فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار ..... ذ

فصل اول: آب مورد نیاز گیاهان

۱-۱- ضرورت محاسبه و اهمیت برآورد دقیق نیاز آبی گیاهان ۳
۱-۲- برآورد تبخیر - تعرق ۵
۱-۳- تبخیر - تعرق پتانسیل، تبخیر - تعرق مرجع ۶
۱-۴- بسط و توسعه مدل‌های تبخیر - تعرق ۸
۱-۵- عوامل مؤثر بر تبخیر - تعرق ۹
۱-۵-۱- چگونگی تأثیر عوامل هواشناسی بر تبخیر - تعرق ۱۰
۱-۶- اثر شرایط ایستگاه هواشناسی بر کیفیت داده‌های اقلیمی ۱۲
۱-۷- تبخیر - تعرق گیاهان زراعی ۱۳
۱-۷-۱- ضرائب گیاهی واحد و دوتائی ۱۴
۱-۸- مدل‌های تبخیر - تعرق ۱۵
۱-۸-۱- رابطهٔ پنمن ۱۵
۱-۸-۲- رابطهٔ پنمن - مانتیس ۱۷
۱-۹- روابط مورد نیاز برای محاسبهٔ تبخیر - تعرق مرجع ۲۰
۱-۹-۱- معادله پنمن مانتیس ۲۰
۱-۹-۲- معادله پنمن - رایت ۲۹
۱-۹-۳- معادله هارگریوز - سامانی ۳۱

منابع فصل اول ۳۲

فصل دوم: پارامترهای مؤثر در تعیین عمق آب آبیاری

۱-۲-راندمان‌های آبیاری ۳۵
۱-۱-۲-مقدمه ۳۵
۲-۱-۲-راندمان مخزن ۳۵
۳-۱-۲-راندمان انتقال شبکه ۳۶
۴-۱-۲-راندمان انتقال مزرعه ۳۶
۵-۱-۲-راندمان کاربرد آبیاری (Ea) ۳۷
۶-۱-۲-راندمان ذخیره یا راندمان کفایت آبیاری (Es) ۳۷
۷-۱-۲-راندمان کل شبکه ۳۸
۸-۱-۲-راندمان دشت ۳۹
۹-۱-۲-راندمان یکنواختی توزیع ۴۰
۱۰-۱-۲-راندمان‌های آبیاری بارانی کلاسیک و طرز اندازه‌گیری آنها ۴۱
۱-۱۰-۱-۲-دستورالعمل اندازه‌گیری راندمان یکنواختی توزیع ۴۱
۲-۱۰-۱-۲-دستورالعمل اندازه‌گیری راندمان مربوط به تلفات ناشی از تبخیر ۴۶
۳-۱۰-۱-۲-راندمان کل آبیاری بارانی ۴۷
الف – راندمان کل آبپاش ۴۷
ب – راندمان کل آبیاری ۴۷
ج – راندمان کل سیستم (Et) ۴۸
۱۱-۱-۲-راندمان‌های آبیاری قطره‌ای و طرز اندازه‌گیری آنها ۴۸
۱-۱۱-۱-۲-راندمان مزرعه (TR) ۵۰
۲-۱۱-۱-۲-راندمان یکنواختی توزیع (E_u) ۵۱
۳-۱۱-۱-۲-راندمان یکنواختی مطلق (E_{ua}) ۵۶
الف ـ طرز تعیین راندمان یکنواختی توزیع از طریق اندازه‌گیریهای مستقیم

در مزرعه ۵۲
ب ـ تخمین راندمان یکنواختی توزیع *(Eu)* جهت طراحی ۵۳
الف ـ اندازه‌گیری راندمان یکنواختی مطلق در واحد آبیاری ۵۶
ب ـ برآورد ضریب یکنواختی مطلق *(Eua)* جهت طراحی..... ۵۷
ج ـ برآورد راندمان یکنواختی مطلق با استفاده از جدول ۵۷
۱۲ـ۱ـ۲ـ دیدگاههای جدید و برداشتهای مختلف در رابطه با اهداف، تبیین و تعیین راندمان آبیاری..... ۵۹
۱ـ۱۲ـ۱ـ۲ـ راندمان جامع جهت ارزیابی مدیریت آبیاری در مزرعه ۶۱
۲ـ۱۲ـ۱ـ۲ـ راندمان جامع آبیاری یا راندمان ترکیبی یا راندمان کل *(E_c)* .. ۶۶
۳ـ۱۲ـ۱ـ۳ـ نتیجه ۷۲
۱۳ـ۱ـ۲ـ نگاه واقع‌گرایانه به راندمان‌های آبیاری و نقد آن ۷۴
۱۴ـ۱ـ۲ـ پیشنهادات جهت برون رفت از بحران آب..... ۷۸
۲ـ۲ـ محاسبه و برآورد آب شستشو در آبیاری جهت کنترل شوری..... ۸۱
۱ـ۲ـ۲ـ مقدمه ۸۱
۲ـ۲ـ۲ـ اثرات شوری..... ۸۱
۳ـ۲ـ۲ـ آستانه مقاومت به شوری ۸۱
۴ـ۲ـ۲ـ رابطه عملکرد با شوری..... ۸۲
۵ـ۲ـ۲ـ کسر آبشویی *LF*..... ۹۰
۶ـ۲ـ۲ـ آب شستشوی مورد نیاز ۹۱
۷ـ۲ـ۲ـ مقایسه آب شستشوی مورد نیاز و راندمان کاربرد آبیاری ۹۱
۳ـ۲ـ باران مؤثر و روش‌های مختلف اندازه‌گیری و برآورد آن..... ۹۳
۱ـ۳ـ۲ـ مفهوم باران مؤثر ۹۳
۲ـ۳ـ۲ـ شبکه پیمایش باران ۹۳
۳ـ۳ـ۲ـ عوامل تأثیرگذار بر باران مؤثر ۹۶
۱ـ۳ـ۳ـ۲ـ عوامل جوی..... ۹۶
۲ـ۳ـ۳ـ۲ـ عامل توپوگرافی، پستی و بلندی، پیکرشناسی زمین

(ژئومورفولوژی): ۹۸
۳-۳-۳-۲- عامل خاک ۹۹
۴-۳-۳-۲- آبیاری ۱۰۱
۵-۳-۳-۲- آب زیرزمینی ۱۰۱
۶-۳-۳-۲- عوامل گیاهی ۱۰۲
۷-۳-۳-۲- عوامل مدیریتی ۱۰۲
۴-۳-۲- روش‌های تعیین مقدار باران مؤثر در پروژه‌های آبیاری ۱۰۳
۱-۴-۳-۲- روش‌های اندازه‌گیری مستقیم ۱۰۳
الف - روش اندازه‌گیری تغییرات رطوبت خاک ۱۰۴
ب - استفاده از باران سنج تجمعی ۱۰۴
پ - روش رامداس ۱۰۴
ت - لیسیمتر (جعبه کشت) ۱۰۶
۲-۴-۳-۲- روش‌های برآورد باران مؤثر با استفاده از فرمول‌های تجربی ۱۰۶
الف - معادله رنفرو ۱۰۶
ب - روش دفتر احیای اراضی ایالات متحده امریکا *(USBR)* ۱۰۸
پ - روش نسبت تبخیر - تعرق به بارندگی ۱۰۹
ت - روش سرویس حفاظت خاک ایالات متحده امریکا *(USDA)* ۱۱۰
ث - روش هرشفلد ۱۱۱
ج - روابط منطقه‌ای ۱۱۳
چ - روش‌های ارائه شده در برنامه *Cropwat* فائو ۱۱۳
۳-۴-۳-۲- روش بیلان آب خاک ۱۱۶
۵-۳-۲- ارزیابی روش‌های مختلف ۱۱۸
منابع فصل دوم ۱۲۰

فصل سوم: برنامه‌ریزی آبیاری

۱-۳- مقدمه ۱۲۷

۲-۳- خصوصیات فیزیکی خاک ۱۲۷
۱-۲-۳- اندازه یا ابعاد ذرات خاک ۱۲۹
۲-۲-۳- بافت خاک ۱۲۹
۳-۲-۳- ساختمان خاک ۱۳۱
۴-۲-۳- وزن مخصوص حقیقی خاک ۱۳۱
۵-۲-۳- وزن مخصوص ظاهری ۱۳۲
۶-۲-۳- تخلخل خاک ۱۳۲
۳-۳- رطوبت خاک ۱۳۳
۱-۳-۳- رطوبت وزنی ۱۳۴
۲-۳-۳- رطوبت حجمی ۱۳۵
۳-۳-۳- ارتفاع آب به ارتفاع خاک ۱۳۵
۴-۳- انواع آب در خاک (نقطه اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی، خاک خشک شده در اتوکلاو) ۱۳۹
۱-۴-۳- نقطه اشباع ۱۳۹
۲-۴-۳- ظرفیت زراعی ۱۳۹
۳-۴-۳- نقطه پژمردگی دائم ۱۳۹
۴-۴-۳- خاک خشک شده در اتو ۱۴۰
۵-۴-۳- آب ثقلی ۱۴۰
۶-۴-۳- آب قابل استفاده گیاه ۱۴۰
۷-۴-۳- آب سهل‌الوصول ۱۴۰
۵-۳- مدل زنجیره خاک، گیاه و اتمسفر (SPAC) ۱۴۰
۱-۵-۳- رابطه مقدار کل محصول (Y) باتعرق (T) و تبخیر ـ تعرق (ET).. ۱۴۳
۲-۵-۳- رابطه مقدار کل محصول (Y) با آب آبیاری (Irr.) و کل آب مورد استفاده گیاه در مزرعه (FWS) ۱۴۷
۶-۳- برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط بهینه (بدون تنش) بمنظور کسب حداکثر محصول از واحد سطح ۱۴۸

۱ـ۶ـ۳ـ عمق خالص آب آبیاری (dn) ۱۴۸
۲ـ۶ـ۳ـ لایه‌های محدودکننده رشد ریشه گیاهان ۱۵۰
۳ـ۶ـ۳ـ عمق ناخالص آب آبیاری (dg) ۱۵۱
۴ـ۶ـ۳ـ دور آبیاری (F) ۱۵۱
۷ـ۳ـ برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط کم آبیاری ۱۵۲
۱ـ۷ـ۳ـ توصیه مقدار آب آبیاری جهت کسب حداکثر کارآیی مصرف آب (WUE) ۱۵۳
۲ـ۷ـ۳ـ توصیه مقدار آب در کم آبیاری جهت کسب حداکثر سود در شرایط کافی بودن منابع آب آبیاری ۱۵۴
۳ـ۷ـ۳ـ توصیه مقدار آب در کم آبیاری جهت کسب حداکثر سود در شرایط محدود بودن منابع آب ۱۵۶
منابع فصل سوم ۱۵۹

فصل چهارم: کارآیی مصرف آب در تولید محصولات کشاورزی

۱ـ۴ـ مقدمه ۱۶۳
۲ـ۴ـ مفهوم کارآیی مصرف آب در تولید ۱۶۵
۳ـ۴ـ راهکارهای افزایش کارآیی مصرف آب در تولید ۱۶۷
۴ـ۴ـ محدوده تغییرات کارآیی مصرف آب در تولید برای چند محصول ۱۶۹
منابع فصل چهارم ۱۷۸

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۲- نحوه آرایش قوطی‌های جمع‌آوری آب خارج شده از آبپاش‌ها جهت اندازه‌گیری راندمان یکنواختی توزیع ۴۲
شکل ۲-۲- نحوه شماره‌گذاری قوطی‌های جمع‌آوری آب خارج شده از آبپاش‌ها جهت اندازه‌گیری راندمان یکنواختی توزیع ۴۴
شکل ۳-۲- منحنی آبدهی - فشار ۵۴
شکل ۴-۲- نیمرخ نفوذ آب پس از آبیاری (سطحی و یا بارانی)..... ۶۴
شکل ۵-۲- نیمرخ نفوذ آب پس از آبیاری قطره‌ای ۶۴
شکل ۶-۲- راندمان کاربرد (E_a)، رابطه بین راندمان جامع (E_g)، کاربرد (E_g) و ذخیره (E_s) (با فرض $a=1$)..... ۷۱
شکل ۷-۲- مقدار راندمان جامد در رابطه با نیمرخ‌های آبی مختلف در روش‌های آبیاری سطحی ۷۳
شکل ۸-۲- اثر شوری آب آبیاری (EC_w) به شوری عصاره اشباع خاک (EC_e) در ناحیه ریشه‌ها با آبشویی‌های متفاوت..... ۹۰
شکل ۹-۲- شبکه پیمایش باران..... ۹۵
شکل ۱۰-۲- باران سنج تجمعی برای اندازه‌گیری باران مؤثر ۱۰۵
شکل ۱۱-۲- دستگاه رامداس برای اندازه‌گیری باران مؤثر..... ۱۰۵
شکل ۱۲-۲- رابطه باران مؤثر فصل رشد (Re) با عوامل بارندگی فصل رشد (Rt). ۱۱۴
شکل ۱-۳- الگوریتم برنامه‌ریزی آبیاری ۱۲۸
شکل ۲-۳- مثلث بافت خاک ۱۳۰

شکل ۳ـ۳ـ حرکت آب در زنجیره پیوسته خاک، گیاه و اتمسفر (مدل SPAC) ۱۴۱
شکل ۴ـ۳ـ مدل هوقلند، تغییرات نسبی جذب آب توسط ریشه با کاهش رطوبت خاک ۱۴۲
شکل ۵ـ۳ـ روابط محصول با مقدار تعرق گیاهی (T) و تبخیر ـ تعرق (ET) ۱۴۴
شکل ۶ـ۳ـ روابط محصول نسبی با تعرق نسبی Tact/Tpot و تبخیر ـ تعرق نسبی ETact/ETpot ۱۴۵
شکل ۷ـ۳ـ گروه‌بندی گیاهان براساس نسبت محصول در رابطه با نسبت کاهش تبخیر ـ تعرق ۱۴۶
شکل ۸ـ۳ـ رابطه تولید محصول با مقادیر مختلف آب آبیاری و کل آب استفاده شده توسط گیاه در مزرعه ۱۴۷
شکل ۹ـ۳ـ آنالیز گرافیکی توصیه عمق آب آبیاری در شرایط مختلف برای زراعت ذرت ۱۵۴

فهرست جداول

عنوان جدول **صفحه**

جدول ۱-۲- مقادیر راندمان یکنواختی مطلق Eua و نسبت‌های آبدهی به ازای مقادیر مختلف تغییرات و افت فشار درلوله‌های فرعی نسبت به فشار ورودی، با قطره‌چکان‌های مجرای طولانی و روزنه‌ای ۵۸
جدول ۲-۲- آستانه شوری و شیب خط کاهش محصول برای گیاهان مختلف ۸۳
جدول ۳-۲- سطوح مختلف مقاومت گیاه نسبت به شوری آب آبیاری و عصاره اشباع خاک با عملکردهای مختلف ۸۵
جدول ۴-۲- نسبت E برای برآورد باران مؤثر در معادله رنفرو ۱۰۷
جدول ۵-۲- باران مؤثر براساس جزءهای بارندگی ماهیانه (روش دفتر احیای اراضی ایالات متحده) ۱۰۸
جدول ۶-۲- شمار روزها در یک گروه برای انواع مختلف خاک و شرایط متفاوت اقلیمی ۱۰۹
جدول ۷-۲- نمونه محاسبات باران مؤثر به روش نسبت تبخیر - تعرق به بارندگی ... ۱۱۰
جدول ۸-۲- متوسط باران مؤثر ماهیانه در رابطه با متوسط باران ماهیانه و متوسط آب مصرفی ماهیانه ۱۱۲
جدول ۹-۲- ضرایب اصلاح باران موثر ماهانه (جدول ۸-۲) در رابطه با عمق خالص آبیاری ۱۱۳
جدول ۱۰-۲- محاسبات نمونه در روش بیلان آب خاک ۱۱۷
جدول ۱-۳- طبقه‌بندی اندازه و ابعاد ذرات خاک ۱۲۹
جدول ۲-۳- عمق ریشه گیاهان مختلف، بخش سهل‌الوصول آب و بر حسب میلیمتر در

یک متر خاک با بافت‌های مختلف (با در نظر گرفتن تبخیر ـ تعرق برابر ۶ـ۵ میلیمتر در روز)..... ۱۳۶
جدول ۳ـ۳ـانواع مختلف کم‌آبیاری برای سطح محدود شده ۱۰۰ هکتار..... ۱۵۸
جدول ۱ـ۴ـکارآیی آب در تولید چند محصول..... ۱۷۰
جدول ۲ـ۴ـکارآیی آب در تولید گیاهان مختلف (Kg/m^3) در سال زراعی ۷۶-۱۳۷۵..... ۱۷۲
جدول ۳ـ۴ـکارآیی آب در تولید گیاهان مختلف (Kg/m^3) در سال زراعی ۷۷-۱۳۷۶..... ۱۷۴

فصل اول

آب مورد نیاز گیاهان

تهیه کننده: دکتر مجید میرلطیفی

۱ـ۱ـ ضرورت محاسبه و اهمیت برآورد دقیق نیاز آبی گیاهان

عدم استفاده مطلوب از آب آبیاری، محدودیت منابع آب و نیاز فزاینده بشر به غذای بیشتر، متنوع، و مطلوب‌تر ایجاب می‌نماید تا مهندسین آبیاری با اعمال شیوه‌های مدیریتی نوین اقدام به صرفه‌جوئی در مصرف آب و افزایش بازده آبیاری نمایند. این امر بدون برآورد دقیق نیاز آبی گیاه و انطباق عمل آبیاری براساس نیاز ادواری گیاهان به آب (آبیاری به موقع و به اندازه) میسر نمی‌باشد. در این راستا، فصل حاضر تلاشی کوچک برای محاسبه نیاز آبی گیاهان می‌باشد.

طراحی شبکه‌ها و پروژه‌های آبیاری براساس برآورد نیاز آبی گیاهان انجام می‌شود. در طراحی پروژه‌های آبیاری با توجه به روش‌های آبیاری، حساسیت گیاهان به کم‌آبی، و نوع و عمق خاک، سطح احتمال وقوع و دوره برگشت برای محاسبه نیاز آبی انتخاب شده و براساس سطح احتمال وقوع مورد قبول، نیاز آبی پروژه در فصول مختلف سال محاسبه می‌شود. عموماً برای گیاهان حساس و یا خاک‌های کم عمق و یا با بافت سبک مقادیر بیشتری از احتمال وقوع در محاسبه نیاز آبی در نظر گرفته می‌شود. در طراحی شبکه‌های نوین، طراح می‌بایستی نیاز آبی گیاهان را معمولاً در منطقه‌ای برآورد نماید که قبلاً هیچگونه زراعت آبی انجام نشده است. بنابراین برآورد نیاز آبی از طریق اندازه‌گیری مستقیم تغییرات رطوبت خاک در فصل کاشت امکان‌پذیر نبوده و تنها تخمین و یا برآورد نیاز آبی با استفاده از مدل‌های برآورد تبخیر ـ تعرق[1] براساس متغیرهای اقلیمی مانند داده‌های هواشناسی امکان‌پذیر است.

