب کنید. به طور معمول، از مقدار $p=80\%$ استفاده می‌شود. سپس، معادله بیضی با محاسبه قطرهای آن به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\alpha = \frac{n}{2} \quad (15-4)$$

$$\beta = \frac{n}{(n-1)^2} z_p s_{y,x} \quad (16-4)$$

که در آن:

n = تعداد نمونه مورد آزمون،

z_p = متغیر نرمال استاندارد برای سطح احتمال p (به طور معمول، $p=80\%$): جدول ۴-۱ و

$s_{y,x}$ = انحراف معیار باقیمانده‌های y (معادله ۴-۱۳)، می‌باشند.

بنابراین، معادله پارامتری بیضی به صورت زیر است:

$$X = \alpha \cos(\theta)$$

$$Y = \beta \sin(\theta)$$

زاویه θ (برحسب رادیان) بین صفر تا 2π متغیر است.

بنابراین، نتیجه می‌شود که با سطح احتمال p ، توزیع باقیمانده‌ها اریب (چولگی) ندارند. یعنی، هنگامی که مقادیر محاسبه شده E_i در درون بیضی (معادله ۴-۱۷) واقع شود، مجموعه داده‌های y_i همگن فرض می‌شود.

۷- باقیمانده‌های تجمعی E_i را در مقابل زمان با استفاده از همان مقیاس زمانی (فاصله) متغیر تحت آزمون، رسم کنید (شکل ۲-۴).

جدول ۴-۱- متغیر نرمال استاندارد (Z_p) برای سطح احتمال p

Z_p	p (درصد)	Z_p	p (درصد)
۰/۸۴	۸۰	۰/۰۰	۵۰
۱/۰۴	۸۵	۰/۲۵	۶۰
۱/۲۸	۹۰	۰/۵۲	۷۰
۱/۶۴	۹۵	۰/۶۷	۷۵

تذکر: با فرض متقارن بودن توزیع نرمال، مقدار Z با سطح احتمال $p < ۵۰\%$ ، همان مقدار Z با سطح احتمال $(۱۰۰-p)$ با علامت مخالف می‌باشد. مثال: برای $p = ۲۰\%$ ، مقدار Z مساوی است با: $Z_{۰.۲} = -۰/۸۴$ ، $Z = -Z_{۰.۸} = -۰/۸۴$.

۸- معادله بیضی را در همان دستگاه مختصات رسم کنید. چنانچه تمامی نقاط E_i در داخل این بیضی واقع شوند، فرض همگنی در سطح احتمال p تأیید می‌شود (شکل ۴-۴).

۹- اگر فرض همگنی تأیید نشود (این حالت در شکل ۲-۴ مشاهده شده)، آنگاه نقطه عطف E_i ، آنجا که افزایش (یا کاهش) مقادیر E_i شروع می‌شود، را می‌توان انتخاب کرد. برای مثال، در شکل ۲-۴ این نقطه $I=۱۶$ است و نقطه عطف $k = i$ نامیده می‌شود.

۱۰- حالا مجموعه داده‌ها تحت بررسی به دو زیرمجموعه از ۱ تا k و از $k+1$ تا n تقسیم می‌گردد. سپس، معادله‌های جدید رگرسیون بین Y و X برای هر دو زیر مجموعه محاسبه می‌شوند. با این فرض که، دومین زیر مجموعه همگن لیکن، اولین زیر مجموعه غیر همگن باشد، داریم:

$$\hat{y}_i = a_{nh} + b_{nh} x_i \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (۱۸-۴)$$

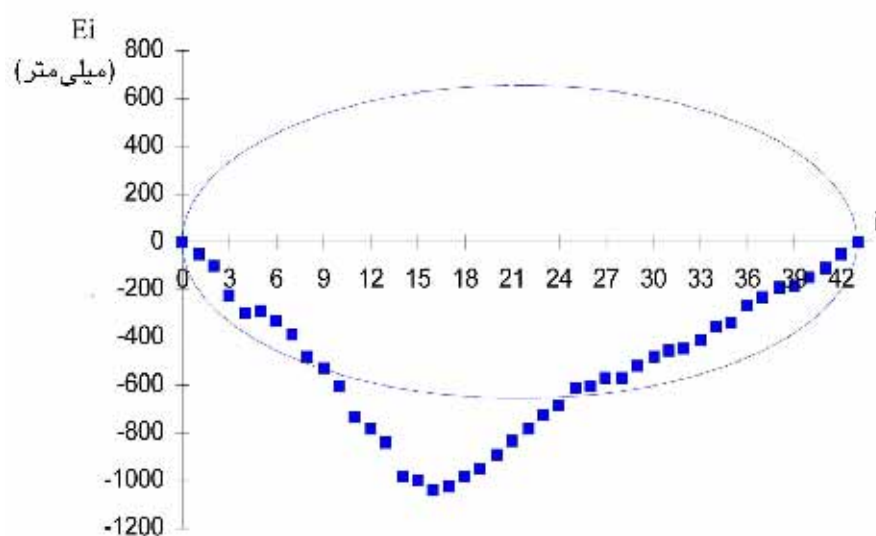
$$\hat{y}_i = a_h + b_h x_i \quad (i=k+1, k+2, \dots, n) \quad (۱۹-۴)$$

که در آن، اندیس‌های h و nh به ترتیب ضرایب رگرسیون زیر مجموعه‌های همگن و غیر همگن را نشان می‌دهند (شکل ۳-۴).

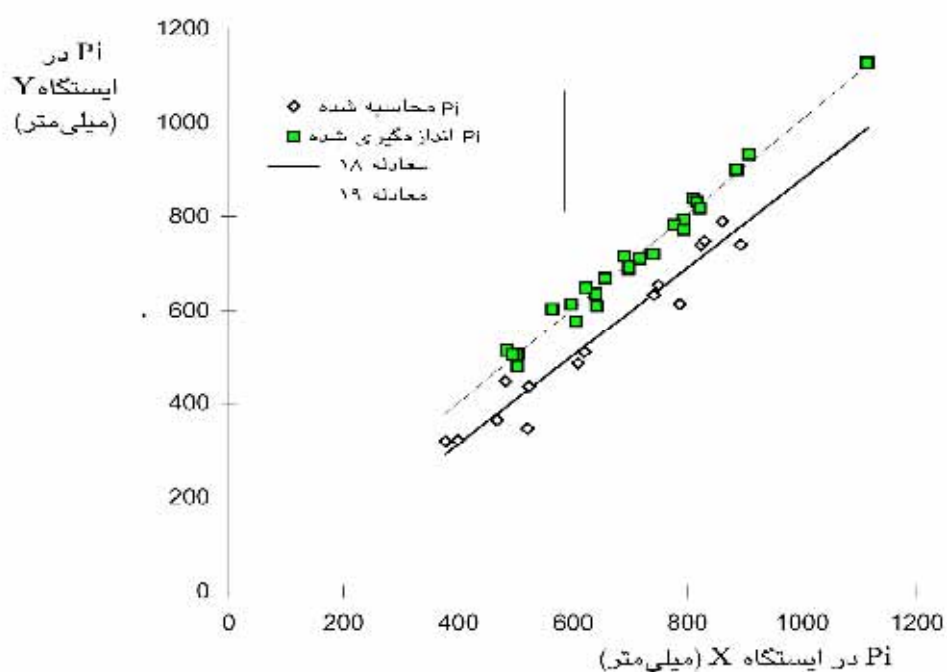
۱۱- تفاوت‌های بین دو خط رگرسیون را محاسبه کنید:

$$\Delta \hat{y}_i = (a_h + b_h x_i) - (a_{nh} + b_{nh} x_i) \quad (۲۰-۴)$$

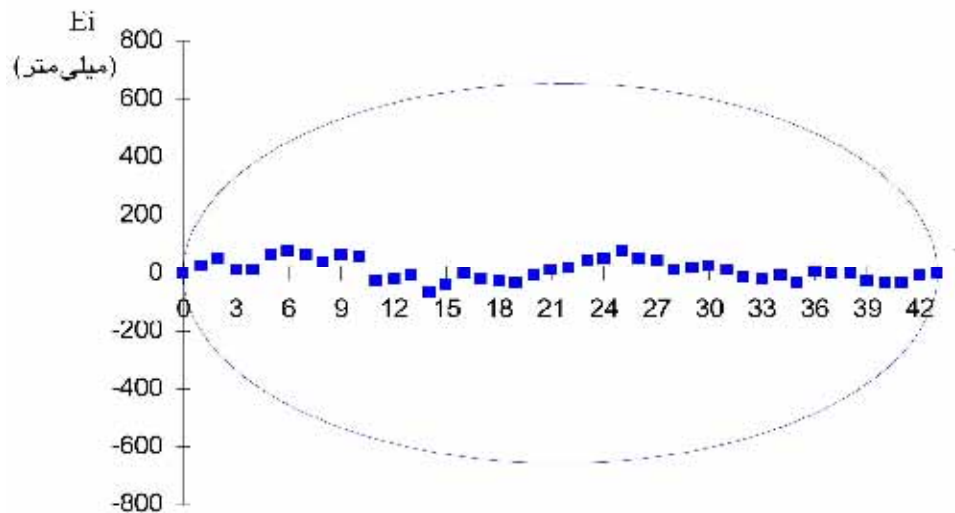
که در آن؛ i برای مجموعه غیر همگن: $i=1, 2, \dots, k$ است.



شکل ۲-۴- رسم باقیمانده‌های تجمعی (E_i) در مقابل زمان و رسم بیضی متناظر با آن برای سطح احتمال $p=80\%$ ، شکل نشان می‌دهد که مجموعه داده‌های Y (نسبت به مجموعه داده‌های X) همگن نیست.



شکل ۳-۴- خطوط رگرسیون برای دو زیر مجموعه بدست آمده از داده‌های شکل‌های ۱-۴ و ۲-۴. این خطوط پس از تعیین نقطه عطف در شکل ۲-۴ رسم شده‌اند.



شکل ۴-۴- رسم باقیمانده‌های تجمعی در مقابل زمان و رسم بیضی متناظر با آن برای سطح احتمال $p=80\%$ پس از اصلاح متغیر y .

۱۲- قسمت زیر مجموعه غیرهمگن از مجموعه داده‌های Y را اصلاح کنید:

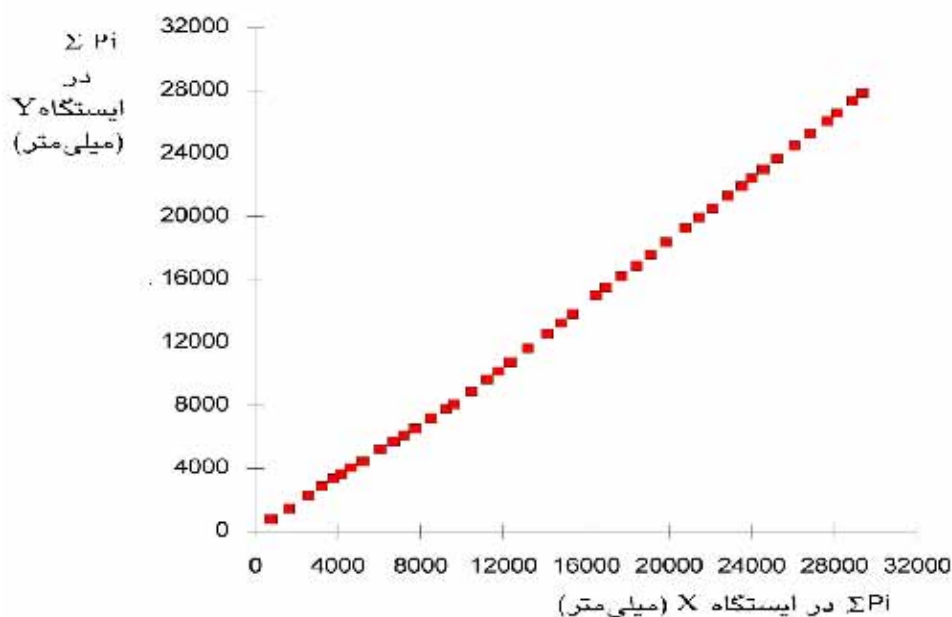
$$y_{c,i} = y_i + \Delta \hat{y}_i \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (21-4)$$

که در آن، اندیس c مقادیر اصلاح شده را نشان می‌دهد. بنابراین، مجموعه کامل، اصلاح و همگن شده متغیر اقلیمی Y عبارت است از:

$$Y_i = y_{c,i} \quad i=1, 2, \dots, k \quad (22-4)$$

$$Y_i = y_i \quad i=k+1, k+2, \dots, n$$

در شرایطی که اصلاح غیر همگنی مجموعه دوم مورد نظر باشد، از روش مشابه استفاده می‌شود. توجه شود که متغیرهای Y_i ، علیرغم تغییر میانگین و واریانس پس از اصلاح داده‌ها، همچنان، متغیرهای تصادفی هستند. برای تأیید همگنی مجموعه داده‌های اصلاح شده Y ، می‌توان از روش آزمون همگنی دوباره استفاده و همگنی متغیر اصلاح شده را در نمودار باقیمانده‌ها مشاهده کرد (مثال شکل ۴-۴). در این مثال، فرض شد که زیرمجموعه k تا i مجموعه داده‌های صحیح یا مناسب بود. بنابراین، فرض است که قرائت‌های پیش از زمان k به دلیل واسنجی تجهیزات اندازه‌گیری، تفاوت در شرایط ایستگاه یا تجهیزات درون آن، تغییر در نوع یا سازنده تجهیزات یا تغییر شرایط عمومی محیط ایستگاه دارای اریب (چولگی) بوده‌اند. شکل ۳-۴ نشان می‌دهد که مقدار اریب نزولی پیش از نقطه $i = k$ حدود ۱۰۰ میلی‌متر بوده است.



شکل ۴-۵- تحلیل دو مجموعه از مقادیر باران به روش توده مضاعف،
هنگامی که داده‌های ایستگاه Y همگن نباشند.

روش توده مضاعف^۱

روش توده مضاعف، نیز، برای ارزیابی همگنی پارامترهای اقلیمی بکار می‌رود. روش توده مضاعف مشابه روش باقیمانده‌های تجمعی بیان شده در بخش پیش، به مجموعه داده‌های دو ایستگاه هواشناسی نیازمند است که در آن $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ ، مجموعه داده‌های یک متغیر اقلیمی مشخص است که به طور مرتب در ایستگاه مرجع برای یک دوره زمانی مشخص اندازه‌گیری شده و همگن فرض می‌شود. مقادیر Y_i مجموعه داده‌های همان متغیر اقلیمی در ایستگاهی است که باید همگنی آن بررسی شود. مجموعه اخیر در همان دوره زمانی اندازه‌گیری شده است.

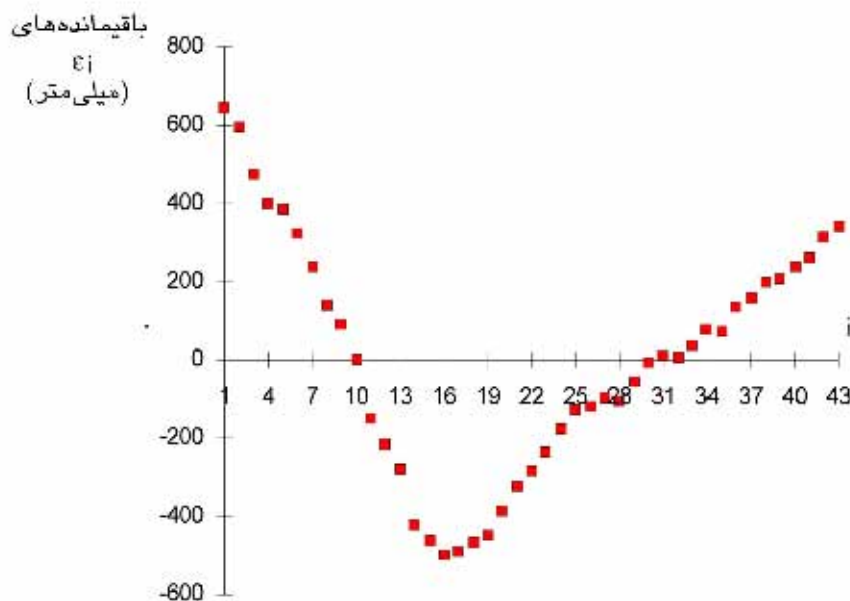
در روش توده مضاعف که با تشکیل اولین زوج اندازه‌گیری شده X_i و Y_i شروع می‌شود، مجموعه داده‌های تجمعی تصاعدی از مقادیر X_i و Y_i تشکیل می‌شود تا مشابه بودن روند تغییر X_i و Y_i در دراز مدت تأیید شود. بنابراین، متغیرهای تجمعی زیر بدست می‌آیند:

$$x_i = X_i + \sum_{j=1}^{i-1} X_j \quad (۲۳-۴)$$

و

$$y_i = Y_i + \sum_{j=1}^{i-1} Y_j \quad (۲۴-۴)$$

که در آن: $i=1, \dots, n$ و $j=1, \dots, i-1$



شکل ۴-۶- پراکندگی باقیمانده‌های توده مضاعف نسبت به خط مستقیم (معادله ۴-۲۶)،
غیرهمگنی باقیمانده مجموعه داده‌های بارندگی ایستگاه Y را نشان می‌دهد.

متغیرهای X_i و Y_i ، همچنان، متغیرهای تصادفی محسوب شده و با میانگین و انحراف معیار (معادله‌های ۴-۱ تا ۴-۴) مشخص می‌شوند. متغیرهای X_i و Y_i را می‌توان با رگرسیون خطی (معادله‌های ۴-۵ تا ۴-۸) به یکدیگر مرتبط کرد هر چند، روش توده مضاعف به عنوان یک روش نموداری بکار می‌رود. کاربرد روش نموداری توده مضاعف با رسم نقاط به مختصات X_i و Y_i انجام و، به طور مشاهده‌ای، خط رسم شده تحلیل می‌شود که، آیا نقطه‌های به مختصات X_i و Y_i بر یک خط مستقیم واقع هستند. این وضعیت همگنی مجموعه داده‌های Y_i نسبت به مجموعه داده‌های X_i را نشان می‌دهد. چنانچه، خط رسم شده Y_i در مقابل X_i دارای یک نقطه عطف یا بیشتر باشد، غیر همگنی مجموعه داده‌های Y_i (یا شاید X_i) مشاهده می‌شود (شکل ۴-۵). نقطه عطف با مختصات X_k و Y_k برای تشکیل دو زیر مجموعه $(i=1, 2, \dots, k)$ و $(i=k+1, k+2, \dots, n)$ قابل استفاده می‌باشد. یکی از این زیرمجموعه‌ها اصلاح شده است. زیر مجموعه مناسب برای اصلاح، باید با کنکاش کردن در قرائت‌های ایستگاه هواشناسی، هنگامی که در دسترس باشد، تعیین شود.

اغلب، تفسیر نموداری روش توده مضاعف مشکل است. بنابراین، استفاده از روش رگرسیون عددی زیر پیشنهاد می‌شود:

۱- خط رگرسیون را با استفاده از مقادیر اولیه، برای مجموعه کامل داده‌های x_i و y_i محاسبه کنید.

$$\hat{y}_i = b x_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (25-4)$$

$$b = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{با:}$$

۲- باقیمانده‌ها از خط رگرسیون را محاسبه کنید.

$$\varepsilon_i = y_i - b x_i \quad (26-4)$$

۳- توزیع باقیمانده‌ها را بررسی کنید. اگر باقیمانده‌ها به صورت متغیرهای مستقل و تصادفی رسم شوند، پس مجموعه داده‌ها همگن فرض می‌شود. هرچند، اگر توزیع باقیمانده‌ها در نقطه $i = k$ اریب (چولگی) داشته باشد، فرض همگنی تأیید نمی‌شود. چولگی را می‌توان از طریق رسم (ε_i, i) ، به طور نموداری، ارزیابی کرد. مثال شکل ۴-۶ نشان می‌دهد که روند تغییر باقیمانده‌ها ε_i تا نقطه $i = k (=16)$ نزولی و سپس صعودی بوده است. چولگی داده‌ها نشان می‌دهد که مجموعه داده‌های Y همگن نمی‌باشند.

۴- نقطه عطف در $i = k$ دو زیرمجموعه $(i=1, 2, \dots, k)$ و $(i=k+1, k+2, \dots, n)$ را تعیین می‌کند. کاربرد با استفاده از اطلاعات محلی در زمینه مجموعه داده‌های اقلیمی، باید تصمیم‌گیری کند که کدام زیر مجموعه باید اصلاح شود.

۵- هنگامی که اولین زیر مجموعه همگن باشد، می‌توان از روش اصلاح زیر استفاده کرد:

(الف) دو خط رگرسیون، که خط رگرسیون اول بر داده‌های اولیه برازش کند، را محاسبه کنید.

$$\hat{y}_i = b_h x_i \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (27-4)$$

و

$$\hat{y}_{nh,i} = a_{nh} + b_{nh} x_i \quad (i=k+1, k+2, \dots, n) \quad (28-4)$$

که در آن، اندیس‌های h و nh به ترتیب همگنی و غیر همگنی را نشان می‌دهند.

(ب) تفاوت‌های بین دو خط رگرسیون برای $(i=k+1, k+2, \dots, n)$ را محاسبه کنید.

$$\Delta \hat{y}_i = b_n x_i - (a_{nh} + b_{nh} x_i) \quad (29-4)$$

۶- هنگامی که دومین زیر مجموعه همگن می‌باشد:

(الف) خط رگرسیون برای زیر مجموعه همگن $(i=k+1, k+2, \dots, n)$ پس از اصلاح مختصات (x_i, y_i) با استفاده از مختصات نقطه عطف $(y_k$ و $x_k)$ به عبارتی، تغییر مبدأ مختصات از $(0, 0)$ به $(y_k$ و $x_k)$ را محاسبه کنید. بنابراین، معادله رگرسیون به صورت زیر می‌باشد:

$$y_i - y_k = b_n (x_i - x_k) \quad (30-4)$$

پس:

$$\hat{y}_i = (y_k - b_n x_k) + b_n x_i \quad (i=k+1, k+2, \dots, n) \quad (31-4)$$

(ب) خط رگرسیون داده‌های زیر مجموعه غیر همگن به نقطه مختصات مبدأ را محاسبه کنید.

$$\hat{y}_i = b_{nh} x_i \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (32-4)$$

(ج) تفاوت‌های بین خطوط رگرسیون معادله‌های $(31-4)$ و $(32-4)$ را محاسبه کنید.

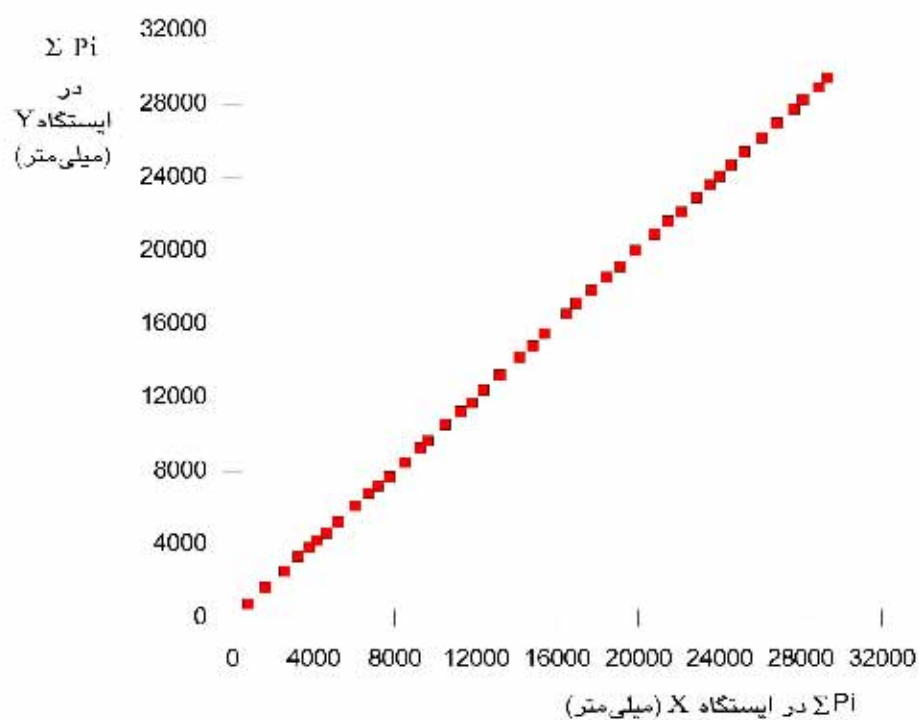
$$\Delta \hat{y}_i = [(y_k - b_n x_k) + b_n x_i] - b_{nh} x_i \quad (33-4)$$

۷- برای هر دو حالت، متغیرهای y_i متناظر با زیر مجموعه غیر همگن را به صورت زیر اصلاح کنید:

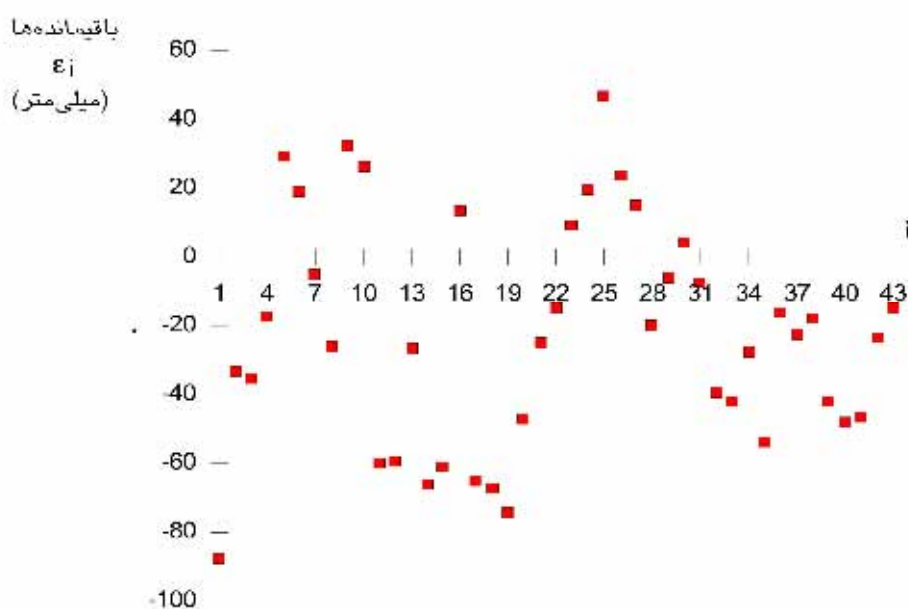
$$y_{c,i} = y_i + \Delta \hat{y}_i \quad (34-4)$$

مقدار $\Delta \hat{y}_i$ با معادله‌های $(29-4)$ یا $(33-4)$ محاسبه می‌شود.

۸- برآوردهای اصلاح شده متغیرهای اقلیمی Y_i را با حل معادله $(24-4)$ برای مقدار Y_i محاسبه کنید. شکل ۷-۴ توده مضاعف پس از اصلاح زیر مجموعه داده‌های Y در شکل ۳-۴ را نشان می‌دهد که در آن، مجموع تجمعی داده‌ها بر روی یک خط راست قرار دارند. شکل ۸-۴ با استفاده از مقادیر باقیمانده‌های متناظر که حالا از توزیع نرمال پیروی کرده، رسم شده است. این روش، با استفاده از محاسبه‌های صفحه گسترده و بسته نرم‌افزارهای نموداری که امروزه در دسترس می‌باشد، به سادگی قابل اجرا است.



شکل ۴-۷- توده مضاعف پس از اصلاح مجموعه داده‌های Y
(مثال شکل ۴-۳)



شکل ۴-۸- باقیمانده‌های توده مضاعف پس از اصلاح مجموعه داده‌های Y
(با شکل ۴-۴ مقایسه شود)

علامت‌های مورد استفاده در بررسی آماری

ضریب رگرسیون	a
ضریب رگرسیون	b
کورینانس متغیرهای X و Y	COV _{xy}
باقیمانده‌های تجمعی	E _i
شماره به ترتیب متغیر X _i در نمونه	i
شماره یک متغیر در یک زیر مجموعه	j, k
تعداد نمونه	n
احتمال	p
تابع چگالی توزیع احتمال	p(x)
ضریب همبستگی	r
ضریب تبیین	r ²
برآورد انحراف معیار متغیر X	S _x
برآورد واریانس متغیر X	S _x ²
برآورد انحراف معیار متغیر Y	S _y
برآورد واریانس متغیر Y	S _y ²
انحراف معیار باقیمانده‌های Y برآورد شده از رگرسیون	S _{x,y}
متغیر تصادفی	X
مقدار متغیر در یک مجموعه داده‌ها	X _i
متغیر تصادفی	x _i
مقدار برآورد شده برای متغیر X با احتمال کمتر از p	$\hat{x}_p$
برآورد میانگین، یا میانگین یک نمونه از متغیر تصادفی X _i	$\bar{X}$
متغیر تبدیل شده از X	Y
مقدار یک متغیر در یک مجموعه داده	Y _i
متغیر تصادفی	y _i
مقدار Y _i برآورد شده از معادله رگرسیون	$\hat{y}_i$
برآورد میانگین، یا میانگین یک نمونه از متغیر تصادفی Y _i	$\bar{y}$
متغیر نرمال استاندارد	z
مقدار متغیر نرمال استاندارد برای احتمال p	Z _p
باقیمانده‌های Y برآورد شده از معادله رگرسیون	ε _i
میانگین جمعیت	μ
انحراف معیار جمعیت	σ

منابع مورد استفاده در تحلیل آماری:

- 1- Dubreuil, P. 1974. *Initiation à l'analyse hydrologique*. Masson & Cie. et ORSTOM, Paris.
- 2- Haan, C. T. 1977. *Statistical Methods in Hydrology*. The Iowa State University Press, Ames.
- 3- Kite, G. W. 1988. *Frequency and Risk Analyses in Hydrology*. Water Resources Publications, Littleton, CO, 257 pp.
- 4- Natural Environment Research Council (NERC) 1975. *Flood Studies Report, Vol I - Hydrology Studies*. Natural Environmental Research Council, London, 550 pp.