بدون تردید در صورتیکه مدلی که برای تخمین نیاز آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد در شرایط اقلیمی پروژه از دقت کافی برخوردار نباشد، زیان‌های اقتصادی را به بار می‌آورد. برآورد بیش از حد نیاز آبی سبب افزایش برآورد حجم آب مورد نیاز پروژه می‌شود. در این راستا شبکه‌های آبرسان، حجم مخازن، و اندازه سیستم‌های آبیاری بزرگتر از مقدار مورد نیاز طراحی خواهند شد. در چنین وضعیتی، سرمایه‌گذاری اولیه پروژه افزایش یافته و از سودآوری پروژه کاسته می‌شود. نکته مهمتر اینکه تحت

1- Evapotranspiration

چنین شرایطی امکان آبیاری بیش از مقدار مورد نیاز، بیش آبیاری [۱]، بخاطر وجود حجم آب بیشتر از حد نیاز به سهولت امکان‌پذیر بوده و این خود می‌تواند سبب کاهش محصول و اتلاف آب آبیاری شود. اعمال بیش آبیاری در اکثر پروژه‌های آبیاری در کشور سبب شده است تا سطح آب زیرزمینی بالا آمده و اراضی زه‌دار شوند. در چنین شرایطی در منطقه توسعه ریشه املاح تجمع نموده و محیطی نامناسب برای رشد و نمو ریشه از نظر شوری و تبادل گاز ایجاد می‌شود. بیش آبیاری سبب شستشوی مواد غذائی خاک مخصوصاً ازت و انتقال آنها به سفره‌های زیرزمینی نیز می‌شود.

نکته مقابل بیش برآورد نمودن [۲]، کم برآورد نمودن [۳] نیاز آبی می‌باشد. در این صورت توانائی پروژه برای تأمین آب کمتر از نیاز واقعی طراحی می‌شود. بدون تردید کم آبیاری گیاهان سبب کاهش تولید خواهد شد و در حالتی که این کاهش تولید بخاطر اعمال استراتژی علمی "کم آبیاری" نبوده بلکه بخاطر عدم وجود منابع مکفی آب و بدون برنامه‌ریزی صورت پذیرد، قطعاً سود حاصل از عمل آبیاری کاهش می‌یابد. البته ممکن است بخاطر ظرفیت کمتر از حد نیاز منابع تأمین آب، از سطح زیر کشت پروژه نیز کاسته شود. کاهش سطح زیر کشت یک پروژه سبب می‌شود تا درآمد حاصل از احداث پروژه نیز کاهش یابد. بنابراین در صورتیکه برآورد نیاز آبی از دقت لازم برخوردار نباشد، سودآوری پروژه خدشه‌دار خواهد شد.

برآورد آب مصرفی گیاهان در مطالعات هیدرولوژی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مطالعاتی که براساس موازنه حجمی آب در دشت‌ها اعمال می‌شود و مؤلفه‌های ورود و خروج آب بررسی می‌شوند، یکی از مؤلفه‌های خروج آب تبخیر ـ تعرق گیاهان می‌باشد. برآورد آب مصرفی گیاهان در حل اختلافات ناشی از حق‌آبه‌ها چه در سطوح محلی و یا بین‌المللی مورد استفاده قرار گرفته است.

همانطور که قبلاً ذکر گردید طراحان و مدیران آبیاری بایستی در جهت افزایش بازده آبیاری اهتمام ورزند. در این راستا، عمل آبیاری (دور و عمق آب آبیاری) براساس مقدار

1- Over irrigation

2- Over estimating

3- Under estimating

آب مصرفی گیاه تعیین می‌شود. بنابراین تنها در صورتی می‌توان اقدام به تدوین برنامه (تقویم) آبیاری جهت افزایش بهره‌وری از آب نمود که مقدار آب مورد نیاز گیاه دقیقاً برآورد شده باشد. مدیریت صحیح آبیاری بر برآورد دقیق آب مورد نیاز گیاهان استوار می‌باشد.

۲ـ۱ـ برآورد تبخیر ـ تعرق

تبخیر ـ تعرق به تلفیق دو فرآیند تعرق آب از گیاه و تبخیر از سطوح گیاه و خاک و انتقال آن به اتمسفر اطلاق می‌شود. تبخیر ـ تعرق عموماً به صورت ET خلاصه شده و واحد آن گرمای نهان تبخیر در واحد زمان و سطح می‌باشد. لیکن متخصصین آبیاری، ET را برحسب عمق آب در واحد زمان ارائه می‌نمایند، زیرا جنبه کاربردی بیشتری خواهد داشت. تبخیر ـ تعرق گیاهان تحت تأثیر عوامل اقلیمی و گیاهی متعددی قرار دارد. اهم عوامل اقلیمی شامل تشعشعات خالص، دما، رطوبت هوا و سرعت باد می‌باشند. در حالیکه نوع گیاه و واریته آن، مرحله رشد، مقاومت روزنه، ارتفاع گیاه، زبری آیرودینامیک، ضریب انعکاس تاج گیاه، ویژگی‌های ریشه و سطح سایه‌انداز از عواملی می‌باشند که مرتبط به گیاه بوده و برمقدار آب مصرفی گیاهان تأثیر می‌گذارند.

تبخیر ـ تعرق را می‌توان با روش‌های مستقیم و یا روش‌های مبتنی بر داده‌های اقلیمی[۱] بدست آورد. در روش‌های مستقیم[۲] رطوبت خاک در عمق‌های مختلف و در قسمت‌های متعددی از مزرعه کنترل و اندازه‌گیری شده و براساس کاهش رطوبت خاک در طول زمان، تبخیر ـ تعرق برآورد می‌گردد. اندازه‌گیری دقیق تبخیر ـ تعرق در ایستگاه‌های تحقیقاتی با استفاده از انواع لایسیمترهای وزنی صورت می‌گیرد. لیکن در روش‌های مبتنی بر داده‌های اقلیمی تبخیر ـ تعرق با استفاده از داده‌های اقلیمی از قبیل رطوبت هوا، سرعت باد، تشعشعات آفتاب، و غیره محاسبه می‌شود. البته از روش‌های مبتنی بر داده‌های اقلیمی می‌توان برای محاسبه تبخیر ـ تعرق واقعی و یا برآورد تبخیر ـ تعرق استفاده نمود. با توجه به اینکه داده‌های اقلیمی تحت تأثیر سطح وسیعی می‌باشند،

1- Agro-climatological methods *2- Direct methods*

برآورد ET با استفاده از داده‌های اقلیمی بیانگر آب از دست رفته از یک سطح نسبتاً وسیع است. در حالیکه برآورد مبتنی بر اندازه‌گیری رطوبت خاک تنها بیانگر شرایط مزرعه در سطحی بسیار محدود به محل‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک می‌باشد. از دیگر مزیت‌های روش دوم، امکان برآورد ET در مناطقی است که تا به حال هیچگونه عملیات زراعی انجام نشده است. پیش‌بینی ET نیز با استفاده از روش‌های مبتنی بر داده‌های اقلیمی عملی می‌باشد. اثرات استراتژی‌های مختلف مدیریت آبیاری در دراز مدت با استفاده از مدل‌های تبخیر ـ تعرق بر اساس روش‌های مبتنی بر داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی می‌شود.

۳ـ۱ـ تبخیر ـ تعرق پتانسیل، تبخیر ـ تعرق مرجع

مفهوم تبخیر ـ تعرق پتانسیل اولین بار همزمان توسط تورن وایت [۱] (۱۹۴۸) و پنمن [۲] (۱۹۴۸) مطرح گردید. تورن وایت مقدار تبخیر آب از یک سطح با پوشش گیاهی را که آبیاری و عملیات زراعی آن در حد مطلوب انجام می‌شود تبخیر ـ تعرق پتانسیل نامید. پنمن با ارائه تعریف تبخیر ـ تعرق پتانسیل (PET)، اولین مدل ریاضی برآورد PET را مبتنی بر فرآیندهای فیزیکی انتقال بخار آب از یک سطح با استفاده از داده‌های اقلیمی استخراج نمود. رابطه اولیه پنمن مقدار تبخیر آب از یک سطح آب آزاد را برآورد می‌نماید. اگرچه در مدت کوتاهی ضرایب مربوط به برآورد تبخیر ـ تعرق چمن نیز ارائه شد. در رابطه اولیه پنمن انتقال حرارت در خاک و اثرات مقاومت روزنه و پایداری اتمسفر لحاظ نشده است.

درسال‌های اولیه پس ازمعرفی موضوع تبخیر ـ تعرق پتانسیل، اشتباهاً متخصصین براین باور بودندکه PET تنها تحت تأثیر فاکتورهای اقلیمی قراردارد. لهذا، PET به عنوان نمادی از شرایط اقلیمی به شمار می‌رفت. نتیجتاً این فرضیه که مقدار تبخیر ـ تعرق پتانسیل کلیه گیاهانی که‌در حدمطلوب آبیاری شده‌اند یکسان است شکل‌گرفت (شارما [۳]،

1- *Thornthwaite*

2- *Penman*

3- *Sharma*

۱۹۸۵). در حالیکه نتایج تحقیقات انجام شده در سال‌های بعد از ۱۹۴۸ دلالت بر آن داشت که شرایط خاک و گیاه نیز مانند فاکتوررهای اقلیمی بر PET تأثیر می‌گذارند. بنابراین PET گیاهان مختلف حتی در حالتیکه در حد مطلوب آبیاری شده و در شرایط اقلیمی یکسان قرار داشته باشند، یکسان نخواهد بود. علت متفاوت بودن PET گیاهان مختلف بخاطر تفاوت‌های موجود در میزان مقاومت‌های داخلی گیاهان در مقابل جریان انتقال آب و متفاوت بودن ویژگی‌های آیرودینامیک گیاهان به ویژه برگ‌ها می‌باشد. پارامترهای مذکور بر انتقال و تبادل بخار آب، گرمای محسوس، و مومنتم روی سطح گیاه تأثیر می‌گذارند.

با توجه به مطالب مذکور و اینکه تعریف PET کلیه گیاهان را شامل می‌شد، کاربرد عملی آن توسط مهندسان آبیاری برای تعیین نیاز آبی پروژه‌های آبیاری که شامل گیاهان متفاوت در دوره‌های رشد مختلف می‌باشند بسیار اندک بود. بدین خاطر پارامتر دیگری با تعریفی محدودتر اما کاربردی‌تر به نام تبخیر ـ تعرق گیاه مرجع (ET_o) توسط مهندسان آبیاری ارائه شد (دورنبوس و پروبت [۱] ۱۹۷۷، جنسن و همکاران [۲] ۱۹۷۱).

دورنبوس و پروت تبخیر ـ تعرق مرجع را اینگونه تعریف کردند: شدت تبخیر ـ تعرق از یک سطح وسیع چمن سبز با ارتفاع یکنواخت ۸ الی ۱۵ سانتیمتر که در حد مطلوب آب در اختیار داشته و به طور فعال در حال رشد بوده (عملیات زراعی در حد مطلوب باشد) و کاملاً سطح زمین را پوشانده است. البته دیگران (جنسن و همکاران، ۱۹۷۱) یونجه را که دارای زبری آیرودینامیک بیشتری است بعنوان پوشش سطح مرجع انتخاب نمودند. در سال‌های اخیر با توجه به استاندارد نبودن تعاریف ارائه شده برای ET_o، متخصصان FAO اقدام به ارائه تعریف جدیدی برای ET_o نمودند. در تعریف جدید فائو سطح مرجع، سطح چمن فرضی است که ارتفاع آن برابر ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی آن ۷۰ ثانیه بر متر و آلبیدو آن برابر ۰/۲۳ می‌باشد. ویژگی‌های چنین سطح مفروضی

1- Doorenbos and Pruitt 2- Jensen et al.,

مشابه ویژگی‌های یک سطح پوشیده از چمن سبز است که مشکل کمبود آب نداشته و سطح زمین راکاملاً پوشانده است. تحت چنین شرایطی تبخیر از سطح خاک قابل اغماض است.

۴ـ۱ـ بسط و توسعه مدل‌های تبخیر ـ تعرق

فرآیند تبخیر ـ تعرق (ET) توسط فاکتورهای متعددی که در انتقال آب از خاک به گیاه و نهایتاً به اتمسفر و تبخیر از منطقه تحت کشت مؤثرند کنترل می‌شود. شبیه‌سازی و یا مدل‌سازی چنین فرآیند پیچیده‌ای که بسیاری از پارامترهای مؤثر بر آن بر یکدیگر نیز اثر متقابل می‌گذارند امری بسیار مشکل بوده که بدون قبول فرض‌های متعدد جهت ساده نمودن موضوع امکان‌پذیر نمی‌باشد. حتی اگر این امکان وجود داشت که بتوان مدلی برای برآورد ET ارائه نمود که اثر کلیه عوامل مؤثر بر آن را شامل شود، چنین مدلی حین اجرا به مقدار قابل توجهی اطلاعات و داده‌های خام احتیاج می‌داشت که کاربرد عملی آن را بسیار محدود و حتی غیر ممکن می‌ساخت. نکتهٔ قابل‌توجه دیگر اینکه مدل‌ها برای ساده‌سازی فرآیندهای فیزیکی واقعی تهیه می‌شوند و بنابراین در بسط و توسعهٔ مدل‌های ET همواره میزان پیچیدگی مدل و حجم داده‌های مورد نیاز آن مورد توجه بوده است. سهولت استفاده از مدل‌ها نیز از اهمیت ویژه‌ای برخورد است. بدین خاطر در اکثر مدل‌های ET از لحاظ نمودن کلیه فاکتورهای مرتبط به خاک و گیاه که در فرآیند ET موثرند اغماض شده است. مخصوصاً مهندسان آبیاری همواره سعی نموده‌اند به جهت ساده نمودن کاربرد مدل‌های ET، مدل‌هایی ارائه نمایند که بتوان براساس داده‌های اقلیمی ET_o را برآورد کرد. یکی از اصلی‌ترین فوائد معرفی پارامتر ET_o، حذف فاکتورهای متعددی بوده است که مرتبط به گیاه و خاک بوده و بر فرآیند تبخیر ـ تعرق اثر می‌گذارند.

مدل‌های تبخیر ـ تعرق با استفاده از داده‌های اقلیمی مانند شدت تشعشعات آفتاب، سرعت باد، دما و یا نقصان فشار بخار هوا که بر فرآیند تعرق گیاهان و تبخیر از سطح خاک و گیاه اثر می‌گذارند، تبخیر ـ تعرق را برآورد می‌نمایند. البته بعضی از مدل‌ها، مانند مدل

پنمن ـ مانتیس [۱]، با توجه به فیزیک فرآیند تبخیر ـ تعرق بسط داده شده‌اند. در حالیکه بعضی دیگر تنها بیانگر یک رابطهٔ تجربی و آماری بین تبخیر ـ تعرق و تعدادی پارامترهای اقلیمی مانند دما، تشعشعات آفتاب، و غیره می‌باشند. به مدل‌هایی که با توجه به تئوری‌های حاکم بر فرآیند تبخیر ـ تعرق استخراج شده‌اند و فیزیک تبخیر ـ تعرق در آنها لحاظ شده است، مدل‌های *Process-oriented* اطلاق می‌شود. مدل‌های دیگر را که براساس یک رابطه تجربی بین ET و بعضی پارامترهای اقلیمی استوارند مدل‌های تجربی [۲] می‌نامند. مدل‌های تجربی دارای جامعیت لازم نبوده و همواره نیازمند به کالیبراسیون (واسنجی) محلی بوده و دورهٔ محاسبه آنها نیز نسبتاً طولانی‌تر مانند دوره‌های چند روزه، هفتگی و یا ماهانه می‌باشد. در حالیکه از مدل‌های گروه اول می‌توان برای محاسبهٔ تبخیر ـ تعرق واقعی در دوره‌های کمتر از یک ساعت استفاده نمود. در این نوشتار از مدل‌های موجود تبخیر ـ تعرق مدل‌های پنمن ـ رایت [۳] و پنمن ـ مانتیس از گروه اول و هارگریوز ـ سامانی [۴] از گروه دوم ارائه خواهند شد.

۱.۵ـ عوامل مؤثر بر تبخیر ـ تعرق

تبخیر ـ تعرق گیاهان تحت تأثیر عوامل هواشناسی، گیاهی و ویژگی‌های مدیریتی و محیطی قرار دارد. عوامل هواشناسی موثر بر تبخیر ـ تعرق گیاهان به طور عمده عبارتند از: تابش، درجه حرارت، رطوبت هوا و سرعت باد. همچنین پایداری اتمسفر (حالت‌های پایدار و ناپایدار) سبب کاهش و یا افزایش شدت انتقال آشفته بخار آب، گرمای محسوس و یا مومنتم بر روی تاج گیاهان می‌شود و بنابراین بر فرآیند تبخیر ـ تعرق تأثیر می‌گذارد. با توجه به اهمیت تأثیر فاکتورهای هواشناسی بر تبخیر و تعرق، مدل‌های متعددی مبتنی بر داده‌های مذکور برای برآورد تبخیر ـ تعرق بسط داده شده‌اند. وجود تفاوت‌های متعدد بین گیاهان از نظر ویژگی‌های فیزیولوژیک و آیرودینامیک سبب می‌شود که تبخیر ـ تعرق گیاهان مختلف در یک شرایط اقلیمی یکسان متفاوت باشد. مقاومت داخلی گیاهان در

1- *Penman - Monteith*
2- *Empirical models*
3- *Penman - Wright*
4- *Hargreares and Samani*

برابر فرآیند تعرق، ارتفاع گیاه، زبری آیرودینامیک برگ‌ها و چگونگی گسترش و رشد ریشه و توانائی آن در جذب رطوبت خاک از عواملی می‌باشند که در بین گیاهان بسیار متفاوتند. فاکتورهای مدیریتی و شرایط محیطی مانند شوری خاک، فقر خاک، عدم استفاده مطلوب از کودها، وجود افق‌های غیر قابل نفوذ، مدیریت نامطلوب خاک و عدم کنترل امراض و بیماری‌ها می‌توانند رشد گیاهان را محدود نموده و بنابراین تبخیر ـ تعرق را کاهش دهند. میزان پوشش گیاهی سطح زمین (سطح سایه انداز)، تراکم کشت و رطوبت خاک نیز بر میزان تبخیر ـ تعرق موثرند.

هنگام ارزیابی و برآورد تبخیر ـ تعرق می‌بایستی به عملیات مدیریتی که برفاکتورهای اقلیمی و گیاهی موثر بر تبخیر ـ تعرق اثر می‌گذارند توجه نمود. عملیات زراعی در مزرعه و روش آبیاری می‌توانند میکرو اقلیم حاکم بر مزرعه یا روند مرطوب شدن سطح مزرعه و یا پوشش گیاهی را تغییر دهند. در روش‌های خرد آبیاری [1] سطح کمتری از مزرعه مرطوب شده و از میزان تبخیر از سطح خاک کاسته می‌شود. بادشکن‌ها با تغییرات قابل توجهی که در نیمرخ سرعت باد ایجاد می‌نمایند بر شدت تلاطم حاکم بر سطح مزرعه اثر گذاشته و از شدت تبخیر ـ تعرق می‌کاهند. البته میزان تأثیر بادشکن‌ها وابسته به ارتفاع و نوع بادشکن و شرایط اقلیمی و پارامترهای متعدد دیگری می‌باشد.

۱ـ۵ـ۱ـ چگونگی تأثیر عوامل هواشناسی بر تبخیر ـ تعرق

فرآیند تبخیر آب نیازمند به مقدار قابل توجهی انرژی می‌باشد. انرژی مورد استفاده در فرآیند تبخیر را گرمای نهان تبخیر می‌نامند. بنابراین شدت تشکیل بخار آب از سطح تبخیر شونده متأثر از مقدار انرژی آزاد و قابل استفاده در فرآیند تبخیر آب خواهد بود. تشعشعات آفتاب منبع اصلی انرژی مورد استفاده در فرآیند تبخیر ـ تعرق می‌باشد و همواره مقدار تبخیر ـ تعرق متناسب با شدت تشعشعات آفتاب است. معمولاً شدت تشعشعات خالص به عنوان نمادی از مقدار انرژی آزادی که در سطح زمین می‌تواند در فرآیند تبخیر تبدیل به گرمای نهان تبخیر شود حد ماکزیمم تبخیر ـ تعرق گیاهان را محدود

1- Micro irrigation

می‌نماید. البته در شرایط اقلیمی که انتقال افقی گرمای محسوس به عنوان منبع دیگری از انرژی وجود داشته باشد، شدت تبخیر ـ تعرق گیاهان افزون بر شدت تشعشعات خالص خواهد بود. تغییرات تبخیر ـ تعرق روزانه گیاهان بسیار متناسب با تغییرات شدت تابش آفتاب می‌باشد. تغییرات فصلی و مکانی تابش آفتاب بر شدت تبخیر ـ تعرق گیاهان نیز موثر است.

جذب انرژی تشعشعات دریافتی در سطح زمین که شامل دو مؤلفه تشعشات با طول موج کوتاه و تشعشعات با طول موج بلند می‌باشد سبب می‌شود تا دمای سطح زمین افزایش یابد. با گرم شدن سطح خاک، هوای اطراف آن نیز گرم شده و دمای هوا افزایش می‌یابد. دمای هوا از دو طریق تبخیر ـ تعرق گیاهان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اول اینکه با افزایش دمای هوا، مقدار انرژی لازم برای تبخیر آب (گرمای نهان تبخیر) کاهش می‌یابد. دوم اینکه افزایش دمای هوا سبب می‌شود تا توانائی جذب و نگهداشت بخار آب توسط هوا و بنابراین فشار بخار اشباع هوا افزایش یابد. با عنایت به این نکته که فشار بخار واقعی نمادی از میزان رطوبت هوا بوده و هیچ ارتباطی با دمای هوا ندارد، افزایش دمای هوا سبب افزایش نقصان فشار بخار هوا خواهد شد. نقصان فشار بخار هوا بیانگر قدرت تبخیر کنندگی یا خشک کنندگی هوا می‌باشد. تبخیر ـ تعرق گیاهان متناسب با نقصان فشار بخار هوا است، مگر آنکه نقصان فشار هوا تا حدی افزایش یابد که سبب بسته شدن روزنه‌ها شود. در این صورت از شدت تبخیر ـ تعرق کاسته خواهد شد.

براساس تئوری‌های آیرودینامیک، شدت انتقال عمودی بخار آب در لایهٔ هوای روی گیاهان متناسب است با تفاضل فشار بخار واقعی هوا در ارتفاعی بر روی سطح تبخیر شونده و فشار بخار هوای سطح تبخیر شونده است. افزایش رطوبت هوا سبب می‌شود تا تفاضل فشار بخار هوا و سطح تبخیر شونده کاهش یابد. یکی از عوامل اصلی و نیروی موثر بر انتقال عمودی بخار از سطح تبخیرشونده تفاضل فشار بخار واقعی می‌باشد. بنابراین افزیش رطوبت هوا از شدت تبخیر ـ تعرق خواهد کاست. بدین خاطر است که در اقالیم مرطوب ممکن است تبخیر ـ تعرق گیاهان در حد قابل توجهی از شدت تشعشعات خالص کمتر باشد.

در صورتیکه انتقال بخار آب از یک سطح تبخیر شونده را مشابه انتقال جریان برق در

یک جسم هادی فرض نمائیم، شدت انتقال بخار آب متناسب با تفاضل فشار بخار و سهولت انتقال بخار در هوا می‌باشد. پس از برخورد باد یا جریان هوا با ناهمواری‌های سطح زمین یک سری جریان‌های چرخشی گردابی تشکیل شده که سبب ایجاد آشفتگی می‌شوند. سهولت انتقال بخار در یک لایه از آتمسفر متأثر از میزان آشفتگی و تلاطم موجود در آن لایه می‌باشد. شدت آشفتگی لایه مرزی روی سطح زمین متأثر از سرعت باد و زبری آیرودینامیک سطح است. آشفتگی هوا، بخار تشکیل شده بر روی سطح تبخیر شونده را به لایه‌های فوقانی منتقل نموده و هوای مرطوب روی سطح را با هوای خشک جایگزین می‌نماید. این فرآیند از تجمع بخار آب روی سطح تبخیر شونده و کاهش تفاضل فشار بخار، عامل انتقال بخار آب به لایه‌های فوقانی، جلوگیری می‌نماید. پایداری آتمسفر اثر قابل توجهی بر شدت آشفتگی هوا دارد و بدین لحاظ بر فرآیند تبخیر ـ تعرق موثر است.

۶ـ۱ـ اثر شرایط ایستگاه هواشناسی بر کیفیت داده‌های اقلیمی

داده‌های هواشناسی مورد استفاده در معادلات برآورد تبخیر ـ تعرق مرجع (ET_o) بایستی در شرایط اقلیمی که دارای ویژگی‌هائی مشابه تعریف ارائه شده برای سطح مرجع می‌باشد اندازه‌گیری و ثبت شوند. بنابراین داده‌های مذکور می‌بایستی بر روی یک سطح که دارای پوشش گیاهی وسیع بوده و در حد مطلوب آبیاری می‌شود اندازه‌گیری شده باشند. انرژی آزاد دریافتی بر روی یک سطح مرجع به سه مؤلفهٔ گرمای نهان تبخیر، گرمای محسوس و گرمای خاک تقسیم می‌شود. در حالیکه اگر سطح مرجع دارای پوشش گیاهی نباشد و یا در حد مطلوب آبیاری نشده باشد، مقدار قابل توجهی از انرژی دریافتی به جای آنکه در فرآیند تبخیر استفاده شود صرف گرم کردن خاک و نهایتاً تبدیل به گرمای محسوس خواهد شد. در چنین شرایط غیر استانداردی، دمای هوا افزایش یافته و به خاطر کاهش شدت تبخیر ـ تعرق از رطوبت هوا نیز کاسته می‌شود. در شرایط غیر استاندارد فشار بخار اشباع هوا افزایش یافته و از فشار بخار واقعی هوا نیز کاسته می‌شود. نقصان فشار بخار هوا، در شرایط غیر استاندارد به مراتب از شرایط استاندارد بیشتر خواهد بود و در صورتیکه در معادله برآورد ET استفاده شود سبب می‌گردد تا ET بیش

از مقدار واقعی برآورد گردد. بنابراین در صورتیکه از داده‌های یک ایستگاه هواشناسی غیر استاندارد برای برآورد تبخیر ـ تعرق استفاده شود، تبخیر ـ تعرق محاسبه شده به مراتب بیش از تبخیر ـ تعرق مرجع خواهد بود. به ایستگاه‌هائی که فاقد یک سطح وسیع با پوشش گیاهی که در حد مطلوب آبیاری می‌شود باشند، ایستگاه غیر استاندارد اطلاق می‌شود. روش‌های تبدیل داده‌های ایستگاه‌های غیر استاندارد به استاندارد در منابعی مانند نشریه شماره ۵۶ سازمان غذا و خواربار جهانی *(FAO)* ارائه شده است.

۷ـ۱ـ تبخیر ـ تعرق گیاهان زراعی

تبخیر ـ تعرق گیاهان زراعی به خاطر متفاوت بودن صفات فیزیولوژیکی، مورفولوژیکی، و آیرودینامیکی و سایر شرایط آنها با چمن و یا یونجه با تبخیر ـ تعرق گیاه مرجع یکسان نمی‌باشد. ضرائب گیاهی نمایانگر اثرات ویژگی‌های خاص هر یک از گیاهان است که ET آنها را از ET گیاهان مرجع متمایز می‌سازد. ضریب گیاهی نسبت تبخیر ـ تعرق یک گیاه خاص به تبخیر ـ تعرق گیاه مرجع است. تبخیر ـ تعرق مرجع به طور عمده نشانگر شرایط اقلیمی است و ضرایب گیاهی نمادی است از مشخصه‌های گیاهان و عملیات زراعی و نتیجتاً شرایط اقلیمی اثر قابل توجهی بر آن ندارد. بنابراین، بخاطر تفاوت‌های موجود در گیاهان زراعی، ضریب گیاهی هر گیاه مختص به خود آن گیاه می‌باشد. با توجه به تغییراتی که در مشخصه‌های گیاهان (مانند ارتفاع، مقاومت تاج، سطح سایه انداز و غیره) در طول فصل رشد ایجاد می‌شود، ضریب گیاهی (K_c) نیز در طول فصل زراعی تغییر خواهد کرد.

ضرائب گیاهی که در منابع مختلف ارائه شده است، معمولاً در مکان‌ها و شرایط اقلیمی دیگری به غیر از محل استخراج آنها قابل استفاده می‌باشند. این بدین خاطر است که در استخراج ضرائب گیاهی اثر شرایط اقلیمی در پارامتر ET_o لحاظ شده است. البته نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که نسبت ET_c/ET_o بسیاری از گیاهان زراعی در شرایط گرم و خشک و بادخیز بیشتر از شرایط اقلیمی مرطوب و یا با سرعت باد کمتر می‌باشد. مدیریت آبیاری بر نسبت ET_c/ET_o اثر فراوان دارد. مقدار تبخیر از سطح خاک تابعی از میزان سایه انداز و دور آبیاری می‌باشد. کاهش و یا افزایش دور آبیاری سبب می‌شود تا مقدار مولفه تبخیر از سطح خاک افزایش یا کاهش یابد. بنابراین عملیات زراعی و مدیریت

آبیاری در مزارعی که نیاز آبی گیاهان با استفاده از ضرائب گیاهی محاسبه می‌شود نبایستی بسیار متفاوت از شرایط مدیریتی در حین استخراج این ضرایب باشند. ضرائب گیاهی تحت شرایطی که گیاهان زراعی در حد مطلوب آبیاری شده و عاری از هرگونه عواملی که سبب کاهش رشد طبیعی و مناسب گیاه می‌شوند (مانند بیماری‌های گیاهی و یا کمبود مواد مغذی و غیره) بدست آمده‌اند. ضرائب گیاهی بیانگر تبخیر ـ تعرق گیاهان تحت شرایط پتانسیل رشد و نمو و تولید محصول می‌باشند. لهذا در صورتیکه رشد و نمو گیاهی کمتر از میزان پتانسیل باشد، قطعاً ضریب گیاهی آن کمتر از ضرائب گیاهی ارائه شده در منابع خواهد بود.

۱ـ۷ـ۱ـ ضرائب گیاهی واحد و دوتائی

ضرائب گیاهی معمولاً به دو روش متفاوت ارائه می‌شوند. روش اول که به آن ضریب گیاهی واحد [۱] (K_c)، اطلاق می‌شود، بیانگر اثر توأمان تبخیر از سطح خاک و تعرق گیاه در یک ضریب گیاهی واحد می‌باشد. با توجه به اینکه تبخیر از سطح خاک متأثر از فواصل آبیاری و یا تواتر باران است، ضریب گیاهی واحد نمادی از میانگین نسبت ET_c/ET_o در یک دورهٔ زمانی مانند یک هفته و یا طولانی‌تر خواهد بود. بنابراین ضریب گیاهی واحد معمولاً برای محاسبهٔ نیاز آبی گیاهان در صورتیکه با دور آبیاری هفته‌ای یا طولانی‌تر آبیاری شوند مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش دوم به نام ضریب گیاهی دوتائی [۲] است. در ضرایب گیاهی دوتائی تبخیر از سطح خاک (K_e) و تعرق گیاه (K_{cb}) جداگانه در نظر گرفته می‌شود.

$$K_c = K_{cb} + K_e \qquad [۱-۱]$$

$$ET_c = (K_{cb} + K_e)\, ET_o \qquad [۱-۲]$$

ضریب گیاهی K_{cb} بیانگر نسبت تبخیر ـ تعرق گیاه به تبخیر ـ تعرق مرجع است، زمانی که مقدار تبخیر از سطح خاک به جهت خشک شدن آن ناچیز باشد، مقدار تبخیر از سطح

1- Single crop coefficient *2- dual crop coefficient*

خاک (K_c) بعد از هر آبیاری در حد ماکزیمم و با خشک شدن سطح خاک از مقدار آن کاسته خواهد شد. استفاده از ضریب گیاهی دوتائی در روش‌های آبیاری با دور کوتاه، از دقت بیشتری برای برآورد نیاز آبی برخوردار است. زیرا مولفهٔ تبخیر از سطح به صورت مجزا محاسبه می‌شود. ضمناً از ضریب گیاهی دوتائی برای محاسبات روزانهٔ تغییرات رطوبت خاک در طول فصل رشد نیز می‌توان استفاده نمود. روش‌های محاسبه ضریب گیاهی واحد و دوتائی در نشریه‌های شماره ۲۴ و ۵۶ سازمان خواربار جهانی و نشریه شماره ۷۰ انجمن مهندسین عمران آمریکا [۱] ارائه شده است.

۸ـ۱ـ مدل‌های تبخیر ـ تعرق

۱ـ۸ـ۱ـ رابطهٔ پنمن

در آغاز قرن نوزدهم فردی به نام دالتون [۲] اعلام نمود که تبخیر از یک سطح تحت تأثیر باد، عوامل جوی، مقدار بخار هوا و ویژگی‌های سطح تبخیر شونده قرار دارد. فرضیه‌های مطرح شده توسط دالتون نقطه آغازین تلاش نوین بشر برای مطالعه فرآیند تبخیر و استخراج روابطی برای محاسبهٔ آن می‌باشد. سال‌ها پس از ارائه نظرات دالتون اولین معادله انتقال جرم برای برآورد شدت تبخیر از یک سطح توسط استلینگ [۳] (۱۸۸۲) ارائه شد. این معادله به نام دالتون نامگذاری شده است، زیرا منطبق بر تئوری‌های ارائه شده توسط دالتون می‌باشد. معادله انتقال جرم دالتون [۴] به قرار زیر است:

$$E = (a + bU)(e_o - e_a) \qquad [۱ـ۳]$$

که در آن:

E : شار انتقال گرمای نهان تبخیر (یا تبخیر ـ تعرق)

a, b : ضرائب تجربی

U : سرعت افقی باد

1- *ASCE*

2- *Dalton*

3- *Stelling*

4- *Daltonian mass transfer equation*

e_o : فشار بخار روی سطح تبخیر شونده

e_a : فشار بخار واقعی هوا در ارتفاعی بالای سطح تبخیر شونده

با توجه به محدودیت کاربرد معادله دالتون، باون [1] (۱۹۲۶) رابطهٔ زیر را برای محاسبه تبخیر یا تبخیر ـ تعرق ارائه نمود:

$$BR = H/E \qquad [۱-۴]$$

که در آن:

BR : نسبت باون

H : شار انتقال گرمای محسوس

در صورت استفاده از روابط آیرودینامیک می‌توان نسبت باون را به صورت زیر نوشت:

$$BR = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \qquad [۱-۵]$$

که در آن:

γ : ثابت سایکرومتریک

ΔT : تفاوت دما در دو ارتفاع مختلف روی سطح تبخیر شونده

Δe : تفاوت فشار بخار واقعی متناظر با ΔT.

با قرار دادن نسبت باون در معادلهٔ تراز انرژی معادله زیر برای بدست آوردن E حاصل می‌شود:

$$E = \frac{Rn - G}{۱ + BR} \qquad [۱-۶]$$

که در آن:

Rn : شار تشعشعات خالص.

G : شار گرمای خاک.

1- *Bowen*

معادله باون از دقت لازم برای محاسبه ET در دوره‌های زمانی کمتر از یک ساعت برخوردار است. البته در صورتی که از سنسورهائی استفاده شود که از دقت بسیار بالائی برخوردار بوده و بتوانند داده‌های موردنظر را در زمان‌های بسیار کوتاه مانند دقیقه ثبت نمایند. از معادله باون برای محاسبه تبخیر ـ تعرق واقعی در مدت زمان‌های کمتر از نیم ساعت و نیز کالیبراسیون دیگر مدل‌های تبخیر ـ تعرق مانند پنمن و یا پنمن ـ مانتیس استفاده می‌شود. لیکن مشکل اساسی روش باون و معادله دالتون نیاز به اندازه‌گیری پارامترهای هواشناسی در دو ارتفاع مختلف می‌باشد. پنمن (۱۹۴۸) با تلفیق رابطه دالتون، قانون تراز انرژی و روابط آیرودینامیک توانست معادله‌ای را استخراج نماید که به اندازه‌گیری پارامترها فقط در یک ارتفاع نیاز دارد. البته در رابطه پنمن فرض گردیده است که انتقال بخار آب از سطح خارجی برگ‌ها آغاز می‌شود و نه از داخل حفره روزنه، بنابراین در استخراج معادله پنمن فرض شده است که گیاهان هیچگونه مقاومت فیزیولوژیکی را در مسیر انتقال بخار آب به آتمسفر اعمال نمی‌نمایند. این ساده نگری تنها برای انتقال بخار از سطح آب آزاد و یا از یک سطح با پوشش گیاهی تنها پس از باران و یا تشکیل شبنم اعتبار دارد. یکی دیگر از محدودیت‌های معادله پنمن، عدم لحاظ نمودن ویژگی‌های آیرودینامیکی سطح تبخیر شونده می‌باشد. زبری و ناهمواری آیرودینامیک تاج گیاهان تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر فرآیندهای انتقال گرمای محسوس، گرمای نهان تبخیر و مومنتم دارد. بدین خاطر اصلاحات متعددی در تابع باد معادله پنمن اعمال شده تا بتوان اثر ارتفاع گیاهان را لحاظ نمود. تابع اصلی باد در معادله پنمن رانیز نمی‌توان برای حالت‌های مختلف پایداری آتمسفر تعدیل کرد.

۲ـ۸ـ۱ـ رابطهٔ پنمن ـ مانتیس

همانطور که قبلاً ذکر گردید در معادله پنمن فرض شده است که در مسیر انتقال بخار آب هیچگونه مقاومت فیزیولوژیکی اعمال نمی‌شود، لیکن تحقیقات متعدد نشان می‌دهد

که گیاهان حتی در شرایط تبخیر ـ تعرق پتانسیل در مسیر انتقال بخار آب از حفره روزنه به سطح خارجی برگ مقداری مقاومت اعمال می‌نمایند. البته اندازهٔ این مقاومت (مقاومت روزنه) در گیاهان متفاوت است. پس از انتقال بخار آب به سطح خارجی برگ، بخار آب همراه جریان‌های چرخشی [1] که روی پوشش گیاهی شکل می‌گیرد به لایه‌های فوقانی هوا منتقل می‌شود. شدت انتقال در این مرحله متناسب با شدت آشفتگی ایجاد شده روی پوشش گیاهی است. بدون تردید ناهمواری‌های سطح و افزایش سرعت باد سبب می‌شوند تا قدرت اختلاط هوا افزایش یافته و انتقال بخار از سطوح گیاهی با سهولت بیشتری شکل گیرد. مقاومت لایه هوا برای انتقال بخار آب را مقاومت آیرودینامیک (R_a) می‌نامند. R_a تحت تأثیر ویژگی‌های سطح تبخیر شونده (زبری آیرودینامیک)، سرعت باد و حالت پایداری اتمسفر قرار دارد. مانتیس با در نظر گرفتن مقاومت روزنه و مقاومت ائرودینامیک معادلهٔ پنمن را بار دیگر استخراج نمود. شایان ذکر است که به خاطر شباهت فرآیندهای انتقال بخار آب و گرمای محسوس، مقاومت آیرودینامیک برای دو فرآیند مذکور برابر در نظر گرفته می‌شود.