پیوست پنج

اندازه‌گیری و ارزیابی صحت داده‌های هواشناسی

دقت برآورد تبخیر - تعرق مرجع (ET_0) نمی‌تواند بیشتر از دقت داده‌های هواشناسی باشد که مبنای برآورد ET_0 هستند. صحت و کیفیت داده‌های هواشناسی باید پیش از بکارگیری در معادله تبخیر - تعرق مرجع ارزیابی شوند. اصلاح داده‌های هواشناسی برای جبران اثر واسنجی غیر دقیق سنسورها باید هر زمان که ضرورت داشته و ممکن باشد، انجام پذیرد. برخی از این اصلاح‌ها در بخش اول پیوست چهار بیان شده‌اند.

در تحلیل و کاربرد داده‌ها تأکید می‌شود که "نبود داده بهتر از داده اشتباه" است. توجه به این نکته در ارزیابی مقدماتی داده‌های تبخیر - تعرق که در توسعه یا واسنجی معادله‌های تبخیر - تعرق مرجع یا تعیین ضرایب گیاهی استفاده شده، ضروری است. به هر حال چنانچه، داده‌های هواشناسی در دسترس نباشند، مراجعه به خلاصه داده‌های هواشناسی یا تبخیر - تعرق منطقه، می‌تواند اطلاعات مفیدی از شرایط محلی ارائه کند. در زمینه داده‌های ET ، با مطالعه نشریه‌هایی نظیر این نشریه، می‌توان برآورد مستدل و دقیق از تبخیر - تعرق مرجع و گیاه را بدست آورد. با این وجود، داده‌های اشتباه به عبارتی داده‌های غیر نمونه که در سطح محلی گردآوری شده، منجر به سردرگمی در برآورد تبخیر - تعرق مرجع و گیاه می‌شود. در مقایسه با هنگامی که تبخیر - تعرق گیاه تنها، به طور منطقی برآورد شده یا حتی از نشریه‌های راهنما انتخاب می‌شود، محاسبه تبخیر - تعرق با بکارگیری داده‌های اشتباه و کاربرد نتایج آن در مدیریت آب آبیاری، بهره‌برداری از منابع آب یا طراحی منابع آب و آبیاری می‌تواند مشکلات اقتصادی و هیدرولوژیکی بیشتری را موجب شود.

در گذشته، در شروع معرفی روش‌های مدل‌سازی با استفاده از رایانه، توصیه می‌شد به هر مدل تا پیش از تأیید آن با استفاده از داده‌های مستقل، اطمینان نشود. امروزه که مدل‌های ریاضی جامع‌تر اثبات و اعتبار یافته، پیامد منطقی این گفته بیشتر مورد تأکید است و توصیه می‌شود که به هیچ داده‌ای تا پیش از تأیید آن با یک مدل، اعتماد نشود. البته انتخاب روشی بین این دو توصیه، مناسب‌تر است. اغلب، برای ارزیابی داده‌های به منظور تعیین خطاها و انحراف‌ها، یک مدل معتبر ارزشمند می‌باشد و البته، داده‌های معتبر برای انتخاب یا واسنجی یک مدل مشخص نیز، مورد نیاز است.

در این پیوست، دستورالعمل‌های مورد استفاده برای محاسبه دامنه تغییر داده‌های هواشناسی و روش ارزیابی صحت این داده‌ها ارائه شده است. در ابتدا، دستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای اقلیمی در ایستگاه‌های هواشناسی کشاورزی توصیف می‌شود.

دستگاه‌های اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی^۱

تهیه داده‌ها و کارکرد تجهیزات

تابش

تابش خورشیدی، به طور معمول، با پیرانومترها (تابش‌سنج) اندازه‌گیری می‌شود. پیرانومترها تابش طول موج کوتاه ورودی را با یک نیمکره که بخش گنبدی آن به سمت بالا تنظیم شده است، اندازه‌گیری می‌کنند. در حال حاضر، در اغلب، پیرانومترها دارای نیمکره شیشه‌ای از یک ترموپیل^۲ به عنوان سنسور استفاده می‌شود که در آن گرادیان گرمای بین سطح گرم و سرد (سیاه و سفید) اندازه‌گیری می‌شود. شدت تابش متناسب با تفاوت دمای دو سطح حساس می‌باشد. صحت اندازه‌گیری به حساسیت مواد مورد استفاده در سنسورها، زمان واکنش به تابش و ناخالصی‌های موجود در مواد تشکیل‌دهنده محافظ سنسورها بستگی دارد. دستگاه سیلیکون دیود^۳ (دوقطبی) نوع دیگر پیرانومتر می‌باشد که ضمن ارزان‌تر بودن، دارای دقت اندازه‌گیری قابل قبول است. در این نوع پیرانومتر، به وسیله یک دیود حساس به نور و متناسب با شدت تابش، جریان الکتریسیته تولید می‌شود. به طور معمول، پیرانومترهای سیلیکون دیود نسبت به کل طیف نور مرئی به طور کامل حساس نمی‌باشند. واسنجی دستگاه تنها، برای اندازه‌گیری تابش به سمت بالا اعتبار دارد.

هنگامی که یک پیرانومتر به سمت پایین تنظیم شود، تابش طول موج کوتاه منعکس شده را اندازه‌گیری می‌کند و بنابراین، دستگاه آلبدومتر^۴ نامیده می‌شود. با نصب دو پیرانومتر توأم که به سمت بالا و پایین تنظیم شود، تابش طول موج کوتاه خالص اندازه‌گیری می‌گردد. در این حالت، دستگاه پیرانومتر^۵ نامیده می‌شود. لازم است که آلبدوسنج یا پیرانومتر نسبت به طیف نور مرئی حساس باشد، زیرا، ترکیب نور منعکس شده از پوشش گیاهی تا حد زیادی به رنگ سبز تمایل دارد. بنابراین، غالب آلبدومتر باید از نوع ترموپیل^۶ و نه از نوع دیود^۷ باشند.

تابش خالص با پیرادیومترها^۸ (یا رادیومترها^۹) که نسبت به هر دو تابش طول موج کوتاه و بلند حساس می‌باشند، اندازه‌گیری می‌شود. این دستگاه‌ها، دارای دو سطح حساس بوده که به دو سمت بالا و پایین تنظیم می‌شوند و یک زاویه سه بُعدی به شکل نیمکره را پوشش می‌دهند. سنسورهای این دستگاه از ترموکوپل‌های متعدد ساخته شده که نسبت به گرمای تولید شده با تابش دارای طول موج‌های متفاوت حساس است و با پوشش‌های گنبدی شکل از جنس پلی‌اتیلن محافظت می‌شود. حساسیت سطح سیاه رنگ

۱- مشروح اطلاعات دستگاه‌های اندازه‌گیری موجود در ایستگاه هواشناسی در نشریه فنی شماره ۲۷ آبیاری و زهکشی فائو (دورنیاس، ۱۹۷۶)، نشریه راهنمای عملیات هواشناسی کشاورزی سازمان جهانی هواشناسی (۱۹۸۱ و ۱۹۸۳) و نیز کتاب‌های هواشناسی سی‌من و همکاران (۱۹۷۹)، روزنبرگ و همکاران (۱۹۸۳) و کسلر و همکاران (۱۹۹۰) ارائه شده است.

2- Thermopile

3- Silicon diode

4- Albedometer

5- Net pyranometer

6- Glass domed thermopile type

7- Photo diode type

8- Pyradiometers

9- Net radiometers

دستگاه با زمان کاهش می‌یابد، بنابراین باید به طور دائم واسنجی شوند. سایر رادیومترها از نظر ترموپیل‌های تهویه‌دار متفاوت می‌باشند، لیکن به ندرت از آنها استفاده می‌شود. تابش سنج‌هایی که در بالا اشاره شد، انرژی تابشی را به انرژی حرارتی تبدیل کرده که بخشی از آن به گرادیان ولتاژ الکتریکی تبدیل شده و شرایط لازم برای ثبت مداوم داده‌ها با استفاده از ثبت‌کننده‌ها را فراهم می‌کنند.

ساعات آفتابی، اغلب، با آفتاب‌نگار کمبل - استوکس اندازه‌گیری می‌شود. یک کره شیشه‌ای، شعاع تابش خورشیدی را روی یک صفحه کاغذ خاص متمرکز می‌نماید و با حرکت خورشید، اثر تابش موجب سوختگی کاغذ شده و با قطع تابش خورشید، خط اثر سوختگی قطع می‌شود. اندازه‌گیری در شرایطی که صفحه کاغذ بر پایه موقعیت نسبی خورشید در وضعیت صحیح نصب شود، معتبر است. باید از جمع شدن آب باران بر روی صفحه کاغذی جلوگیری شود. آفتاب‌نگار باید در نیمکره شمالی به سمت جنوب و در نیمکره جنوبی به سمت شمال نصب شود. در کشور چین، از نوعی آفتاب‌نگار استفاده می‌شود که در آن اثر تابش خورشید پس از عبور از یک روزنه بر روی یک صفحه کاغذی حاوی ماده شیمیایی حساس باقی می‌ماند. ثبت خودکار ساعات آفتابی با استفاده از دستگاه‌های فتوالکتریک یا فیبرهای نوری ثبات صورت می‌پذیرد.

سرعت باد

سرعت باد توسط بادسنج‌هایی اندازه‌گیری می‌شود که بر پایه توصیه سازمان جهانی هواشناسی در ارتفاع دو متری یا بیشتر و گاه در ارتفاع پنج متری بالای سطح زمین نصب شده‌اند، معمول‌ترین آن، بادسنج‌های سه فنجان می‌باشند. استفاده از بادسنج پروانه‌ای نیز، رایج است. اندازه‌گیری سرعت باد با هر دو نوع دستگاه، به شرط کارکرد مطلوب قسمت‌های مکانیکی در شرایط نگهداری مناسب، قابل قبول می‌باشد. بادسنج‌های قدیمی شمارش‌گرهای مکانیکی دارند. بادسنج‌های مدرن، ممکن است، به مولدهای سیگنال ولتاژ متناسب با سرعت باد مجهز باشند. سایر بادسنج‌های، ممکن است، به کلیدهای مغناطیسی کوچک یا تولیدکننده پالس‌های الکتریکی به تناسب سرعت باد، مجهز باشند. از وسایل الکترونیکی در ایستگاه‌های هواشناسی خودکار استفاده می‌شود. دقت اندازه‌گیری سرعت باد، علاوه بر دستگاه اندازه‌گیری، به شرایط منطقه بالادست محل اندازه‌گیری نیز بستگی دارد. برای اینکه اندازه‌گیری‌ها، نمونه‌ای از سرعت باد در منطقه باشند، لازم است یک منطقه وسیع در بالادست محل نصب بادسنج بدون درخت و ساختمان باشد.

دما

دماسنج‌های جیوه‌ای، هنوز هم متداول‌ترین سنسورهای اندازه‌گیری دما می‌باشند. در دماسنج‌های حداکثر و حداقل از جیوه و الک استفاده می‌شود. دمانگارهای دو آلیاژی^۱، متداول‌ترین ثبت‌کننده‌های مکانیکی دما بوده و به سادگی قابل استفاده و نگهداری هستند. دمانگارهای مکانیکی، به شدت، به بازبینی و تنظیم موقعیت قلم ثبت کننده نیاز دارند. این وسایل در درون پناهگاه دارای تهویه طبیعی نصب می‌شوند.

سنسورهای دمای سنج مدرن با نام‌های ترمیستور^۱ و ترموکوپل ساخته شده‌اند. دقت اندازه‌گیری‌ها این دستگاه‌ها بسیار بالا بوده و به طور معمول، در ایستگاه‌های هواشناسی خودکار استفاده می‌شوند. ترمیستورها دمای هوا یا خاک را، به طور مستقل، اندازه‌گیری می‌کنند لیکن، ترموکوپل‌ها به یک قرائت اضافی دما به عنوان مبنا نیازمند هستند که، به طور معمول، با یک ترمیستور انجام می‌شود. برای حفظ دقت اندازه‌گیری و ویژگی نمایشگری این دستگاه‌ها، آنها را در پناهگاه‌های مخصوص با تهویه طبیعی نصب می‌نمایند. بعضی اوقات، پناهگاه‌ها دارای تهویه مصنوعی هستند تا خطای اندازه‌گیری ناشی از گرمای تابش مستقیم خورشید کاهش یابد.

(رطوبت)

دمای نقطه شبنم، اغلب، با یک سطح آینه‌ای فلزی که به طور مصنوعی خنک می‌شود، اندازه‌گیری می‌شود. پس از تشکیل شبنم بر روی سطح، دمای آن دمای نقطه شبنم (T_{dew}) نامیده می‌شود. در سایر روش‌های اندازه‌گیری دمای نقطه شبنم، از خواص الکتریکی یا شیمیایی برخی مواد مشخص که در اثر جذب بخار آب تغییر حالت داده، استفاده شده است. وسایل اندازه‌گیری دمای نقطه شبنم، به نگهداری و بهره‌برداری دقیق نیازمند هستند و به ندرت، در ایستگاه‌های هواشناسی نصب می‌شوند. به طور معمول، دقت برآورد فشار بخار واقعی با استفاده از دمای نقطه شبنم (T_{dew}) بسیار بالا می‌باشد.

رطوبت نسبی با استفاده از رطوبت‌سنج‌ها اندازه‌گیری می‌شود. در ایستگاه‌های مکانیکی مستقر در مزرعه، به طور عمده، از رطوبت‌سنج‌های مویی استفاده می‌شود. دقت اندازه‌گیری‌ها تحت اثر گرد و غبار هوا و گذشت زمان، کاهش می‌یابد. در رطوبت‌سنج‌های مدرن از یک لایه پلیمر عایق استفاده شده که ثابت دی‌الکتریک آن با تابع تغییر رطوبت سطح است و به موجب آن، ظرفیت تقطیرکننده بکار رفته در دی‌الکتریک تغییر می‌کند. این وسایل، به طور معمول، رطوبت‌سنج‌های خازنی دی‌الکتریک^۲ نامیده می‌شوند. دقت اندازه‌گیری با این وسایل می‌تواند بیشتر از رطوبت‌سنج‌های مویی باشد. وسایل الکترونیکی در بیشتر ایستگاه‌های هواشناسی مدرن خودکار کاربرد دارند.

دماهای خشک و تر توسط سایکرومترها اندازه‌گیری می‌شوند. متداول‌ترین آنها، از دو دماسنج جیوه‌ای استفاده می‌کند، که مخزن یک دماسنج آن با فتیله نازک پنبه‌ای اشباع از آب مقطر پوشیده شده و کاهش دما به واسطه خنک شدن هوا را اندازه‌گیری می‌نماید. هنگامی که این دماسنج‌ها درون پناهگاه دارای تهویه طبیعی نصب شوند چنانچه، جریان هوا برای حفظ میزان تبخیر در حد مناسب و خنک شدن درون پناهگاه کافی نباشد، مشکلاتی در اندازه‌گیری دمای تر ایجاد می‌شود. در سایکرومتر آسمن، هوای اطراف دماسنج‌های خشک و تر تهویه می‌شود.

با ترموکوپل‌ها یا ترمیستورها که سایکرومترهای ترموکوپلی و سایکرومترهای ترموسوندی نیز نامیده می‌شوند، می‌توان دمای خشک و تر را اندازه‌گیری کرد. این سایکرومترها در ایستگاه‌های هواشناسی

1- Thermistor

2- Dielectric polymer capacitive hygrometer

خودکار نصب می‌شوند و اندازه‌گیری بسیار دقیق در شرایط نگهداری و بکارگیری صحیح را ارائه می‌دهند.

ارزیابی صحت داده‌های هواشناسی^۱

تابش خورشیدی

با رسم میانگین قرائت‌های ساعتی یا روزانه تابش خورشیدی (R_s) در مقابل تابش طول موج کوتاه محاسبه شده مورد انتظار در آسمان صاف (R_{s0})، عملکرد پیرانومتر و دقت واسنجی آن برای یک منطقه اقلیمی مشخص می‌تواند ارزیابی شود. تابش طول موج کوتاه برای هر روز یا ساعت را می‌توان با استفاده از معادله زیر محاسبه کرد:

$$R_{s0} = K_T R_a \quad (1-5)$$

که در آن، R_a تابش فرازمینی^۲ و K_T نمایه صافی هوا یا انتقال‌پذیری هوا می‌باشد.

در این ترسیم، R_{s0} محاسبه شده با معادله (۱-۵) باید به عنوان حد بالای R_s محاسبه شده رسم و برای کنترل واسنجی پیرانومترها استفاده شود. معادله‌های (۱۳-۳)، (۱۴-۳) یا (۱۷-۳) تا (۲۰-۳) پیوست سه باید برای برآورد K_T برای هوای با کدورت پایین بکار رود. معادله‌های (۱۴-۳) یا (۱۷-۳) تا (۲۰-۳) در پیوست سه برای مناطقی که کدورت هوا در اثر آلودگی یا گرد و غبار بالا بوده و یا زاویه تابش خورشید به طور معنی‌داری کمتر از ۵۰ بوده، مناسب است.

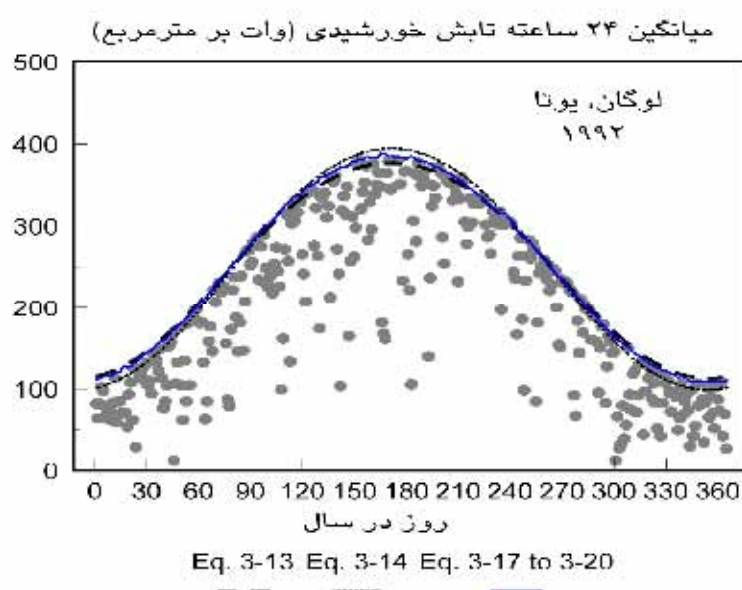
مثال ارائه شده در شکل ۱-۵، کاربرد محاسبه تابش در طول دوره ۲۴ ساعت (روزانه) برای منطقه لوگان، یوتا (ایالات متحده آمریکا) می‌باشد که در آن بیشتر مقادیر R_s مشاهده شده با R_{s0} محاسبه شده همخوانی دارند. بنابراین، واسنجی پیرانومتر مورد استفاده مناسب بوده است. در شکل ۲-۵، برای منطقه لوگان، R_s اندازه‌گیری شده در دوره‌های نیم‌ساعت با R_s محاسبه شده، مقایسه شده‌اند. این شکل، همبستگی مناسبی بین مقادیر مشاهده و محاسبه شده را نشان می‌دهد. هر چند، گاهی نظیر روز هفتم، ممکن است، R_s در برخی اوقات بیشتر از R_{s0} پیش‌بینی شده باشد، و آن هنگامی است که تابش به وسیله ابرهای مناطق مجاور که بر پیرانومتر سایه داشته لیکن، در ایستگاه هواشناسی ثبت نشده‌اند، منعکس شده باشد.

هنگامی که R_s اندازه‌گیری شده در روزهای صاف، اغلب، بیشتر یا کمتر از مقادیر R_{s0} محاسبه شده باشد، اصلاح داده‌های ضروری است. داده‌ها ممکن است، با ضرب در یک ضریب اصلاح (a) به صورت

۱- این دستورالعمل‌ها برگرفته از مقاله آلن (۱۹۹۶) می‌باشد.

۲- برای محاسبه‌های تابش فرازمینی روزانه به فصل سوم و معادله‌های (۲۱-۳) تا (۲۴-۳) و برای محاسبه‌های ساعتی به معادله‌های (۲۸-۳) تا (۳۳-۳) و برای تعیین K_T به R_{s0} به معادله‌های (۱۲-۳) تا (۲۰-۳) پیوست سوم مراجعه شود.

رابطه: $(R_s)_{cor} = aR_s$ تعدیل شود. اصلاح داده‌ها می‌تواند با افزودن یک ضریب ثابت (C) به صورت رابطه: $(R_s)_{cor} = R_s + C$ یا به صورت تلفیق این دو روش انجام شود. واضح است که، اصلاح داده‌ها با فرض صحت R_{s0} محاسبه شده، صورت می‌پذیرد. صحت این داده‌ها در منطقه، ممکن است، نیازمند بررسی و تأیید باشد. این تأیید به روش مقایسه با داده‌های دقیق اندازه‌گیری شده تابش به وسیله پیرانومتري که دارای ضریب واسنجی مطابق با استاندارد بین‌المللی است، انجام می‌شود. پیرانومتر واسنجی شده باید برای دوره‌های کوتاه مدت ۱۰ تا ۱۴ روز استفاده و سپس، برای افزایش طول عمر و حفظ دقت واسنجی، در محل تاریک نگهداری شود. ضریب کدورت هوا در معادله‌های ۳-۱۴ و ۳-۱۸ پیوست سه نیز، باید صحیح انتخاب گردد. هر چند، در این زمینه اطلاعات زیادی در دسترس نمی‌باشد.



شکل ۵-۱- هم‌پوشانی میانگین R_s و R_{s0} برآورد شده روزانه در منطقه لوگان، یوتا-ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۹۲ که واسنجی مناسب پیرانومتر مورد استفاده را نشان می‌دهد.

تابش خالص

معادله‌های مورد استفاده برآورد میانگین ساعتی یا روزانه تابش خالص (R_n) از روی R_s اندازه‌گیری شده، به طور معمول، در اغلب شرایط دقیق می‌باشند. بنابراین، باید R_n اندازه‌گیری شده همواره در مقابل R_n برآورد شده با معادله‌ها^۱ از روی R_s (اندازه‌گیری شده)، دمای هوا و فشار بخار آب رسم شود. ضریب بازتابش (α) بکار رفته در معادله برآورد R_n باید نمایانگر شرایط سطح زیرین تابش‌سنج باشد. اگر، تفاوت مقادیر R_n اندازه‌گیری و برآورد شده در یک دوره زمانی مشخص بیشتر از ۳ تا ۵ درصد باشد، باید واسنجی یا عملکرد دستگاه اندازه‌گیری R_n (تابش‌سنج) به دقت بررسی شود. این نوع مقایسه،

۱ - به معادله‌های (۳۸-۳) تا (۴۰-۳) در پیوست سوم مراجعه شود.

می‌تواند به سادگی، روزها یا دوره‌هایی که کارکرد دستگاه تابش‌سنج به دلیل اثر گرد و غبار هوا، فضولات پرندگان، تقطیر رطوبت در داخل گنبد پلاستیکی محافظ، تراز نبودن دستگاه یا عدم وجود پوشش گیاهی سبز در زیر سنسورها دقیق نمی‌باشد، را تعیین کند. البته، دقت اندازه‌گیری R_s بکار رفته در معادله‌های R_n باید، همان طور که در بخش پیش بیان شد، بررسی شود.

در بکارگیری داده‌های تابش خالص که با دستگاه تابش‌سنج اندازه‌گیری شده، باید توجه شود که این دستگاه‌ها به وسیله شرکت‌های مختلف ساخته می‌شوند و ممکن است، علیرغم نصب در مکان مشابه، نتایج اندازه‌گیری متفاوت باشد. این اختلاف‌ها، به دلیل متفاوت بودن حساسیت انواع تابش خالص‌سنج‌ها نسبت به تابش طول موج بلند و کوتاه و تفاوت میان روش‌های واسنجی سنسورها در طی مراحل ساخت می‌باشد.

نوع، تراکم و ارتفاع پوشش گیاهی محوطه زیر تابش سنج و مقدار نسبی رطوبت خاک باید پایش^۱ شده و به همراه داده‌ها گزارش شوند. در تعیین موقعیت تابش خالص‌سنج باید دقت بسیار شود که در هیچ زمان سایر وسایل یا ساختمان‌ها بر پوشش گیاهی زیر سنسورها و تابش‌سنج سایه‌اندازی نداشته باشد. R_n اندازه‌گیری شده و برآورد شده برای یک نوع علف در منطقه‌ای نزدیک لوگان، یوتا (ایالات متحده آمریکا) در سال ۱۹۹۳، در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. ارقام برای دوره زمانی ۲۰ دقیقه‌ای اندازه‌گیری شدند. همخوانی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و برآوردهای بدست آمده از معادله مناسب بود. همخوانی کامل بین اندازه‌گیری‌های R_n و نتایج معادله‌های R_n ، بدلیل فرض‌های بکار رفته در معادله‌ها، (برای مثال، مقدار ضریب بازتابش، روش‌های برآورد جزء تابش طول موج بلند خالص و غیره)، انتظار نمی‌رود.

شار گرمای خاک

رابطه پیشنهاد شده توسط چادهاری^۲ (۱۹۸۹) برای برآورد شدت شار گرمای خاک (G) در طول ساعات آفتابی روز به صورت زیر است:

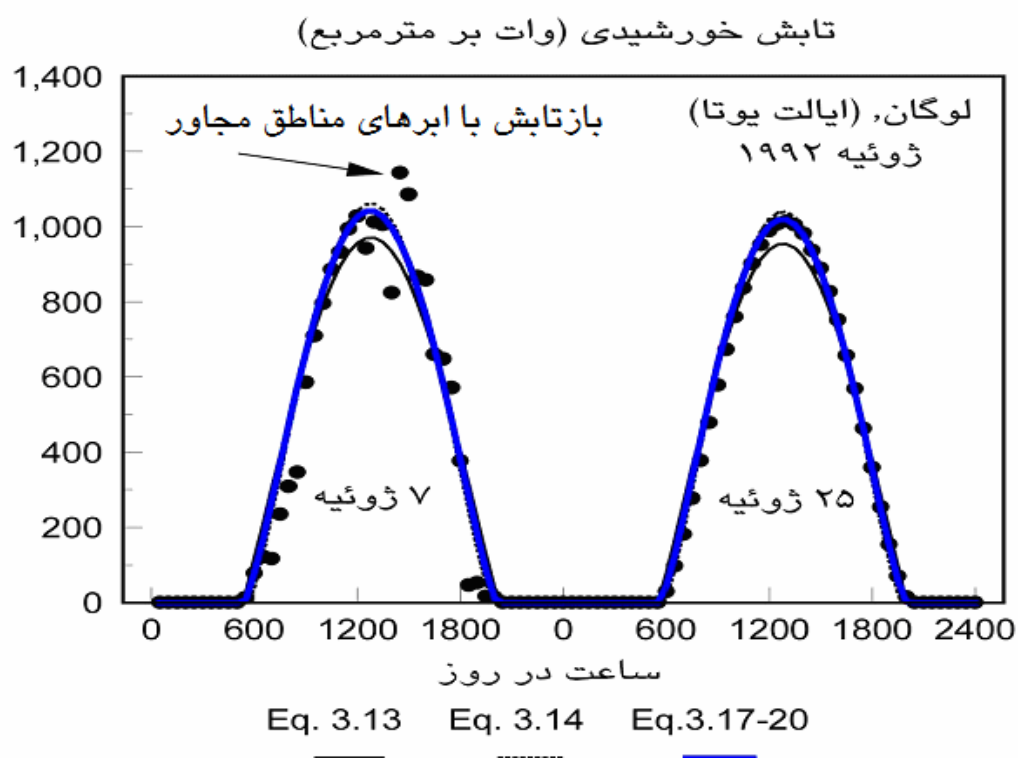
$$G = 0.4 \exp(-0.5 \text{ LAI}) R_n \quad (2-5)$$

که در آن، R_n تابش خالص خورشیدی بوده و واحدهای G و R_n یکسان است.