مانتیس در استخراج معادله جدید پنمن ـ مانتیس فرض نمود که مسیر حرکت بخار آب از گیاه به آتمسفر از دو قسمت تشکیل شده است. در قسمت اول، بخار آب از داخل حفره روزنه به سطح برگ منتقل می‌شود. عامل انتقال در این مرحله اختلاف فشار بخار اشباع در دمای برگ (فشار واقعی حفرهٔ روزنه) و فشار بخار واقعی روی سطح برگ و مقاومت گیاه در این مسیر انتقال مقاومت روزنه است. مقاومت روزنه عمدتاً بیانگر مقدار باز و بسته بودن دهانه روزنه است. مقاومت روزنه متأثر از ویژگی‌های فیزیولوژیکی گیاه است و در حقیقت مکانیزمی است که توسط آن گیاه در مقابل شرایط اقلیمی و محیطی مانند کم‌آبی، تشعشعات آفتاب و غیره عکس‌العمل نشان می‌دهد.

قسمت دوم از فرآیند تعرق از انتقال بخار آب از سطح برگ به آتمسفر تشکیل شده

1- eddy

است. عامل انتقال اختلاف فشار بخار واقعی در سطح برگ و در ارتفاعی (به عنوان دومین سطح مبناء) در لایه هوای فوقانی پوشش گیاهی بوده و مقاومت در این مسیر "مقاومت آیرودینامیک" می‌باشد. مانتیس (۱۹۶۴) با فرض اینکه شدت انتقال بخار در دو قسمت ذکر شده یکسان می‌باشد، دو معادله مشابه معادله اهم برای تعیین و محاسبه شدت انتقال بخار از حفره روزنه به سطح برگ و از سطح برگ به هوای اطراف گیاه ارائه نمود. وی با تلفیق دو معادله مذکور توانست نیاز به اندازه‌گیری پارامترهائی مانند دمای برگ و فشار بخار واقعی روی سطح برگ را حذف نماید. بدین ترتیب معادله‌ای استخراج گردید که اثر مقاومت‌های پوشش گیاهی و آیرودینامیک در آن لحاظ شده است. لیکن نیاز به اندازه‌گیری داده‌های اقلیمی تنها در یک ارتفاع مانند دو متری از سطح تبخیر شونده می‌باشد. بنابراین در صورتیکه مقادیر واقعی مقاومت روزنه (R_c) و مقاومت آیرودینامیکی (R_a) در معادله پنمن ـ مانتیس قرار داده شود، این معادله قادر است حتی بدون نیاز به ضریب گیاهی، تبخیر ـ تعرق گیاهان را تحت هر شرایط ممکن برآورد نماید. البته این نکته منوط به آن است که بتوان مقادیر پارامترهای R_a و R_c را تحت شرایط مختلف اقلیمی و محیطی برآورد نمود. پس از ارائه معادله پنمن ـ مانتیس مطالعات متعددی انجام شده تا اثر مولفه‌های مختلف بر R_a و R_c تعیین شود. چگونگی اثر فواصل کاشت، ارتفاع گیاه، زبری سطح و حالت پایداری بر R_a کاملاً مورد تحقیق قرار گرفته و مشخص شده است. همچنین روند تغییرات R_c به ازاء شدت تشعشعات آفتاب، نقصان فشار بخار و رطوبت خاک بررسی شده و روابطی برای برآورد R_c به عنوان تابعی از پارامترهای مذکور در منابع موجود می‌باشد. لیکن با توجه به پیچیدگی کنترل تعرق توسط روزنه‌ها و تأثیر فاحش فاکتورهای متعدد بر R_c، روابط ارائه شده برای برآورد آن کاربردی نبوده و تنها در سطوح تحقیقاتی بسیار پیشرفته کاربرد داشته است. در ادامه روابط مورد نیاز برای محاسبه تبخیر ـ تعرق مرجع با سه روش پنمن ـ رایت، پنمن ـ مانتیس و هارگریوز ـ سامانی ارائه شده است.

۹-۱- روابط مورد نیاز برای محاسبهٔ تبخیر ـ تعرق مرجع

۱-۹-۱- معادلهٔ پنمن ـ مانتیس

در سال‌های اخیر FAO معادله پنمن ـ مانتیس را به عنوان معادله استاندارد برای برآورد تبخیر ـ تعرق مرجع انتخاب نمود. البته سطح مبناء در تعریف جدید FAO یک سطح فرضی است که ارتفاع، مقاومت سطحی و ضریب انعکاس آن به ترتیب برابر با ۱۲ سانتیمتر، ۷۰ ثانیه بر متر و ۰/۲۳ می‌باشد. البته ویژگی‌های لحاظ شده برای سطح تبخیر شونده مفروض نسبتاً برابر با ویژگی‌های یک سطح چمن که در حد مطلوب به صورت هفتگی آبیاری می‌شود، می‌باشد.

معادله پنمن ـ مانتیس به قرار ذیل می‌باشد:

$$ET_O = \frac{0.408\,\Delta\,(R_n - G) + \gamma \dfrac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0.34\,u_2)} \qquad [۱-۷]$$

که در آن:

ET_0 : تبخیر ـ تعرق مرجع، (mm/day).

R_n : شار تشعشعات خالص، (MJ/m^2 /day).

G : شار حرارت خاک، (MJ/m^2 /day^{-1}).

T : دمای میانگین هوا در ارتفاع دو متری، (°C).

u_2 : سرعت باد در ارتفاع دو متری، (m/sec).

e_s : فشار بخار اشباع، (Kpa).

e_a : فشار بخار واقعی، (Kpa).

Δ : شیب منحنی فشار بخار اشباع، (Kpa/°C).

γ : ثابت سایکرومتر، (Kpa/°C).

900 : ضریبی برای گیاه مرجع، (KJ.Kg.° $K.d^{-1}$).

0.34 : ضریب باد برای گیاه مرجع، (sec/m).

روابط مربوط برای محاسبهٔ پارامترهای معادله فائو ـ پنمن ـ مانتیس با ذکر یک مثال تشریح می‌شود.

مثال:

اطلاعات هواشناسی ایستگاه مهرآباد در روز دهم ماه هفتم سال ۱۹۹۸ به صورت زیر می‌باشد. تبخیر ـ تعرق مرجع را به روش فائو ـ پنمن ـ مانتیس محاسبه نمایید.

دمای حداقل	۲٤°C
دمای حداکثر	٤۰°C
دمای تر هوا	۱۹/۹°C
دمای خشک هوا	۳۲°C
دمای نقطه شبنم	۱۲/۳°C
سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری	۱/۸m/sec
ارتفاع از سطح دریا	۱۱۹۰/۸m
شماره روز در سال میلادی	۱۹۱

ـ گرمای نهان تبخیر(λ):

$$\lambda = 2.501 - (2.361\times10^{-3})T \qquad [۱-۸]$$

که در آن

λ : گرمای نهان تبخیر ($MJ.Kg^{-1}$).

T : دمای متوسط هوا، (°C).

$$\lambda = 2.501 - (2.361\times10^{-3})\times32 = 2.423 MJ/Kg$$

ـ شیب منحنی تغییرات فشار بخار اشباع (Δ):

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T+237.3)^2} = \frac{4098\times\left[0.6108\exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)\right]}{(T+237.3)^2} \qquad [۱-۹]$$

که در آن:

Δ : شیب منحنی تغییرات فشار بخار اشباع، (Kpa/°C).

T : دمای هوا، (°C).

e_s : فشار بخار اشباع در دمای T، (Kpa).

$$\Delta = \frac{4098 \times \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27 \times 32}{32 + 237.3}\right)\right]}{(32 + 237.3)^2} = 0.269 \text{kpa} / °\text{C}$$

ـ ثابت سایکرومتر(رطوبت‌سنجی) (γ):

$$\gamma = \frac{Cp \times P}{\varepsilon \lambda} 10^{-3} = 0.00163 \frac{P}{\lambda} \qquad [۱-۱۰]$$

که در آن:

γ : ثابت سایکرومتر، (Kpa/°C).

Cp : گرمای ویژه هوای مرطوب معادل 1.103، (KJ/ Kg/°C).

P : فشار اتمسفر، (Kpa).

ε : نسبت وزن مولکولی بخار آب به وزن مولکولی هوای خشک معادل 0.622.

λ : گرمای نهان تبخیر، (MJ/ kg).

$$\gamma = 0.00163 \frac{87.994}{2.425} = 0.059 \text{kpa} / °\text{C}$$

ـ فشار اتمسفر (P):

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 Z}{293}\right)^{5.26} \qquad [۱ - ۱۱]$$

که در آن:

Z : ارتفاع از سطح دریا، (m).

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 \times 1190.8}{293}\right)^{5.26} = 87.994 \text{kpa}$$

ـ فشار بخار اشباع (e_s):

$$e_s = e^\circ(T) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right) \qquad [۱-۱۲]$$

که در آن:

e_s: فشار بخار اشباع، (Kpa).

$e^\circ(T)$: تابع فشار بخار اشباع، (Kpa).

T : دمای هوا، (°C).

e_s به صورت روزانه (۲٤ ساعته) از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \qquad [۱-۱۳]$$

که در آن:

T_{max} : حداکثر دمای روزانه، (°C).

T_{min} : حداقل دمای روزانه، (°C).

$$e^\circ(T_{max}) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27 \times 40}{40+237.3}\right) = 7.378 kpa$$

$$e^\circ(T_{min}) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27 \times 24}{24+237.3}\right) = 2.985 kpa$$

ـ فشار بخار واقعی (e_a):

فشار بخار واقعی در نقطه شبنم به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$e_a = e^\circ(T_{dew}) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27 T_{dew}}{T_{dew}+237.3}\right) \qquad [۱-۱۴]$$

که در آن:

e_a: فشار بخار واقعی، (kpa).

T_{dew}: دمای نقطه شبنم، (°C).

برای محاسبه فشار بخار واقعی با استفاده از دمای تر و خشک از روابط زیر استفاده می‌گردد:

$$e^{\circ}(T_{wet}) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27 T_{wet}}{T_{wet} + 237.3}\right) \qquad [۱ - ۱۵]$$

که در آن T_{wet} عبارت است از دمای تر هوا برحسب درجه سانتیگراد.

$$e^{\circ}(T_{wet}) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27 \times 19.9}{19.9 + 237.3}\right) = 2.325 \text{kpa}$$

$$e_a = e^{\circ}(T_{dew}) = e^{\circ}(T_{wet}) - \gamma(T_{dry} - T_{wet}) \qquad [۱ - ۱۶]$$

که در آن T_{dry} عبارت است از دمای خشک هوا بر حسب درجه سانتیگراد.

$$e_a = 2.325 - 0.059(32 - 19.9) = 1.61 \text{kpa}$$

ـ کمبود فشار بخار (VPD)

برای دوره‌های ۲٤ ساعته کمبود فشار بخار از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$VPD = e_s - e_a = \frac{e^{\circ}(T_{max}) + e^{\circ}(T_{min})}{2} - e_a \qquad [۱ - ۱۷]$$

که در آن:

VPD : کمبود فشار بخار، (Kpa).

$e^{\circ}(T_{max})$: فشار بخار اشباع در T_{max}، (Kpa).

$e^{\circ}(T_{min})$: فشار بخار اشباع در T_{min}، (Kpa).

$$VPD = e_s - e_a = \frac{7.378 + 2.985}{2} - 1.611 = 3.571 kpa$$

ـ تشعشع خورشیدی در بالای جو (R_a):

$$R_a = 37.6 d_r (\omega_s \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \sin\omega_s) \qquad [۱ - ۱۸]$$

که در آن:

R_a : تشعشع خورشیدی رسیده به بالای جو، ($MJ/m^2/d$).

d_r : فاصله نسبی زمین تا خورشید.

δ : زوایه انحراف خورشیدی از سطح استوا، (rad).

ω_s : زوایه انحراف خورشیدی به هنگام طلوع آفتاب، (rad).

ϕ : عرض جغرافیایی ایستگاه، (rad).

مقادیر δ، d_r و ω_s از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\omega_s = \text{Arc cos}\ \left(-\tan\phi \tan\delta\right) \qquad [۱ - ۱۹]$$

$$[۱ - ۲۰]$$

$$dr = 1 + 0.033\cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) = 1 + 0.033\cos\left(0.0172 J\right)$$

$$\delta = 0.409\sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) = 0.409\sin\left(0.0172\, J - 1.39\right) \qquad [۱ - ۲۱]$$

J : شماره روز در سال میلادی.

$$\delta = 0.409\sin(0.0172 \times 191 - 1.39) = 0.388 rad$$

$$d_r = 1 + 0.033\cos(0.0172 \times 191) = 0.967$$
$$\omega_s = \text{Arccos}\left(-\tan 0.623 \tan 0.388\right) = 1.869 \text{rad}$$

R_a=37.6×0.967(1.869sin0.623sin0.388+cos0.623cos0.388sin1.869)= 41.128MJ/m^2/d

ـ ساعات روشنایی روز (N):

$$N = \frac{24}{\pi}\omega_s = 7.64\ \omega_s \qquad [۱-۲۲]$$

که در آن:

N : حداکثر ساعات آفتابی در روز، (hr).

$$N = 7.64 \times 1.869 = 14.28 \text{hr}$$

ـ تشعشع خالص (R_n):

$$R_n = 0.77\left(0.25 + 0.5\frac{n}{N}\right)R_a - 4.903\times10^{-9}\left(0.9\frac{n}{N} + 0.1\right)\times \left(0.34 - 0.14\sqrt{e_a}\right)\times\frac{\left(T_{kx}^4 + T_{kn}^4\right)}{2} \qquad [۱-۲۳]$$

که در آن:

n : ساعات آفتابی واقعی در روز، (hr).

N : حداکثر ساعات آفتابی در روز، (hr).

Ra : تشعشعات خورشیدی رسیده به بالای جو زمین، (MJ/m^2/d).

T_{kx} : حداکثر دمای روزانه، (°K).

T_{kn} : حداقل دمای روزانه، (°K).

$$R_n = 0.77\left(0.25 + 0.5\frac{12.5}{14.28}\right) \times 41.128 - 4.903 \times 10^{-9} \times$$
$$\left(0.9\frac{12.5}{14.28} + 0.1\right) \times \left(0.34 - 0.14\sqrt{1.611}\right)\left(\frac{313^4 + 297^4}{2}\right) =$$
$$15.56 MJ/m^2/d$$

ـ جریان حرارتی خاک (G):

برای محاسبات روزانه، G را می‌توان با استفاده از رابطهٔ زیر برآورد نمود:

$$G = 0.38\left(T_{day_i} - T_{day_{i-1}}\right) \qquad [۱-۲۴]$$

که در آن:

G : جریان حرارتی خاک، $(MJ/m^2/d)$.

T_{day_i} : میانگین دمای روزانه هوا، $(^\circ C)$.

$T_{day_{i-1}}$: میانگین دمای روزانه هوا در روز یا ماه قبل، $(^\circ C)$.

$$G = 0.38(32 - 29.1) = 1.102 MJ/m^2/d$$

ـ سرعت باد (u_2):

برای تعدیل ارقام سرعت باد که از تجهیزات نصب شده در ارتفاعات مختلف به دست آمده به ارتفاع استاندارد ۲ متری، از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$u_2 = u_z \frac{Ln\left(\frac{Z_2 - d}{Z_{om}}\right)}{Ln\left(\frac{Z_m - d}{z_{om}}\right)} \qquad [۱-۲۵]$$

که در آن:

u_z: متوسط سرعت باد اندازه‌گیری شده در ارتفاع Z، (m/sec).

u_2: متوسط سرعت باد در ارتفاع ۲ متری، (m/sec).

Z_m: ارتفاع اندازه‌گیری سرعت باد، (m).

Z_2: ارتفاع استاندارد اندازه‌گیری سرعت باد، (m).

d: ارتفاع جابجایی سطح صفر پروفیل باد، (m).

Z_{om}: پارامترهای ناهمواری برای اندازه حرکت، (m).

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

$$Z_{om} = 0.123\, h_c$$

h_c: ارتفاع پوشش گیاهی، برابر ۰/۱۲ متر.

$$d = \frac{2}{3} \times 0.12 = 0.08m$$

$$Z_{om} = 0.123 \times 0.12 = 0.015m$$

$$u_2 = 1.80 \frac{Ln\left(\frac{2-0.08}{0.015}\right)}{Ln\left(\frac{10-0.08}{0.015}\right)} = 1.345m/s$$

با جاگذاری پارامترهای محاسبه شده در معادله اصلی خواهیم داشت:

$$ET_o = \frac{0.408 \times 0.269(15.56 - 1.102) + 0.059 \frac{900}{32+273} 1.345 \times 3.571}{0.269 + 0.059(1 + 0.34 \times 1.345)} =$$

$6.83mm/day$

۲-۹-۱- معادلهٔ پنمن ـ رایت:

تابع باد در معادلهٔ پنمن در شرایط اقلیمی متفاوتی کالبیره و ارائه شده است. رایت (۱۹۸۲) تابع باد را برای شرایط گرم و خشک ایالت آیداهو در غرب آمریکا تصحیح نمود. معادله پنمن با اصلاحات رایت معادله پنمن ـ رایت نامیده شده است. گیاه مرجع در معادلهٔ پنمن ـ رایت یونجه می‌باشد. بنابراین می‌بایستی در انتخاب ضرائب گیاهی برای محاسبه تبخیر ـ تعرق به این نکته توجه نمود. البته ضریب $1/1.35$ الی $1/1.15$ برای تعدیل تبخیر ـ تعرق یونجه به چمن ارائه شده است (ASCE,79). معادله پنمن ـ رایت به قرار ذیل می‌باشد:

$$\lambda ET_r = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma}(R_n - G) + \frac{\gamma}{\Delta+\gamma} 6.43 f(u)(e_s - e_a) \qquad [۱-۲۶]$$

که در آن:

λ : گرمای نهان تبخیر، (MJ/kg).

ET_r : تبخیر ـ تعرق گیاه مرجع (یونجه)، (mm/day).

R_n : تشعشع خالص، ($MJ/m^2/d$).

G : جریان گرمایی خاک، ($MJ/m^2/d$).

(در رابطه فوق برای محاسبه G به جای $T_{day_{i-1}}$ از میانگین دمای ۳ روز قبل استفاده می‌گردد.)

γ : ثابت سایکرومتریک، (Kpa/°C).

Δ : شیب منحنی فشار بخار، (Kpa/°C).

(e_s-e_a) : کمبود فشار بخار هوا، (Kpa).

$f(u)$: تابع باد

$$f(u) = a_w + b_w \times u_2 \qquad [۱-۲۷]$$

u_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین، (Km/day).

در رابطه فوق و رابطه تبدیل مقدار u_z به u_2 مقادیر سرعت برحسب کیلومتر در روز می‌باشد.

$$a_w = 0.4 + 1.4\exp(-((J-173)/58)^2)$$
$$b_w = 0.007 + 0.004\exp(-((JD-243)/80)^2)$$

J : روز ژولیوسی، شماره روز از سال از اول ژانویه.

مقدار R_n با استفاده از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$R_n = (1-\alpha)R_s - \sigma\left(\frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2}\right)\left(a_1 - 0.139\sqrt{e_a}\right)\left(a\frac{R_s}{R_{so}} + b\right) \qquad [۱-۲۸]$$

α : ضریب انعکاس گیاه یا آلبیدو سطح.

مقدار α برای گیاه یونجه با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = 0.29 + 0.06\sin((J+96)/57.3)$$

R_s : تشعشع خورشیدی رسیده به سطح زمین ($MJ/m^2/hr$ یا $MJ/m^2/d$)

$$R_s = \left(0.25 + 0.5\frac{n}{N}\right)R_a \qquad [۱-۲۹]$$

در روابط بالا:

σ : ثابت استفان بولتزمن $\left(4.903\times10^{-9}\ MJ/m^2/d/^\circ K^4\right)$.

T_{max} :حداکثردرجه حرارت روزانه، $(^\circ C)$.

T_{min} :حداقل درجه حرارت روزانه، $(^\circ C)$.

e_a : فشار بخار واقعی، (Kpa).

a_1: ضریب تجربی که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$a_1 = 0.26 + 0.1\exp\left(-\left(0.0154(J-180)\right)^2\right) \qquad [۱-۳۰]$$

R_{so}: تشعشعات خورشیدی، زمانی که آسمان صاف و بدون ابر می‌باشد، $(MJ/m^2/d)$.

$$R_{so} = 0.75\ R_a$$

R_a: تشعشعات خارج از جو، $(MJ/m^2/d)$.

اگر $\frac{R_S}{R_{SO}} < 0.7$ باشد آنگاه b= -0.07 و a= 1.126،

اگر $\frac{R_s}{R_{so}} \rangle 0.7$ باشد آنگاه b= -0.06 و a=1.017 خواهند بود.

۳-۹-۱- معادلهٔ هارگریوز ـ سامانی

با توجه به محدویت داده‌های هواشناسی در اکثر مناطق، هارگریوز و همکاران معادله‌ای را ارائه نموده‌اند که براساس تفاوت دمای حداکثر و حداقل روزانه و تشعشعات آفتاب درسطح لایه خارجی جو تبخیر ـ تعرق گیاه چمن را برآورد نماید. معادله هارگریوز و همکاران (۱۹۸۵) به قرار زیر است:

$$ET_0 = 0.0023\ R_a\ TD^{0.5}\ (T_{mean} + 17.8) \qquad [۱-۳۱]$$

TD : تفاوت دمای حداکثر و حداقل روزانه، (سانتیگراد).

R_a : شدت تشعشعات آفتاب در سطح لایه خارجی جو، (میلیمتر آب تبخیرپذیر).

T_{mean} : میانگین دمای حداکثر و حداقل روزانه، (سانتیگراد).

منابع فصل اول:

1- Doorenbos, J., and Pruitt, W.O. 1977. Guide lines for Predicting crop water requirements, Irrig. Drain. Paper 24, FAO, Rome.

2- Jensen, M.E., Wright, J.L., and Pratt, B.J. 1971. Estimating soil moisture depletion from Climate, Crop and soil data, Transactions, Agricultural Engineers, 14:954-959.

3- Sarma, M.L. 1985. Estimating evapotranspiratin, Advances in irrigation, D. Hilled, ed., Vol. 3, Academic Preu, PP. 213-281.

فصل دوم

پارامترهای مؤثر در تعیین عمق آب آبیاری
(راندمان‌های آبیاری، محاسبه آب شستشو و باران مؤثر)

تهیه کنندگان:

دکتر جمشید خیرابی

مهندس محمدرضا انتصاری

مهندس محمدحسین سادات‌میرئی

۱ـ۲ـ راندمان‌های آبیاری

۱ـ۱ـ۲ـ مقدمه

راندمان در مفهوم فیزیکی آن نسبت ستانده‌ها به داده‌هاست و بخش مفید به بخش مصرف شده است مثل انرژی، کار و غیره که معمولاً بر حسب درصد بیان می‌شود.

این مفهوم در شاخه‌های دیگر علوم و فنون نیز رایج است و بسته به مقتضیات و اهداف و نیازهای آن بخش، به کار گرفته می‌شود.

در رشته مهندسی آبیاری در رابطه با منابع، مخازن و ذخیره آب یا انتقال آن به نقاط مصرف، توزیع در مزرعه، و واحدهای آبیاری، تأمین آب مورد نیاز محصولات، کارآیی «آب و آبیاری» جهت نیل به اهداف مختلف (مثل تلفات آب، عملکرد محصول، سود خالص، و غیره) راندمانهایی تعریف می‌شود که اکثراً بر مبنای فیزیکی آن استوار است (و گاه از آن عدول می‌کند، از آنجمله است راندمان ذخیره)[۱]

رایجترین راندمانها به زبان علمی و در عین حال ساده به قرار زیر قابل طرح است:

در شرایطی که آب در یک منبع، مخزن و یا پشت سد جمع می‌شود، و مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد ممکن است به علت نفوذ، نشت و یا تبخیر و غیر آن، آبهای ورودی و خروجی برابر نباشد که اکثراً چنین است. لذا راندمانی بنام راندمان مخزن را، با هدف تعیین میزان تلفات آب می‌توان به قرار زیر تعریف نمود:

۲ـ۱ـ۲ـ راندمان مخزن

$$\text{راندمان مخزن} = \frac{\text{مقدار آبیکه از مخزن خارج می‌شود}}{\text{مقدار آبیکه به مخزن وارد شده}} \times ۱۰۰ \qquad [۱-۲]$$

آب خروجی از مخزن به طرق مختلف مثل کانال خاکی، کانال‌های پوشش‌دار، کانال هوایی یا زیرگذر، سیفون، اکدوک تونل، شبکه لوله‌های تحت فشار، کم فشار و بدون فشار و غیره تا سر واحدهای زراعی منتقل می‌شود، و در حین انتقال به دلایل مختلف مثل

۱ـ توضیح آنکه پاره‌ای اوقات بنا به ماهیت کار و بنا به ضرورت بین منطق مهندسی و منطق ریاضی دوگانگی به وجود می‌آید، که موجه است.

نفوذ، تبخیر، نشت، وجود علف‌های هرز و غیره مقداری تلف می‌شود لذا با هدف تعیین میزان تلفات از مبادی ورودی سیستم انتقال تا رسیدن به محل مصرف، راندمانی به نام «راندمان انتقال شبکه» به قرار زیر تعریف می‌شود:

۳ـ۱ـ۲ـ راندمان انتقال شبکه

$$\text{راندمان انتقال کل شبکه آبیاری} = \frac{\text{مقدار آبیکه به منطقه تحت آبیاری رسیده}}{\text{مقدار آبیکه از منبع منشعب شده}} \times ۱۰۰ \qquad [۲ـ۲]$$

راندمان انتقال را همچنین، در صورت ضرورت، می‌توان برای مسیرها و مقاطع مختلف شبکهٔ انتقال (مثل ابتدا و انتهای کانال اصلی، کانال درجه ۱، ۲، ۳ و...) تعریف و مورد اندازه‌گیری قرار داد. و یا ممکن است لازم باشد راندمان انتقال و میزان تلفات بین مقاطع مختلف با فواصل معین (مثلاً ۵۰۰ متری و ۱۰۰۰ متری و غیره در طول هر یک از کانالها و مسیرها) تعیین گردد. در صورتی که اندازه‌گیری میزان تلفات از هر مقطع و مبداء دلخواه در شبکه تا سر مزرعه و یا مزارع موردنظر باشد، راندمان انتقال آن بخش از شبکه ذکر می‌شود، مثل راندمان انتقال آخرین انشعاب، و یا راندمان انتقال از محل تحویل آب به کشاورز تا سر مزرعه.

۴ـ۱ـ۲ـ راندمان انتقال مزرعه

بخشی از آب در انهار داخل مزرعه، تا رسیدن به سر قطعات آبیاری، تلف می‌شود لذا برای تعیین آن، اصطلاح راندمان انتقال مزرعه را بکار می‌برند که به قرار زیر تعریف می‌شود:

$$\text{راندمان انتقال مزرعه} = \frac{\text{مقدار آبی که وارد قطعات آبیاری شده}}{\text{مقدار آبی که وارد مزرعه شده}} \times ۱۰۰ \qquad [۲ـ۳]$$

در مباحث کاربردی، این دو راندمان(یعنی راندمان انتقال شبکه و مزرعه) یک جا، و تحت عنوان راندمان انتقال نامیده می‌شود.

۵ـ۱ـ۲ـ راندمان کاربرد آبیاری (E_a)

همه مقدار آبی که وارد قطعهٔ تحت آبیاری می‌شود در عمق موثر توسعه ریشه ذخیره نمی‌شود، بلکه بخشی از آن به اعماق می‌رود و از دسترس ریشه خارج می‌گردد، بخش دیگر نیز ممکن است از زهکشهای سطحی مزرعه خارج گردد که همه جزو تلفات به حساب می‌آید. هرچه ابعاد قطعه و واحدهای آبیاری بزرگتر باشد تلفات ناشی از نفوذ عمقی بیشتر خواهد بود. همچنین تلفات جریان سطحی در روشهایی که مثل آبیاری نشتی اساس طراحی آنها مبتنی بر وجود زهاب است بیشتر است. مقدار این تلفات در روشهای نوین آبیاری سطحی (که ابعاد واحدهای آبیاری در مقایسه با روشهای سنتی بیشتر است) بسته به روش آبیاری، نوع طراحی، اجرا و مدیریت، در بهترین حالت حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد است.

راندمان کاربرد آبیاری به قرار زیر تعریف می‌شود:

$$E_a = \text{راندمان کاربرد آبیاری} = \frac{\text{مقدار آبی که در عمق مؤثر توسعه ریشه‌ها ذخیره شده}}{\text{مقدار آبی که وارد قطعه آبیاری شده}} \times ۱۰۰ \qquad [۲-۴]$$

۶ـ۱ـ۲ـ راندمان ذخیره یا راندمان کفایت آبیاری (E_s)

هدف از تعریف و تعیین این راندمان مربوط به تلفات آب نیست بلکه منظور اینست که آیا عمق موثر توسعه ریشه‌ها به رطوبت مطلوب رسیده یا نه؟ چراکه دریک آبیاری ممکن است آب کمتر از میزان لازم در اختیار قطعه آبیاری گذاشته شود، حتی ممکن است تلفات به صفر هم برسد ($E_a = ٪۱۰۰$) ولی در عوض گیاه جیره مورد نیاز خود را دریافت نکند.

اصولاً، جز موارد استثنائی، هرچه راندمان ذخیره کمتر باشد راندمان کاربرد بیشتر می‌شود لذا بالا بودن راندمان کاربرد آبیاری همیشه نشانه مثبتی به حساب نمی‌آید مگر اینکه راندمان ذخیره صد در صد (و یا در حد قابل‌قبول) باشد.

راندمان ذخیره به قرار زیر تعریف می‌شود:

$$E_s = \frac{\text{مقدار آبی که در عمق موثر توسعه ریشه‌ها ذخیره شده}}{\text{مقدار آبی که لازم بود ذخیره شود}} \times ۱۰۰ \qquad [۲-۵]$$

به عنوان مثال، اگر لازم بود عمق ۶۰ سانتیمتری خاک به رطوبت مطلوب برسد ولی در عمل فقط عمق ۳۰سانتیمتری به این حد از رطوبت رسیده باشد، راندمان ذخیره به قرار زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{راندمان ذخیره} = \frac{۳۰}{۶۰} \times ۱۰۰ = ٪۵۰$$

ویا به عنوان مثال دیگر، اگر جیره آبیاری (عمق ناخالص آبیاری در هر نوبت) ۸۰ میلیمتر باشد و آبیکه در اختیار گیاه قرار می‌گیرد ۶۰میلیمتر باشد راندمان ذخیره معادل ۷۵ درصد ($\frac{۶۰}{۸۰} \times ۱۰۰$) خواهد بود.

کاهش راندمان ذخیره ممکن است به علت سوء مدیریت و یا به عکس در چهارچوب برنامه حساب شده «کم آبیاری» صورت بگیرد، در حالت دوم و در صورت ایجاد تعادل منطقی بین آب صرفه‌جویی شده، کاهش پاره‌ای هزینه‌ها و افزایش سطح زیرکشت از یکسو، و کاهش عملکرد در هکتار و افزایش برخی دیگر از هزینه‌ها از سوی دیگر، می‌توان از واحد آب، عملکرد و یا سود بیشتری به دست آورد (کم آبیاری نیمه کلاسیک). در صورتیکه کم آبیاری به عنوان یک روش کلاسیک (کم آبیاری تنظیم شده) صورت بگیرد و بهینه‌سازی شود در اینصورت می‌توان از واحد آب حداکثر عملکرد، و یا حداکثر سود خالص را (بسته به هدف طرح و آبیاری) به دست آورد. معمولاً و در اکثر حالات کاهش راندمان ذخیره همراه با افزایش راندمان کاربرد می‌باشد. ولی ممکن است این روند، به علت سوء مدیریت آبیاری یا کاستی‌های طراحی و اجرا مثل عدم یکنواختی شیب و نفوذپذیری در طول واحد آبیاری و غیره هر دو راندمان تواماً کاهش یابد. مثلاً حالتی که نفوذپذیری یک نوار دربخش اول خیلی بیشتر از بخش دوم باشد. (در اینصورت به علت نفوذ عمقی خیلی زیاد در بخش اول راندمان کاربرد کاهش می‌یابد. در بخش دوم نیز عمق مؤثر توسعه ریشه‌ها بطور کامل به رطوبت لازم نمی‌رسد، در نتیجه راندمان ذخیره نیز کاهش پیدا می‌کند).

۷ـ۱ـ۲ـ راندمان کل شبکه

در رابطه با آبشخوری که در زیر سد قرار دارد (و یا از یک رودخانه و منبع واحدی

تغذیه می‌شود) می‌توان راندمان دیگری بنام راندمان کل شبکه را به قرار زیر تعریف کرد: [۶-۲]

$$\text{راندمان کل شبکه} = \frac{\text{مقدار آبی که در عمق موثر توسعه ریشه‌ها ذخیره‌شده و صرف تبخیر - تعرق می‌گردد}}{\text{مقدار آبی که از منبع خارج و یا از آن منشعب گردیده}} \times ۱۰۰$$

۸-۱-۲- راندمان دشت

در یک دشت که از منابع آبی مختلف تغذیه می‌شود برای برآورد و اندازه‌گیری تلفات آب (و از آنجا محاسبه راندمان آبیاری دشت) می‌توان با دردست داشتن آبهای ورودی و خروجی حوضه آبریز و تفاضل آنها، سطوح تحت کشت محصولات مختلف و تبخیر - تعرق مربوطه، و با در نظر گرفتن نوسانات آب زیرزمینی و میزان بارندگی راندمان کل دشت را به دست آورد. در اینگونه مطالعات که با مقیاس کلان، و در چهارچوب بررسیهای آبیاری و هیدرولوژی انجام می‌گیرد، در صورتیکه میزان تبخیر و نفوذ آب و تغییرات رطوب خاک نیز مورد برآورد و اندازه‌گیری قرار گیرد، می‌توان تبخیر - تعرق سطوح تحت کشت نباتی، اعم از محصولات زراعی، پوشش طبیعی، جنگل و مرتع را با در دست داشتن بقیه عوامل، برآور نمود که یکی از روشهای برآورد تبخیر - تعرق به حساب می‌آید.

یادآوری ۱: پاره‌ای از کارشناسان، تلفات آب آبیاری را به این دلیل که به آبهای زیرزمینی می‌پیوندد چندان جدی نمی‌گیرند. این برخورد به دلایل زیر موجه نیست:

اولاً: آب آبیاری با صرف هزینه بسیار (به ویژه در شرایط ایران) تهیه می‌شود لذا تلفات آن از نظر اقتصادی موجب ضرر و زیان خواهد بود.

ثانیاً: در پروژه‌های آب و آبیاری به ازای آب استحصالی برنامه‌ریزی کشت و کار صورت می‌گیرد که تلفات آب، این برنامه و تبعات آنرا مختل می‌کند که از نظر اقتصاد منطقه‌ای و ملی قابل قبول نیست.

ثالثاً: همیشه نمی‌توان اطمینان داشت که آبهای تلف شده کیفیت خود را حفظ خواهد کرد، و یا به منابع طبیعی خواهد پیوست و وارد چرخه طبیعی آب خواهد شد.

رابعاً: آبهای تلف شده، و نفوذی معایب و مضرات دیگری هم مثل تخریب کیفیت فیزیکی خاک، شستشوی مواد حاصلخیزکننده، بالا آوردن بیش از حد و غیر مجاز سطح

آب زیر زمینی و آلوده کردن این آبها و در شرایطی نیاز به ایجاد شبکه زهکشی و غیره را نیز به همراه دارد.

یاد آوری ۲: درعین حال در بحث راندمانها که در رابطه با تلفات آب قرار دارد تذکر دو نکته ضروری است: یکی اینکه بخشی از تلفات آب (اعم از راندمان انتقال یا راندمان کاربرد و راندمان یکنواختی توزیع) اجتناب‌ناپذیر است. ولی بدیهی است که این تلفات باید در حد قابل‌قبول باشد.

دیگر اینکه با مقیاس حوضه آبریز، و با مقیاس منطقه‌ای و مملکتی به ویژه در مناطق خشک تلفات آب آبیاری را نباید به طور کامل از بیلان آب کشور خارج کرد. در ضمن آب ثقلی موجب شستشوی نمکهای خاک نیز می‌شود.

توجه به موارد فوق و در نظر گرفتن جهات مختلف تلفات، و هر دو جنبه آن موجب خواهد شد که برخورد کارشناسی صحیح‌تری با موضوع راندمانها به عمل آید.

۹-۱-۲- راندمان یکنواختی توزیع

در روشهای آبیاری تحت فشار، آب به یکسان، و به یک میزان به همه نقاط زمین نمی‌رسد. علل این امر به قرار زیر است:

الف - در روش آبیاری بارانی وزش باد عمده‌ترین دلیل غیر یکنواختی توزیع است که موجب جابجایی قطرات آب، و گاه خروج آن از مزرعه می‌گردد.

ب - غیریکنواختی ساخت قطره چکانها و آبپاشها و آبفشانها

پ - تغییرات فشار سیستم

ت - به وجود آمدن تغییراتی در منافذ خروجی آبپاشها و قطره چکانها به علل مختلف، مثل سایش منفذ آبپاش به وسیله مواد معلق و گشاد شدن آن، گرفتگی و انسداد قطره چکانها وغیره

ث - عدم یکنواختی و همسانی سرعت دورانی (سرعت زاویه‌ای) آبپاشها.