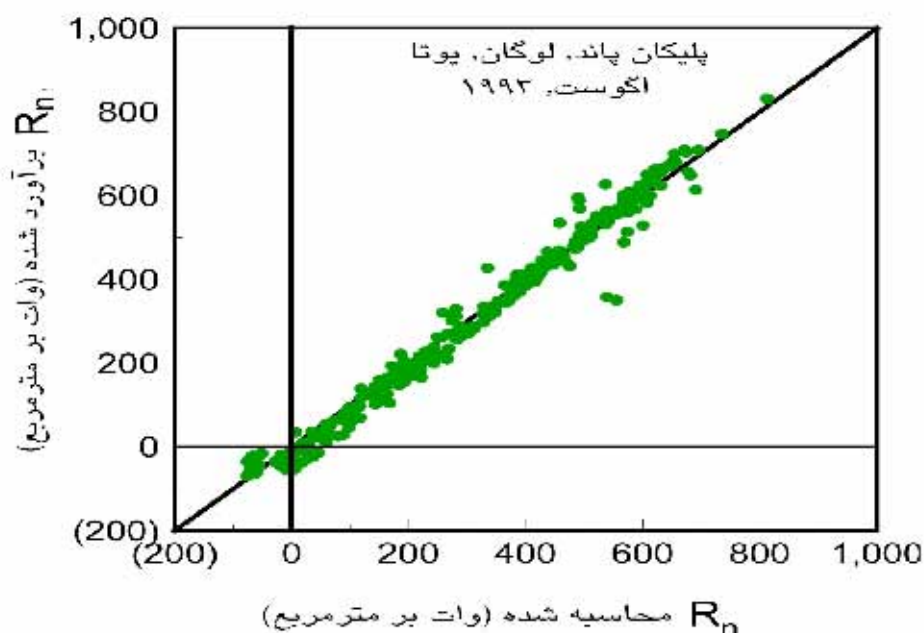
1- Monitored

2-Choudhury

این معادله، G را برای $\text{LAI} = 2/8$ ، که نمایه سطح برگ یک چمن کوتاه (معادله ۴۵ در فصل سوم) است، به صورت $G = 0.1 R_n$ برآورد می‌کند. شار گرمای خاک زیرین چمن علوفه‌ای در ساعات شب، حدود $0.5 R_n$ اندازه‌گیری شد. در منطقه دیویس، کالیفرنیا (ایالات متحده آمریکا)، پروت (۱۹۹۵)، مکاتبات شخصی) مقدار G را در طول ساعات شب برای خاک زیر پوشش چمن کوتاه حدود $(0.3 R_n)$ اندازه‌گیری کرد.



شکل ۵-۲- میانگین R_s و R_{s0} برآورد شده در طول دوره ۳۰ دقیقه‌ای، در منطقه لوگان، یوتا (ایالت متحده آمریکا) در روزهای ۷ و ۲۵ ژوئیه سال ۱۹۹۲.



شکل ۵-۳- R_n اندازه‌گیری شده و برآورد شده (در طول دوره ۲۰ دقیقه‌ای) برای نوعی علف (با رشد کامل) در نزدیک لوگان، یوتا (ایالات متحده آمریکا) در ماه اوت سال ۱۹۹۳ (به نقل از آلن و همکاران، ۱۹۹۴).

معادله (۲-۵) می‌تواند برای کنترل کارکرد و دقت نسبی صفحه‌های شار گرمای خاک پس از اصلاح اندازه‌گیری‌ها برای اثر تغییر دمای خاک بالای صفحه‌ها، بکار رود. معادله (۲-۵) برای داده‌ها اندازه‌گیری شده در دوره روزانه کاربرد ندارد زیرا، شار گرمای خاک در طول این دوره را همیشه مثبت برآورد می‌کند. توجه شود که مقدار تقریبی G با معادله (۲-۵) محاسبه می‌شود و در آن اثر فاصله کشت، زاویه خورشید، رنگ خاک، رطوبت یا بافت خاک و موازنه گرمای محسوس در سطح خاک بر نسبت G به R_n گنجانده نشده است. به طور کلی، به سبب تغییر موضعی نوع خاک، مقدار رطوبت آن و نیز پوشش گیاهی، بهتر است بیشتر از یک صفحه شار گرمای بکار رود.

سرعت باد

ارزیابی دقت داده‌های سرعت باد به جزء در شرایطی که از وسایل مضاعف استفاده شده، مشکل است. برای ثبت بادها با سرعت پایین، دیدبانی مداوم لازم است. مقادیر اندازه‌گیری شده با وسایل خودکار در مقایسه با معادله واسنجی بادسنج، ممکن است، همواره به اندازه یک مقدار ثابت متفاوت باشند. وجود تفاوت ثابت و پایداری آن در مجموعه داده‌ها، نشان‌دهنده شرایط اقلیمی متفاوت و نه همیشه آرام (اگر سرعت باد در کل دوره اندازه‌گیری کمتر از ۰/۵ متر بر ثانیه باشد، وضعیت هوا آرام بوده که به ندرت چنین است)، یا خرابی سنسور دستگاه اندازه‌گیری ناشی از ولتاژ پایین یا فرسودگی بلبرینگ‌ها (قطعات متحرک) می‌باشد که، ممکن است، متصدی ایستگاه متوجه آن نشده باشد. در صورت امکان، در سه یا چهار روز سال و حداقل یک نوبت، باید از بادسنج^۱ دیگری از همان نوع، لیکن، با بلبرینگ‌های نو استفاده شده و مشاهدات اندازه‌گیری شده دو بادسنج دائم و موقت مقایسه شود. تفاوت داده‌ها بر ضرورت تعویض بلبرینگ‌ها، کلیدها و سایر قسمت‌ها تأکید دارد.

رطوبت نسبی و فشار بخار

اندازه‌گیری دقیق فشار بخار مشکل است. در گذشته، کارکرد برخی از سنسورهای رطوبت‌سنج الکترونیکی، بدلیل خطای پسماند^۲، رابطه غیر خطی در ویژگی دستگاه و واسنجی افت داشتند. برخی از این خطاها، ناشی از اصول طراحی سنسورها بوده که هنوز هم، موجب افت کارکرد سنسورهای مدرن است. سایر خطاها متأثر از گرد و خاک، رطوبت، ورود حشره‌ها، آلودگی و کهنه شدن دستگاه است.

استفاده از وسایل مضاعف برای اندازه‌گیری رطوبت نسبی

به طور اکید، توصیه می‌شود که رطوبت نسبی و دمای هوا در ایستگاه‌های هواشناسی خودکار، به طور دائم یا حداقل برای دوره‌ای از سال، توسط سنسورهای مضاعف اندازه‌گیری شوند. در شرایطی که مقادیر دما و رطوبت نسبی اندازه‌گیری شده با دو سنسور یکسان باشند، مشروط بر استفاده از معادله‌های واسنجی مناسب، می‌توان از صحت کارکرد سنسورها اطمینان یافت. هر چند، هم‌خوانی داده‌های

۱- هرگاه، از یک دستگاه دوم برای ثبت داده‌ها موقت سرعت باد استفاده شود، باید مراقب هماهنگی ساعت کارکرد دستگاه بود. درضمن، باید

دقت شود که دستگاه‌های بادسنج نزدیک به یکدیگر نباشند.

سنسورهای مضاعف، نیز، دلیل کافی بر نبودن خطای اندازه‌گیری ناشی از کارکرد غیرخطی دستگاه و خطای واسنجی و سایر موارد نمی‌باشد.

(ابطه دمای نقطه شبنم مناسبه شده با زمان)

هنگامی که رطوبت هوا با سنسورهای رطوبت‌سنج اندازه‌گیری شده، فشار بخار واقعی (e_a) به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$e_a = \frac{RH}{100} e^{\circ}(T) \quad (3-5)$$

که در آن، $e^{\circ}(T)$ فشار بخار اشباع در دمای T و RH درصد رطوبت نسبی است و باید RH و T در دوره زمانی یکسان و بهتر است در طول دوره ساعتی یا کمتر، اندازه‌گیری شوند. اندازه‌گیری‌های ساعتی یا کوتاه‌تر رطوبت نسبی (RH)، دمای نقطه شبنم (T_{dew}) و فشار بخار واقعی (e_a) می‌توانند با رسم مقادیر T_{dew} یا e_a محاسبه شده در طول دوره ساعتی در مقابل زمان، ارزیابی شود. رطوبت نسبی در طی روز، همان طور که در شکل ۱۲ فصل سوم نشان داده شده است، به طور معنی‌داری، با زمان و به طور عکس، با دمای هوا تغییر می‌کند. هر چند، هنگام پایدار بودن توده هوا و نبودن پدیده همرفت هوای خشک مناطق اطراف، باید مقادیر T_{dew} و e_a (مستقیم قرائت شده یا محاسبه شده با استفاده از اندازه‌گیری RH و T)، در طول ۲۴ ساعت ثابت باشند. در طول دوره‌های پایداری هوا، می‌توان انتظار داشت که، T_{dew} و e_a روزانه بدلیل مرطوب شدن لایه تعادل مرزی به طور نسبی، با تبخیر - تعرق، افزایش یابند. هرچند، این افزایش، به طور معمول، کمتر از حدود ۱۰ تا ۲۰ درصد است. مقدار T_{dew} در زمان عبور یک جبهه هوا از روی منطقه، به طور معنی‌داری، افزایش می‌یابد. از آنجا که، فشار بخار واقعی هوا (e_a) از حاصل ضرب RH و فشار بخار اشباع در دمای هوا بدست می‌آید، هر خطا در واسنجی RH ، با تغییر دمای واقعی موجب خطا در محاسبه T_{dew} و e_a می‌شود.

شکل ۴-۵، محاسبه دمای نقطه شبنم از روی داده‌های رطوبت نسبی و دمای هوا (داده‌های ۲۰ دقیقه‌ای) برای یک ایستگاه هواشناسی مستقر در مرکز اراضی مرطوب واقع در لوگان (ایالات متحده آمریکا) را نشان می‌دهد. به طور کلی، دمای نقطه شبنم بدلیل ناپایداری توده هوا به طور ساعتی تغییر و در طول اغلب روزهای این دوره افزایش داشته است، زیرا تبخیر از پوشش گیاهی مرطوب منطقه موجب افزایش رطوبت هوا بوده است. مجموعه داده‌ها نشان می‌دهد که T_{dew} روزانه اندازه‌گیری شده در برخی دوره‌ها، حتی با تغییر اساسی دمای هوا، به طور نسبی، ثابت بوده است (به طور مثال، در روز ۱۹۹۹ سال). این نکته بر کارکرد صحیح سنسور RH و اعتبار واسنجی دستگاه‌های اندازه‌گیری دلالت دارد.

شکل ۴-۵، در همان ایستگاه، مقادیر RH اندازه‌گیری شده با دو سنسور مختلف نیز، مقایسه شده است. از دو سنسور یکی^۱ دمای نقطه شبنم و دیگری، به طور مستقیم، رطوبت نسبی را اندازه‌گیری کردند. داده‌ها همخوانی بسیار بالا را در طول ۸ روز نشان می‌دهند. روش تشخیص خطا در دستگاه‌های اندازه‌گیری با این مثال نشان داده شده است. این روش برای هنگامی است که دو دستگاه مختلف، یک پارامتر مشابه (در

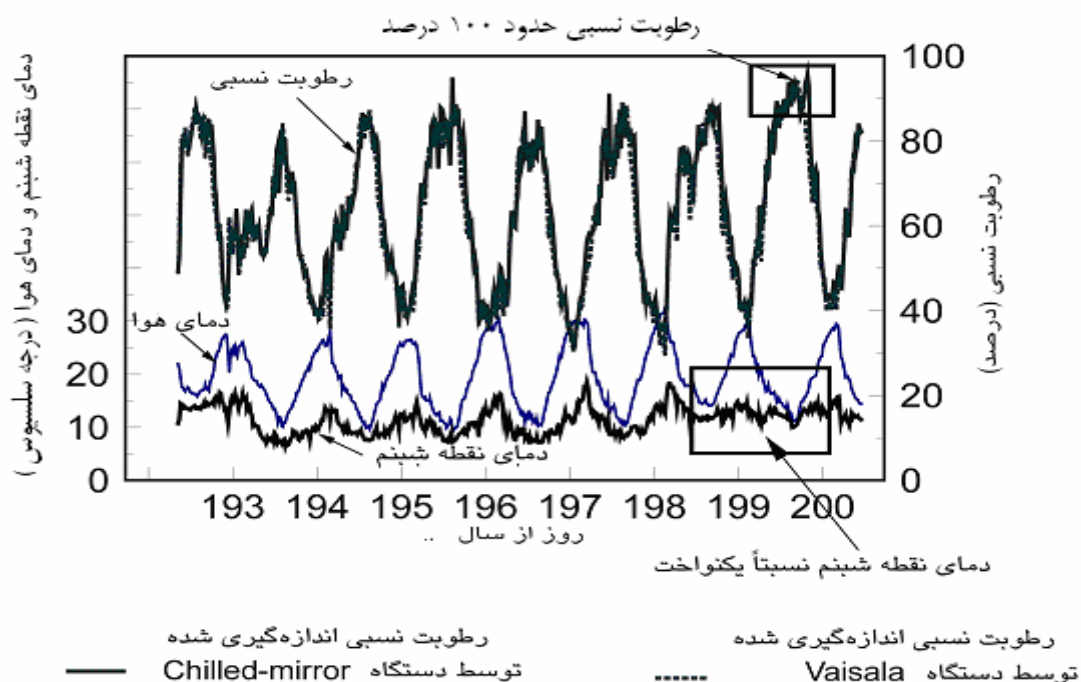
1- Chilled-mirror

این مورد RH را اندازه‌گیری کنند. همخوانی داده‌ها تردیدی در خصوص اعتبار و دقت اندازه‌گیری رطوبت نسبی باقی نمی‌گذارد. لیکن، استفاده از یک دستگاه، نمی‌تواند ابهام در صحت داده‌ها را رفع کند.

شکل ۴-۵ رطوبت نسبی در روز ۲۰ام سال، حدود ۱۰۰ درصد نشان می‌دهد که در یک مجموعه از اراضی خوب آبیاری شده، قابل انتظار است. تفاوت بین حداقل دما و دمای نقطه شبنم در اغلب روزها ۱ تا ۲ درجه سلسیوس بود. این تفاوت برای محیط‌های خشک دارای پدیده همرفت، همان طور که در فصل سوم و پیوست شش بیان شد، انتظار می‌رود.

مشاهدات در دوره‌های تشکیل شبنم و بارندگی

در اغلب اقلیم‌ها، به ویژه، آنجا که شبنم در شب تشکیل می‌شود، T_d در طول ساعات اولیه صبح و پیش از طلوع خورشید باید نزدیک به حداقل دمای اندازه‌گیری شده باشد و رطوبت نسبی نیز، باید به حدود ۱۰۰ درصد نزدیک گردد. در ایستگاه هواشناسی خودکار که از باران‌سنج استفاده می‌شود، می‌توان انتظار داشت که قرائت‌های رطوبت نسبی در طول دوره‌های بارندگی سنگین یا سبک^۱ بیشتر از ۹۵ درصد شود. اگر اختلاف قرائت‌های رطوبت نسبی در ساعات اولیه صبح یا در دوره بارندگی با ۱۰۰ درصد بیشتر از ۳ تا ۵ درصد گردد، واسنجی مجدد رطوبت‌سنج و اصلاح داده‌ها ضروری است.



شکل ۴-۵- دمای نقطه شبنم و رطوبت نسبی اندازه‌گیری شده در منطقه لوگان، یوتا- ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۹۵ (داده‌ها در طول دوره زمانی ۲۰ دقیقه‌ای اندازه‌گیری شده‌اند).

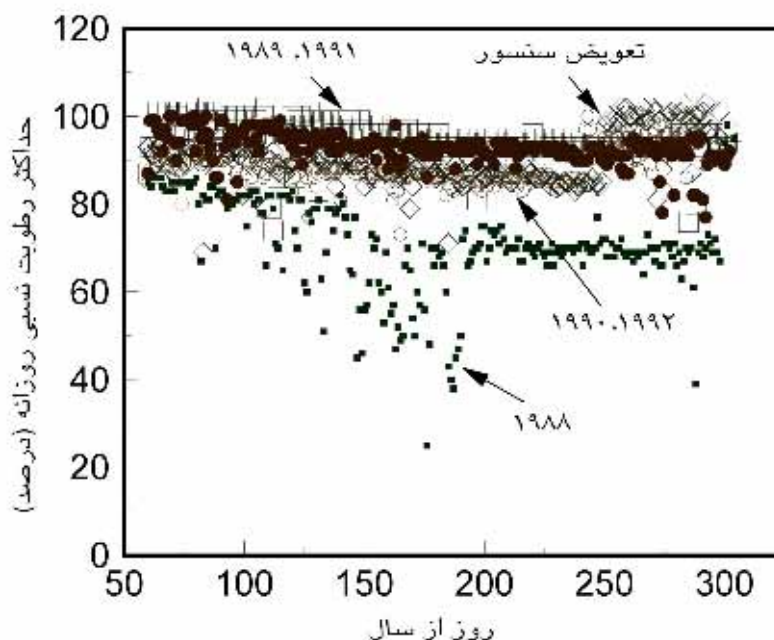
1- Light drizzle

حداکثر رطوبت نسبی روزانه

هنگامی که داده‌های رطوبت در یک محدوده آبیاری شده اندازه‌گیری می‌شوند، اغلب، حتی در مناطق نیمه خشک، رطوبت نسبی در ابتدای صبح، حدود ۱۰۰ درصد است. اگر همیشه، حداکثر رطوبت نسبی (RH_{max}) در این محدوده پایین‌تر از ۸۰ تا ۹۰ درصد باشد، ممکن است، مشکل در عملکرد یا واسنجی سنسور رطوبت‌سنج یا انحراف از شرایط مرجع را نشان دهد.

شکل ۵-۵ قرائت حداکثر رطوبت نسبی روزانه یک ایستگاه هواشناسی کشاورزی خودکار واقع در نزدیک شمال بالتیمور، اوهایو- ایالات متحده آمریکا را در طول یک دوره ۵ ساله نشان می‌دهد. می‌توان انتظار داشت که حداکثر رطوبت نسبی در این منطقه نیمه مرطوب به ۱۰۰ درصد نیز برسد. هر چند، این شکل نشان می‌دهد که سنسور رطوبت‌سنج حداکثر رطوبت نسبی را در برخی سال‌ها کمتر از آن اندازه‌گیری کرده است و روند کاهش RH_{max} مشاهده می‌شود. این امر بر کارکرد الکترونیکی سنسور رطوبت‌سنج به جز در نیمه اول سال ۱۹۸۸، دلالت دارد. هرچند، واسنجی سنسور برای سال‌های ۱۹۸۸، ۱۹۹۰ و ۱۹۹۲ معتبر نیست. به طور معمول، سنسورها در ماه سپتامبر هر سال تعویض می‌شود. داده‌های رطوبتی نسبی برای سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۲، به طور اصولی، با ضرب در یک ضریب تعدیل یا جمع با یک ضریب جبرانی، قابل اصلاح است.

شکل‌های ۴-۵ و ۵-۵ روش‌های ساده برای ارزیابی صحت داده‌ها بوده که برای داده‌های روزآمد یا ثبت شده در گذشته، قابل استفاده هستند. این روش‌ها برای ارزیابی صحت تمامی داده‌های هواشناسی مورد نیاز در برآورد تبخیر - تعرق قابل استفاده است. لیکن، پیش از بکارگیری باید توسط متصدیان شبکه‌های هواشناسی کشاورزی تأیید شوند.



شکل ۵-۵- حداکثر رطوبت نسبی روزانه اندازه‌گیری شده در شمال بالتیمور، اوهایو- ایالات متحده آمریکا (۹۲-۱۹۸۸)، برخی ارقام واسنجی نامناسب سنسور در سال‌های ۱۹۸۸، ۱۹۹۰ و ۱۹۹۲ را نشان می‌دهد.

پیوست شش

اصلاح داده‌های هواشناسی ایستگاه غیر مرجع

محاسبه تبخیر - تعرق مرجع به روش پنمن - مونتئیث فائو بر مفهومی استوار است که، نیازمند بکارگیری داده‌های هواشناسی اندازه‌گیری شده تحت شرایط سطح مرجع استاندارد می‌باشد. به عبارتی، داده‌های هواشناسی باید در در بالای سطح وسیع چمن فعال دارای پوشش گیاهی سالم و بدون کمبود آب اندازه‌گیری شود^۱. تحت این شرایط (مرجع)، انرژی قابل دسترس ($R_n - G$) بوده که در آن نسبت گرمای محسوس (H) به گرمای نهان تبخیر (λE) پایین‌تر از ۰/۵ است (یعنی، $\beta = \frac{H}{\lambda E_{ref}} \leq 0.5$ ، اندیس ref شرایط مرجع را نشان می‌دهد).

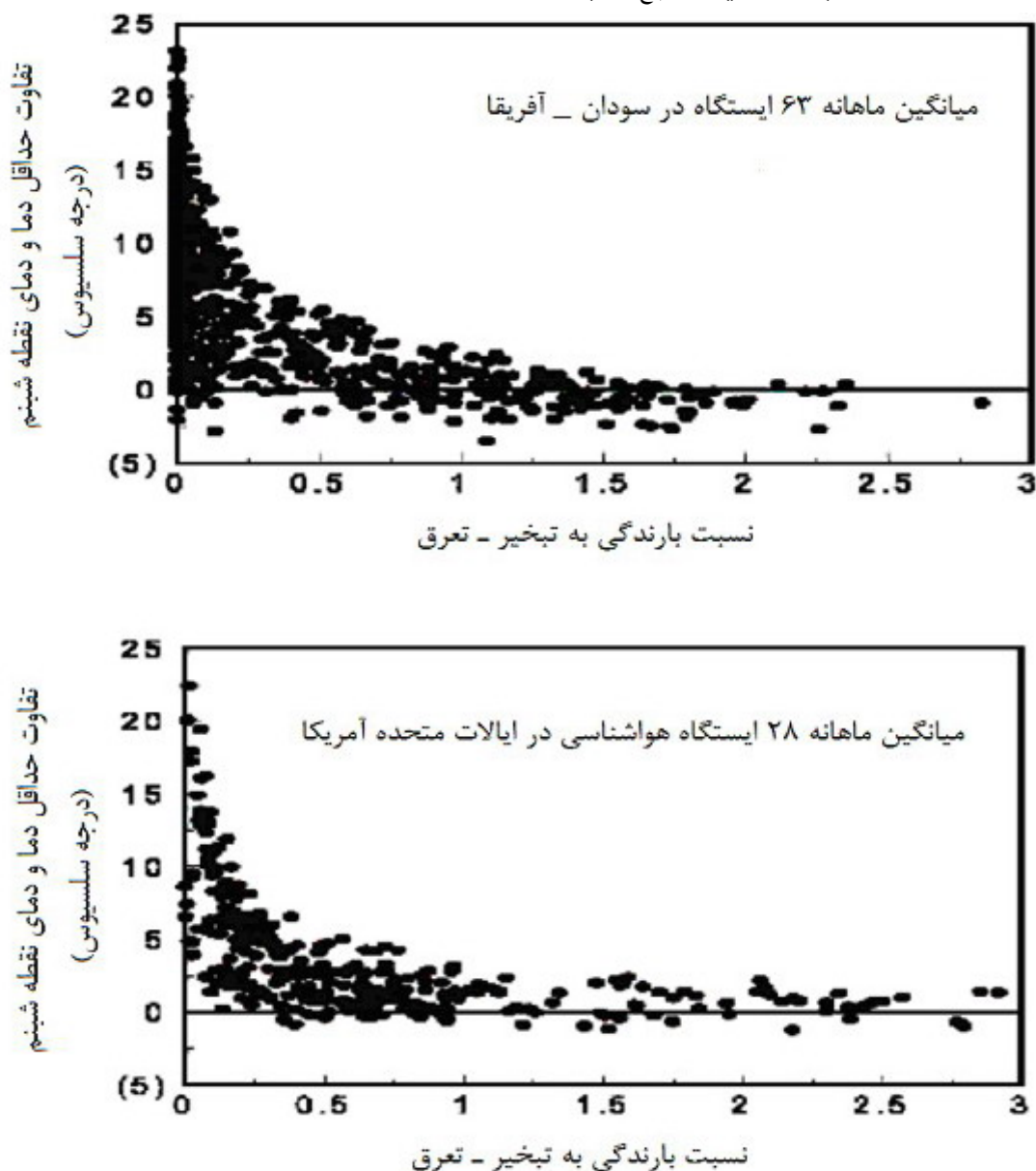
خشکی اطراف یک ایستگاه هواشناسی غیر مرجع، از انجام تبخیر - تعرق معادل سطح مرجع جلوگیری می‌کند. این وضعیت، به طور عمده، حاصل عدم انجام آبیاری به صورت مطلوب است. بنابراین، گرمای نهان تبخیر در شرایط غیر مرجع کمتر از مرجع می‌باشد (یعنی، $\lambda E_{n/ref} < \lambda E_{ref}$ ، که اندیس n/ref شرایط غیرمرجع را نشان می‌دهد). چنانچه، مقدار انرژی قابل دسترس (یعنی، $R_n - G$) در هر دو شرایط یکسان باشد، تقسیم آن بین دو جزء یعنی گرمای محسوس و گرمای نهان تبخیر به صورت $H_{n/ref} > H_{ref}$ و اغلب، $\beta_{n/ref} > 0.5$ متغیر است. در نتیجه، از آنجا که دمای هوا با افزایش H بالا می‌رود، پس دمای اندازه‌گیری شده در سطح غیر مرجع بالاتر از سطح مرجع بوده (یعنی، $T_{n/ref} > T_{ref}$) و رطوبت اندازه‌گیری شده در آن پایین‌تر است. همچنین، فشار بخار واقعی در سطح غیر مرجع پایین‌تر و در نتیجه کمبود فشار بخار در آن بالاتر از سطح مرجع می‌باشد.

هنگام محاسبه تبخیر - تعرق مرجع با استفاده از برآوردهای $R_n - G$ ، r_a و r_s استاندارد، مقدار ET_0 بر مبنای $T_{n/ref}$ و $VPD_{n/ref}$ ، بیشتر از واقع برآورد می‌شود. لذا، یک ضریب اصلاح برای نزدیک‌تر کردن داده‌های دما و رطوبت به مقادیر مرجع مورد نیاز است. در یک پوشش گیاهی سالم با رطوبت کافی در خاک (شرایط مرجع)، حداقل دمای هوا، به طور معمول، به دمای نقطه شبنم نزدیک می‌شود (به شکل ۶-۲ برای منطقه کیمبرلی - آیداهو، ایالات متحده آمریکا مراجعه شود)^۲. این حالت، به ویژه، در ابتدای صبح که سرعت باد پایین و رطوبت خاک بالا است، مشاهده می‌شود (این شرایط در شکل ۶-۱ به صورت نسبت بارندگی به تبخیر - تعرق مرجع نشان داده شده است). در طول شب به دلیل خنک شدن سطح زمین در اثر انتشار تابش طول موج بلند و تبخیر، هنگامی که کمبود فشار بخار مثبت است، دمای هوا کاهش می‌یابد. هنگامی که دمای هوای مجاور سطح زمین به دمای نقطه شبنم نزدیک می‌شود، میعان بخار و تأثیر گرمای

۱- مشروح آن توسط آلن (۱۹۹۶)، آلن و همکاران (۱۹۹۶) بیان شده است.

۲- هر چند، در شرایطی که حجم زیادی از هوای گرم و خشک به وسیله باد به سطح مورد نظر انتقال یابد، دمای هوا تا دمای نقطه شبنم کاهش نمی‌یابد.

نهان آزاد شده، از کاهش دما به پایین‌تر از دمای نقطه شبنم جلوگیری می‌کند. بنابراین، به طور کلی، رابطه $(T_{\min})_{\text{ref}} = (T_{\text{dew}})_{\text{ref}}$ برای شرایط مرجع معتبر است.



شکل ۶-۱- رابطه تفاوت دمای حداقل و دمای نقطه شبنم $(T_{\min} - T_{\text{dew}})$ ماهانه و نسبت بارندگی به تبخیر - تعرق مرجع ماهانه در سودان (آفریقا) و ایالات متحده آمریکا

در ایستگاه غیر مرجع، محدودیت رطوبت خاک و یا پوشش گیاهی موجب برقراری شرایط $ET_{n/\text{ref}} < ET_0$ یا $\lambda ET_{n/\text{ref}} < \lambda ET_{\text{ref}}$ بوده و بنابراین، ممکن است، حداقل دمای هوا بالاتر از دمای نقطه شبنم باشد. از جمله دلایل برقراری این پدیده، منبع عظیم گرمای محسوس موجود در آتمسفر در طول روز است (یعنی، $H_{n/\text{ref}} > H_{\text{ref}}$ ، همان طور که در قبل بیان شد). این گرما در شب به سطح خاک انتقال

می‌یابد و اثر خنک‌کنندگی هوا تحت تأثیر تابش طول موج بلند از زمین را کاهش می‌دهد. همچنین، کمبود رطوبت خاک از تبخیر در شب جلوگیری می‌کند که، فرآیندی خنک‌کننده است.

این پدیده، در شکل ۶-۱ به صورت رابطه میانگین تفاوت حداقل دمای هوا و دمای نقطه شبنم ماهانه ($T_{min} - T_{dew}$) و نسبت میانگین بارندگی به تبخیر - تعرق مرجع ماهانه در برخی ایستگاه‌های هواشناسی واقع در کشورهای سودان و ایالات متحده آمریکا نشان داده شده است. نسبت بارندگی به تبخیر - تعرق مرجع برای ارزیابی کافی بودن آب خاک و برقراری شرایط مرجع (آبیاری مطلوب) در فصل غیر آبیاری بکار می‌رود. مشاهدات نشان می‌دهند که، به طور تقریبی، در تمامی ایستگاه‌ها هنگامی که نسبت بارندگی به تبخیر - تعرق ۱ یا بزرگتر بوده، حداقل دمای هوا به دمای نقطه شبنم نزدیک شده است. هنگامی که این نسبت کوچکتر از ۱ باشد، خشکی هوای مناطق پیرامون ایستگاه هواشناسی موجب افزایش قابل توجه حداقل دما نسبت به دمای نقطه شبنم (اندازه‌گیری شده) شده است. ایستگاه‌های هواشناسی با نسبت بارندگی به تبخیر - تعرق مرجع کوچکتر از ۱ و شرایط آبیاری یا رطوبت کافی باقیمانده از ماه‌های گذشته، از این حالت مستثنی می‌باشند. تشابه بین داده‌های هواشناسی سودان و ایالات متحده آمریکا نشان می‌دهد که این پدیده عمومیت دارد.

همچنین، در شکل ۶-۲، برای دو ایستگاه واقع در منطقه نیمه خشک کیمبرلی، آیداهو (ایالات متحده آمریکا) که به فاصله ۲۰۰ کیلومتر از یکدیگر واقع هستند، تفاوت حداقل دمای هوا و دمای نقطه شبنم مقایسه شده است. ایستگاه کیمبرلی یک ایستگاه مرجع و در محدوده یک منطقه بزرگ تحت آبیاری واقع است. ایستگاه بویس^۱ در یک فرودگاه مستقر بوده و با چمن مرتعی احاطه شده است. از آنجا که، تنها، چمن ایستگاه آبیاری می‌شود، این ایستگاه غیر مرجع می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که حداقل دمای هوا در مناطق تحت آبیاری کیمبرلی در طول ماه‌های خشک، با اندک تفاوت، به دمای نقطه شبنم نزدیک می‌شود (در آنجا نسبت بارندگی به تبخیر - تعرق مرجع پایین است). در حالی که در ایستگاه غیر مرجع بویس، حداقل دمای هوا حدود ۱۰ درجه سلسیوس بالاتر از دمای نقطه شبنم می‌باشد. از مقایسه این منحنی‌ها نتیجه می‌شود که داده‌های ایستگاه غیر مرجع بویس باید پیش از بکارگیری در معادله تبخیر - تعرق مرجع به روش پنمن - مونتیت فائو اصلاح شوند. این اصلاح مانع برآورد بیشتر از واقع تبخیر - تعرق مرجع متأثر از برآورد دست بالای دما و کمبود فشار بخار هوا می‌شود.

اصلاح حداکثر و حداقل دما و دمای نقطه شبنم

در این نشریه، یک روش تجربی برای اصلاح داده‌های دمای حداقل و حداکثر دما از روی تفاوت حداقل دما و دمای نقطه شبنم که می‌تواند یک نمایه از برآورد بیشتر از واقع ($T_{n/ref} - T_{ref}$) باشد، ارائه شده است. از آنجا که دمای نقطه شبنم، فشار بخار واقعی هوا ($e_a = e^o(T_{dew})$) را تعیین می‌کند، اصلاح دمای نقطه شبنم موجب اصلاح کمبود فشار بخار هوا (VDP)، نیز، می‌شود.

روش پیشنهادی به شرح زیر است:

۱- تفاوت حداقل دما و دمای نقطه شبنم (T_{dew} مستقیم اندازه‌گیری شده یا غیر مستقیم از روی e_a با معادله ۱۱-۳ یا ۱۲-۳ پیوست سه، محاسبه شده) مربوط به دو ایستگاه غیرمرجع و مرجع و نسبت بارندگی به تبخیر - تعرق مرجع را به روش نموداری مشابه شکل ۶-۲ مقایسه کنید. برای محاسبه تفاوت حداقل و دمای نقطه شبنم از داده‌های روزانه یا ماهانه استفاده شود.

۲- هنگامی که میانگین ماهانه تفاوت حداقل دما و دمای نقطه شبنم ایستگاه غیر مرجع، به طور دائم، بیشتر از ۲ درجه سلسیوس با ایستگاه مرجع اختلاف دارد، آنگاه، میانگین اختلاف‌ها (ΔT) در ماه‌هایی که باید دما اصلاح شود، را محاسبه کنید (به طور معمول، چنانچه نسبت بارندگی به تبخیر - تعرق مرجع ماهانه بیشتر از ۰/۵ نباشد، این اصلاح ضروری است)، بنابراین:

$$\Delta T = T_{min} - T_{dew} \quad (۱-۶)$$

$$\Delta T = (T_{min} - T_{dew})_{n/ref} - (T_{min} - T_{dew})_{ref} \quad (۲-۶)$$

۳- دمای ماهانه (یا روزانه) را با معادله‌های زیر اصلاح کنید:

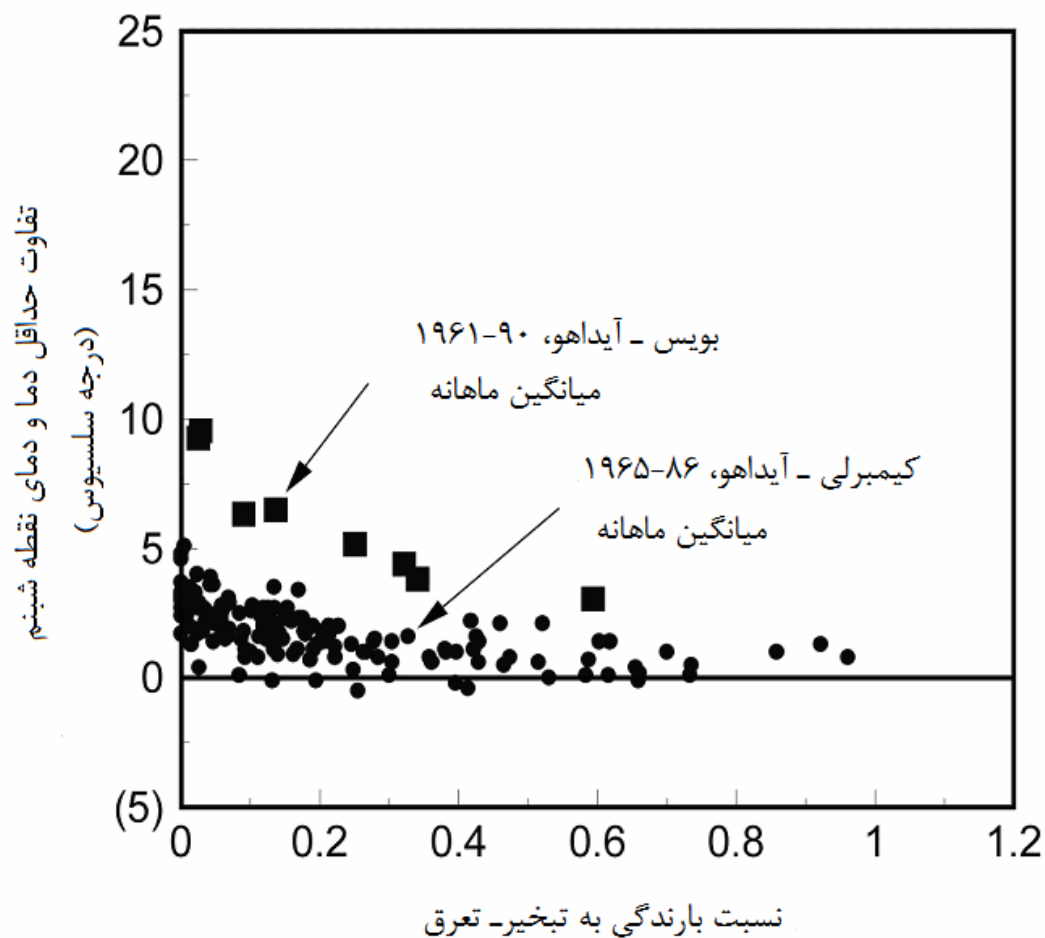
$$(T_{max})_{cor} = (T_{max})_{obs} - \left(\frac{\Delta T - K_0}{2} \right) \quad (۳-۶)$$

$$(T_{min})_{cor} = (T_{min})_{obs} - \left(\frac{\Delta T - K_0}{2} \right) \quad (۴-۶)$$

که در آن: $\Delta T > K_0$ است و اندیس‌های cor و obs به ترتیب به دو مقدار اصلاح و اندازه‌گیری شده اشاره دارد. K_0 یک ضریب اصلاح و برای حالتی که داده‌های دو ایستگاه غیر مرجع و مرجع مقایسه نمی‌شود (یعنی، ΔT از معادله ۶-۱ محاسبه شده)، مساوی با ۲ درجه سلسیوس است. اگر ΔT با معادله (۲-۶) محاسبه شود، K_0 صفر است.

۴- دمای نقطه شبنم برای همان ماه یا روز را به صورت زیر اصلاح کنید:

$$(T_{dew})_{cor} = (T_{dew})_{obs} + \left(\frac{\Delta T - K_0}{2} \right) \quad (۵-۶)$$



شکل ۶-۲- رابطه میانگین تفاوت حداقل دما و دمای نقطه شبنم ($T_{min} - T_{dew}$) ماهانه و میانگین نسبت بارندگی به تبخیر- تعرق ماهانه در دو ایستگاه مرجع (کیمبرلی) و غیر مرجع (بویس)، واقع در آیداهو (ایالات متحده آمریکا)

که، K_0 همان مقدار ارائه شده برای معادله‌های (۳-۶) و (۴-۶) را دارد و برای هر دو مقدار T_{dew} اندازه‌گیری یا محاسبه شده با معادله‌های (۱۱-۳) یا (۱۲-۳) در پیوست سه، قابل بکارگیری است. توجه شود که باید همواره شرط $(T_{min})_{cor} \geq (T_{dew})_{obs}$ برقرار باشد.

۵- مقدار تبخیر- تعرق مرجع را با استفاده از مقادیر اصلاح شده حداقل و حداکثر دما و دمای نقطه شبنم محاسبه کنید.

تعدیل دمای نقطه شبنم

هنگامی که، رطوبت نسبی، فشار بخار واقعی یا دمای نقطه شبنم به یکدیگر وابسته نباشند یا اصلاح حداکثر و حداقل دمای هوا به روش بخش پیش مورد نظر نباشد، از روش دیگری برای اصلاح مجموعه داده‌های هواشناسی برای گنجاندن اثر خشکی ایستگاه استفاده می‌شود. در این روش برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع تنها، T_{dew} به صورت زیر اصلاح می‌گردد:

$$T_{dew} = T_{min} - K_o \quad (۶-۶)$$

که در آن، K_o برای اقلیم‌های مرطوب و نیمه مرطوب صفر و برای اقلیم‌های خشک و نیمه خشک ۲ درجه سلسیوس است. در این روش، دمای نقطه شبنم برای نشان دادن اثر رطوبت بالاتر که تحت شرایط مرجع مورد انتظار بوده، افزایش یافته است. توجه شود که T_{min} اندازه‌گیری شده در شرایط غیر مرجع ممکن است، خیلی بالا از مقدار مورد انتظار در شرایط مرجع باشد. بنابراین، معادله (۶-۶)، ممکن است، دمای نقطه شبنم را (حتی برای شرایط مرجع) بیشتر از واقع برآورد کند. هرچند، در محاسبه ET_o کمبود فشار بخار به صورت رابطه $VPD=0.5(e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min}) - e^{\circ}(T_{dew}))$ بکار رفته است و در نتیجه در برآورد بیشتر از واقع حداقل و حداکثر دمای هوا و دمای نقطه شبنم، تفاوت‌های تمامی پارامترهای وابسته به دما با یکدیگر حذف می‌شود. در این شرایط، کمبود فشار بخار محاسبه شده می‌تواند نمایانگر شرایط مرجع باشد.

نمایه خشکی^۱ ایستگاه

هنگامی که داده‌های رطوبت در دسترس است، نمایه خشکی A_{bi} ماهانه ایستگاه غیر مرجع نسبت به شرایط مرجع را برای همان دوره، می‌توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$A_{bi} = \frac{(ET_o)_{obs}}{(ET_o)_{T_{dew}=T_{min}}} - 1 \quad (۶-۷)$$

که در آن: $(ET_o)_{obs}$ - تبخیر - تعرق مرجع می‌باشد که با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده هواشناسی بدون اصلاح، محاسبه می‌شود. عبارت $(ET_o)_{T_{dew}=T_{min}}$ تبخیر - تعرق مرجع بوده که با استفاده از دمای حداقل (به جای برآورد دمای نقطه شبنم) در همان دوره محاسبه شده است. چنانچه، تفاوت دمای حداقل و دمای نقطه شبنم $(\Delta T = T_{min} - T_{dew})$ کم بوده، نمایه خشکی حدود صفر و اگر زیاد (یعنی شرایط غیر مرجع) باشد، نمایه خشکی بالاتر از صفر خواهد بود.

کاربر باید نمایه خشکی ماه‌های مرطوب و خشک را مقایسه و تعیین کند که بالا بودن آن ناشی از خشکی هوا یا دلایل دیگر است. اگر به طور دائم، نمایه خشکی بالاتر از ۰/۰۵ باشد، ممکن است، اصلاح آن ضروری گردد. داده‌های دما و رطوبت، به روشی که در بخش‌های قبل بیان شد، اصلاح می‌شوند. توجه شود که، اصلاح داده‌ها تنها، موجب افزایش دقت در محاسبه تبخیر - تعرق مرجع شده و برای بررسی‌های مرتبط با هیدرولوژی که نیازمند تبخیر - تعرق واقعی است، ضروری نیست، زیرا، $ET_{o n/ref}$ تقاضای تبخیر طبیعی در اقلیم مورد نظر را مشخص می‌کند. داده‌های اصلاح شده حداقل و حداکثر دما و دمای نقطه شبنم نباید اطلاعات قطعی محسوب شوند. کاربر باید توجه کند که تمامی روش‌های ارائه شده برای اصلاح داده‌ها، تنها، تلاشی برای نزدیک شدن ET_0 محاسبه شده به ET_0 واقعی بر مبنای شرایط محلی است. علل خطا یا ابهام که اصلاح داده‌ها را ضروری کرده، به طور عمده، هم چنان نامعلوم می‌باشد. لذا، به کاربر توصیه می‌شود که در استفاده از این نتایج احتیاط کند.

پیوست هفت

محاسبه ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد

بخش عمده تبخیر - تعرق گیاهان سالانه در مرحله اولیه رشد به صورت تبخیر می‌باشد. بنابراین، در برآورد دقیق ضریب گیاهی این مرحله باید تعداد خیس سطح خاک در نظر گرفته شود. در فصل ششم، مرحله اولیه رشد برای گیاهان سالانه، به صورت فاصله بین تاریخ کشت و زمان پوشش گیاهی حدود ۱۰ درصد تعریف شده است.

در فصل ششم، پیشینه و شکل‌های مورد نیاز برآورد ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد به صورت تابع تبخیر - تعرق مرجع، بافت خاک، فاصله خیس شدن خاک و عمق آب کاربردی و پیشینه و معادله‌های افزون بر آن در فصل هفتم بیان شده است. در این پیوست، مطالب بیشتری در توسعه منحنی‌های ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد که در شکل‌های ۲۹ و ۳۰ فصل ششم نمایش داده شده، بیان می‌شود. در صورت استفاده از رایانه، معادله‌های ارائه شده در این پیوست می‌توانند جایگزین شکل‌های ۲۹ و ۳۰ شوند.

مقدمه

فرآیند تبخیر از خاک بدون پوشش (E_s) شامل دو مرحله جداگانه است. در مرحله اول که مرحله تبخیر وابسته به انرژی نامیده می‌شود، رطوبت کافی از خاک عمقی نیاز تبخیر پتانسیل (E_{s0}) در خاک سطحی را تأمین می‌کند. بنابراین، تبخیر به وسیله انرژی در دسترس خاک کنترل می‌شود. در این مرحله تبخیر بالقوه از رابطه زیر برآورد می‌گردد:

$$E_{s0} = 1.15 ET_0 \quad (1-7)$$

که در آن، E_{s0} تبخیر پتانسیل [میلی‌متر بر روز] و ET_0 میانگین ET_0 در مرحله اولیه رشد [میلی‌متر بر روز] است. ضریب ۱/۱۵ بیانگر افزایش تبخیر بالقوه ناشی از پایین بودن ضریب بازتابش (آلبیدو) خاک مرطوب و وجود باقیمانده گرما از فصل خشک در لایه خاک سطحی است.

مرحله دوم تبخیر مرحله وابسته به خاک نامیده می‌شود و در آن، انتقال هیدرولیکی آب از خاک عمقی به سطحی برای تبخیر به مقدار پتانسیل کافی نیست. سطح خاک در مرحله دوم، به طور نسبی، خشک است و بخشی از تبخیر در لایه زیرین خاک سطحی صورت می‌گیرد. انرژی مورد نیاز تبخیر آب در این لایه، به وسیله گرما انتقال یافته از سطح به عمق خاک، تأمین می‌شود. تبخیر در مرحله دوم، همان طور که شکل ۱-۷ نشان می‌دهد، با کاهش آب خاک کاهش می‌یابد (به شکل ۳۸ فصل هفتم نیز مراجعه شود). بنابراین، تبخیر در طول مرحله دوم می‌تواند متناسب با آب باقیمانده در لایه تبخیر نسبت به حداکثر عمق آب قابل تبخیر در همان لایه، بیان شود.

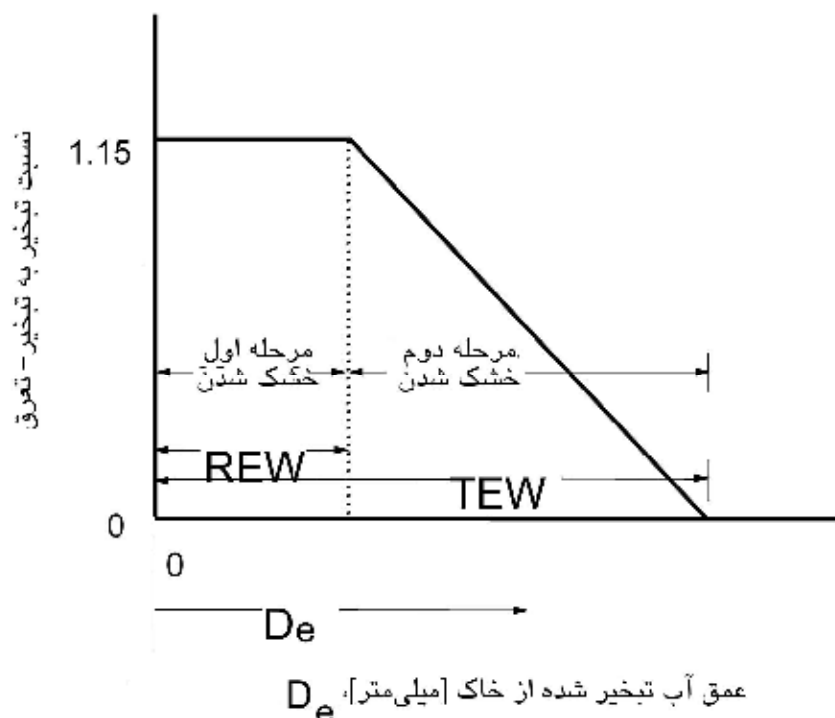
حداکثر عمق آب که می‌تواند از لایه خاک سطحی تبخیر شود، کل آب قابل تبخیر (TEW) نامیده شده و با معادله ۷۳ فصل هفتم برآورد می‌شود. حداکثر عمق آب قابل تبخیر در مرحله اول، تحت عنوان آب با

سهولت قابل تبخیر (REW) نامیده می‌شود. در جدول ۱۹ فصل هفتم حدود آب با سهولت قابل تبخیر در انواع بافت خاک آمده است.

چنانچه فرض شود که در طول مرحله دوم، تبخیر به طور خطی متناسب با عمق آب باقیمانده در لایه تبخیر باشد (همان طور که در شکل ۷-۱ نشان داده شده است)، پس میانگین تبخیر در این مرحله به صورت یک رابطه مشابه معادله ۷۴ فصل هفتم برآورد می‌شود:

$$E_s = E_{so} \left[\frac{TEW - D_e}{TEW - REW} \right] \quad (۷-۲)$$

که در آن، $D_e > REW$ بوده و E_s تبخیر واقعی [میلی‌متر بر روز] در یک زمان مشخص و در هنگامی است که عمق آب تخلیه شده از لایه خاک سطحی D_e [میلی‌متر] باشد. عبارت REW، مقدار آب با سهولت قابل تبخیر در همان لایه [میلی‌متر] و t_1 طول مدت مورد نیاز مرحله اول تبخیر و $t_1 = \frac{REW}{E_{so}}$ است.



شکل ۷-۱- مدل دو مرحله‌ای تبخیر از خاک در مرحله اولیه رشد گیاه

معادله عمومی ضریب گیاهی در مرحله اولیه رشد

با انتگرال‌گیری از معادله (۷-۲) در فاصله بین دو حد آب با سهولت قابل تبخیر و کل آب قابل تبخیر، معادله اصلی ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد در طول مرحله دوم تبخیر به صورت زیر بدست می‌آید:

$$K_{c\ ini} = \frac{TEW - (TEW - REW) \exp \left(\frac{-(t_w - t_1) E_{so} \left(1 + \frac{REW}{TEW - REW} \right)}{TEW} \right)}{t_w ET_0} \quad (3-7)$$

در معادله فوق: $t_w > t_1$ و $K_{c\ ini} = \frac{E_s}{ET_0}$ است. عبارت t_w میانگین فاصله خیس شدن خاک [روز] و t_1 طول مدت مورد نیاز مرحله اول تبخیر ($t_1 = \frac{REW}{E_{so}}$ ، برحسب روز) است. مقدار $K_{c\ ini}$ محاسبه شده با معادله (۳-۷) کوچکتر یا مساوی ۱/۱۵ است. هنگامی که $t_w < t_1$ باشد، یعنی کل تبخیر در مرحله اول انجام شود:

$$K_{c\ ini} = \frac{E_{so}}{ET_0} = 1.15 \quad (4-7)$$

هنگامی که از روش آبیاری جویچه‌ای (فارو) یا قطره‌ای استفاده شده که در آن تنها، کسری از سطح خاک خیس می‌شود، مقدار $K_{c\ ini}$ محاسبه شده با معادله‌های (۳-۷) و (۴-۷) باید متناسب با کسر سطح خیس شده، f_w [بین صفر تا ۱] کاهش یابد. مقادیر f_w در جدول ۲ فصل هفتم ارائه شده است. معادله ۶۰ فصل ششم برای اصلاح ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد بکار می‌رود:

$$K_{c\ ini} = f_w K_{c\ ini} (f_w = 1)$$

که در آن، f_w کسر سطح خاک خیس شده با بارندگی یا آبیاری [بین صفر تا ۱] است. عبارت $K_{c\ ini} (f_w = 1)$ ، ضریب گیاهی مرحله اولیه رشد گیاه برای $f_w = 1$ می‌باشد و با معادله (۳-۷) یا (۴-۷) تعیین می‌شود. مطابق آن، باید مقدار آب آبیاری نفوذ یافته (I_w) با استفاده از معادله ۶۱ فصل ششم اصلاح شود:

$$I_w = \frac{I}{f_w}$$

که در آن، I_w عمق آب آبیاری نفوذ یافته از کسر سطح خیس شده خاک و I عمق آب آبیاری نفوذ یافته [به میلی‌متر] است که از تقسیم عمق آبیاری بر کل سطح بدست می‌آید.

کل آب قابل تبخیر

کل آب قابل تبخیر، حداکثر عمق آب قابل تبخیر از خاک خیس پس از آبیاری یا بارندگی است. مقدار کل آب قابل تبخیر به عمق خاک درگیر فرآیند تبخیر و ظرفیت نگهداری آب در آن بستگی دارد. به علاوه، مقدار کل آب قابل تبخیر تابع هدایت هیدرولیکی غیر اشباع، وجود لایه محدود کننده ویژگی‌های هیدرولیکی خاک

زیرین و همچنین، هدایت گرمای محسوس خاک در تأمین انرژی برای تبخیر است. در طول مرحله اولیه رشد گیاهان هنگامی که تبخیر - تعرق مرجع بزرگتر یا مساوی ۵ میلی‌متر بر روز باشد، بیشترین مقدار کل آب قابل تبخیر خاک به طور تقریبی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$TEW = 1000(\theta_{FC} - 0.5\theta_{WP})Z_e \quad (5-7)$$

که در آن TEW، کل آب قابل تبخیر [میلی‌متر]، θ_{FC} مقدار آب خاک در ظرفیت زراعی [مترمکعب بر مترمکعب]، θ_{WP} مقدار آب خاک در نقطه پژمردگی [مترمکعب بر مترمکعب] و Z_e عمق لایه خاک سطحی [بین ۰/۱ تا ۰/۲ متر] است که تبخیر در آن انجام می‌شود. اگر Z_e معلوم نباشد، مقدار آن به طور متوسط ۰/۱۵ متر در نظر گرفته می‌شود. مقادیر معمول θ_{FC} و θ_{WP} در جدول ۱۹ فصل هفتم ارائه شده است. در زمستان و دیگر ماه‌های سرد سال، انرژی تابشی کمتری برای نفوذ در خاک و تبخیر در دسترس است. بنابراین، هنگامی که تبخیر - تعرق مرجع کوچکتر از ۵ میلی‌متر بر روز باشد، کل آب قابل تبخیر به صورت معادله (۳-۷) برآورد می‌شود.

$$TEW = 1000(\theta_{FC} - 0.5\theta_{WP})Z_e \sqrt{\frac{ET_0}{5}} \quad (6-7)$$

که در آن، ET_0 تبخیر - تعرق مرجع بر حسب میلی‌متر بر روز می‌باشد. معادله (۶-۷) برای اصلاح TEW خاک بدون پوشش در مرحله اولیه رشد ارائه شده است. این معادله در روش ضریب گیاهی دو جزئی فصل هفتم کاربرد ندارد. مقدار آب با سهولت قابل تبخیر کوچکتر یا مساوی کل آب قابل تبخیر می‌باشد $(REW \leq TEW)$.

فواصل خیس شدن خاک و میانگین عمق آب نفوذ یافته

برآوردی از تعداد و فاصله خیس شدن سطح خاک در طول مرحله اولیه رشد، در فصل ششم توصیف شده است. در تعیین فاصله خیس شدن خاک (توسط آبیاری و بارندگی) در مرحله اولیه رشد، خیس شدن پی در پی، یک نوبت فرض شده و از آبیاری با عمق کمتر از $0.5 ET_0$ ، صرف نظر می‌شود. میانگین فاصله خیس شدن سطح خاک در طول مرحله اولیه رشد گیاه (t_w)، به طور تقریبی، از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$t_w = \frac{L_{ini}}{n_w + 0.5} \quad (7-7)$$

که در آن، t_w برحسب روز و L_{ini} طول مرحله اولیه رشد به روز، و n_w تعداد خیس شدن خاک در این مرحله است. میانگین عمق آب اضافه شده به لایه تبخیر در هر نوبت خیس شدن خاک، از تقسیم مجموع بارندگی و آبیاری نفوذ یافته به کل تعداد خیس شدن خاک بدست می‌آید، بنابراین:

$$P_{\text{mean}} = \frac{(\sum P_n + \sum I_w)}{n_w} \quad (۸-۷)$$

که در آن، P_{mean} میانگین عمق آب نفوذ یافته در هر نوبت خیس شدن خاک [میلی-متر]، P_n عمق بارندگی نفوذ یافته در طول دوره اولیه رشد [میلی-متر] و I_w عمق آب آبیاری نفوذ یافته در سطح خیس شده خاک [میلی-متر] می باشد (معادله ۶۱). هر یک از مقادیر P_n و I_w معادله (۸-۷) باید به طور جداگانه مساوی کل آب قابل تبخیر یا کوچکتر از آن باشد (یعنی $P_n [TEW]$ و $I_w [TEW]$). مقدار TEW با معادله (۵-۷) یا (۶-۷) محاسبه می شود.