ج - تبخیر

در نتیجه عوامل فوق، همه نقاط مزرعه به یک میزان آب دریافت نمی‌کنند. به عنوان مثال اگر جیره آبیاری (عمق ناخالص آبیاری در هر نوبت) ۶۰میلیمتر محاسبه و برهمین منبا‌آب وارد سیستم شده باشد پاره‌ای نقاط بیش از ۶۰ میلیمتر و پاره‌ای نقاط دیگر کمتر

از ۶۰ میلیمتر آب دریافت می‌کند. برای اینکه تمام نقاط مزرعه حداقل جیره لازم را دریافت نماید لازم است مقدار آب بیشتری (بیشتر از ۶۰میلیمتر) مورد محاسبه قرار گرفته و وارد سیستم شود. در اینصورت کلیه نقاطی که بیش از ۶۰میلیمتر آب دریافت می‌کنند، مازاد بر ۶۰میلیمتر جزو تلفات به حساب می‌آید.
نظر به اهمیت راندمان یکنواختی توزیع در روشهای آبیاری بارانی و قطره‌ای و انواع راندمانهای داخل سیستم آبیاری بارانی و قطره‌ای ذیلاً مباحث مربوطه تشریح می‌شود.

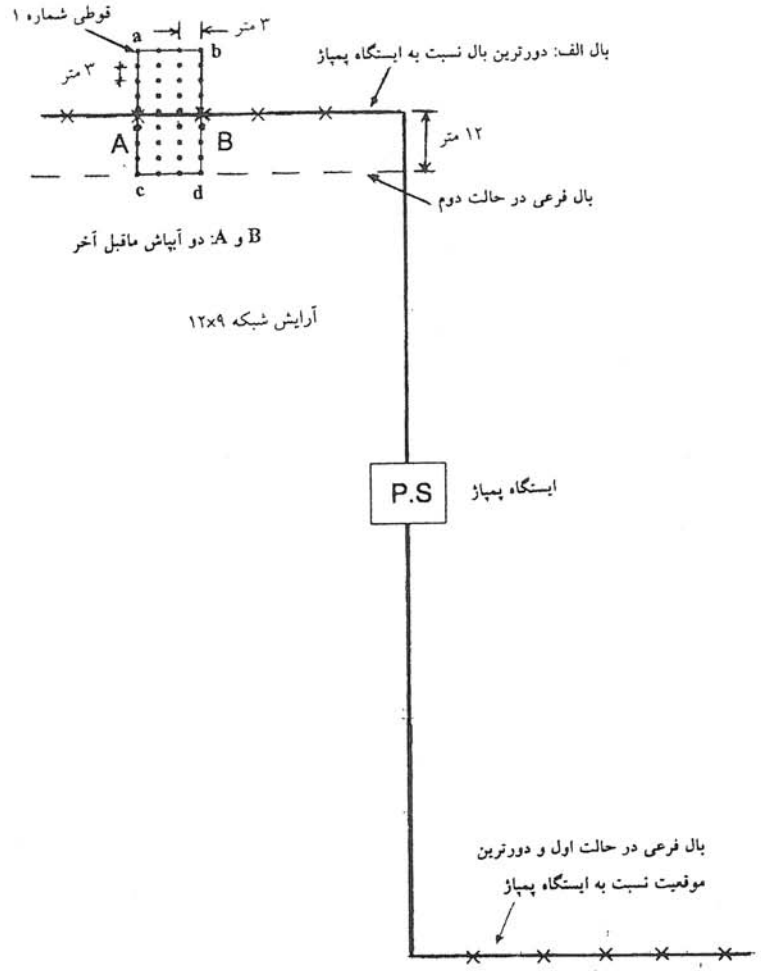
۱۰ـ۱ـ۲ـ راندمان‌های آبیاری بارانی کلاسیک و طرز اندازه‌گیری آنها

در آبیاری بارانی، آب متناسب با نفوذپذیری خاک به تمام نقاط تحت پوشش آبپاش‌ها و آبفشان‌ها می‌پاشد و به لحاظ نظری، علی الاصول نباید نفوذ عمقی و رواناب (که منشأ تلفات در روش‌های آبیاری سطحی است) وجود داشته باشد. ولی در عمل همانگونه که گفته شد، به علت وزش باد و جابجایی قطرات در مزرعه و انتقال بخشی از آن به خارج از مزرعه تحت آبیاری، تبخیر آب، یا تغییرات فشار سیستم در سر آبپاش‌ها، غیر یکنواختی ساختمان کار آبپاش‌ها از نظر سرعت دورانی و از نظر قطر منفذ آبپاشی و غیره، آب به صورت یکسان به همه جای مزرعه نمی‌رسد و بخش‌هایی از مزرعه بیشتر از جیره محاسبه شده و بخش‌هایی کمتر از آن، آب دریافت می‌نمایند، بنابراین لازم است در طراحی، مقدار عمق خالص آب مورد نیاز را افزایش داد به طوریکه حداقل ۸۰ تا ۹۰٪ زمین جیره لازم را دریافت نماید. به همین دلیل در آبیاری بارانی راندمان، بسته به شرایط ۶۵ تا ۷۵٪ (و ندرتاً ۸۰٪) تغییر می‌کند.
دراین بخش دستورالعمل اندازه‌گیری "راندمان یکنواختی توزیع"، "راندمان تبخیر" و "راندمان کل آبیاری بارانی" به صورت کاربردی تشریح می‌گردد:

۱ـ۱۰ـ۱ـ۲ـ دستورالعمل اندازه‌گیری راندمان یکنواختی توزیع

۱ـ روی دورترین بال فرعی (نسبت به ایستگاه پمپاژ) که در آن افت بار حداکثر و فشار سیستم حداقل است، دو آبپاش ماقبل آخر را (که در دورترین فاصله قرار دارند) انتخاب می‌کنیم. (بال الف، و آبپاش‌های A و B در شکل ۱ـ۲)
۲ـ در طرفین این دو آبپاش در داخل یک مستطیل شبکه‌ای از مربعات به ابعاد و به

فواصل ۳×۳متر ایجاد می‌کنیم. طول مستطیل (مستطیل *abcd* در شکل ۱ـ۲) معادل دو برابر شعاع پاشش (دو برابر فاصله بال فرعی در دو ایستگاه متوالی) و عرض مستطیل معادل فاصله دو آبپاش متوالی در روی بال فرعی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۱ـ۲ـ نحوه آرایش قوطی‌های جمع‌آوری آب خارج شده از آبپاش‌ها جهت اندازه‌گیری راندمان یکنواختی توزیع

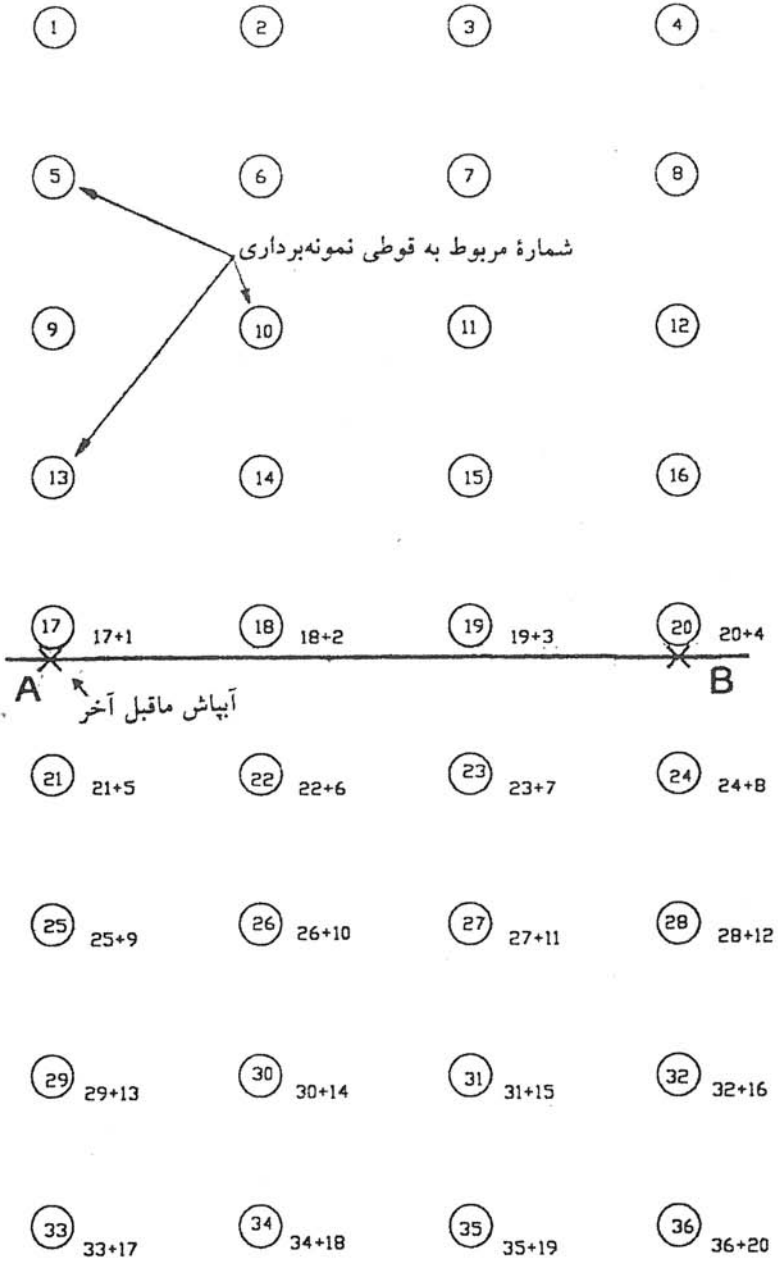
(دراین شکل فاصله آبپاشها ۹ متر و شعاع پاشش ۱۲متر در نظر گرفته شده است)

۳ـ در نقاط شبکه‌بندی، قوطی‌های استوانه‌ای شکل آلومینیومی هم اندازه و در صورت امکان استاندارد با لبه‌های صاف و منظم و حتی المقدور تیز، در خاک کار گذاشته می‌شود به طوری که حدود ۳ الی ۴سانتیمتر در خاک فرو رود. باید دقت کرد دهانه استوانه‌ها در حالت افقی قرار بگیرند. در این مثال طول مستطیل ۲۴متر و عرض آن ۹ متر است لذا تعداد ۳۶قوطی (به شماره‌های ۱ الی ۳۶) برای پوشاندن نقاط شبکه‌بندی لازم است. (شکل ۱ـ۲)

۴ـ قبل از راه‌اندازی سیستم، دو نفر دو آبپاش ماقبل آخر (A,B) را با دست از حرکت بازمیدارند بطوری که تا تثبیت فشار سیستم، آب به داخل قوطی‌ها نریزد. وقتی که فشار سیستم به حالت طبیعی خود رسید زمان را یادداشت کرده (t_1) و دو آبپاش فوق رها می‌شوندتا به مدت ۴ساعت کار کنند. پس از ۴ساعت مجدداً دو نفر آبپاش‌ها را نگه می‌دارند و کنترل می‌کنند بطوریکه آب به داخل قوطی‌ها نپاشد و سپس سیستم آبیای را از کار می‌اندازند و دستگاه را خاموش می‌کنند.

۵ـ مقدار آب جمع شده در هریک از قوطی‌ها از طریق حجمی و با دقت و با استفاده از مزور (ظروف شیشه‌ای مدرج) $۲۵۰cc$ الی $۵۰۰cc$، اندازه‌گیری و به سطح دهانه قوطی تقسیم می‌شود و از آنجا ارتفاع آب رسیده به هریک از نقاط (۱ الی ۳۶) به دست می‌آید وسپس عدد به دست آمده را به ساعات پاشش یعنی ۴تقسیم می‌کنیم تا مقدار شدت باران در نقاط اندازه‌گیری برحسب میلیمتر در ساعت بدست آید.

یادآوری ۱: لازم است قوطی‌ها طبق نقشه وکروکی (شکل ۲ـ۲) شماره‌گذاری شود. برای این کار از رنگ ثابت استفاده به عمل می‌آید. در دفترچه صحرایی مقدار باران اندازه‌گیری شده روبروی شماره مربوطه ثبت می‌گردد.



شکل ۲ـ۲ـ نحوه شماره‌گذاری قوطی‌های جمع‌آوری آب خارج شده از آبپاش‌ها جهت اندازه‌گیری راندمان یکنواختی توزیع

یادآوری ۲: اگر بال فرعی در ایستگاه دوم قرار بگیرد به قوطی‌های سمت راست خود به همان اندازه آب می‌پاشد که این بال در ایستگاه اول به قوطی‌ها سمت راست خود پاشیده است لذا برای سهولت کار و صرفه‌جویی در وقت، آب جمع شده در قوطی‌های مربوطه، دو به دو جمع می‌شود (۱+۱۷ و ۲+۱۸ و ... و ۲۰+۳۶) و در دفتر ثبت می‌گردد (بدون اینکه نیازی به صرف وقت بیشتر برای راه‌اندازی بال فرعی در ایستگاه دوم بوده باشد) بدین ترتیب آب رسیده به نقاط اندازه‌گیری در سطح موردنظر (فاصله دو بال در دو ایستگاه متوالی، ضربدر فاصله دو آبپاش متوالی یعنی $۱۲m \times ۹m$) در مثال مطرح شده، برحسب میلیمتر در ساعت بدست می‌آید.

همانطور که گفته شد قوطی‌های اندازه‌گیری باید کاملاً یکنواخت و استاندارد باشد. قطر استوانه‌ها حدود ۱۰ الی ۱۵ سانتیمتر (به ارتفاع حدود ۲۰سانتیمتر) مناسب است.

پس از اینکه اعداد بطور منظم روی کروکی و در دفتر صحرایی یادداشت شد، کل باران رسیده به نقاط اندازه‌گیری جمع و به تعداد نقاط اندازه‌گیری (n که در این مثال معادل ۳۶ می‌باشد) تقسیم می‌گردد تا میانگین آب رسیده به سطح مورد اندازه‌گیری (d' یا m) بدست بیاید. سپس انحراف آب رسیده به هریک از نقاط (Y) نسبت به میانگین محاسبه و قدر مطلق آن در نظر گرفته می‌شود ($|Y|$)، که این قدر مطلق‌ها با یکدیگر جمع می‌شوند و از آنجا راندمان یکنواختی توزیع از رابطه زیر بدست می‌آید که برحسب درصد بیان می‌شود:

$$C_u = ۱۰۰(۱ - \frac{\Sigma|Y|}{m.n}) \qquad [۲-۷]$$

این راندمان هرچه بیشتر باشد بهتر است. در صورتیکه از اثر باد صرفنظر کنیم کم بودن آن به دلیل نقص ساخت و طراحی است. سرعت چرخش آبپاش، یکنواختی چرخش، فاصله آبپاش‌ها در روی بال، جهت بال نسبت به باد، فشار سیستم، نوسانات و دامنه تغییرات آن و بده آبپاش‌ها در یکنواختی توزیع تأثیر دارد، ولی باد مهمترین عاملی است که سبب می‌شود تا راندمان یکنواختی پایین بیاید. در هر حال راندمان یکنواختی توزیع کمتر از ۷۰درصد قابل‌قبول نیست و حدود ۸۰٪ راندمان خوبی است. در شرایط ایران انتظار راندمان یکنواختی توزیع بیش از ۷۰درصد اکثراً انتظار بیجایی است (این راندمان در

شرایط ویژه و استثنایی ممکن است تا ۸۰٪ هم برسد).

۲ـ۱۰ـ۱ـ۲ـ دستورالعمل اندازه‌گیری راندمان مربوط به تلفات ناشی از تبخیر (راندمان تلفات تبخیر):

با استفاده از یک ظرف ۲۰ الی ۵۰ لیتری و با استفاده از یک کرنومتر، آزمایش را شروع می‌کنیم، و پس از اینکه فشار سیستم به اندازه طبیعی خود رسید و متعادل شد، آب خروجی از هر یک از آبپاش‌ها (B,A) را در مدت معینی (حدود چند ده ثانیه) بوسیله لوله پلاستیکی در ظرف فوق‌الذکر وارد می‌کنیم. در صورتیکه این ظرف مدرج باشد بهتر است و کار اندازه‌گیری آسانتر انجام می‌گیرد. در غیر اینصورت حجم آب داخل آنرا با استفاده از یک ظرف مدرج (مزور) یک لیتری، با دقت اندازه‌گیری و متوسط حجم آب خارج شده از دو آبپاش را بدست می‌آوریم.

ارتفاع آب خارج شده از هر آبپاش بر حسب میلیمتر در ساعت (d) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$d=\frac{V}{S}=\frac{\text{متوسط حجم آب خروجی از دو آبپاش برحسب متر مکعب برساعت}}{\text{فاصله بین نازل‌ها بر حسب متر} \times \text{فاصله بین بال‌ها برحسب متر}} \times ۱۰۰۰ \qquad [۲\text{ـ}۸]$$

درصد تلفات آب که دراثر تبخیر (و احیاناً جریان و حرکت قطرات آب به خارج مزرعه در اثر باد) ناشی می‌شود از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{درصد تلفات تبخیر}=\frac{d-d'}{d} \times ۱۰۰ \qquad [۲\text{ـ}۹]$$

که در آن:

d: متوسط آب خروجی از آبپاش A و B (میلیمتر در ساعت).

d': متوسط آب رسیده به سطح زمین، (میلیمتر در ساعت).

و از آنجا راندمان تلفات تبخیر از رابطه زیر و بر حسب درصد بدست می‌آید:

$$E_e=\text{راندمان تلفات تبخیر}=۱۰۰-(\frac{d-d'}{d} \times ۱۰۰) \qquad [۲\text{ـ}۱۰]$$

۳ـ۱۰ـ۱ـ۲ـ راندمان کل آبیاری بارانی

به سه طریق زیر می‌توان راندمان کل آبیاری بارانی را بدست آورد. اعداد بدست آمده از هریک از این روش‌ها ممکن است با هم مختصر تفاوتی داشته باشند. (و معمولاً این تفاوت در صورتی که اندازه‌گیری‌ها صحیح انجام شده باشد باید اندک باشد).

الف - راندمان کل آبپاش

در این روش ۲۵٪ از قوطی‌ها که در آنها آب کمتری جمع شده است انتخاب و میانگین آنها برحسب میلیمتر در ساعت $(d_{\min})$ محاسبه می‌شود. سپس راندمان کل آبیاری بارانی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_t=\frac{d_{\min}}{d} \qquad [۲-۱۱]$$

ب - راندمان کل آبیاری

این راندمان از حاصل تقسیم ارتفاع مینیمم $(d_{\min})$ به متوسط ارتفاع بارش کلیه آبپاش‌ها و نازل‌هایی که روی آخرین بال قرار گرفته‌اند بدست می‌آید. در عمل جهت سهولت امر می‌توان بجای اندازه‌گیری مستقیم متوسط مقدار باران همه نازل‌ها، به قرار زیر عمل کرد:

۱ـ ارتفاع آب رسیده بوسیله اولین و آخرین نازل برحسب میلیمتر در ساعت طبق روش‌هایی که قبلاً ذکر شد اندازه‌گیری می‌شود $(d_۱,d_۲)$.