کرانهای کل آب قابل تبخیر و آب با سهولت قابل تبخیر

در شرایطی که میانگین عمق آب نفوذ یافته در خاک (P_{mean}) کمتر از کل آب قابل تبخیر است، مرحله اول تبخیر، ممکن است زودتر از زمان مورد انتظار پایان یابد. پس، کل مقادیر آب قابل تبخیر واقعی و آب با سهولت قابل تبخیر باید بر مبنای P_{mean} اصلاح شوند. بنابراین، این دو پارامتر بر حسب میانگین کل آب قابل استفاده در طول هر دوره خشک شدن خاک محاسبه می شوند:

$$TEW_{\text{cor}} = \min[TEW, P_{\text{mean}} + \frac{W_{\text{ini}}}{n_w}] \quad (۹-۷)$$

$$REW_{\text{cor}} = REW \left[\min \left(\frac{P_{\text{mean}} + \frac{W_{\text{ini}}}{n_w}}{TEW}, 1 \right) \right] \quad (۱۰-۷)$$

که در آن، $\min()$ علامتی برای انتخاب حداقل مقدار عبارت‌های درون کروشه است که با علامت ویرگول از یکدیگر جدا شده‌اند و نیز، کل آب قابل تبخیر با استفاده از معادله‌های (۵-۷) یا (۶-۷) تعیین می شود. همچنین، W_{ini} عمق رطوبت اولیه خاک [میلی-متر] در لایه تبخیر (به ضخامت Z_e) در زمان کشت (شروع مرحله اولیه رشد گیاه) می باشد. مقدار W_{ini} بیشترین مقدار کل آب قابل تبخیر در شرایطی است که رطوبت اولیه خاک لایه تبخیر در حد ظرفیت زراعی باشد. مقادیر TEW_{cor} و REW_{cor} از معادله‌های (۹-۷) و (۱۰-۷) جایگزین TEW و REW در معادله (۳-۷) می شوند.

معادله‌های شکل‌های ۲۹ و ۳۰ فصل ششم

شکل‌های ۲۹ و ۳۰ فصل ششم را می توان به روش حل عددی با استفاده از معادله (۳-۷) برای شرایط زیر بدست آورد. در حالت کلی:

$$t_1 = \frac{REW_{\text{cor}}}{E_{\text{so}}}, \quad E_{\text{so}} = 1.15ET_0 \quad (\text{معادله } ۱)$$

اگر $t_1 < t_w$ باشد پس $K_{c\ ini} = 1/15$ (معادله ۷-۴) است و از معادله (۷-۳) استفاده نمی‌شود. به عبارت دیگر، معادله (۷-۳) با استفاده از پارامترهای زیر بکار می‌رود TEW_{cor} و REW_{cor} جایگزین TEW و REW در معادله ۷-۳ می‌شوند:

برای شکل ۲۹ (انواع بافت خاک و عمق آب نفوذ یافته کمتر از ۱۰ میلی‌متر):

$$TEW_{cor} = 10 \text{ میلی‌متر}$$

$$REW_{cor} = \min(\max(2.5, \frac{6}{ET_o^{0.5}}), 7)$$

برای شکل ۳۰-الف (خاک‌های درشت بافت و عمق آب نفوذ یافته ۴۰ میلی‌متر یا بیشتر):

$$TEW_{cor} = \min(15.7, 6(ET)^{0.5})$$

$$REW_{cor} = \min(6, TEW_{cor} - 0.01)$$

برای شکل ۳۰-ب (خاک‌های با بافت متوسط و ریز و عمق آب نفوذ یافته ۴۰ میلی‌متر یا بیشتر):

$$TEW_{cor} = \min(28, 13(ET)^{0.5})$$

$$REW_{cor} = \min(9, TEW_{cor} - 0.01)$$

عبارت‌های $\max()$ و $\min()$ تأکید دارد که حداکثر یا حداقل مقدار پارامترهای داخل پرانتز که با علامت ویرگول از یکدیگر جدا شده‌اند، انتخاب شود. در بسیاری از زبان‌های برنامه‌نویسی و برنامه‌های صفحه گسترده این عبارات وجود دارند.

شکل‌های ۲۹ و ۳۰ (الف و ب) با کاربرد روش حل عددی معادله (۷-۳) و استفاده از پارامترها و فرض‌های بیان شده در بالا قابل رسم هستند. لیکن، ممکن است نتایج محاسبه‌ها در نزدیک نقطه $ET_o = 5$ [میلی‌متر بر روز] با مقادیر منحنی‌های شکل ۳۰ (الف و ب) متفاوت باشند. تفاوت بین شکل‌ها و روش حل عددی کم و غیرمعنی‌دار است. پارامترهای فهرست شده در بالا از معادله‌های (۷-۵) تا (۷-۱۰) و با بکارگیری مقادیر معمول θ_{FC} و θ_{WP} کاهش می‌یابند.

در شرایطی که در دوره اولیه رشد گیاه، فاصله خیس شدن خاک یکسان نباشد، استفاده از روش ضریب گیاهی دو جزیی توصیف شده در فصل ششم به همراه رابطه موازنه روزانه آب خاک، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌نماید.

مثال ۷-۱- کاربرد معادله (۷-۳) در مثال ۲۵	
مشابه مثال ۲۵ بخش ب، در یک منطقه خشک، سبزیجات (ریز) در یک خاک درشت بافت کشت شده و دو نوبت در هفته به روش بارانی به مقدار ۲۰ میلی‌متر در هر نوبت، آبیاری می‌شوند. میانگین تبخیر - تعرق مرجع در مرحله اولیه ۵ میلی‌متر بر روز است. تبخیر - تعرق گیاه را در این مرحله برآورد کنید.	
فاصله آبیاری: $t_w = \frac{V}{\eta} = 2/5$	day $ET_0 = 5 \text{ mm day}^{-1}$ $= 1/15 \quad ET_0 = 1/15 \times (5) = 5/75 \text{ mm day}^{-1}$ E_{so}
از شکل ۲۹: $REW_{cor} = \min(\max(2/5, (\frac{6}{5 \cdot 5}), 7), 7) = 2/7$ $T_1 = \frac{REW}{E_{so}} = \frac{2/7}{5/75} = 0.47 \text{ day}$ از آنجا که $t_w > T_1$، با استفاده از معادله ۷-۳ داریم: $K_c(29) = 1.0 - (1.0 - 2/7) \times \frac{\exp[-\frac{-(3/5 - 0.47) \times (5/75) \times (1 + \frac{2/7}{1.0 - 2/7})}{1.0 - 2/7}]}{3/5 \times 5} = 0.57$ ini	TEW_{cor} = ۱۰ mm
از شکل ۳۰-الف: $= \min(7, 15(5^{0.5})) = 15 \text{ mm}$ $REW_{cor} = (6, 15 - 0.01) = 6 \text{ mm}$ $t_1 = \frac{REW}{E_{so}} = \frac{6}{5/75} = 1.04 \text{ day}$ از آنجا که $t_w > t_1$ است، با استفاده از معادله ۷-۳ داریم: $K_c(30-f) = (15 - (15 - 6/0)) \times \frac{\exp[-\frac{-(3/5 - 1.04) \times (5/75) \times (1 + \frac{6}{15 - 6})}{15 - 6}]}{3/5 \times 5} = 0.75$ ini	TEW_{cor} min
عمق آب نفوذ یافته: از معادله ۵۹: از معادله ۵۸: $I = 20 \text{ mm}$ $k_{cini} = 0.57 + (\frac{2.0 - 1.0}{4.0 - 1.0}) \times (0.75 - 0.57) = 0.57 + 0.33 \times (0.18) = 0.63$ $ET_c = 0.63(5) = 3.2 \text{ mm day}$	
میانگین تبخیر - تعرق گیاه مرحله اولیه رشد سبزیجات ریز ۳/۲ میلی‌متر بر روز است. نتایج این مثال، با مقادیر بدست آمده از مثال ۲۵ همخوانی دارند.	

پیوست هشت

کاربرد روش ضریب گیاهی دو جزئی

در برنامه‌ریزی آبیاری

در این پیوست، مشروح معادله‌های مورد استفاده در فصل هفتم برای محاسبه K_e ، K_{cb} و ET_c به روش ضریب گیاهی دو جزئی، بیان می‌شود. مثال موردی به صورت یک صفحه گسترده رایانه‌ای برای گیاه لوبیا دانه‌ای (مصرف خوراکی) برای اطلاعات مندرج در کادرهای ۱۵ و ۱۶ فصل‌های ششم و هفتم ارائه شده است. شکل ۸-۱ یک صفحه گسترده را نمایش می‌دهد که در آن، آبیاری با استفاده از روش موازنه روزانه آب خاک توصیف شده در فصل هشتم، برنامه‌ریزی شده است. آبیاری، بر مبنای تخلیه مجاز مدیریتی (MAD) رطوبت خاک محدوده توسعه ریشه گیاه، زمان‌بندی شده است. برنامه آبیاری و مقدار تبخیر برآورد شده از سطح خاک خیس متفاوت با مقادیر واقعی ارائه شده در کادر ۱۶ فصل هفتم می‌باشد. زیرا، در کادر ۱۶ از اطلاعات واقعی برنامه آبیاری در کیمبرلی (ایالات متحده آمریکا) در سال ۱۹۷۴ استفاده شده که، تا حدی، متفاوت از برنامه آبیاری پیش‌بینی شده شکل ۸-۱ است.

روابط بکار رفته برای محاسبه‌های صفحه گسترده و مبنای معادله‌های آن، در کادر ۸-۱ نشان داده شده است. اسامی متغیرهای مورد استفاده برای پارامترها همان تعاریف بکار رفته در فصل‌های اول تا نهم را دارند و در مقدمه نشریه نیز در فهرست علامت‌ها و واحدها آمده‌اند. متغیرهایی که در آن فهرست اشاره نشده در جدول ۸-۱ آمده است.

صفحه گسترده در شکل ۸-۱، شامل ستون‌های برای متغیرهای T_{max} ، u_2 و T_{dew} است. ستون‌های حداکثر دما و دمای نقطه شبنم برای محاسبه حداقل رطوبت نسبی روزانه استفاده می‌شوند. ستون‌های u_2 و RH_{min} برای اصلاح $K_{cb\ mid}$ و $K_{cb\ end}$ روزانه با استفاده از معادله ۷۰ فصل هفتم و محاسبه $K_{c\ max}$ روزانه با استفاده از معادله ۷۲ بکار می‌روند. داده‌های هفت ردیف اول شکل ۸-۱ که در کادرها مشاهده می‌شوند، اطلاعات مربوط به خاک و گیاه مورد نظر را نشان می‌دهند که توسط کاربر وارد برنامه شده و سایر اطلاعات (خارج از اطلاعات کادرها)، به صورت خودکار محاسبه شده‌اند. ستون‌هایی مشخص شده با دو خط در زیر عنوان، داده‌های ورودی به صفحه گسترده توسط کاربر را نشان می‌دهند.

محاسبه‌های شکل ۸-۱ را می‌توان برای تأیید محاسبه K_e ، K_c و ET_c با سایر برنامه‌های رایانه‌ای یا صفحه گسترده‌ها استفاده کرد. بر مبنای فرض‌های اعمال شده در زمان‌بندی آبیاری، ممکن است در نتایج، تفاوت‌های اندک مشاهده شود. در صفحه گسترده شکل ۸-۱ فرض می‌شود که همواره در ابتدای صبح، بارندگی اتفاق افتاده یا آبیاری انجام شده است. زمان و عمق آبیاری بر مبنای مقدار تخلیه آب خاک در انتهای روز پیش از آبیاری، برنامه‌ریزی می‌شود. همچنین، فرض شده است که آب اضافی حاصل از بارندگی در همان روز بارندگی به ناحیه زیرین محدوده توسعه ریشه گیاه نفوذ می‌کند. رواناب حاصل از

بارندگی نیز، صفر فرض می‌شود. در صورت نیاز، می‌توان مقدار رواناب حاصل از بارندگی را با استفاده از روش‌های بیان شده در اغلب کتاب‌های مرجع هیدرولوژی، برآورد و نتایج را در صفحه گسترده وارد کرد. فرض می‌شود که عمق خالص آب آبیاری ذخیره شده معادل عمق آب تخلیه شده در محدوده توسعه ریشه گیاه بوده که مقدار آن در روز پیش از آبیاری تعیین شده است. این فرض، بر آگاهی کامل آبیاری از نحوه تخلیه آب خاک، کافی یا اضافی بودن آب آبیاری در تمامی نوبت‌ها دلالت دارد. این فرض، ممکن است، در برخی مواقع برقرار نباشد و می‌تواند هر جا که لازم شود، توسط کاربر تغییر یابد. روابط مورد استفاده جهت تدوین صفحه گسترده شکل ۸-۱، در کادر ۸-۱ برای محیط اکسل (ماکروسافت، ویرایش ۵ و بالاتر) ارائه شده است. برای سایر انواع صفحه گسترده نیز روابط مشابه وجود دارد. رابطه قابل استفاده در محیط کوآترو- پرو (ویرایش ۵ و بالاتر) را می‌توان از وب سایت فائو^۱ دریافت کرد.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Example Spreadsheet for Calculating $ET_c = (K_{cb} + K_p) ET_0$ and an Irrigation Schedule													
2														
3	Crop:	Dry, Edible Beans			Table 11:					For a New Crop, Change Values in the Boxes				
4					L_{int}	25		$K_{cb\ int}$	0.15	0.15	K_{cmin}	0.15		
5	Planting: Month	5			L_{dev}	25		$K_{cb\ mid}$	1.10	1.13	Max.Ht:	0.4	m	
6	Day	22			L_{mid}	30		$K_{cb\ end}$	0.25	0.23				
7					L_{late}	20								
8														
9	"Double" Underlined Columns (below) are User-Entered								Midseas. Av. Wind Speed: 1.98 m/s	← Computed automatically from Lookup on column AO				
10	"Single" Underlined Columns are Computed by the Spreadsheet								Midseas. Av. RH _{min} : 29 %	← Computed automatically from Lookup on column AP				
11														
12														
13	Month	Day	Year	J	C	m/s	C	mm/d	kPa	kPa	%	P - RO		
14	5	15	74	135	10.0	5.8	0.0	3.4	0.61	1.23	50			
15	5	16	74	136	13.3	2.2	-5.0	4.1	0.42	1.53	28			
16	5	17	74	137	13.3	3.8	-1.1	3.7	0.56	1.53	37			
17	5	18	74	138	13.3	3.1	-2.8	3.8	0.50	1.53	33			
18	5	19	74	139	13.3	4.5	-0.6	3.1	0.58	1.53	38	2.5		
19	5	20	74	140	12.8	8.4	3.3	2.8	0.77	1.48	52	0.8		
20	5	21	74	141	17.2	3.5	-0.6	4.8	0.58	1.96	30			
21	5	22	74	142	22.8	2.2	1.7	4.9	0.69	2.78	25			
22	5	23	74	143	24.4	2.5	5.6	5.2	0.91	3.06	30			
23	5	24	74	144	24.4	2.7	6.7	5.4	0.98	3.06	32			
24	5	25	74	145	25.6	2.2	8.3	5.2	1.09	3.28	33			
25	5	26	74	146	27.8	1.9	10.0	5.4	1.23	3.74	33			
26	5	27	74	147	24.4	3.6	10.6	5.3	1.28	3.06	42			

کادر ۸-۱- روابط صفحه گسترده و معادله‌های متناظر تحت برنامه اکسل.

Formulas for Rows 1 to 15 of Figure 8.1 (for MicroSoft Excel, versions 5/95 and later)		
Equation in text or footnote	Cell	Text, value, or formula
	A1:	Example Spreadsheet for Calculating $ET_c = (K_{cb} + K_e)ET_o$ and an Irrigation Schedule
	P2:	Computed Dates for Stages:
	A3:	Crop:
	B3:	<u>Dry, Edible Beans</u>
	F3:	Table 11:
	I3:	Table 12:
	J3:	Following Adjustment:
Table 2.5	P3:	J_{plant}
	Q3:	$=TRUNC(275 \times C5/9-30+C6)+IF(C5>2,-2,0)+IF(MOD(C14,4)=0,+1,0)$
	V3:	f_w (irrig.):
	X3:	<u>0.5</u>
	AE3:	$Root_{min}$
	AF3:	<u>0.2</u>
	AG3:	m
	AH3:	MAD during Initial Stage
	AK3:	<u>70</u>
	AL3:	%
	E4:	L_{ini}
	F4:	<u>25</u>
	H4:	$K_{cb\ ini}$
	I4:	<u>0.15</u>
	J4:	$=I4$
	L4:	K_{cmin}
	M4:	$=J4$
	P4:	J_{Dev}
	Q4:	$=Q3+F4$
	V4:	REW:
	X4:	<u>8</u>
	Y4:	mm
	AE4:	$Root_{max}$
	AF4:	<u>0.8</u>
	AG4:	m
	AH4:	MAD after Initial Stage
	AK4:	<u>45</u>
	AL4:	%
Eq. 70	A5:	Planting:
	B5:	Month
	C5:	<u>5</u>
	E5:	L_{dev}
	F5:	<u>25</u>
	H5:	$K_{cb\ mid}$
	I5:	<u>1.1</u>
	J5:	$=I5+(0.04 \times (\$K\$8-2)-0.004 \times (\$K\$9-45)) \times (\$M\$5/3)^{0.3}$
	L5:	Max.Ht.:
	M5:	<u>0.4</u>
	N5:	m
	P5:	J_{Mid}
	Q5:	$=Q4+F5$
	V5:	TEW:
	X5:	<u>22</u>
	Y5:	mm

ادامه کادر ۸-۱-

	AE5:	Avail. Water
	AF5:	160
	AG5:	mm/m
	B6:	Day
	C6:	22
	E6:	L_{mid}
	F6:	30
	H6:	K_{cb_end}
	I6:	0.25
Eq. 70	J6:	$=IF(I6<0.45,I6,I6+(0.04*(\$K\$8-2)-0.004*(\$K\$9-45))*(\$M\$5/3)^{0.3})$
	P6:	J_{Late}
	Q6:	$=Q5+F6$
	V6:	initial D_e :
	X6:	18
	Y6:	mm
	E7:	L_{late}
	F7:	20
	P7:	J_{Harv}
	Q7:	$=Q6+F7$
	V7:	Initial f_w :
	X7:	1
(1)	H8:	Midseas. Av. Wind Speed:
	K8:	$=(VLOOKUP(Q6,D14:AP183,38)-VLOOKUP(Q5,D14:AP183,38))/(Q6-Q5)$
	L8:	m/s
	M8:	<----Computed automatically from Lookup on column AO
	AH8:	(Irrigation that is needed is presumed applied at beginning of next day)
(1)	H9:	Midseas. Av. RH_{min} :
	K9:	$=(VLOOKUP(Q6,D14:AP183,39)-VLOOKUP(Q5,D14:AP183,39))/(Q6-Q5)$
	L9:	%
	M9:	<----Computed automatically from Lookup on column AP
First row of formulas (row 14)		
Note: some formulas in row 14 (first day) vary from those in rows 15 onward. See row 15 for example calculations for all subsequent days.		
	A14:	5
	B14:	15
	C14:	74
Table 2.5	D14:	$=TRUNC(275*A14/9-30+B14)+IF(A14>2,-2,0)+IF(MOD(C14,4)=0,+1,0)$
	E14:	10
	F14:	5.7655
	G14:	0
	H14:	3.4
Eq. 14	I14:	$=0.6108*EXP((17.27*G14)/(G14+237.3))$
Eq. 11	J14:	$=0.6108*EXP((17.27*E14)/(E14+237.3))$
Eq. 63	K14:	$=I14/J14*100$
	L14:	0
Eq. 66 ⁽²⁾	O14:	$=IF(D14<\$Q\$4,\$J\$4,IF(D14<\$Q\$5,\$J\$4+(D14-\$Q\$4)/\$F\$5*(\$J\$5-\$J\$4),IF(D14<\$Q\$6,\$J\$5,IF(D14<\$Q\$7,\$J\$5+(D14-\$Q\$6)/\$F\$7*(\$J\$6-\$J\$5),\$J\$4))))$
(3)	P14:	$=MAX(O14/\$J\$5*\$M\$5,P13)$
Eq. 72	Q14:	$=MAX(1.2+(0.04*(F14*0.9-2)-0.004*(K14-45))*(P14/3)^{0.3}, O14+0.05)$
(4)	R14:	0
Eq. 76	S14:	$=MAX(((O14-M\$4)/(Q14-MS4))^{(1+0.5*P14)},0.01)$
(5)	T14:	$=IF(R14>0,X\$3,IF(L14>0,1,X7))$

ادامه کادر ۸-۱-

Eq. 75 (6)	U14:	=MIN(1-S14,T14)
	V14:	=X6
Eq. 74	W14:	=MAX(IF(V14<X\$4,1,(X\$5-V14)/(X\$5-X\$4)),0)
Eq. 71	X14:	=MIN(+W14*(Q14-O14),U14*Q14)
	Y14:	=X14*H14
Eq. 79	Z14:	=MAX(L14+R14,0)
Eq. 77(6)	AA14:	=V14-L14-R14+Y14/U14+Z14
(7)	AB14:	=O14+X14
Eq. 69(7)	AC14:	=AB14*H14
Eq. 8.1(8)	AE14:	=MAX((O14-\$J\$4)/(S\$5-\$J\$4)*(\$AF\$4-SAFS3)+SAFS3,AE13)
Eq. 82	AF14:	=MAX(IF(D14<Q\$4,AK\$3,AK\$4)/100*AE14*AFS5,AF13)
Eq. 85(9)	AG14:	=X\$6-L14+AC14
(10)	AH14:	=IF(D14>=QS3,IF(D14<(Q\$6+Q\$7)/2,IF(AG14>AF14, AG14,0), 0), 0)
Eq. 88	AI14:	=MAX(+L14-AC14-X\$6,0)
Eq. 84(11)	AJ14:	=IF(AG14>AF14,(AE14*AF\$5-AG14)/(AE14*AFS5-AF14),1)
Eq. 80	AK14:	=X14+O14*AJ14
Eq. 85(9)	AL14:	=+X\$6-L14+AK14*H14+AI14
(12)	AO14:	=F14
(12)	AP14:	=K14

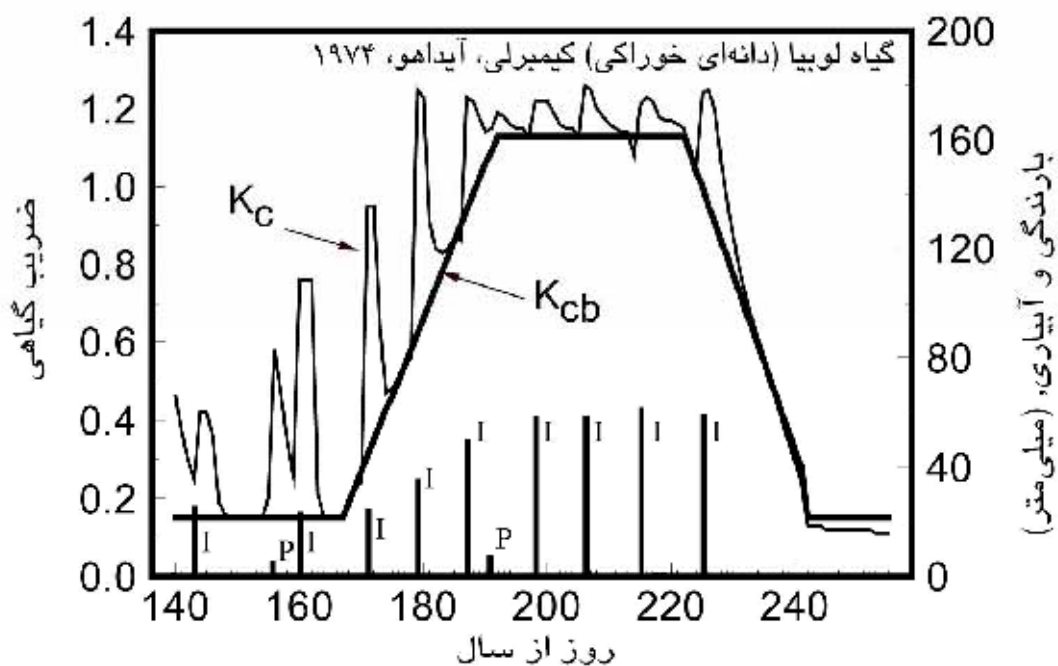
Second row of formulas		
All rows below row 15 are similar.		
	A15:	<u>5</u>
	B15:	<u>16</u>
	C15:	<u>74</u>
Table 2.5	D15:	=TRUNC(275*A15/9-30+B15)+IF(A15>2,-2,0)+IF(MOD(C15,4)= 0,+1,0)
	E15:	<u>13.3</u>
	F15:	<u>2.2175</u>
	G15:	<u>-5</u>
	H15:	<u>4.1</u>
Eq. 14	I15:	=0.6108*EXP((17.27*G15)/(G15+237.3))
Eq. 11	J15:	=0.6108*EXP((17.27*E15)/(E15+237.3))
Eq. 63	K15:	=I15/J15*100
	L14:	<u>0</u>
Eq. 66 (2)	O15:	=IF(D15<SQ\$4,\$J\$4,IF(D15<Q\$5,\$J\$4+(D15-\$Q\$4)/\$F\$5* (S\$5-S\$4),IF(D15<Q\$6,\$J\$5,IF(D15<Q\$7,\$J\$5+ (D15-\$Q\$6)/\$F\$7*(J\$6-\$J\$5),S\$4))))
(3)	P15:	=MAX(O15/\$J\$5*\$M\$5,P14)
Eq. 72	Q15:	=MAX(1.2+(0.04*(F15*0.9-2)-0.004*(K15-45))*(P15/3)^0.3, O15+0.05)
(4)	R15:	=IF(AH14>0,AH14/\$X\$3,0)
Eq. 76	S15:	=MAX(((O15-M\$4)/(Q15-M\$4))^(1+0.5*P15),0.01)
(5)	T15:	=IF(R15>0,X\$3,IF(L15>0,1,T14))
Eq. 75	U15:	=MIN(1-S15,T15)
(6)	V15:	=MAX(AA14-L15-R15,0)
Eq. 74	W15:	=MAX(IF(V15<X\$4,1,(X\$5-V15)/(X\$5-X\$4)),0)
Eq. 71	X15:	=MIN(+W15*(Q15-O15),U15*Q15)
	Y15:	=X15*H15
Eq. 79	Z15:	=MAX(L15+R15-AA14,0)
Eq. 77(6)	AA15:	=AA14-L15-R15+Y15/U15+Z15
(7)	AB15:	=15+X15
Eq. 69(7)	AC15:	=AB15*H15
Eq. 8.1(8)	AE15:	=MAX((O15-\$J\$4)/(S\$5-\$J\$4)*(\$AF\$4-SAFS3)+SAFS3,AE14)
Eq. 82	AF15:	=MAX(IF(D15<Q\$4,AK\$3,AK\$4)/100*AE15*AFS5,AF14)
Eq. 85(9)	AG15:	=AK14-L15-AH14+AC15
(10)	AH15:	=IF(D15>=QS3,IF(D15<(Q\$6+Q\$7)/2,IF(AG15>AF15, AG15,0), 0),0)
Eq. 88	AI15:	=MAX(+L15-AH14-AC15-AK14,0)
Eq. 84(11)	AJ14:	=IF(AG15>AF15,(AE15*AF\$5-AG15)/(AE15*AFS5-AF15),1)
Eq. 80	AK14:	=X15+O15*AJ15
Eq. 85(9)	AL15:	=+AL14-L15-AH14+AK15*H15+AI15
(12)	AO15:	=AO14+F15
(12)	AP15:	=AP14+K15

Footnotes:

- (1) Cells K8 and K9 use the vertical lookup function to automatically calculate the average wind speed and average daily minimum relative humidity during the midseason period. The lookup function uses cumulative totals of wind speed and RH_{min} that are calculated in columns AO and AP.
- (2) The formula to calculate K_{cb} for each day uses a series of imbedded IF statements to determine which growing period the day is in. Linear interpolation is applied when the day is within the development and late season growing periods.
- (3) The crop height on any day is calculated as proportional to the value of K_{cb} on that day to the $K_{cb\ mid}$ value, multiplied by the maximum crop height that has been entered by the user in cell M5. The value for crop height is not allowed to decrease with time. Hence, the MAX() function is employed, comparing with the value of the previous day.
- (4) The value for irrigation depth (divided by f_w to express the depth over the wetted fraction of the soil, only) is presumed to occur early in the day. This value is based on a decision made at the end of the previous day (column AH), based on whether or not the ending soil water depletion on the previous day has exceeded the readily available water (RAW). The irrigation depth on the first day is presumed to be zero.
- (5) The value for f_w is determined according to the last occurrence of precipitation or irrigation, as described in Chapter 7.
- (6) The depletion of the evaporation layer (top soil layer) at the beginning of the day is presumed to equal the depletion at the end of the previous day less any precipitation or irrigation, which is assumed to occur very early in the day. The value for $D_{e,i}$ is limited to ≥ 0 .
The depletion of the evaporation layer at the end of the day is calculated according to Eq. 77, with root extraction of plant transpiration from the evaporation layer assumed to equal zero.
- (7) The value for K_c is calculated as $K_c = K_{cb} + K_e$ and the value for ET_c is calculated as $K_c \times ET_o$.
- (8) The depth of the effective root zone on any day is calculated as being proportional to the ratio of the value of the K_{cb} on that day (above the value of $K_{c\ min}$) to the $K_{cb\ mid} - K_{c\ min}$, as described in Eq. 1 of this annex. The rooting depth is not allowed to decrease with time. Therefore, the MAX() function is utilised, where the value for the previous day is compared.
- (9) The "first" estimate for ending depletion of the root zone ($D_{r,i}$) is estimated using Eq. 85, with drainage assumed to be zero and with ET_c for nonstressed conditions. The value for $D_{r,i}$ is then recalculated in Column AK, after any drainage loss is estimated and after any reduction in ET_c , to account for low soil water content. The value for $D_{r,i}$ in column AK represents depletion of the root zone at the end of the day.
- (10) The net depth of irrigation needed is based on the value of soil water depletion at the end of the day. It is assumed that irrigation will be applied at the beginning of the following day. The formula in column AH checks to insure that the specific day is within the growing period. The formula assumes that no irrigation will be desired during the last one-half of the late-season period. This assumption may need to be modified for some other crops. The value for management allowed depletion is allowed to have a different (normally higher) value during the initial period as compared to during the rest of the growing season.
- (11) The stress coefficient K_s represents the K_s under the current conditions of soil water. The value for K_s is reduced below 1.0 using Eq. 84 if the depletion of the root zone (following any irrigation or precipitation earlier in the day) is greater than the readily available water (RAW). It is presumed that the stress point, p , is the same as the value entered for MAD. This presumption can be modified as needed.
- (12) Columns AO and AP contain cumulative sums of daily wind speed and daily minimum relative humidity. These columns are used to calculate mean values for u_2 and RH_{min} during the midseason period (footnote 1).

جدول ۸-۱- متغیرهای بکار رفته در صفحه گسترده که در فهرست علامت‌ها و واحدها بیان نشده است.

آب قابل استفاده خاک برای گیاه برابر تفاضل ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی [میلی‌متر]	Avail. Water
شماره روز از سال در هنگام کشت	J_{plant}
شماره روز از سال در شروع مرحله توسعه گیاه	J_{Dev}
شماره روز از سال در شروع مرحله میانی رشد	J_{Mid}
شماره روز از سال در شروع مرحله پایانی رشد	J_{Late}
شماره روز از سال در هنگام برداشت یا پلاسیدگی دائم گیاه	J_{Harv}
میانگین ارتفاع پوشش گیاهی در مرحله میانی رشد [متر]	Max. Ht
کسر تخلیه مجاز مدیریتی آب خاک در مرحله اولیه رشد	MAD during intial stage
کسر تخلیه مجاز مدیریتی آب خاک در دوره‌های پس از مرحله اولیه رشد	MAD after initial stage
میانگین عمق مؤثر توسعه ریشه گیاه در مرحله اولیه رشد (به صورت $Z_{r\ min}$ نیز آمده است)، [متر]	Root _{min}
حداکثر عمق مؤثر توسعه ریشه گیاه (به صورت $Z_{r\ max}$ نیز آمده است)، [متر]	Root _{max}



شکل ۸-۲- مقادیر روزانه ضریب گیاهی پایه از محاسبه‌های مثال شکل ۸-۱

مقادیر K_{cb} و K_c روزانه محاسبه شده در شکل ۸-۲ نشان داده شده است. در مثال صفحه گسترده، مقادیر تخلیه روزانه آب خاک که در پایان هر روز محاسبه شده، به صورت شکل ۸-۳ نشان داده شده است. شکل ۸-۳ اثر افزایش عمق توسعه ریشه گیاه را بر تخلیه مجاز آب خاک نشان می‌دهد. در هنگامی که، ضریب تخلیه مجاز مدیریتی همان ضریب آب سهل‌الوصول باشد ($MAD=p$)، مقدار تخلیه مجاز همان عمق آب سهل‌الوصول است. عمق (محدوده) مؤثر توسعه ریشه گیاه در هر روز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_{ri} = Z_{rmin} + (Z_{rmax} - Z_{rmin}) \frac{K_{cbi} - K_{cbini}}{K_{cbmid} - K_{cbini}} \quad J < J_{mid} \quad (۱-۸)$$

و

$$Z_{ri} = Z_{rmax} \quad J > J_{mid} \quad (۲-۸)$$

ام

که در آن:

Z_{ri} = عمق مؤثر توسعه ریشه گیاه در روز i ام [متر]،

Z_{rmin} = عمق مؤثر اولیه توسعه ریشه گیاه (در شروع مرحله اولیه رشد)،

Z_{rmax} = حداکثر عمق مؤثر توسعه ریشه گیاه در مرحله میانی رشد (از جدول ۲۲ فصل هشتم)، و

J = شماره روز در سال [بین ۱ تا ۳۶۶]، می‌باشد.

Z_{rmin} ، مشابه متغیر $Root_{min}$ و Z_{rmax} مشابه $Root_{max}$ می‌باشد که در شکل ۸-۱ استفاده شده است.

در معادله‌های (۱-۸) و (۲-۸) فرض می‌شود که عمق توسعه ریشه گیاه متناسب با افزایش ضریب گیاهی پایه افزایش می‌یابد. با این فرض، عمق مؤثر توسعه ریشه گیاه در شروع مرحله میانی رشد بیشترین مقدار است. روش‌های دیگر شامل میان‌یابی‌ها داده‌ها در زمان مورد نظر از دوره رشد نیز، برای برآورد Z_r استفاده می‌شوند. برای مثال:

$$Z_{ri} = Z_{rmin} + (Z_{rmax} - Z_{rmin}) \frac{J - J_{start}}{J_{max} - J_{start}} \quad J_{start} \leq J \leq J_{max} \quad (۳-۸)$$

هنگامی که $J < J_{start}$ باشد، $Z_{ri} = Z_{rmin}$ بوده و برای $J > J_{max}$ ، $Z_{ri} = Z_{rmax}$ است که در آن:

J_{start} = شماره روز از سال در زمانی که افزایش عمق ریشه از Z_{rmin} به Z_{ri} شروع می‌شود.

J_{max} = شماره روز از سال در زمانی که عمق توسعه ریشه گیاه بیشترین مقدار است.

مقدار Z_{rmin} گیاهان سالانه باید مجموع عمق کاشت بذر و عمق خاک تأمین‌کننده نیاز رطوبتی ریشه در حال توسعه پس از جوانه‌زنی باشد. مقدار Z_{rmin} برای بسیاری از گیاهان سالانه از ۰/۱۵ تا ۰/۲ متر

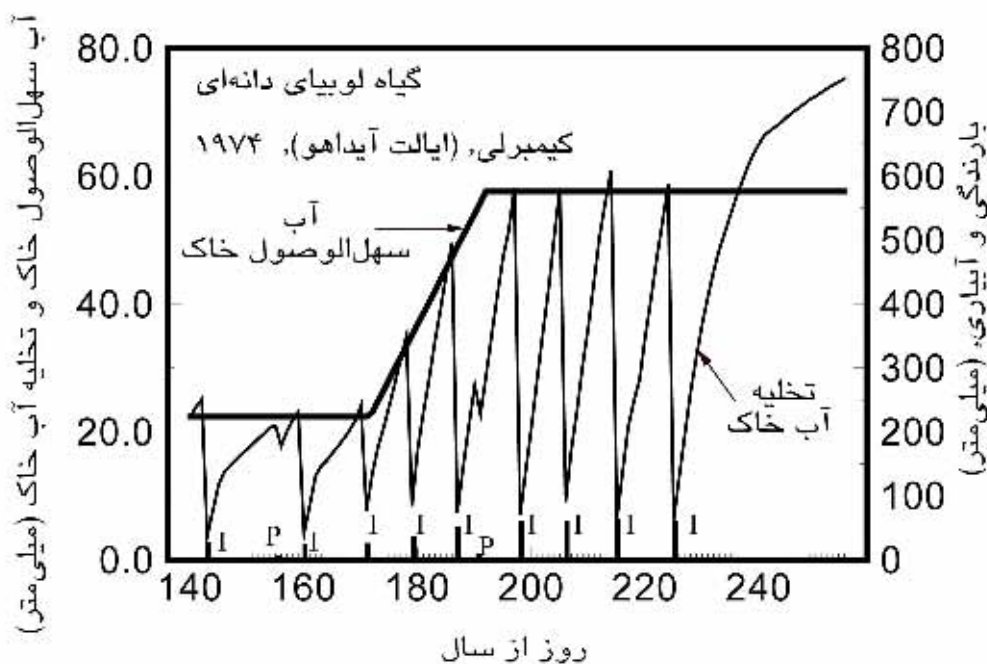
برآورد می‌شود.

برای نشان دادن توانایی ریشه برخی گیاهان در جذب آب از خاک نسبتاً خشک و ناچیز بودن اثر تنش آبی بر جذب در مرحله‌های جوانه‌زنی و اولیه رشد، مقدار MAD در مرحله اولیه رشد به صورت یک مقدار جداگانه و بزرگتر در نظر گرفته شده است. در این مثال، فرض می‌شود p مساوی با MAD می‌باشد.

فرض می‌شود دوره آبیاری لوبیا از هنگام کشت شروع و در نیمه مرحله پایانی رشد، خاتمه می‌یابد. بنابراین، آخرین آبیاری در روز ۲۲۵م از دوره رشد انجام می‌شود. گیاه لوبیا، تنها، پس از روز ۲۲۵ با تنش آبی اندک مواجه بوده زیرا، K_c کاهش یافته است. ضریب تنش (K_s) در ستون AJ صفحه گسترده محاسبه شده است.

این واقعیت که آبیاری تنها در زمانی انجام شده که تخلیه آب خاک در انتهای روز پیش از آن مساوی یا بیش از آب سهل‌الوصول بوده است، گاه موجب بروز تنش جزئی در گیاه در روز پیش از آبیاری شده است (به ضریب تنش ستون AJ رجوع شود). تأثیر K_s بر K_c adj پیش از کشت و نزدیک به پایان دوره رشد به دلیل کوچک بودن ضریب گیاهی پایه نسبت به مقدار K_e پتانسیل در این دوره، ناچیز است.

هدف این مثال، تنها، نشان دادن روش استفاده از معادله‌های تبخیر از سطح خاک در برنامه‌ریزی آبیاری است. روش بکار رفته برای برنامه آبیاری و فرض‌های مورد استفاده ممکن است، همیشه، متناسب با شرایط واقعی نباشند. کاربر باید روش برنامه‌ریزی آبیاری را برای تطبیق با شرایط محلی اصلاح کند.



شکل ۸-۳- تخلیه آب خاک در پایان هر روز که در شکل ۸-۱ محاسبه شده است.

منابع مورد استفاده:

منابع و مراجع بسیاری در تهیه این کتاب مورد استفاده قرار گرفته، که بر حسب موضوع به شرح زیر دسته‌بندی شده است:

A. Basic concepts and definitions

- Allen, R. G., Smith, M., Perrier, A., and Pereira, L. S. 1994a. An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*. 43(2). 1-34.
- Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G. (ed). 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70., Am. Soc. Civil Engrs., New York, NY, 360 p.
- Monteith, J. L., 1965. *Evaporation and Environment*. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, University Press, Cambridge, 19:205-234.
- Monteith, J. L. 1973. *Principles of Environmental Physics*, Edward Arnold, London.
- Monteith, J. L. and Unsworth, M. H. 1990. *Principles of Environmental Physics*, 2nd ed., Edward Arnold, London.
- Penman, H. L. 1948. "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proc. Roy. Soc. London*, A193, 120-146.
- Penman, H. L. 1963. *Vegetation and hydrology*. Tech. Comm. No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England. 125 p.
- Pereira, L. S., Perrier, A., Allen, R. G. and Alves, I. 1996. *Evapotranspiration: Review of concepts and future trends*. *J. Irrig. And Drain. Engrg.*, ASCE 25. (in press).
- Perrier, A. 1978. Importance des définitions de l'évapotranspiration dans le domaine pratique de la mesure, de l'estimation of de la notion de coefficients culturaux. XV' *Journal of Hydraulics*, Société Hydrotechnique de France, Question IV, Rapport 1:1-7 (in French).
- Perrier, A. 1982. Land surface processes: vegetation. pp. 395-448 in P. S. Eagleson (Editor), *Land Surface Processes in Atmospheric General Circulation Models*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, Mass.
- Perrier, A. 1985. Updated evapotranspiration and crop water requirement definitions. In: Perrier, A. and Riou, C. (eds) *Crop Water Requirements (ICID Int. Conf., Paris, Sept. 1984)*. INRA, Paris: 885-887.
- Rijtema, P. E., (1965). "Analysis of actual evapotranspiration." *Agric. Res. Rep. No. 69*, Centre for Agric. Publ. and Doc., Wageningen.
- Slatyer, R. O. and McIlroy, I. C. 1961. *Evaporation and the principle of its measurement*. In: *Practical Meteorology*, CSIRO (Australia) and UNESCO, Paris.
- Smith, M., Allen, R. G., Monteith, J. L., Perrier, A., Pereira, L., and Segeren, A. 1992.

Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. UN-FAO, Rome, Italy, 54 p.

B. ET equations

- Allen, R. G. 1986. A Penman for all seasons. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 112(4): 348-368.
- Allen, R. G. 1992. Evaluation of a temperature difference method for computing grass reference evapotranspiration. Report submitted to UN-FAO Water Resources Development and Management Service, Land and Water Dev. Div., Rome. 50 p.
- Allen, R. G., 1995b. Evaluation of procedures for estimating grass reference evapotranspiration using air temperature data only. Report prepared for FAO, Water Resources Development and Management Service, FAO, Rome.
- Allen, R. G. and Pruitt, W. O. 1986. Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE 112(IR2): 139-155.
- Allen, R. G. and Pruitt, W. O. 1991. FAO-24 reference evapotranspiration factors. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE 117(5): 758-773.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O., Businger, J. A., Fritschen, L. J., Jensen, M. E., and Quinn, F. H. 1996. Chapter 4 "Evaporation and Transpiration" in *ASCE Handbook of Hydrology*. New York, NY. p. 125-252.
- Batchelor, C. H. 1984. The accuracy of evapotranspiration functions estimated with the FAO modified Penman equation. *Irrig. Science* 5(4): 223-234.
- Blaney, H.F. and Criddle, W. D. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. *USDA Soil Conserv. Serv. SCS-TP96*. 44 pp.
- Brutsaert, W. H., 1982. *Evaporation into the Atmosphere*. R. Deidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- Burman, R. and Pochop, L. O. 1994. *Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data*. Elsevier Science B. V., Amsterdam.
- Businger, J. A. 1956. Some remarks on Penman's equations for the evapotranspiration. *Netherlands J. Agric. Sci.* 4: 77.
- Castrignanò, A., de Caro, A., and Tarantino, E. 1985. Verifica sulla validità di alcuni metodi empirici di stima dell'evapotraspirazione potenziale nel Metapontino. (Verification of validity of several empirical methods of estimating potential evapotranspiration in southern Italy). *L'Irrigazione* XXXII (4): 23-28 (in Italian).
- Chiew, F. H. S., N. N. Kamadalasa, H. M. Malano and McMahon, T. A. 1995. Penman-Monteith, FAO-24 reference crop evapotranspiration and class-A pan data in Australia. *Agric. Water Management* 28: 9-21.
- Choisnel, E., de Villele, O., and Lacroze, F. 1992. Une approche uniformisée du calcul

- de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la Communauté Européenne, Com. Commun. Européennes, EUR 14223 FR, Luxembourg, 176 p.
- Christiansen, J. E. 1968. Pan evaporation and evapotranspiration from climatic data. J. Irrig. and Drain. Div., ASCE 94: 243-265.
- Cuenca, R. H. and Nicholson, M. T. 1982. Application of the Penman equation wind function. J. Irrig. and Drn. Engrg. Div., ASCE 108(IR1): 13-23.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 33, FAO, Rome, Italy. 193 pp.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 179 p.
- Feddes, R. A. 1987. Crop factors in relation to Makkink reference crop evapotranspiration. Tech. Bull. Inst. for Land and Water Management Research. No. 67, pp. 33-45.
- Frère, M. and Popov, G. F. 1979. Agrometeorological crop monitoring and forecasting. FAO Plant Production and Protection Paper 17. FAO, Rome, Italy., pp 38-43,
- Frevert, D. K., Hill, R. W., and Braaten, B. C. 1983. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. J. Irrig. and Drain Engrg., ASCE 109(IR2): 265-270.
- Gunston, H. and Batchelor, C. H. 1983. A comparison of the Priestley-Taylor and Penman methods for estimating reference crop evapotranspiration in tropical countries. Agric. Water Man. 6:65-77.
- George, W., Pruitt, W. O., and Dong, A. 1985. Evapotranspiration modeling. In: California Irrigation Management Information System, Final Report, by R. Snyder, D. W. Henderson, Pruitt, W. O., and Dong, A. Calif. Dept. Water Resour. Contract. No. B53812. Land, Air and Water Resources Pap. 10013-A, Univ. Calif., Davis, III-36 to III-59.
- Gosse, G., Perrier, A., and Itier, B. 1977. Etude de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé dans le bassin parisien. Ann. Agron. 28(5): 521-541. (in French).
- Hargreaves, G. H. 1983. Discussion of 'Application of Penman wind function' by Cuenca, R. H. and Nicholson, M. J. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE 109(2): 277-278.
- Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H., and Riley, J. P. 1985. Agricultural benefits for Senegal River Basin. J. Irrigation and Drainage Engr., ASCE 111: 113-124.
- Hashemi, F. and Habibian, M. T. 1979. Limitations of temperature based methods in estimating crop evapotranspiration in arid-zone agricultural development project. Agric. Meteorol. 20: 237-247.
- Hatfield, J. L. and Fuchs, M. 1990. Evapotranspiration models. Chapter 3, pp 33-59 in

- Management of Farm Irrigation Systems (G. J. Hoffman, T. A. Howell, and K. H. Solomon (ed)), ASAE, St. Joseph, Michigan.
- Howell, T. A., Schneider, A. D., and Jensen, M. E. 1991. History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements. In Allen, R. G., Howell, T. A., Pruitt, W. O., Walter, L.A., and Jensen, M. E. (Editors), *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, ASCE, New York, NY p. 1-9.
- Itier, B. and Perrier, A. 1976a. Présentation d'une étude analytique de l'advection: I. Advection liée aux variations horizontales de concentration et de température. *Ann. Agron.* 27(2): 111-140.
- Itier, B., Brunet, Y., Mcaneney, K. J., and Lagouarde, J. P. 1994. Downwind evolution of scalar fluxes and surface resistance under conditions of local advection. Part I: A reappraisal of boundary conditions. *Agric. and For. Meteorol.* 71: 211-255.
- Itier, B. 1996. Measurement and estimation of evapotranspiration. In: Pereira, L. S., Feddes, R. A., Gilley, J. R., Leseffre, B. (eds) *Sustainability of Irrigated Agriculture*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, pp. 171-191.
- Jensen, M. E. and Haise, H. R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation *J. Irrig. and Drain. Div.*, ASCE, 89:15-41.
- Jensen, M. E. 1974. (ed.) *Consumptive use of water and irrigation water requirements*. Rep. Tech. Com. on Irrig. Water Requirements, *Irrig. and Drain. Div.*, ASCE, 227 pp.
- Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G. (ed). 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70., Am. Soc. Civil Engrs., New York, NY, 360 p.
- Katerji, N. and Perrier, A. 1983. Modélisation de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne: rôle d'un coefficient cultural. *Agronomie* 3(6): 513-521 (in French).
- Makkink, G. F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. Inst. Water Engng.* 11 (3): 277-288.
- McNaughton, K. G. and Jarvis, P. G. 1984. Using the Penman-Monteith equation predictively. *Agricultural Water Management* 8: 263-278.
- Monteith, J. L. 1973. *Principles of Environmental Physics*, Edward Arnold, London.
- Monteith, J. L. 1981. Evaporation and surface temperature. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 107: 1-27.
- Monteith, J. L. 1985. Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. pp. 4-12 in *Advances in Evapotranspiration*, Proceedings of the ASAE Conference on Evapotranspiration, Chicago, Ill. ASAE, St. Joseph, Michigan.

- Pelton, W. L., King, K. M. and Tanner, C.B. 1960. An evaluation of the Thornthwaite and mean temperature methods for determining potential evapotranspiration. *Agron. J.* 52: 387-395.
- Penman, H. L. 1948. "Natural evaporation from open water, bare soil and grass." *Proc. Roy. Soc. London*, A193, 120-146.
- Penman, H. L. 1963. *Vegetation and hydrology*. Tech. Comm. No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England. 125 pp.
- Pereira, L. S. and Smith, M. 1989. Proposed procedures for revision of guidelines for predicting crop water requirements. Land and Water Use Div., FAO Rome, 36 p.
- Phene, C. J., dark, D. A. and Cardon, G. E. 1996. Real time calculation of crop evapotranspiration using an automated pan evaporation system. In: Camp, C. R., Sadler, E. J. and Yoder, R. E. (eds.). *Evaporation and Irrigation Scheduling*, ASCE: 189-194.
- Piper, B. S. 1989. Sensitivity of Penman estimates of evaporation to errors in input data. *Ag. Water Man.* 15:279-300.
- Priestley, C.H.B. and Taylor, R. J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Mon. Weath. Rev.*, 100: 81-92. Pruitt, W. O. (1996). "Empirical method of estimating evapotranspiration using primarily evaporation pans." *Proc. Conf. on Evapotranspiration and its Role in Water Resources Management*. Chicago. Dec. pp. 57-61. Stewart, J. B. 1983. A discussion of the relationships between the principal forms of the combination equation for estimating evapotranspiration. *Ag. Meteorol.* 30:111-127.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L. and Verma, S. B. 1983. *Microclimate. The Biological Environment* (2nd edition). J. Wiley, New York.
- Seemann, J., Chirkov, Y. I., Lomas, J. and Primault, B., 1979. *Agrometeorology*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Seguin, B., Brunet, Y., and Perrier, A. 1982. Estimation of evaporation: a review of existing methods and recent developments in European Geologic Society Symposium on Evaporation. Leeds, U.K., August, 1982, 21 p.
- Sharma, M. L. 1985. Estimating evapotranspiration. p. 213-281 in *Adv. in Irrigation*, Vol III, D. Hillel (Editor)., Academic Press, New York.
- Stewart, J. B. 1983. A discussion of the relationships between the principal forms of the combination equation for estimating evaportranspirations. *Ag. Meteorol.* 30:111-127.
- Tanner, C.B. and Pelton, W. L. 1960. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance of Penman. *J. Geophysical Res.* 65 (10): 3391-3413.
- Tanner, C.B. and Fuchs, M. 1968. Evaporation from unsaturated surfaces: a generalized combination equation. *J. Geophysical Res.* 73(4): 1299-1304.

- Thompson, N., Barrie, L.A., and Ayles, M. 1981. The Meteorological Office rainfall and evaporation calculation system: MORECS. Hydrological Memorandum 45, Hydrometeorological Services, London, 66 p.
- Thornthwaite, C. W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geograph. Rev.*, 38, 55.
- Turc, L. 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule climatique simplifiée et mise a jour. (in French). *Ann. Agron.* 12:13-49.
- Watts, P. J. and Hancock, N. H. 1985. Evaporation and potential evaporation - a practical approach for agricultural engineers. *Mech. Engrg. Trans.* 10(4): 231-240 plus discussions during 1986.
- Wright, J. L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. *J. irrig. and Drain. Div., ASCE*, 108 (IR2): 57-74.
- Wright, J. L. 1988. Daily and seasonal evapotranspiration and yield of irrigated alfalfa in southern Idaho. *Agron. J.* 80: 662-669.

C. ET and weather measurement

- Allen, R. G. 1996. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. *J. Irrig. and Drain. Engng. Div., ASCE* 122(2): 97-106.
- Allen, R. G., Pruitt, W. O., and Jensen, M. E. 1991. Environmental requirements for lysimeters. pp. 170-181 in Allen, R. G., Howell, T. A., Pruitt, W. O., Walter, L.A., and Jensen, M. E. (Editors). *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*. Proc. of the ASCE Int. Symp. on Lysimetry, Honolulu, HA, ASCE, New York, NY.
- Bastiaanssen, W.G.M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University; Wageningen, 273 pp.
- Beard, J. R. 1985. An assessment of water use by turfgrass. p. 45-60 in Gibeault, V. A. and Cockerham, S. T. (Editors). *Turfgrass Water Conservation*. Publ. 21405, Univ. Calif, Div. of Agrie and Nat. Resour., Berkley, Calif.
- Biran, I., Bravdo, B., Bushkin-Harav, I., and Rawitz, E. 1981. Water consumption and growth rate of 11 turfgrasses as affected by mowing height, irrigation frequency and soil moisture. *Agron. J.* 73:85-90.
- Blad, B. L. and Rosenberg, N. J. 1974. Lysimetric calibration of the Bowen-ratio energy balance method for evapotranspiration estimation in the Central Great plains. *J. App. Meteorol.* 13(2): 227-236.
- Brutsaert, W. H., 1982. *Evaporation into the Atmosphere*. R. Deidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.

- Businger, J. A. 1988. "A note on the Businger-Dyer profiles." *Boundary-Layer Meteorol.* 42: 145-151.
- Businger, J. A. and Yaglom, A. M. 1971. "Introduction to Obukhov's paper on 'Turbulence in an atmosphere with a non-uniform température'," *Boundary-Layer Meteorol.* 2: 3-6.
- Campbell, G. S. 1977. *An Introduction to Environmental Biophysics*. Springer Verlag, N.Y. 159 p.
- Carrijo, O. A. and Cuenca R. H., 1992. Precision of evapotranspiration estimates using neutron probe. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE 118 (6): 943-953.
- Dolman, A. J. and Stewart, J. B. 1987. Modelling forest transpiration from climatological data. In: R. H. Swanson, P. Y. Bernier and P. D. Woodard (eds) *Forest Hydrology and Watershed Management*, IAHS Publ. 167: 319-327.
- Fritschen, L. J. and Fritschen, C. L. 1991. Design and evaluation of net radiometers. Paper presented at the 7th Symp. on Meteorol. Observations and Instrumentation, Jan. 13-18, 1991., New Orleans, La., U.S.A. 5 p.
- Gash, J. H. C., Shuttleworth, W. J., Lloyd, C. R., André, J. C., Goutorbe, J. P., and Gelpe, J. 1989. Micrometeorological measurements in Les Landes forest during HAPEX-MOBILHY. *Ag. and For. Meteorol.* 46:131-147.
- Grant, D. R. 1975. Comparison of evaporation from barley with Penman estimates. *Agric. Meteorol.* 15: 49-60.
- Grebet, P. and Cuenca, R. H. 1991. History of lysimeter design and effects of environmental disturbances. in Allen, R. G., Howell, T. A., Pruitt, W. O., Walter, LA., and Jensen, M. E. (Editors), *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, ASCE, New York, NY p. 10-18.
- Itier, B. and Perrier, A. 1976a. Présentation d'une étude analytique de l'advection: I. Advection liée aux variations horizontales de concentration et de température. *Ann. Agron.* 27(2): 111-140.
- Itier, B., Brunet, Y., Mcaneney, K. J., and Lagouarde, J. P. 1994. Downwind evolution of scalar fluxes and surface resistance under conditions of local advection. Part I: A reappraisal of boundary conditions. *Agric. and For. Meteorol.* (in press).
- Itier, B. 1996. Measurement and estimation of evapotranspiration. In: Pereira, L. S., Feddes, R. A., Gilley, J. R., Leseffre, B. (eds) *Sustainability of Irrigated Agriculture*. Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, pp. 171-191.
- Kessler, J., Perrier, A. and Pescara, C. de, 1990. *La Météo Agricole*. Météole, (Pau).
- Kizer, M. A., Elliott, R. L. and Stone, J. F. 1990. Hourly ET model calibration with eddy flux and energy balance data. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE 116(2): 172-181.
- Marsh, A. W., Strohman, R. A., Spaulding, S., Younger, V., and Gibeault, V. 1980.