۲ـ تفاضل ارتفاعات آب رسیده بوسیله اولین و آخرین آبپاش محاسبه و در سه چهارم ضرب می‌شود. $\frac{۳}{۴}\times(d_۱-d_۲)$

۳ـ عدد بدست آمده را از ارتفاع آب رسیده بوسیله آبپاش اول کم می‌کنیم:

$$d_۳=d_۱-\frac{۳}{۴}\times(d_۱-d_۲)$$

عدد بدست آمده $(d_۳)$ ارتفاع باران در مساحت حاصل از فاصله بین دو آبپاش ضرب در فاصله دو بال است راندمان بال آبیاری به قرار زیر به دست می‌آید:

$$E_{la}=\frac{d_{\min}}{d_۳} \qquad [۲-۱۲]$$

یادآوری: بجای ارتفاع آب رسیده به سطح S بوسیله نازل‌ها، می‌توان قبلاً حجم آب

خارج شده از نازل‌های اول و آخر را اندازه‌گیری و تفاضل آنها در $\frac{۳}{۴}$ ضرب و از حجم آب نازل اول کم کرد و سپس آنرا به سطح A تقسیم نمود.

که در آن:

A = فاصله دو بال در دو حالت متوالی × فاصله دو نازل متوالی

به عنوان مثال اگر بده نازل اول ۲/۳متر مکعب در ساعت و بده نازل آخری ۲/۱ متر مکعب در ساعت باشد، محاسبه به قرار زیر انجام می‌شود:

$\frac{۳}{۴}(۲/۳-۲/۱) = ۰/۱۵$

متوسط جریان $d_3 = ۲/۳ - ۰/۱۵ = ۲/۱۵\, m^3/h$

$$d_3 = \frac{۲/۱۵\, m^3/h}{\text{فاصله بین دو نازل} \times \text{فاصله دو بال (بر حسب متر)}}$$

$$E_{la} = \frac{d_{min}}{d_3}$$

ج - راندمان کل سیستم (E_t)

نظر به اینکه تغییرات فشار در بال‌ها در حالت‌های مختلف زیاد نیست، لذا راندمان کل بال را بجای راندمان کل سیستم می‌توان بکار برد. راندمان کل سیستم را از رابطه زیر نیز می‌توان بدست آورد:

$$E_t = cu \times E_c \qquad [۲-۱۳]$$

راندمان تلفات تبخیر × راندمان یکنواختی توزیع = راندمان کل آبیاری بارانی

بعنوان مثال اگر راندمان یکنواختی توزیع ۸۰٪ و راندمان تلفات تبخیر ۹۰٪ باشد راندمان کل سیستم ۱۰۰ × $(\frac{۸۰}{۱۰۰} \times \frac{۹۰}{۱۰۰}) = E_t$ معادل ۷۲٪ بدست خواهد آمد.

۱۱-۱-۲- راندمان‌های آبیاری قطره‌ای و طرز اندازه‌گیری آنها[۱]

راندمان آبیاری قطره‌ای (E_a) بستگی به راندمان مزرعه (TR) یعنی نسبت تبخیر تعرق به

۱- مستخرج از کتاب «مبانی نظری و کاربردی آبیاری قطره‌ای» تألیف ج. خیرابی در دست انتشار

آب مصرف شده و راندمان یکنواختی توزیع (E_u) دارد که در رابطه زیر خلاصه می‌شود:

$$E_a = TR.E_u \qquad [۲-۱۴]$$

عوامل موثر در راندمان آبیاری قطره‌ای بویژه در رابطه با مشخصات و خصوصیات قطره چکانها عبارتند از:

- تغییرات آبدهی قطره چکانها، ناشی از اشکالات ساخت
- بزرگی هرچه بیشتر نسبت: $\frac{\text{تغییرات آبدهی قطره چکانها}}{\text{تغییرات فشار سیستم}}$ که در اینصورت به ازای تغییرات اندک فشار سیستم تغییرات آبدهی بیشتر خواهد بود.
- توان رابطه آبدهی قطره‌چکان (x) و فشار سیستم، (H)، x هرچه بزرگتر باشد بدان معنی است که آبدهی قطره‌چکان‌ها نسبت به تغییرات فشار سیستم حساس‌تر است ($q = KH^x$).
- محدوده تغییرات مجاز فشار در رابطه با آبدهی، که این حدود هرچه کمتر باشد، راندمان یکنواختی توزیع پایین می‌آید.
- افت فشار در لوله‌های فرعی، حاصل از اتصال قطره چکانها به لوله فرعی.
- حساسیت قطره چکانها به تجمع مواد شیمیایی و انسداد.
- ثبات و درجه پایداری سیستم آبیاری قطره‌ای در رابطه با تنظیم «نسبت آبدهی و فشار». به طوریکه هرچه عوامل بهم زننده این تنظیم بیشتر باشد راندمان آبیاری پایین می‌آید.

پاره‌ای از عوامل دیگر و خصوصیات و مشخصات مهم طرح، موثر در بازدهی آبیاری قطره‌ای:

- درجه کارآیی دستگاههای تصفیه و فیلترها
- تغییرات مجاز فشار، که محدوده آن هرچه بیشتر باشد، از هر نظر، از جمله افزایش راندمان بهتر است.
- فشار مورد عمل دستگاه
- امکان کنترل جریان و یا فشار
- رابطه بین آبدهی و فشار در پمپ و یا لوله‌های آبرسانی

- منظور نمودن ضریب تصحیح در جه حرارت برای قطره چکانهایی با مجرای طولانی
- کاربرد مواد شیمیایی برای انحلال رسوبات معدنی
- استعمال صافی‌های ثانوی
- کاربرد وسائل تنظیم و تقسیم آب
- پیش‌بینی امکان افزایش آبدهی و یا فشار اضافی جهت جبران کاهش جریان در اثر انسداد

در هر حال جهت بدست آوردن بازدهی بالا، حتی در یک شبکه آبیاری قطره‌ای که بخوبی طراحی و پیاده شده و مجهز به بهترین نوع قطره چکانها باشد، مدیریت خوب جهت تأمین فشار مطابق معیارهای طراحی شده، تمیز نگهداشتن صافیها، بازنگهداشتن قطره چکانها و رعایت دقیق جیره آبیاری و غیره شرط عمده جهت بالا بردن راندمان آبیاری است.

۱ـ۱۱ـ۱ـ۲ـ راندمان مزرعه (*TR*)

همانگونه که قبلاً گفته شد، راندمان مزرعه عبارت است از درصد نسبت تبخیر ـ تعرق پتانسیل به آب مصرفی در مزرعه. آب مصرفی مزرعه مقداری به علت نفوذ به اعمال پایین‌تر از عمق مؤثر توسعه ریشه‌ها و خارج از محدوده ریشه‌ها تلف می‌شود، همچنین لازم است مقداری آب جهت تأمین ضریب اطمینان کمبود احتمالی آب آبیاری در نظر گرفت که مجموعه این اقلام موجب پائین آمدن راندمان مزرعه می‌گردد.

در مناطق خشک راندمان مزرعه (*TR*) به میزان ۹۰٪ نشان‌دهنده‌یک مدیریت خوب می‌باشد. این رقم استثنائاً و در یک مدیریت عالی ممکن است تا ۹۵٪ نیز برسد. در شرایط ایران این راندمان را نباید بیش از ۸۵٪ در نظر گرفت.

در مناطق مرطوب که آبیاری معمولاً به صورت تکمیلی است و مسائل شوری و از آنجا نیاز به شستشو وجود ندارد و تبخیر نیز ناچیز است، بدست آوردن راندمان نزدیک به ۱۰۰٪ با یک مدیریت عالی می‌تواند قابل دسترس باشد، با اینحال حتی در یک مدیریت خوب نیز در نظر گرفتن راندمان مزرعه *TR* به میزان بیش از ۹۰٪ نمی‌تواند مورد اطمینان باشد. درضمن باید توجه داشت که ممکن است راندمانهای خیلی بالا و نزدیک ۱۰۰٪ به

علت انجام آبیاریهای غیر کافی (کم آبیاری) به دست بیاید، و نه دقت و مدیریت و طراحی خوب.

۲ـ۱۱ـ۱ـ۲ـ راندمان یکنواختی توزیع (E_u)

در شبکه آبیاری قطره‌ای آب پس از توزیع در شبکه لوله‌های آبرسانی و لوله‌های فرعی، بوسیله قطره چکانها به نقاط مختلف زمین می‌رسد و سپس در زمین نفوذ می‌کند. لذا راندمان یکنواختی توزیع بستگی کامل به یکنواختی آبدهی قطره چکانها در سراسر شبکه پیدا می‌کند.

آبدهی غیر یکنواخت به علت: ۱ـ تغییرات فشار در نقاط مختلف شبکه، ۲ـ اصطکاک، ۳ـ اختلاف ارتفاع نقاط مختلف شبکه، ۴ـ وجود اختلاف در ساخت قطره چکانها، ۵ـ مسدود شدن قطره چکانها و غیره بوجود می‌آید.

در یک طرح آبیاری قطره‌ای که بخوبی طراحی و مدیریت شده باشد، یکی از اهداف اساسی این است که با توجه به ظرفیت و بده ایستگاه پمپاژ که در طرح پیش‌بینی شده است، امکان آبیاری مکفی در نقاطی از مزرعه که حداقل آب را دریافت می‌کند وجود داشته باشد. لذا تفاوت بین آبدهی‌های حداقل و متوسط، بیانگر ضریب و راندمان یکنواختی توزیع است.

آبیاری کمتر ویا زیادتر از حد مناسب درکمیت وکیفیت محصول اثر می‌گذارد، لذا در اینجا یک مقیاس دیگر برای راندمان یکنواختی توزیع در نظر گرفته می‌شود که شامل حداقل و حداکثر آبدهی قطره چکانها است و این مقیاس، ضریب یکنواختی مطلق [1] (E_{ua}) نامیده می‌شود.

مقادیر E_u و E_{ua} برای شبکه آبیاری موجود و دایر براساس آزمایشات صحرایی اندازه‌گیری و محاسبه می‌گردد، ولی در طراحی، مقدار تقریبی نزدیک به واقعیت و صحت آن در رابطه باکلیه عوامل طراحی، تخمین زده می‌شود که این هر دو به نوبت خود لازم و مفید است. زیرا جهت طراحی و قبل از پیاده شدن طرح، تخمین تقریبی آن جهت

1- Absolute emission uniformity

محاسبات مربوطه ضروری است و پس از پیاده شدن نیز اندازه گیریهای مستقیم آن در واحدهای آبیاری از نظر کنترل سیستم و بهبود کار آن برای مدیریت طرح امری ضروری است.

الف ـ طرز تعیین راندمان یکنواختی توزیع از طریق اندازه‌گیریهای مستقیم در مزرعه

ارقام و اطلاعات لازم در این مورد جهت اندازه‌گیری و محاسبه راندمان یکنواختی توزیع، از اندازه‌گیری دقیق آبدهی حداقل ۱۶ قطره‌چکان که در روی ۴لوله فرعی به تعداد مساوی (یعنی هر لوله فرعی ۴قطره‌چکان) قرار گرفته باشد، بدست می‌آید.
چهار لوله فرعی هر یک در دورترین نقطه نسبت به ایستگاه پمپاژ در نظر گرفته می‌شود. روی هر لوله فرعی یک قطره‌چکان در ابتدا و دیگری در انتها و دوتای دیگر در وسط و با فواصل مساوی ($\frac{۲}{۳}$و$\frac{۱}{۳}$) مشخص می‌شود. تعیین این راندمان با تقسیم طول لوله فرعی به سه قسمت مساوی و اندازه‌گیری بده قطره چکانهای واقع در ابتدای لوله فرعی، در $\frac{۱}{۳}$ و $\frac{۲}{۳}$ در انتهای لوله فرعی صورت می‌گیرد. در صورتیکه بیش از سه قطره‌چکان برای هر درخت مورد استفاده قرار گیرد، آبدهی هر یک از این قطره‌چکان‌ها اندازه‌گیری شده، و از اقلام بدست آمده متوسط‌گیری می‌شود که در محاسبه بکار می‌رود. سپس راندمان یکنواختی توزیع از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_u = \frac{\text{متوسط پایین‌ترین میزان آبدهی در } \frac{۱}{۴} \text{ قطره چکانهای اندازه‌گیری شده (۴ قطره‌چکان)}}{\text{متوسط میزان آبدهی کلیه قطره چکانهای اندازه‌گیری شده(۱۶ قطره‌چکان)}} \quad [۲-۱۵]$$

در اینجا متوسط میزان آبدهی، پایین‌ترین مقدار جریان در $\frac{۱}{۴}$ قطره چکانها یک مقدار عملی به عنوان حداقل جریان انتخاب شده است و ضریب یکنواختی با رابطه زیر مشخص می‌شود:

$$E_u = ۱۰۰ \times \frac{q_n}{q_a} \quad [۲-۱۶]$$

که در آن:

E_u: راندمان یکنواختی توزیع، براساس اندازه‌گیری مستقیم در مزرعه (درصد).

q_n: متوسط پایین‌ترین میزان آبدهی در $\frac{1}{4}$ قطره‌چکان‌های تحت مطالعه (لیتر در ساعت).

q_a: متوسط میزان آبدهی کلیه قطره‌چکان‌های تحت مطالعه (لیتر در ساعت).

ب ـ تخمین راندمان یکنواختی توزیع (E_u) جهت طراحی

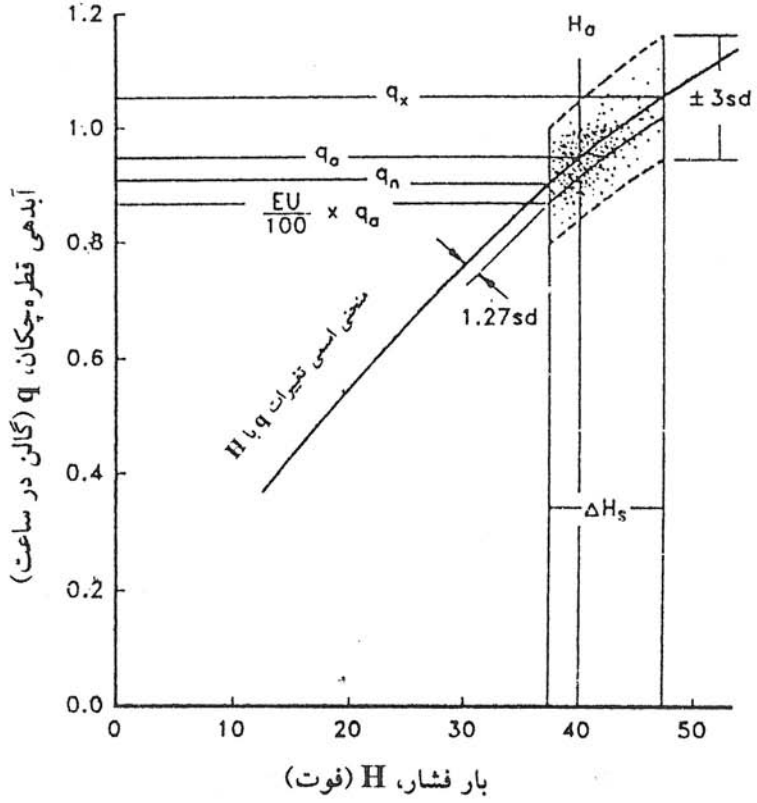
راندمان یکنواختی توزیع جهت محاسبه جیره آبیاری (عمق آبیاری در هر نوبت) (I_d)، فواصل آبیاری (I_i)، ظرفیت آبدهی سیستم و بده ایستگاه پمپاژ (Q) ضروری است. راندمان یکنواختی توزیع مربوط به اختلاف آبدهی قطره چکانها است. اختلاف آبدهی قطره چکانها نیز به نوبه خود معلول تغییرات فشار و مربوط به مشخصات قطره چکانها در داخل شبکه است. دریک بررسی روی قطره چکانهای ۶ مجرا، مقادیر مختلف آبدهی قطره چکانها در رابطه با تغییرات فشار نقاط مختلف یک لوله فرعی یک ردیفه اندازه‌گیری و نتایج روی نمودار برده شده است. برای اینکه عامل اختلاف ارتفاع زمین حذف شود، آزمایش در یک زمین مسطح انجام گرفته است. نتایج بصورت منحنی تغییرات آبدهی و فشار در شکل (۳ـ۲) نشان داده شده است.

در این شکل حد پایین فشار مربوط به آبدهی حداقل (q_n) و حد بالای فشار مربوط به آبدهی حداکثر (q_x) و آبدهی متوسط (q_a) مربوط به فشار متوسط (H_a) است.

همانگونه که در شکل دیده می‌شود فشار متوسط (H_a)، در وسط (نقطه میانی) فشار حداقل و حداکثر قرار نگرفته است. علت این پدیده مربوط به افت فشار حداکثر در اول لوله فرعی است، زیرا افت فشار در طول لوله فرعی به صورت رابطه خطی انجام نمی‌گیرد. بطوریکه در روی شکل دیده می‌شود نسبت تغییرات فشار به متوسط فشار یعنی $\frac{\Delta H}{H_a}$ برابر ۰/۲۵ است.

همانگونه که گفته شد آبدهی قطره‌چکان‌ها علاوه بر فشار به نوع قطره‌چکان، و برای یکنوع قطره‌چکان به ناهمگنی ساخت آنها ارتباط پیدا می‌کند. زیرا ساختمان آنها هر قدر دقیق و استاندارد باشد، باز در عمل آبدهی آنها بطور صد در صد یکسان و همگن نخواهد بود. این عامل نیز به نوبهٔ خود راندمان یکنواختی توزیع را پایین می‌آورد و «ضریب

ناهمگنی ساخت [۱]» نامیده می‌شود و با V نشان داده می‌شود. V بوسیله کارخانجات سازنده قطره‌چکان اندازه‌گیری و جزو مشخصات عمومی قطره‌چکان‌ها در کاتالوگ‌های مربوطه ارائه می‌گردد.



شکل ۳-۲- منحنی آبدهی - فشار

ضریب ناهمگنی ساخت ضریبی است که برای پیش‌بینی اختلاف در مقادیر آبدهی قطره‌چکان‌ها از یک نوع که در یک شبکه تحت فشار معین مورد استفاده قرار می‌گیرد،

1- Manufacturer's - coefficient of variation

بکار می‌رود. این ضریب ممکن است از اندازه‌گیری مقادیر آبدهی یکدسته قطره‌چکان که به بطور تصادفی نمونه برداری و برگزیده شده‌اند، با یک فشار معیّن تعیین گردد. در اینصورت ضریب ناهمگنی ساخت از حاصل تقسیم انحراف معیار (θ_r) به متوسط آبدهی قطره‌چکان‌های نمونه (q_{ra}) بدست می‌آید ($V=\frac{\theta_r}{q_{ra}}$). ضریب یکنواختی توزیع با دردست داشتن ضریب ناهمگنی ساخت که توسط کارخانجات سازنده در اختیار مصرف‌کننده گذاشته می‌شود. از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_u = ۱۰۰ \left(۱ - \frac{۱/۲۷}{\sqrt{e}} \times V\right) \frac{q_n}{q_a} \qquad [۲-۱۷]$$

که در آن:

E_u : ضریب یکنواختی، (درصد).

e : تعداد قطره‌چکان برای هر درخت.

q_n : حداقل میزان آبدهی قطره چکانها با حداقل فشار که با استفاده از منحنی رابطه آبدهی و فشار بدست می‌آید، (لیتر در ساعت).

q_a : متوسط میزان آبدهی تمام قطره چکانهای تحت مطالعه، (لیتر در ساعت).

V : ضریب ناهمگنی ساخت.