- Turf grass irrigation research at the University of California: warm and cool season grasses tested for water needs. *Irrig. J.*, July/August. 20-21, 32-33.
- Meyer, W. S. and Mateos, L. 1990. Effects of soil type on soybean crop water use in weighing lysimeters. 11. effect of lysimeter canopy height discontinuity on evaporation. *Irrig. Sci.* 11:233-237.
- Neale, C. M. U., Kruse, E.G., and Yoder, R. E. 1991. Field experience with hydraulic weighing lysimeters. in Allen, R. G., Howell, T. A., Pruitt, W. O., Walter, LA, and Jensen, M. E. (Editors), *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*, ASCE, New York, NY p. 160-169.
- Pearce, A. J., Gash, J. H. C., and Stewart, J. B. 1980. Rainfall interception in a forest stand estimated from grassland meteorological data. *J. Hydrol.*, 46: 147-163.
- Perrier, A., Itier, B., Bertolini, J. M., and Katerji, N. 1976. A new device for continuous recording of the energy balance of natural surfaces. *Agric. Meteor.* 16(1): 71-85.
- Perrier, A. and Tuzet, A. 1991. Land surface processes: Description, theoretical approaches, and physical laws underlying their measurements pp. 145-155 in Schmugge, T. J. and André, J. C. (eds) *Land Surface Evaporation: Measurement and Parameterization*. Springer-Verlag. Berlin.
- Perrier, A., Archer, P., and de Pablos, B. 1974. Etude de l'évapotranspiration réelle et maximale de diverses cultures. I: Dispositif et mesure. *Ann. Agron.* 25(3): 229-243.
- Perrier, A., Katerji, N., Gosse, G., and Itier, B. 1980. Etude "in situ" de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé. (In situ study of evapotranspiration rates for a wheat crop). *Agric. Meteorol.* 21: 295-311. (in French).
- Pruitt, W. O., Morgan, D. L., and Lourence, F. J. 1973. Momentum and mass transfers in the surface boundary layer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 99: 370-386.
- Pruitt, W. O. 1991. Development of crop coefficients using lysimeters. pp. 182-190 in Allen, R. G., Howell, T. A., Pruitt, W. O, Walter, LA., and Jensen, M. E. (Editors). *Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements*. Proc. of the ASCE Int. Symp. on Lysimetry, Honolulu, HA, ASCE, New York, NY.
- Pruitt, W. O. and Lourence, F. J. 1985. Experiences in lysimetry for ET and surface drag measurements. pp. 51-69 in: *Advances in Evapotranspiration*, ASAE, St. Joseph, MI.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L. and Verma, S. B. 1983. *Microclimate. The Biological Environment* (2nd edition). J. Wiley, New York.
- Schulze, K. 1995. Report of expert meeting for the preparation of an intercomparison of instruments and procedures for measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration. World Meteorological Organization, Commission for Instruments and Methods of Observation. Geneva, Switzerland. 30 p.
- Seemann, J., Chirkov, Y. I., Lomas, J. and Primault, B., 1979. *Agrometeorology*.

- Springer Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Shuttleworth, W. J. 1993. Evaporation. In: D. R. Maidment (ed) Handbook of Hydrology. McGraw Hill, New York: 4.1-4.53.
- Shuttleworth, W. J. and Wallace, J. S. 1985. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. Quart. J. Roy Meteorol. Soc. 111: 839-853.
- Stringer, W. C., Wolf, D. D., and Baser, R. E. 1981. Summer regrowth of tall fescue: stubble characteristics and microenvironment. Agron. J. 73:96-100.
- Slatyer, R. O. and McIlroy, I. C. 1961. Evaporation and the principle of its measurement. In: Practical Meteorology, CSIRO (Australia) and UNESCO, Paris.
- Stewart, J. B. and Gay, L. W. 1989. Preliminary modelling of transpiration from the FIFE stie in Kansas. Agric. and For. Meteorol. 48: 305-315.
- Tarantino, E. 1991. Grass reference measurements in Italy in Allen, R. G., Howell, T. A., Pruitt, W. O., Walter, LA., and Jensen, M. E. (Editors), Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements, ASCE, New York, NY p. 200-209.
- Thom, A. S., Thony, J. L., and Vauclin, M. 1981. On the proper employment of evaporation pans and atmometers in estimating potential transpiration. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 107: 711-736.
- Walter, LA., Siemer, E., Dirks, L. R., Quinian, J. P., and Burman, R. D. 1991. Lysimeters vs. buffer areas: evapotranspiration and agronomic comparisons in Allen, R. G., Howell, T. A., Pruitt, W. O., Walter, LA., and Jensen, M. E. (Editors), Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements, ASCE, New York, NY p. 10-18.
- Wehner, D. J. and Watschke, T. L. 1981. Heat tolerance of Kentucky bluegrasses, perennial ryegrasses, and annual bluegrass. Agron. J. 73:79-84.
- WMO 1983 Guide to Meteorological Instruments and Observing Practices. WMO n° 8 (fifth edition), Geneva.
- Wright, J. L. 1991. Using lysimeters to develop evapotranspiration crop coefficients in Allen, R. G., Howell, T. A., Pruitt, W. O., Walter, LA., and Jensen, M. E. (Editors), Lysimeters for Evapotranspiration and Environmental Measurements, ASCE, New York, NY p. 191-199.

D. Parameters in ET equations

- Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L., and Burman, R. D. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agron. J. 81:650-662.
- Allen, R. G., Smith, M., Perrier, A., and Pereira, L. S. 1994a. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bulletin. 43(2). 1-34.
- Allen, R. G., Smith, M., Pereira, L. S., and Perrier, A. 1994b. An update for the

- calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin, 43 (2): 35-92.
- Allen, R. G. 1995a. Evaluation of procedures for estimating mean monthly solar radiation from air temperature. Report prepared for FAO, Water Resources Development and Management Service, FAO, Rome.
- Bosen, J. F. 1958. An approximation formula to compute relative humidity from dry bulb and dew point temperatures. Monthly Weather Rev. 86(12): 486.
- Brunt, D. 1939. Physical and dynamical meteorology, Univ. Press, Cambridge. 400 pp.
- Brunt, D. 1952. Physical and dynamical meteorology, 2nd ed., Univ. Press, Cambridge. 428 pp.
- Brutsaert, W. H., 1982. Evaporation into the Atmosphere. R. Deidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- Burman, R. D., Jensen, M. E., and Allen, R. G. 1987. Thermodynamic factors in evapotranspiration. In: James, L. G. and M. J. English (editors), Proc. Irrig. and Drain. Spec. Conf., ASCE, Portland, Ore., p. 28-30.
- Burman, R. and Pochop, L. O. 1994. Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. Elsevier Science B. V., Amsterdam.
- Businger, J. A. 1988. "A note on the Businger-Dyer profiles." Boundary-Layer Meteorol. 42: 145-151.
- Choudhury, B. J., Idso, S. B., and Reginato, R. J. 1987. Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared temperature based energy balance equation. Agric. for. Meteorol. 39:283-297.
- Clothier, B. E., Clawson, K. L., Pinter, P. J., Moran, M. S., Reginato, R. J., and Jackson, R. D. 1986. Estimates of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa. Agric. For. Meteorol 37:319-329.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A. 1991. Solar engineering of thermal processes. 2nd Ed., John Wiley and sons, New York. 994 p.
- Harrison, L. P. 1963. Fundamentals concepts and definitions relating to humidity. In Wexler, A (Editor) Humidity and moisture Vol 3, Reinhold Publishing Co., N.Y.
- Dyer, A. J. 1974. A review of flux-profile relationships. Boundary Layer Meteorol. 7: 363-372.
- Dyer, A. J. and Hicks, B. B., 1970. Flux-gradient relationships in the constant flux layer. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 96: 715-721.
- Frevert, D. K., Hill, R. W., and Braaten, B. C. 1983. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. J. Irrig. and Drain Engrg., ASCE 109(IR2): 265-270.
- Garratt, J. R. (1992). The atmospheric boundary layer. Cambridge Univ. Press, 316 p.
- Garratt, J. R. and Hicks, B. B. 1973. Momentum, heat and water vapour transfer to and

- from natural and artificial surfaces. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 99: 680-687.
- George, W., Pruitt, W. O., and Dong, A. 1985. Evapotranspiration modeling. In: California Irrigation Management Information System, Final Report, by R. Snyder, D. W. Henderson, Pruitt, W. O., and Dong, A. Calif. Dept. Water Resour. Contract. No. B53812. Land, Air and Water Resources Pap. 10013-A, Univ. Calif., Davis, III-36 to III-59.
- Gosse, G., Perrier, A., and Itier, B. 1977. Etude de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé dans le bassin parisien. *Ann. Agron.* 28(5): 521-541. (in French).
- Harrison, L. P. 1963. Fundamentals concepts and definitions relating to humidity. In Wexler, A (Editor) *Humidity and moisture Vol 3*, Reinhold Publishing Co., N.Y.
- Hashemi, F. and Habibian, M. T. 1979. Limitations of temperature based methods in estimating crop evapotranspiration in arid-zone agricultural development project. *Agric. Meteorol.* 20: 237-247.
- Hatfield, J. L. and Fuchs, M. 1990. Evapotranspiration models. Chapter 3, pp 33-59 in *Management of Farm Irrigation Systems* (G. J. Hoffman, T. A. Howell, and K. H. Solomon (ed)), ASAE, St. Joseph, Michigan.
- Hottel, H. C. 1976. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy* 18: 129.
- Idso, S. B. and Jackson, R. B. 1969. Thermal radiation from the atmosphere. *J. Geophys. Res.* 74:5397-5403.
- Jensen, J. R. 1988. Effect of asymmetric, daily air temperature and humidity waves on calculation of reference evapotranspiration. *Proc. European Economic Community Workshop on Management of Water Resources in Cash Crops and in Alternative Production Systems*. Brussels, Belg. 24-25 Nov., 1988. 12 p.
- List, R. J. 1984. *Smithsonian Meteorological Tables*, 6th rev. ed., Smithsonian Institution, Washington D.C., U.S.A. 539 p.
- Liu, B. Y. H., and Jorden, R. C. 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct diffuse and total solar radiation. *Solar Energy* 4(3): 1-19.
- Matias P. G. M. 1992. SWATCHP, a model for a continuous simulation of hydrologic processes in a system vegetation - soil - aquifer - river. Ph. D. dissertation, Techn. Univ. Lisbon (in Portuguese).
- Monteith, J. L. and Unsworth, M. H. 1990. *Principles of Environmental Physics*, 2nd ed., Edward Arnold, London.
- Monteith, J. L., 1965. *Evaporation and Environment*. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, University Press, Cambridge, 19: 205-234.
- Murray, F. W. 1967. On the computation of saturation vapor pressure. *J. Appl. Meteor.* 6: 203-204.
- Penman, H. L. 1963. *Vegetation and hydrology*. Tech. Comm. No. 53, Commonwealth

- Bureau of Soils, Harpenden, England. 125 pp.
- Pereira, L. S. and Smith, M. 1989. Proposed procedures for revision of guidelines for predicting crop water requirements. Land and Water Use Div., FAO Rome, 36 p.
- Pruitt, W. O. and Doorenbos, J. 1977. Background and Development of Methods to Predict Reference Crop Evapotranspiration (ET_o). Appendix II in FAO-ID-24, pp 108-119.
- Seguin, B., Brunet, Y., and Perrier, A. 1982. Estimation of evaporation: a review of existing methods and recent developments in European Geologic Society Symposium on Evaporation. Leeds, U.K., August, 1982, 21 p.
- Sharma, M. L. 1985. Estimating evapotranspiration. p. 213-281 in Adv. in Irrigation, Vol III, D. Hillel (Editor), Academic Press, New York.
- Smith, M., Allen, R. G., Monteith, J. L., Pereira, L. S., Perrier, A., Pruitt, W. O. 1992. Report on the Expert Consultation on procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements. Land and Water Development Division, United Nations Food and Agriculture Service, Rome, Italy.
- Tetens, O. 1930. Über einige meteorologische Begriffe. z. Geophys. 6:297-309.
- van Wijk, W. R. and de Vries, D. A. 1963. Periodic temperature variations in a homogeneous soil. In: van Wijk, W. R. (Editor). Physics of the plant environment. North-Holland Publ. Co., Amsterdam, P. 102-143.
- Weiss, A. 1982. An experimental study of net radiation, its components and prediction Agron. J. 74: 871-874.
- WMO 1970. Guide to Hydrometeorological Practices. WMO n° 168. TP. 82. Geneva
- WMO 1981. Guide to Agricultural Meteorological Practices. WMO n° 134 (second edition), Geneva.
- Wright, J. L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. J. irrig. and Drain. Div., ASCE, 108 (IR2): 57-74.

E. Crop parameters in PM equation

- Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L., and Burman, R. D. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agron. J. 81: 650-662.
- Allen, R. G., Smith, M., Pereira, L. S., and Perrier, A. 1994b. An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin, 43 (2): 35-92.
- Allen, R. G., Vanderkimpfen, P. J., and Wright, J. L. 1995. "Development of resistance parameters for operational application of the Penman-Monteith equation." Agric. and For. Meteorol.
- Alves, I. L. 1995. Modelling crop evapotranspiration. Canopy and aerodynamic resistances. Ph.D. Dissertation, ISA, Univ. Tec. Lisboa (in Portuguese).

- Alves, I., Perrier, A. and Pereira, L. S., 1998. Aerodynamic and surface resistances of complete over crops: How good in the "big leaf" approach? *Trans. ASAE* 41 (2): 345-351.
- Ben-Mehrez, M., Taconet, O., Vidal-Madjar, D., and Valencogne, C. 1992. "Estimation of stomatal resistance and canopy evaporation during the HAPEX-MOBILHY experiment." *Agr. and For. Meteorol.* 58: 285-313.
- Bevan, K. 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *J. Hydrol.* 44: 169-190.
- Brutsaert, W. H., 1982. *Evaporation into the Atmosphere*. R. Deidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- Businger, J. A. and Yaglom, A. M. 1971. "Introduction to Obukhov's paper on 'Turbulence in an atmosphere with a non-uniform temperature'," *Boundary-Layer Meteorol.* 2: 3-6.
- Campbell, G. S. 1977. *An Introduction to Environmental Biophysics*. Springer Verlag, N.Y. 159 p.
- Chamberlain, A. C., 1966. Transport of gases to and from grass and grass-like surfaces. *Proc. Roy. Soc. A*, 290: 236-259.
- DeCoursey, D. G. 1992. Evaporation and evapotranspiration processes. In: *Root Zone Water Quality Model, version 1.0. Technical Documentation*. GPSR, USDA-ARS, Fort Collins, Co, pp 29-74.
- Dolman, A. J. and Stewart, J. B. 1987. Modelling forest transpiration from climatological data. In: R. H. Swanson, P. Y. Bernier and P. D. Woodard (eds) *Forest Hydrology and Watershed Management*, IAHS Publ. 167: 319-327.
- Frank, A. B. 1981. Effect of leaf age and position on photosynthesis and stomatal conductance of forage grasses. *Agron. J.* 73: 70-74.
- Jarvis, P. G. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. Roy. Soc., Lond., B* 273: 593-610.
- Kelliher, F. M., Leuning, R. and Schulze, E. D. 1993. Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grasslands.. *Oecologia* 95: 153-163.
- Kim, J. and Verma, S. B. 1991. Modeling canopy stomatal conductance in a temperate grassland ecosystem. *Agric. and For. Meteorol.* 55: 149-166.
- Loomis, R. S. and Williams, W. A. 1969. Productivity and the morphology of crop stand patterns with leaves. In: J. D. Eastin (ed) *Physiological Aspects of Crop Yield*. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI: 27-47.
- Martin, D. L. and J. R. Gilley 1993. *Irrigation Water Requirements*. Chapter 2 of the SCS National Engineering Handbook, Soil Conservation Service, Washington D.C., 284 pp.

- Matias P. G. M. 1992. SWATCHP, a model for a continuous simulation of hydrologic processes in a system vegetation - soil - aquifer - river. Ph. D. dissertation, Techn. Univ. Lisbon (in Portuguese).
- McNaughton, K. G. and Jarvis, P. G. 1984. Using the Penman-Monteith equation predictively. *Agricultural Water Management* 8: 263-278.
- Monin, A. S. and Obukhov, A. M. 1954. "The basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere." *Akad. Nauk. SSSR Trud. Geofiz. Inst.*, No. 24. (151): 163-187.
- Monteith, J. L. 1973. *Principles of Environmental Physics*, Edward Arnold, London.
- Monteith, J. L. 1981. Evaporation and surface temperature. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 107: 1-27.
- Monteith, J. L. 1985. Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. pp. 4-12 in *Advances in Evapotranspiration*, Proceedings of the ASAE Conference on Evapotranspiration, Chicago, Ill. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- Monteith, J. L. and Unsworth, M. H. 1990. *Principles of Environmental Physics*, 2nd ed., Edward Arnold, London.
- Monteith, J. L., 1965. Evaporation and Environment. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, university Press, Cambridge, 19: 205-234.
- Paulson, C. A. 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *J. Appl. Meteorol.* 9: 857-861.
- Perrier, A. 1982. Land surface processes: vegetation pp. 395-448 in P. S. Eagleson (Editor), *Land Surface Processes in Atmospheric General Circulation Models*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, Mass.
- Perrier, A. and Tuzet, A. 1991. Land surface processes: Description, theoretical approaches, and physical laws underlying their measurements pp. 145-155 in Schmugge, T. J. and Andre, J.-C. (eds) *Land Surface Evaporation: Measurement and Parameterization*. Springer-Verlag, Berlin.
- Pruitt, W. O., Morgan, D. L., and Lourence, F. J. 1973. Momentum and mass transfers in the surface boundary layer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 99: 370-386.
- Shaw, R. H. and Pereira, A. R. 1982. Aerodynamic roughness of a plant canopy: A numerical experiment. *Agric. Meteorol.* 26: 51-65. Stewart, J. B. 1988. Modelling surface conductance of pine forest. *Agric. and For. Meteorol.* 43: 19-35.
- Shuttleworth, W. J. 1993. Evaporation. In: D. R. Maidment (ed) *Handbook of Hydrology*. McGraw Hill, New York: 4.1-4.53.
- Shuttleworth, W. J. and Wallace, J. S. 1985. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. *Quart. J. Roy Meteorol. Soc.* 111: 839-853.
- Smith, M., Allen, R. G., Monteith, J. L., Perrier, A., Pereira, L., and Segeren, A. 1992.

- Report of the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. UN-FAO, Rome, Italy, 54 p.
- Stewart, J. B. 1989. On the use of the Penman-Monteith equation for determining areal evapotranspiration. in *Estimation of Areal Evapotranspiration*, IAHS Publ. no. 177: 3-12.
- Stewart, J. B. and Verma, S. B. 1992. Comparison of surface fluxes and conductances at two contrasting sites within the FIFE area. *J. Geophysical Research* 97 (D17): 18623-18628.
- Szeicz, G. and Long, I. F. 1969. Surface resistance of crop canopies. *Water Resour. Res.* 5, 622-633.
- Thom, A. S. 1971. Momentum absorption by vegetation. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 97: 414-428.
- Thom, A. S. 1972. Momentum, mass and heat exchange of vegetation. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 98, 124-134.
- Thom, A. S. and Oliver, H. R. 1977. On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 103: 345-357.
- Thom, A. S., Setwart, J. B., Oliver, H. R. and Gash, J. H. C. 1975. Comparison of aerodynamic and energy budget estimates of fluxes over a pine forest. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 101: 93-105.
- van Bavel, C. H., Fritschen, L. J., and Reeves, W. E. 1963. Transpiration of sudangrass as an externally controlled process. *Science* 141: 269-270.
- Verma, S. B. 1989. Aerodynamic resistances to transfers of heat, mass and momentum. *Estimation of Areal Evapotranspiration*, T. A. Black, D. L. Spittlehouse, M. D. Novak and D. T. Price (ed)., IAHS Pub. No. 177. p. 13-20.
- Webb, E. K. 1970. "Profile relationships: the log-linear range, and extension to strong stability." *Q. J. Roy. Met. Soc.* 96: 67-90.
- Wallace, J. S., Roberts, J. M., and Sivakuma, M. V. K. 1990. "The estimation of transpiration from sparse dryland millet using stomatal conductance and vegetation area indices." *Agric. and Forest Meteorol.* 51: 35-49.

F. Analysis of weather and ET data

- Allen, R. G. 1996. Assessing integrity of weather data for use in reference evapotranspiration estimation. *J. Irrig. and Drain. Engng. Div., ASCE* 122 (2): 97-106.
- Allen, R. G. and Brockway, C. E. 1983. Estimating consumptive use on a statewide basis pp. 79-89 in *Proc. 1983 Irrig. and Drain. Specialty Conf. at Jackson, WY.* ASCE, New York, NY.
- Allen, R. G., Brockway, C. E., and Wright, J. L. 1983. Weather station siting and

- consumptive use estimates. J. Water Resour. Ping, and Mgmt. Div., ASCE 109 (2): 134-146.
- Allen, R. G. 1997. a Self-Calibrating Method for Estimating Solar Radiation from Air Temperature. J. Hydrologic Engineering, ASCE 2 (2): 5 6-67.
- Allen, R. G. and Wright, J. L. 1977. Translating Wind Measurements from Weather Stations to Agricultural Crops. J. Hydrologic Engineering, ASCE 2 (1): 26-35..
- Burman, R. D., Wright, J. L. and Jensen, M. E. 1975. Changes in climate and estimated evaporation across a large irrigated area in Idaho. Trans. ASAE 18 (6): 1089-1091, 1093.
- Pereira, L. S. (ed.). 1998. Water and Soil Management for Sustainable Agriculture in the Huang-Huai-Hai Rivers Plain (North China). Final report of EC Research Contract CT93-250, Instituto Superior de Agronomia, Lisbon.
- Pruitt, W. O. and Doorenbos, J. 1977. Background and Development of Methods to Predict Reference Crop Evapotranspiration (ET_o). Appendix 11 m FAO-ID-24, pp 108-119.
- Pruitt, W. O. and Swann, B.D. 1986. Evapotranspiration studies in N. S. W.: Daily vs. hourly meteorological data. Irrigation '86, Darling downs Institute of Advanced Education, Toowoomba, Queensland, Australia, 29 p.
- Rosenberg, N. J., Blad, B. L. and Verma, S. B. 1983. Microclimate. The Biological Environment (2nd edition). J. Wiley, New York.
- Snyder, R. L. and Pruitt, W. O. 1992. Evapotranspiration data management in California. Proceedings of the Irrigation and Drainage sessions of ASCE Water Forum '92, T. Engman, ed. ASCE, New York, New York. p. 128-133.

G. Crop evapotranspiration

- Alves, I. L. 1995. Modelling crop evapotranspiration. Canopy and aerodynamic resistances. Ph.D. Dissertation, ISA, Univ. Tec. Lisboa (in portuguese).
- Bevan, K. 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. J. Hydrol. 44: 169-190.
- Howell, T. A., Evett, S. R., Tolk, J. A., Schneider, A. D. and Steiner, J. L. 1996. Evapotranspiration of corn - Southern High Plains. In: Camp, C. R., Sadler, E. J. and Yoder, R. E. (eds.). Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, ASAE: 158-166.
- Jensen, M. E. 1968. Water consumption by agricultural plants. In: Kozlowski, T. T. (ed) Water Deficits and Plant Growth, vol II, Academic Press, New York: 1-22.
- Jensen, M. E. 1974. (ed.) Consumptive use of water and irrigation water requirements. Rep. Tech. Com. on Irrig. Water Requirements, Irrig. and Drain. Div., ASCE, 227 pp.

- Katerji, N. and Perrier, A. 1983. Modélisation de l'évapotranspiration réelle ETR d'une parcelle de luzerne: rôle d'un coefficient cultural. *Agronomie* 3 (6): 513-521 (in French).
- Lee, R. 1980. *Forest Hydrology*. Columbia Univ. Press, New York.
- Perrier, A., Archer, P., and de Pablos, B. 1974. Etude de l'évapotranspiration réelle et maximale de diverses cultures. I: Dispositif et mesure. *Ann. Agron.* 25 (3): 229-243.
- Perrier, A., Katerji, N., Gosse, G., and Itier, B. 1980. Etude "in situ" de l'évapotranspiration réelle d'une culture de blé. (In situ study of evapotranspiration rates for a wheat crop). *Agric. Meteorol.* 21:295-311. (in French).
- Rijtema, P. E., (1965). "Analysis of actual evapotranspiration." *Agric. Res. Rep. No. 69*, Centre for Agric. Publ. and Doc., Wageningen.
- Shuttleworth, W. J. 1993. Evaporation. In: D. R. Maidment (ed) *Handbook of Hydrology*. McGraw Hill, New York: 4.1-4.53.

H. Crop coefficients

- Abtew, W. and J. Obeysekera. 1995. Lysimeter study of evapotranspiration of cattails and comparison of three estimation methods. *Trans. ASAE* 38 (1): 121-129.
- Allen, R. G., J. Prueger, and R. W. Hill. 1992. Evapotranspiration from Isolated Stands of Hydrophytes: Cattail and Bulrush. *Trans ASAE* 35 (4): 1191-1198.
- Allen, R. G., R. W. Hill, and S. Vemulapali, S. 1994. Evapotranspiration Parameters for Variably-Sized Wetlands. Paper presented at the 1994 Summer Meeting of ASAE. No. 942132, 24 p. Burman, R. D., Nixon, P. R., Wright, J. L. and Pruitt, W. O. 1980 "Water requirements" p. 189-232 in Jensen, M. E. (ed) *Design and operation of farm irrigation systems*, Amer. Soc. Agric. Engr., St. Joseph, Mich.
- Allen, R. G., Smith, M., Pereira, L. S. and Pruitt, W. O. 1997. Proposed revision to the FAO procedure for estimating crop water requirements. In: Chartzoulakes, K. S. (ed.). *Proc. 2nd. Int. Sym. on Irrigation of Horticultural Crops*, ISHS, Acta Hort. Vol. I: 17-33.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., 1977. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 24*, (rev.) FAO, Rome, Italy. 144 p.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. *FAO Irrig. and Drain. Paper No. 33*, FAO, Rome, Italy. 193 pp.
- Elliott, R. L., S. L. Harp, G. D. Grosz and M. A. Kizer. 1988. Crop Coefficients for Peanut Evapotranspiration. *Agricultural Water Management* 15: 155-164.
- Feddes, R. A. 1987. Crop factors in relation to Makkink reference crop evapotranspiration. *Tech. Bull. Inst. for Land and Water Management Research*. No. 67, pp. 33-45.

- Fereres, E., (1981). (ed.) "Drip irrigation management." Cooperative Extension, Univ. California, Berkeley, CA, Leaflet No. 21259.
- Grattan, S. R., W. Bowers, A. Dong, R. L. Snyder, J. J. Carroll, and W. George. 1998. New crop coefficients estimate water use of vegetables, row crops. California Agriculture 52 (1): 16-21.
- Howell, T. A., D. A. Bucks, D. A. Goldhamer, and J. M. Lima. 1986. "Management Principles: 4.1 Irrigation Scheduling.", in Trickle Irrigation for Crop Production: Design, Operation and Management (F. S. Nakayama and D. A. Bucks (ed)). Elsevier.
- Howell, T. A., Steiner, J. L., Schneider, A. D., and Evett, S. R. 1995. Evapotranspiration of irrigated winter wheat - southern high plains. Trans. ASAE 38 (3): 745-759.
- Jensen, M. E. 1974. (ed.) Consumptive use of water and irrigation water requirements. Rep. Tech. Com. on Irrig. Water Requirements, Irrig. and Drain. Div., ASCE, 227 pp.
- Kolar, J. J. and Kohl, R. A. 1976. Irrigating alfalfa for seed production. Univ. Idaho Agric. Exp. Station Current Information Series 357., Moscow, Idaho. 3 p.
- Liu, Y., Teixeira, J. L., Zhang, H. J. and Pereira, L. S. 1998. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China plain. Agricultural Water Management 36: 233-246.
- Neale, C. M. U. 1987. Development of Reflectance Based Crop Coefficients for Corn. Unpublished Ph D Dissertation, Agricultural Engineering, Colorado State University, Fort Collins, USA.
- Neale, C. M. U., W. C. Bausch and D. F. Heerman. 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. Trans. ASAE 32 (6): 1891-1899.
- Pastor, M. and Orgaz, F. 1994. Riego deficitario del olivar: Los programas de recorte de riego en olivar. Agricultura no. 746: 768-776 (in Spanish).
- Pereira, L. S., Teixeira, J. L., Pereira, L. A., Ferreira, M. I., and Fernando, R. M., 1987. Simulation models of crop response to irrigation management: research approaches and needs. In: J. Feyen (ed) Simulation Models for Cropping Systems in Relation to Water Management. Commission of the European Communities, EUR 10869, Luxembourg: 19-36.
- Pereira, L. S., Perrier, A., Allen, R. G. and Alves, I. 1996. Evapotranspiration: Review of concepts and future trends. In: Camp, C. R., Sadler, E. J., Yoder, R. E. (eds) Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, ASAE: pp. 109-115.
- Pruitt, W. O. 1976. "Evapotranspiration and crop coefficients for a windbreak of Monterey pine trees", personal communication, Davis, CA.
- Pruitt, W. O. 1986. "Traditional methods 'Evapotranspiration research priorities for the next decade'." ASAE Paper No. 86-2629. 23 p.

- Pruitt, W. O., E. Fereres, P. E. Martin, H. Singh, D. W. Henderson, R. M. Hagan, E. Tarantino, and B. Chandio. 1984. "Microclimate, evapotranspiration, and water-use efficiency for drip- and furrow-irrigated tomatoes." *Proceedings 12th Congress, International Commission on Irrigation and Drainage*, Ft. Collins, CO., p. 367-394.
- Rogers, J. S., Allen, L. H., and Calvert, D. J. 1983. Evapotranspiration for humid regions: developing citrus grove, grass cover. *Trans. ASAE*, 26 (6): 1778-83, 92.
- Snyder, R. L., Lanini, B. J., Shaw, D. A., and Pruitt, W. O. 1989a. Using reference evapotranspiration (ET_o) and crop coefficients to estimate crop evapotranspiration (ET_c) for agronomic crops, grasses, and vegetable crops. Cooperative Extension, Univ. California, Berkeley, CA, Leaflet No. 21427, 12 p.
- Snyder, R. L., Lanini, B. J., Shaw, D. A., and Pruitt, W. O. 1989b. Using reference evapotranspiration (ET_o) and crop coefficients to estimate crop evapotranspiration (ET_c) for trees and vines. Cooperative Extension, Univ. California, Berkeley, CA, Leaflet No. 21428, 8 p.
- Wright J. L. 1981. Crop coefficients for estimates of daily crop evapotranspiration. *Irrig. Scheduling for Water and Energy Conservation in the 80s*, ASAE, Dec. 1981.
- Wright, J. L. 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients. *J. of Irrig. and Drain. Div.*, ASCE, 108: 57-74.
- Wright, J. L. and Jensen, M. E. 1972. Peak water requirements of crops in southern Idaho. *J. Irrig. and Drain. Div.*, ASCE 96 (IR1): 193-201.
- Wright, J. L. 1990. Evapotranspiration data for dry, edible beans at Kimberly, Idaho., unpublished data, USDA-ARS, Kimberly, Idaho.

I. Lengths of crop growth stages

- Allen, R. G. and Gichuki, F. N. 1989. Effects of Projected CO₂ - induced Climatic Changes on Irrigation Water Requirements in the Great Plains States (Texas, Oklahoma, Kansas, and Nebraska). *The Potential Effects of Global Climate Change on the United States: Appendix C - Agriculture*. Vol. 1. EPA-230-05-89-053 (J. B. Smith and D. A. Tirpak, Eds.), U.S. Environmental Protection Agency, Office of Policy, Planning and Evaluation, Washington, D. C., (6): 1-42.
- Dingkuhn, M. 1994. Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. III. Characterizing environments by simulating crop phenology. *Agricultural Systems* (48): 435-456.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O., 1977. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No. 24*, (rev.) FAO, Rome, Italy. 144 p.
- Everson, D. O., M. Faubion and D. E. Amos 1978. "Freezing temperatures and growing seasons in Idaho." *Univ. Idaho Agric. Exp. station bulletin* 494. 18 p.
- Kruse E. G. and Haise, H. R. 1974. "Water use by native grasses in high altitude Colorado meadows." *U.S.D.A Agric. Res. Service, Western Region report* ARS-

W-6-1974. 60 pages

- O'Halloran, T. F. 1997. Reported crop acreages by month for the Imperial Irrigation District, Imperial Irrigation District, Imperial, Calif., USA. personal communication.
- Ritchie, J. T. 1991. Wheat phasic development. In: R. J. Hanks and J. T. Ritchie (Editors), Modeling Plant and Soil Systems, Agronomy Series No. 31, Am. Soc. Agron., Madison, Wise., Chapter 3, 31-54.
- Ritchie, J. T. and D. S. NeSmith. (1991). "Temperature and crop development." In: R. J. Hanks and J. T. Ritchie (Editors). Modeling Plant and Soil Systems, Agronomy Series No. 31, Am. Soc. Agron., Madison, Wise., Chapter 2, 5-29.
- Ritchie, J. T. and Johnson, B. S. (1990). "Soil and plant factors affecting evaporation." Chapter 13 of Irrigation of Agricultural Crops, (Stewart, B. A. and Nielsen, D. R (ed.)), Agronomy Series 30. Am. Soc. Agron. p. 363-390.
- Snyder, R. L., Lanini, B. J., Shaw, D. A., and Pruitt, W. O. 1989a. Using reference evapotranspiration (ET_o) and crop coefficients to estimate crop evapotranspiration (ET_c) for agronomic crops, grasses, and vegetable crops. Cooperative Extension, Univ. California, Berkeley, CA, Leaflet No. 21427, 12 p.
- Snyder, R. L., Lanini, B. J., Shaw, D. A., and Pruitt, W. O. 1989b. Using reference evapotranspiration (ET_o) and crop coefficients to estimate crop evapotranspiration (ET_c) for trees and vines. Cooperative Extension, Univ. California, Berkeley, CA, Leaflet No. 21428, 8 p.
- Wright, J. L. 1982. New evapotranspiration crop coefficients. J. Irrig. and Drain. Div., ASCE, 108 (IR2): 57-74.

J. Effects of soil mulches

- Battikhi, A. M. and Hill, R. W. 1986. Irrigation scheduling and watermelon yield model for the Jordan Valley. J. Agronomy and Crop Science 157: 145-155.
- Battikhi, A. M. and Hill, R. W. 1986. Irrigation scheduling and cantaloupe yield model for the Jordan Valley. Agricultural Water Management 15: 177-187.
- Ghawi, I. and Battikhi, A. M. 1986. Watermelon (*Citrullus lanatus*) production under mulch and trickle irrigation in the Jordan Valley. J. Agronomy and Crop Science 156: 225-236.
- Ghinassi, G. and Neri, L. 1998. Effect of mulching with black polyethylene sheets on sweet pepper evapotranspiration losses. In: Pereira, L. S. and Gowing, J. W. (eds.). Water and the Environment: Innovative Issues in Irrigation and Drainage. E. & F. N. Spon, London. Pp. 396-403.
- Haddadin, S. H. and Ghawi, I. 1983. Effect of plastic mulches on soil water conservation and soil temperature in field grown tomato in the Jordan Valley. Dirasat 13(8): 25-34

Safadi, A. S. 1991. Squash and cucumber yield and water use models unpublished Ph.D. dissertation, Dept. Biological and Irrigation Engineering, Utah State Univ., Logan, UT 84322-4105. 190 p.

K. Non-growing season evapotranspiration

Flerchinger, G. N. and Pierson, F. B. 1991. Modeling plant canopy effects on variability of soil temperature and water. *Agr. and For., Meteorol.* 56: 227-246.

Running, S. W. and Coughlan, J. C. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications: I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modeling* 42: 125-154.

Saxton, K. E., Johnson, H. P., and Shaw, R. H. (1974). "Modeling evapotranspiration and soil moisture." *Trans. ASAE* 17 (4): 673-677.

Sinclair, T. R. (1984). "Leaf area development in field-grown soybeans." *Agron. J.* 76:141-146.

Liu, Y., Teixeira, J. L., Zhang, H. J. and Pereira, L. S. 1998. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China plain. *Agricultural Water Management* 36: 233-246.

L. Soil water holding characteristics

Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G. (1990). *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. 332 p.

Keller, J. and Bliesner, R. D. (1990). *Sprinkle and Trickle Irrigation* van Nostrand Reinhold., New York, NY. 652 p.

Ratcliff, L. F., Ritchie, J. T., and Cassel, D. K. 1983. Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 770-775.

M. Rooting depths

Doorenbos, J. and Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. *FAO Irrig. and Drain. Paper No. 33*, FAO, Rome, Italy. 193 pp.

Keller, J. and Bliesner, R. D. (1990). *Sprinkle and Trickle Irrigation* van Nostrand Reinhold., New York, NY. 652 p.

N. Salinity impacts on evapotranspiration

Ayers, R. S. and D. W. Westcot. 1985. Water quality for agriculture. *Irrigation and Drainage Paper 29*, Rev. 1. Food and Agriculture Organization of the United

- Nations, Rome, 174 pages.
- Doorenbos, J. and A. H. Kassam. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 193 pages.
- Hanks, R. J. 1984. Prediction of crop yield and water consumption under saline conditions. Section 8.2, pages 272-283, in Shainberg, I. and J. Shalhevet (ed), Soil Salinity under Irrigation: Processes and Management, Springer-Verlag, Berlin.
- Hoffman, G. J., J. A. Jobes, and W. J. Alves. 1983. Response to tall fescue to irrigation water salinity, leaching fraction, and irrigation frequency. Agric. Water. Management 7: 439-456.
- Letey, J. and A. Dinar. 1986. Simulated crop-water production functions for several crops when irrigated with saline waters. Hilgardia 54 (1): 1-32.
- Letey, J., A. Dinar, and K. C. Knapp. 1985. Crop-water production function model for saline irrigation waters. Soil Sci. Soc. Am. J., 49: 1005-1009.
- Maas, E. V., 1990. Crop salt tolerance. In: K. K. Tanji (Ed.), Agricultural Salinity Assessment and Management. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Am Soc. Civil Engineers, New York, pp. 262-304.
- Mieri, A. 1984. Plant response to salinity: experimental methodology and application to the field, Section 8.3, pages 284-297, in Shainberg, I. and J. Shalhevet (ed), Soil Salinity under Irrigation: Processes and Management, Springer-Verlag, Berlin.
- Oster, J. D. 1994. Irrigation with poor quality water - review article. Agricult. Water management 25: 271-297.
- Oster, J. D., I. Shainberg, and I. P. Abrol. 1996. Reclamation of salt-affected soil, Ch. 14. In: M. Agassi (ed.). Soil Erosion, Conservation, and Rehabilitation. Marcel Dekker, Inc. New York. pp 315-35.
- Rhodes, J. D., A. Kandiah, and A. M. Mashali. 1992. The use of saline waters for crop production. Irrigation and Drainage Paper 48. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 133 pages.
- Shalhevet, J. 1984. Management of Irrigation with Brackish Water, Section 8.4, pages 298-318, in Shainberg, I. and J. Shalhevet (ed), Soil Salinity under Irrigation: Processes and Management, Springer-Verlag, Berlin.
- Shalhevet, J. 1994. Using water of marginal quality for crop production: major issues - review article. Agricult. Water management 25: 233-269.
- Stewart, J. I., R. M. Hagan, and W. O. Pruitt. 1976. Salinity effects on corn yield, evapotranspiration, leaching fraction, and irrigation efficiency pages 316-331 in H. E. Dregne (ed). Managing Saline Water for Irrigation, Proceedings of the Int. Conf. on Managing Saline Water for Irrig.: Planning for the Future, Lubbock, TX.

Tanji, K. K. (Ed.), *Agricultural Salinity Assessment and Management*. 1990. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71. Am Soc. Civil Engineers, New York, pp. 113-137

O. Soil evaporation

Hanks, R. J. 1974. Model for predicting plant growth as influenced by evapotranspiration and soil water. *Agron. J.* 66: 660-665.

Hanks, R. J. 1985. Crop coefficients for transpiration. *Advances in Evapotranspiration. Proceedings, National Conf. Advances in Evapotranspiration., ASAE, Chicago, IL., 431-438.*

Hanks, R. J. and Hill, R. W. 1980. *Modeling Crop Response to Irrigation in Relation to Soils, Climate and Salinity*. International Irrigation Information Center, No. 6, Pergamon Press, Elmsford, New York. 63 p.

Kanemasu, E. T., Stone, L. R., and Powers, W. L. 1976. Evapotranspiration model tested for soybean and sorghum. *Agron. J.* 68: 569-572.

Pruitt, W. O. 1995. Background information on development of Fig. 6 in FAO-ID-24, personal communication, Davis, CA.

Ritchie, J. T. 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Res.* 8: 1204-1213.

Ritchie, J. T. 1974. Evaluating irrigation needs for southeastern U.S.A. 262-273. *Proc. Irrig. and Drain. Spec. Conf., ASCE.*

Ritchie, J. T., Godwin, D. C., and Singh, U. 1989. Soil and weather inputs for the IBSNAT crop models. *Proceedings of the IBSNAT Symposium: Decision Support System for Agrotechnology Transfer: Part I., IBSNAT, Dept. Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, Honolulu, HA. p. 31-45.*

Ritchie, J. T. and Johnson, B. S. 1990. "Soil and plant factors affecting evaporation". Chapter 13 of *Irrigation of Agricultural Crops*, (Stewart, B. a. and Nielsen, D. R. (ed.)), Agronomy Series 30. Am. Soc. Agron. p. 363-390.

Tanner, C.B. and Fuchs, M. 1968. Evaporation from unsaturated surfaces: a generalized combination equation. *J. Geophysical Res.* 73 (4): 1299-1304.

Tanner, C.B. and Jury, W. A. 1976. Estimating evaporation and transpiration from a crop during incomplete cover. *Agron. J.* 68: 239-242.

Wright, J. L. 1989. Evaporation data for a dry soil surface condition, unpublished data, USDA-ARS, Kimberly, Idaho.

P. Factors affecting ETc

- Allen, I. H., Jones, P. and Jones, J. W. 1985. Rising atmospheric CO₂ and evapotranspiration. Proc. Natl. Conf. on Advances in Evapotranspiration (Chicago, IL, 16-17 Dec.), ASAE, St. Joseph, MI.
- Burman, R. D., Wright, J. L. and Jensen, M. E. 1975. Changes in climate and estimated evaporation across a large irrigated area in Idaho. Trans. ASAE 18 (6): 1089-1091, 1093.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 33, FAO, Rome, Italy. 193 pp.
- Loommis, R. S. and Williams, W. A. 1969. Productivity and the morphology of crop stand patterns with leaves. In: J. D. Eastin (ed) Physiological Aspects of Crop Yield. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI: 27-47.
- Rhoades, J. D., Kandiah, A. and Mashali A. M. 1992. The Use of Saline Waters for Crop Production. Irrig. and Drain. Pap. 48, FAO, Rome.
- Shuttleworth, W. J. and Wallace, J. S. 1985. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. Quart. J. Roy Meteorol. Soc. 111: 839-853.
- Wallace, J. S., Roberts, J. M., and Sivakuma, M. V. K. 1990. "The estimation of transpiration from sparse dryland millet using stomatal conductance and vegetation area indices." Agric. and Forest Meteorol. 51: 35-49.

Q. Soil water balance and irrigation scheduling

- Bastiaanssen, W.G.M. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, 273 pp.
- Belmans, C., Wesseling, J. G. and Feddes, R. A. 1983. Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE. I. Hydrology, 63: 271-286.
- Camp, C. R., Sadler, E. J. and Yoder, R. E. 1996. Evapotranspiration and irrigation scheduling. Proc. Int. Conf. on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Am. Soc. Ag. Engineers, St. Joseph, MI. ISBN 0-929355-82-2. 1166 p.
- Doorenbos, J. and Kassam, A. H. 1979. Yield response to water. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 33, FAO, Rome, Italy. 193 pp.
- Jordan, W. R. and Ritchie, J. T. 1971. Influence of soil water stress on evaporation, root absorption and internal water status of cotton. Plant Physiol. 48: 783-788.
- Kabat, P., van den Broek, B. J. and Feddes, R. A. 1992. SWACROP: a water management and crop production simulation model. ICID Bull. 41 (2): 61-84.
- Merriam, J. L. 1966. A management control concept for determining the economical depth and frequency of irrigation. Trans. Am. Soc. Agric. Engrs. 9: 492-498.

- Pereira, L. S., Perrier, A. Ait Kadi, M. and Kabat, P. (eds) 1992. Crop Water Models. Special issue of the ICID Bulletin. 41 (2), 200 pp.
- Pereira, L. S., van den Broek, B. J., Kabat, P. and Allen, R. G. (eds) 1995. Crop-Water Simulation Models in Practice. Wageningen Pers, Wageningen, 339 pp.
- Raes, D., Lemmens, H., Van Aelst, P., Vanden Bulcke, M. and Smith, M. 1988. IRSIS - Irrigation Scheduling Information System. Reference Manual n° 3. Institute for Land and Water Management, K. U. Leuven, Belgium. Volume 1&2, 119 & 71 p.
- Smith, M. 1992. CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management. FAO Irrigation and Drainage Paper 46, FAO, Rome.
- Teixeira, J. L., Farrajota, M. P. and Pereira, L. S. 1995. PROREG simulation software to design demand in irrigation projects. In: Pereira, L. S., van den Broek, B. J., Kabat, P. and Allen, R. G. (eds) Crop-Water Simulation Models in Practice. Wageningen Pers, Wageningen: 273-285.
- Tuzet, A., Perrier, A. and Masaad, C. 1992. Crop water budget estimation of irrigation requirement. ICID Bull. 41(2): 1-17.
- Xevi, E. and Feyen, J. 1992. Combined soil water dynamic model (SWATRER) and summary crop simulation model (SUCROS). ICID Bull. 41 (2): 85-98.

R. General

- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. 1975. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 179 p.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and
- Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G. (ed). 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70., Am. Soc. Civil Engrs., New York, NY, 360 p.
- Martin, D. L. and J. R. Gilley 1993. Irrigation Water Requirements. Chapter 2 of the SCS National Engineering Handbook, Soil Conservation Service, Washington D. C., 284 pp.
- Pereira, L. S. and Allen, R. G. 1998. Crop water requirements. Chapter 1.5.1 of Handbook of Agricultural Engineering, CIGR and ASAE (in press).

لیست انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

شماره	نام کتاب
۱	فرهنگ فنی آبیاری و زهکشی
۲	تحلیلی بر رانده‌های آبیاری
۳	سالنامه سال ۱۳۷۳
۴	سالنامه سال ۱۳۷۴
۵	دستورالعمل‌های کم آبیاری
۶	مجموعه مقالات ششمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
۷	مجموعه مقالات هفتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
۸	مجموعه مقالات هشتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
۹	ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری و زهکشی و عوامل مؤثر در آن
۱۰	آبیاری موجی
۱۱	آشنایی با آبیاری کابلی
۱۲	مدیریت محلی سیستم‌های آبیاری و زهکشی
۱۳	راهنمای ارزیابی اثرات زیست محیطی طرح‌های آبیاری و زهکشی
۱۴	مجموعه مقالات اولین کارگاه فنی ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری و زهکشی
۱۵	راهنمای احداث زهکش‌های زیرزمینی
۱۶	معرفی جهات نظری و کاربردی روش پنمن - مانتیس
۱۷	Water and Irrigation Techincs in Ancient IRAN
۱۸	تلاش ایرانیان در تأمین و مدیریت توزیع آب
۱۹	تحلیلی بر ارزیابی اثرات زیست محیطی طرح‌های آبیاری و زهکشی
۲۰	تجارب جهانی مشارکت کشاورزان در مدیریت آبیاری
۲۱	مجموعه مقالات نهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

شماره	نام کتاب
۲۲	مفاهیم زهکشی و شوری آب و خاک
۲۳	مجموعه مقالات کارگاه مسائل و مشکلات اجرای شبکه‌های زهکشی
۲۴	معیارهای انتخاب سیستم‌های آبیاری
۲۵	فن سنجش از دور در آبیاری و زهکشی
۲۶	استفاده از آب‌های شور و لب شور برای آبیاری
۲۷	مجموعه مقالات همایش مشارکت کشاورزان در مدیریت شبکه‌های آبیاری
۲۸	مجموعه مقالات همایش جنبه‌های زیست محیطی استفاده از پساب‌ها در آبیاری
۲۹	فرهنگ آب و آبیاری سنتی
۳۰	مجموعه مقالات دومین کارگاه فنی ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری و زهکشی
۳۱	چاره آب در تاریخ فارس
۳۲	مجموعه مقالات کارگاه آموزشی مدیریت استفاده از آب‌های شور
۳۳	جنبه‌های مالی مدیریت آب
۳۴	عرضه و تقاضای آب در جهان از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۵ «سناریوها و مسائل»
۳۵	تدارک برای انجام پروژه‌های کوچک آبیاری
۳۶	خلاصه مقالات کارگاه فنی - آموزشی کم آبیاری
۳۷	مجموعه مقالات کارگاه فنی - آموزشی آبیاری میکرو
۳۸	مجموعه مقالات دهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
۳۹	مجموعه کارگاه فنی ساخت کانال‌های آبیاری، محدودیت‌ها و راه حل‌ها
۴۰	راهنمای روش‌های غیرسازه‌ای مدیریت سیلاب
۴۱	مجموعه مقالات کارگاه فنی روش‌های غیرسازه‌ای مدیریت سیلاب
۴۲	مجموعه مقالات دومین کارگاه فنی زهکشی
۴۳	مدیریت کیفیت زه‌آب‌های کشاورزی

شماره	نام کتاب
۴۴	نرم افزارهای مرتبط با آبیاری و زهکشی (جلد اول)
۴۵	انسان و آب
۴۶	چاره آب در تاریخ فارس (جلد دوم)
۴۷	استفاده از فاضلاب‌های تصفیه شده در کشاورزی
۴۸	CD کتاب‌ها و نشریات مؤسسات بین‌المللی
۴۹	راهنمای مقابله با خشکسالی
۵۰	مجموعه مقالات کارگاه آموزشی کاربرد اینترنت در آبیاری
۵۱	مجموع مقالات همایش تاریخ آب و آبیاری کشور
۵۲	سومین کارگاه فنی ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری و زهکشی
۵۳	مجموعه مقالات همایش اثرات زیست محیطی پساب‌های کشاورزی بر آبهای سطحی و زیرزمینی
۵۴	لوح فشرده فرهنگ فنی آبیاری و زهکشی (انگلیسی - فرانسه)
۵۵	رهنمودهای انتقال مدیریت خدمات آبیاری
۵۶	راهنمای پایش و ارزشیابی انتقال مدیریت آبیاری
۵۷	زهکشی؛ کمیت و کیفیت جریان برگشتی
۵۸	واکنش گیاهان به شوری
۵۹	نگرشی بر مسائل و مشکلات مطالعات و اجرای زهکشی زیرزمینی در ایران
۶۰	برنامه‌ریزی مدیریت بهره‌برداری و نگهداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۶۱	بررسی و مقایسه تطبیقی روش پنمن - مانتیس با روش‌های فائو ۲۴ در ایران
۶۲	لوح فشرده نرم افزارهای مرتبط با آبیاری و زهکشی (نسخه شماره ۲)
۶۳	مدیریت آب در کشاورزی؛ پیامدهای اقتصادی - اجتماعی
۶۴	قیمت‌گذاری آب آبیاری: بررسی ادبیات موضوع
۶۵	دانشنامه مشاهیر فنون آب و آبیاری و سازه‌های آبی

شماره	نام کتاب
۶۶	لوح فشرده مجموعه مقالات کنفرانس‌های بین‌المللی
۶۷	مجموعه مقالات کارگاه تخصصی مدیریت بهره‌برداری و نگهداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۶۸	استاندارد ادوات و تجهیزات آبیاری تحت فشار
۶۹	استفاده از آب‌های شور در کشاورزی پایدار
۷۰	نظریه‌ها و مدل‌های زهکشی
۷۱	مدیریت نوین آبیاری و تأثیر آن بر عملکرد شبکه‌های آبیاری
۷۲	آبیاری در مقیاس کوچک برای مناطق خشک، اصول و روش‌ها
۷۳	نگرشی بر روند توسعه و چشم‌انداز آبیاری تحت فشار در ایران
۷۴	مهار آلودگی آب ناشی از فعالیت‌های کشاورزی
۷۵	استفاده از لوله‌های کم فشار در آبیاری سطحی
۷۶	مدیریت آب آبیاری در مزرعه
۷۷	ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری تحت فشار بر مبنای تقاضا
۷۸	تاریخ آب و آبیاری استان کرمان
۷۹	لوح فشرده مجموعه مقالات کارگاه بین‌المللی راهکارهای مدیریت خشکسالی
۸۰	دانشنامه مشاهیر فنون آب و آبیاری و سازه‌های آبی (جلد دوم)
۸۱	مواد و مصالح سامانه‌های زهکشی زیرزمینی
۸۲	بهره‌وری آب کشاورزی
۸۳	مجموعه مقالات یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
۸۴	نگرشی بر مسائل، مشکلات و تجربه‌های ساخت کانال‌های آبیاری در ایران
۸۵	انتخاب روش‌های آبیاری در کشاورزی
۸۶	ارزیابی شوری خاک
۸۷	لوح فشرده کتاب‌ها و نشریات مؤسسات بین‌المللی (جلد سوم)

شماره	نام کتاب
۸۸	مدیریت آبیاری در سامانه‌های روباز آبیاری
۸۹	مجموعه مقالات سومین کارگاه فنی زهکشی
۹۰	راهنمای ارزیابی مقایسه‌ای و کاربرد آن در شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۹۱	مجموعه مقالات چهارمین کارگاه فنی ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری
۹۲	مجموعه مقالات کاربرد سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در آبیاری و زهکشی
۹۳	مجموعه مقالات کارگاه سیستم زهکشی زیر پوشش کانال‌ها
۹۴	نظام آبیاری سنتی در نائین
۹۵	نرم‌افزارهای مرتبط با آبیاری و زهکشی (جلد سوم)
۹۶	فرآیند ارزیابی سریع و کاربرد آن در شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۹۷	مجموعه مقالات کارگاه فنی آبیاری بارانی «توانمندی‌ها و چالش‌ها»
۹۸	مجموعه مقالات کارگاه فنی آبیاری سطحی مکانیزه
۹۹	مجموعه مقالات کارگاه آموزشی مدلسازی در آبیاری و زهکشی
۱۰۰	اصول و کاربرد کم آبیاری
۱۰۱	مجموعه مقالات چهارمین کارگاه فنی مشارکت کشاورزان در مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۱۰۲	پیش‌بینی و هشدار سیل
۱۰۳	راهنمای عملی ارزیابی عملکرد آبیاری و زهکشی
۱۰۴	مروری بر استانداردها و تجارب استفاده از پساب‌ها برای آبیاری
۱۰۵	مجموعه مقالات کارگاه فنی همزیستی با سیلاب
۱۰۶	کاربرد ژئوسنتتیک در آبیاری و زهکشی
۱۰۷	مجموعه مقالات چهارمین کارگاه فنی زهکشی
۱۰۸	مجموعه مقالات دومین کارگاه فنی خرد آبیاری «توسعه و چشم‌انداز»
۱۰۹	مجموع مقالات کارگاه فنی مدیریت، بهره‌برداری و نگهداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۱۱۰	انتقال مدیریت آبیاری (مبانی و روش‌شناسی)

شماره	نام کتاب
۱۱۱	کارآیی مصرف آب در کشت گلخانه‌ای
۱۱۲	راهنمای روش مشارکت‌مدار برای تشخیص سریع مسایل و طرح‌ریزی عملیات در سامانه‌های آبیاری
۱۱۳	مدیریت، بهره‌برداری و نگهداری شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۱۱۴	Proceedings of the 4 th Asian Regional Conference and 10 th International Seminar on Participator Irrigation Management
۱۱۵	Proceedings of the International History Seminar on Irrigation and Drainage
۱۱۶	Water and Irrigation Techniques in Ancient Iran
۱۱۷	مجموعه مقالات اولین کارگاه فنی اتوماسیون (خودکارسازی) سامانه‌های آبیاری تحت فشار
۱۱۸	مدیریت زهاب کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک
۱۱۹	خُرد آبیاری در مناطق خشک و نیمه خشک راهنمای برنامه و طرح (در حال چاپ)
۱۲۰	زهکشی زیرزمینی؛ برنامه‌ریزی، اجرا و بهره‌برداری
۱۲۱	نگرشی بر روش‌های خودکار کردن سامانه‌های آبیاری تحت فشار
۱۲۲	تبخیر و تعرق گیاهان (دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان) (در حال چاپ)
۱۲۳	مجموعه مقالات اولین کارگاه فنی ارتقای کارآیی مصرف آب با کشت محصولات گلخانه‌ای
۱۲۴	کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب
۱۲۵	راهنمای عملیات نگهداری سامانه‌های آبیاری (در حال چاپ)
۱۲۶	راهنمای برنامه‌ریزی رهیافت‌های سازه‌ای مدیریت سیلاب (در حال چاپ)
۱۲۷	کارگاه آشنایی با راهبردهای مهندسی در آبیاری و زهکشی
۱۲۸	مجموعه مقالات سمینار علمی طرح ملی آبیاری تحت فشار و توسعه پایدار
۱۲۹	مجموعه مقالات دومین سمینار راهکارهای بهبود و اصلاح سامانه‌های آبیاری سطحی
۱۳۰	مجموعه مقالات پنجمین کارگاه فنی زهکشی و محیط زیست
۱۳۱	انتقال مدیریت آبیاری: تلاش‌های جهانی و نتایج

Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements)

**Food and Agriculture Organization
of the United Nations**

**Iranian National Committee
on Irrigation and Drainage (IRNCID)**

Translated By:

Jaleh Vaziri

Mohammad Reza Entesari

Nader Hidari

Ali Reza Salamat

Mahmmovd Meschi

Hossein Dehghani Sanich

Edited By:

Daruosh Tamadoni

ISBN: 978-964-6668-69-0

Publication Issue: 122

2009

Crop Evapotranspiration

(Guidelines for Computing Crop
Water Requirements)

FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56

**Food and Agriculture Organization
of the United Nations**

By:

Richard G. ALLEN
Utah State University
Logan, Utah, U.S.A.

Luis S. PEREIRA
Instituto Superior de Agronomia
Lisbon, Portugal

Dirk RAES
Katholieke Universiteit Leuven
Leuven, Belgium

Martin SMITH
FAO, Water Resources, Development and
Management Service
Rome, Italy

Published by Arrangement with the Food and Agriculture
Organization of the United Nations
by
Iranian National Committee on Irrigation and Drainage

**FAO
IRRIGATION
AND DRAINAGE
PAPER**

56

**Food
and
Agriculture
Organization
of
the
United
Nations**



Rome, 1998

Crop Evapotranspiration

Guidelines for Computing Crop Water Requirements

FAO Irrigation and Drainage Paper 56
Food and Agriculture Organization of
the United Nations

Iranian National Committee on
Irrigation and Drainage (IRNCID)



شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۶۶۶۸-۶۹-۰
ISBN: 978-964-6668-69-0
Publication Issue: 122
2009