در صورتیکه ضریب ناهمگنی ساخت در اختیار نباشد، راندمان یکنواختی توزیع از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Eu = ۱۰۰ \left(۱ - \frac{۱}{\sqrt{e}} + \frac{۱}{\sqrt{e}} \cdot \frac{q_{rn}}{q_{ra}}\right) \frac{q_n}{q_a} \qquad [۲-۱۸]$$

که در آن:

q_{rn} : متوسط آبدهی $\frac{۱}{۴}$ قطره‌چکان‌های نمونه که تحت فشار معین، بده آنها از همه کمتر است، (لیتر در ساعت).

q_{ra} : متوسط آبدهی تمام قطره‌چکان‌های نمونه تحت آزمایش و تحت فشار معین، (لیتر در ساعت).

راندمان یکنواختی توزیع (E_u)با در دست داشتن مشخصات هیدرولیکی لوله‌های فرعی از طریق ساده‌تری بدست می‌آید که در جای خود بحث و بررسی خواهد شد.
منحنی نمایش‌دهنده‌رابطه آبدهی و فشار در یک قطره‌چکان ۶ مجرا با ضریب ناهمگنی ساخت V=۰/۰۳۳ در طول یک لوله فرعی یک ردیفه، با نسبت تغییر فشار به فشار متوسط معادل ۰/۲۵، که در روی زمین مسطح قرار گرفته است.

$$\frac{\Delta H}{H_a} \rightarrow \text{نسبت تغییر فشار به فشار متوسط} \rightarrow \frac{\text{تغییر بار فشار در طول لوله فرعی}}{\text{فشار متوسط مربوط به آبدهی متوسط}}$$

$$\rightarrow \frac{۴}{۱۰} = ۰/۲۵$$

$$\frac{0_r}{q_{ra}} \rightarrow \frac{\text{انحراف معیار قطره‌چکان‌های نمونه}}{\text{متوسط آبدهی قطره‌چکان‌های نمونه}} = ۰/۳۳$$

۳-۱۱-۱-۲- راندمان یکنواختی مطلق (E_{ua})

نظر به اینکه آبیاری بیش از حد لزوم، باعث تلفات آب و صدمه‌دیدن گیاه می‌گردد، لذا در یک سیستم آبیاری قطره‌ای داشتن اطلاعات در این زمینه، مفید و راهگشای مدیریت خواهد بود، راندمان یکنواختی مطلق که در آن علاوه بر آبدهی حداقل و متوسط قطره‌چکان‌های شبکه، آبدهی‌های حداکثر نیز مورد بررسی و اندازه‌گیری و محاسبه قرار می‌گیرد، یکی از ضرائب مورد توجه میباشد که در مزرعه و پس از پیاده کردن طرح و یا در مرحله طراحی می‌تواند مورد اندازه‌گیری و برآورد قرار بگیرد.

الف ـ اندازه‌گیری راندمان یکنواختی مطلق در واحد آبیاری

جهت اینکار عیناً مثل روش اندازه‌گیری راندمان یکنواختی توزیع عمل می‌شود. بدین معنی که چهار لوله فرعی در دورترین موقعیت نسبت به ایستگاه پمپاژ تعیین و در روی هریک از آنها چهار قطره‌چکان (مجموعاً ۱۶ قطره‌چکان) به فواصل ۰، $\frac{۱}{۳}$، $\frac{۲}{۳}$ و $\frac{۳}{۳}$ طول لوله، انتخاب و آبدهی آنها مورد اندازه‌گیری قرار می‌گیرد وسپس راندمان یکنواختی مطلق از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E_{ua} = ۱۰۰ \times \frac{۱}{۲}\left(\frac{q_n}{q_a} + \frac{q_a}{q_x}\right) \qquad [۲-۱۹]$$

که در آن:

E_{ua} : راندمان یا ضریب یکنواختی مطلق در واحد آبیاری (درصد)

q_x : متوسط بالاترین میزان آبدهی در $\frac{1}{8}$ (۲ قطره‌چکان) نمونه‌های اندازه‌گیری شده، (لیتر در ساعت)

ب ـ برآورد ضریب یکنواختی مطلق (E_{ua}) جهت طراحی

اطلاع از ضریب یکنواختی مطلق به منظور پیش‌بینی یکنواختی عمومی آبدهی در یک سیستم آبیاری قطره‌ای مفید خواهد بود. در مرحله طراحی این ضریب را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$E_{ua} = ۱۰۰(۱/۰ - \frac{۱/۲۷}{\sqrt{e}} V) \times \frac{۱}{۲} \times (\frac{q_n}{q_a} + \frac{q_a}{q_x}) \qquad [۲-۲۰]$$

که در آن:

E_{ua} : راندمان یکنواختی مطلق، جهت طراحی، (درصد).

q_x : حداکثر میزان آبدهی محاسبه شده با حداکثر فشار، با استفاده از رابطه بین میزان آبدهی قطره‌چکان و فشار آبدهی (لیتر در ساعت).

بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده است.

ج ـ برآورد راندمان یکنواختی مطلق با استفاده از جدول

جدولی جهت بدست آوردن راندمان یکنواختی مطلق در قطره‌چکان‌های با مجرای طولانی و روزنه‌ای و با توان آبدهی x به ترتیب ۰/۸ و ۰/۵ و به ازای مقادیر مختلف افت فشار در لوله‌های فرعی تنظیم گردیده است.

ضریب ناهمگنی ساخت قطره‌چکان‌ها جهت تنظیم این جدول $V=۰/۰۵۷$ و مقدار قطره‌چکان برای هر درخت ۴ عدد در نظر گرفته شده است. همانطور که در جدول دیده می‌شود به ازاء راندمان یکنواختی مطلق به میزان ۹۰٪، تغییرات فشار حدود ۲۰٪ می‌باشد، یعنی تغییرات فشار به این میزان، تغییرات آبدهی به میزان ۱۰٪ ایجاد می‌نماید.

نظر به اینکه آبیاری قطره‌ای به تغییرات فشار حساس بوده و کنترل فشار در تمام نقاط شبکه زیاد ساده وعملی نیست، لذا توصیه می‌شود حدود تغییرات مجاز فشار کمتر و به میزان ۱۰٪ در نظر گرفته شود که در اینصورت ضریب یکنواختی توزیع ۹۴٪ خواهد بود و از آنجا تغییرات آبدهی ۵٪ بدست خواهد آمد.

به عنوان یک فرمول و قانون کلی هیچ شبکه آبیاری قطره‌ای نباید با مقدار E_{ua} کمتر از ۹۰٪ طراحی شود. شبکه‌هایی که براساس E_{ua} بالاتر از ۹۴٪ طراحی می‌شود، احتیاج کمتری به مراقبت از نظر انسداد دارند. در صورتیکه اگر طراحی براساس E_{ua} بین ۹۰ و ۹۴ درصد باشد شبکه نیاز به کنترل‌های مکرر و متوالی از نظر انسداد قطره‌چکان‌ها خواهد داشت.

جدول ۱ـ۲ـ مقادیر راندمان یکنواختی مطلق E_{ua} و نسبت‌های آبدهی به ازای مقادیر مختلف تغییرات و افت فشار درلوله‌های فرعی نسبت به فشار ورودی، با قطره‌چکان‌های مجرای طولانی و روزنه‌ای

تغییرات و افت فشار لوله‌های فرعی ورودی	قطره‌چکان با مجرای طولانی $x=۰/۸$		قطره‌چکان روزنه‌ای $x=۰/۵$	
(٪)	$۱-\frac{q_n}{q_x}$	E_{ua}	$۱-\frac{q_n}{q_x}$	E_{ua}
	(٪)	(٪)	(٪)	(٪)
٪	٪	۹۶/۴	٪	۹۶/۴
۳/۲	۲/۱	۹۵/۲	۱/۳	۹۵/۸
۴/۳	۲/۹	۹۴/۹	۱/۷	۹۵/۴
۹/۸	۵/۳	۹۳/۶	۴/۱	۹۴/۴
۱۵/۷	۹/۶	۹۱/۵	۶/۸	۹۳/۱
۱۷/۸	۱۰/۸	۹۰/۹	۷/۸	۹۲/۶
۲۵/۰	۱۵/۶	۸۸/۴	۱۱/۴	۹۰/۷

$V=۰/۰۵۷$ و $e=۴$

۱۲-۱-۲- دیدگاههای جدید و برداشتهای مختلف در رابطه با اهداف، تبیین و تعیین راندمان آبیاری

از نظر علمی، همچنین از نظر کاربردی و مهندسی، ذکر راندمان و درصد آن بدون مشخص کردن هدف مربوطه هیچگونه مفهوم و معنایی را القاء نمی‌کند. لذا قبل از همه باید معلوم گردد که هدف از تعریف، یا برآورد و اندازه‌گیری راندمان چیست؟ لازم است به این مهم، بیش از گذشته تأکید گردد که در دهه‌های گذشته، طی سالهای متمادی اکثراً راندمان آبیاری، هم وزن تلفات آب در نظر گرفته می‌شد، و هرگاه که گفته می‌شد راندمان بالا است و تلفات اندک است این مسئله، بدون بحث در جوانب و توابع تبعات آن، به عنوان شاخص مثبت تلقی می‌شد و به آن وزن و بهای بیشتر از اندازه‌های خود داده می‌شد.

اگر در «صورت مسئله» یک تجدیدنظر اصولی، انجام دهیم در نهایت به این اصل اساسی می‌رسیم که در برنامه‌ریزی می‌خواهیم از واحد آب استفاده بیشتر و بهتر و یا حداکثر به عمل آوریم. کیفیت و کمیت کلمه «استفاده» که در این فراز آمده است، همچنین درجه و گستره و گستردگی آن، و اینکه گفته می‌شود استفاده «بیشتر» و یا «بیشترین»، و یا استفاده «بهتر» و «حداکثر»، باید دقیقاً و به صورت شفاف توضیح داده شود و تصریح گردد.

از طرف دیگر استفاده بیشتر، بهتر و یا حداکثر از واحد آب، در ارتباط نزدیک و تنگاتنگ و غیرقابل تفکیک با «آبیاری صحیح»، «مدیریت آبیاری»، الگوی کشت، «برنامه بهره‌وری» و توسعه پایدار، سایر شرایط طبیعی، فنی، اقتصادی و اجتماعی و غیره قرار داد.

استفاده از واحد آب می‌تواند در ارتباط با عملکرد محصول و یا سود حاصل از آن، یا میزان کالری حاصل از آن قرار بگیرد. سود حاصل از واحد آب مصرفی در ارتباط با محصولات صادراتی در رابطه با قیمتهای خارجی قرار دارد. میزان سود حاصل از واحد آب و راندمان آبیاری با توجه به اقتصاد و مصالح ملی و از دیدگاه دولت باز هم به گونه دیگر تعریف می‌شود. با چنین دیدگاهی، جالب اینکه اگر الزامات قابل‌قبول از قبیل: شرایط زراعی و به زراعی، الگوی کشت، بهره‌وری از نظر اقتصادی و اجتماعی، اقتصاد

ملی، عملکرد، ارز آوری، توسعه پایدار و محیط زیست و مسایل عمرانی فراهم نباشد می‌توان به جرأت ادعا کرد که چه بسا مصرف نکردن آب، بیشترین فایده (به بیان دیگر بیشترین راندمان) به ویژه از نظر مصالح ملی (از نظر استفاده صحیح از آب) ببار بیاورد و شاید بتوان آنرا «راندمان عدم مصرف آب» نامگذاری کرد و چنین اصطلاح و برداشتی را هم می‌توان وارد ادبیات فنی و مهندسی نمود. چنین وضعیتی در بسیاری موارد و کشت‌های ایران قابل مشاهده است و موارد و مثالهای بسیاری قابل ذکر است. در متون فنی، در ایران ملاحظه می‌شود که همه جا صحبت از استفاده «بهینه» از آب به میان می‌آید و کلمه بهینه بیشتر در مفهوم «ادبی» آن به کاربرده می‌شود تا در مفهوم فنی، توضیح اینکه استفاده بهینه (حداکثر) از آب موقعی میسر است که تمام شرایط پیش گفته در حالت بهینه قرار داشته باشد. پر واضح است که بهینه‌سازی[1] کلیه شرایط در یک پروژه آبیاری ادعای بزرگی است و اکثراً به ویژه در شرایط جهان سوم غیرقابل دسترس و دعوی شعارگونه و یا بسیار نادر و دشوار می‌باشد. لذا در محاورات فنی لازم است بین استفاده بهتر، بیشتر و یا حداکثر نقطه‌گذاری کرد و تفاوت قایل شد.

با توجه به دیگاههای جدید و بازنگری‌های اصولی‌تر در مفهوم راندمان می‌توان ادعا کرد که تعریفی از راندمان که مفهوم و محتوای آن صرفاً صرفه‌جویی در آب (بدون در نظر گرفتن جهات و اهداف اصولی دیگر) باشد می‌تواند ابتدایی‌ترین و خام‌ترین برداشت ممکن از راندمان آبیاری به حساب بیاید.

در سال ۱۹۷۷ نتایج پژوهشهای انجام شده در زمینه اثر تخلخل روی توزیع آب در آبیاری قطره‌ای و روی مدل آزمایشگاهی در آزمایشگاه فیزیک خاک آوینیون (فرانسه) که در بولتن بین‌المللی آبیاری و زهکشی به چاپ رسید (ج، خیرابی) در مقاله مزبور ضمن ارایه تعریف جدید از آبیاری قطره‌ای و ویژگیهای منحصر به فرد آن نسبت به روشهای دیگر، یادآوری شده است: «در آینده لازم است روی مفاهیم تبخیر ـ تعرق و پاره‌ای قوانین فیزیک خاک تجدید نظر به عمل آید».

در سالهای پس از آن مشاهده گردید که در فرمول جیره آبیاری قطره‌ای غیر از ضریب

1- Optimization

تخلیه مجاز ضریب دیگری نیز مرتبط با خیس خوردگی بخش کوچکی از مزرعه، به عنوان ضریب سطح خیس خورده وارد شد، در حال حاضر نیز در رابطه با تبخیر ـ تعرق در مزارعی که شاخص سطح برگ و پوشش نباتی اندک بوده، سطح و لایه بالایی خاک (بالاتر از عمق توسعه ریشه‌ها) و برگها اکثراً خیس است، تبخیر ـ تعرق به علت افزایش تبخیر افزایش می‌یابد بدون اینکه در افزایش عملکرد موثر باشد، لذا در بحث راندمان‌ها نیز سعی می‌شود به این مسئله و بازنگری و بازسازی مفاهیم راندمان آبیاری توجه شود که ذیلاً به آنها اشاره می‌شود.

۱ـ۱۲ـ۱ـ۲ـ راندمان جامع جهت ارزیابی مدیریت آبیاری در مزرعه

در تعریف و تبیین راندمانها سعی می‌شود که هر یک از راندمانها، بالا و یا پایین بودن آنها به عنوان شاخص و معیاری برای نشان دادن بخشی از مکانیزمهای فنی و مدیریت سیستم آبیاری از زوایای مختلف مورد استفاده قرار بگیرد.

همچنین بررسیهای دیگری در این جهت انجام می‌شود تا راندمانها جامعیت بیشتری داشته باشند. به عنوان مثال پایین بودن مقدار ذخیره آب در عمق موثر توسعه ریشه‌ها معمولاً باید با بالا رفتن راندمان کاربرد مترادف باشد. در صورتیکه همیشه چنین نیست به عنوان مثال اگر در یک خاک شنی با نفوذپذیری بالا و نشتی‌های بلند، آبیاری صورت بگیرد بخش اعظم آب در اوایل جویچه‌ها به اعماق نفوذ می‌کند و ممکن است تمام عمق موثر ریشه به رطوبت مطلوب نرسد و راندمان ذخیره پایین باشد، ضمن اینکه بخش اعظم آب به علت نفوذ عمقی در اوایل جویچه‌ها تلف شده، و راندمان کاربرد آبیاری هم پائین باشد. لذا در نگرش جدید تحت عنوان راندمان جامع، سعی می‌شود راندمانها بگونه‌ای فرموله و جمع‌بندی شوند که در برگیرنده مفاهیم بیشتری، مثل راندمان کاربرد آب و تلفات مربوط به نفوذ عمقی، زهاب سطحی، تبخیر از لایه سطحی خاک، راندمان ذخیره و کمبود آب در عمق موثر توسعه ریشه‌ها و غیره باشد.

دیدگاه راندمان جامع برای مدیریت آبیاری توسط آقای جان‌فین و زی‌وانگ [1]

1- Jan feyen and Zhi wang

(۱۹۹۵) محققان موسسه مدیریت خاک و آب بلژیک مطرح شده و در مجله «مدیریت آب در کشاورزی» به چاپ رسیده است.

پس از آبیاری مزرعه، آب مصرفی به چهار بخش تقسیم می‌شود: بخش اول و دوم مربوط به نفوذ عمقی و رواناب (به ترتیب V_2 و V_3)، بخش سوم مربوط به مقدار آبی است که در عمق موثر توسعه ریشه‌ها ذخیره شده و صرف تعرق می‌شود (V_1) و مستقیماً و به طور کامل دارای مصرف مفید بوده وعملکرد را به صورت تابع خطی افزایش می‌دهد. بخش چهارم مقدار آبی است که در لایه سطحی خاک ذخیره می‌شود و تبخیر می‌گردد بدون اینکه در عملکرد محصول تأثیر مستقیم داشته باشد (V_4) . به طوریکه ملاحظه می‌شود دراین دیدگاه آب ذخیره شده در لایه سطحی خاک و تبخیر آن، و تلقی این بخش از آب به عنوان آب تلف شده تازگی دارد و برای شرایطی که تواتر آبیاری و یا بارندگی زیاد بوده و از طرفی سطح سایه‌اندازکم باشد حائزکمال اهمیت است [۱]. در این مبحث می‌توان بخش دیگری را عنوان کرد که مربوط به کمبود رطوبت مطلوب در عمق توسعه ریشه‌ها پس از آبیاری (V_0) است. اشکال (۴-۲) و (۵-۲) نیمرخ نفوذ آب را پس از هر آبیاری (با روشهای سطحی، بارانی و قطره‌ای) نشان می‌دهد که در این اشکال:

L: طول واحد آبیاری است.

Z_d: عمقی از خاک است که جهت تأمین آب مورد نیاز محدوده توسعه ریشه‌ها باید مرطوب شود.

L_d: بخشی از طول واحد آبیاری است که جیره خود را به طورکامل دریافت کرده است

V_1: آبی که در عمق موثر توسعه ریشه‌ها ذخیره شده و صرف تعرق می‌شود.

۱- نگارنده در آذربایجان غربی مزرعه‌ای را مورد بازدید و ارزیابی قرار داده است که با دستگاه گان و با فواصل سه روز، آبیاری می‌شد و افت زیاد محصول، در نتیجه تلفات آب لایه سطحی ناشی از تبخیر، موجب نارضایتی بهره بردار از روش آبیاری تحت فشار و روآوردن مجدد او به روش آبیاری سطحی سنتی شده بود که با تغییر برنامه آبیاری این مشکل حل شد.

V_2: نفوذ عمقی آب است که از دسترس ریشه خارج شده است.

V_3: زهاب سطحی است.

V_4: مقدار تبخیر از لایه سطحی خاک است که جزو تلفات به حساب می‌آید.

V_0: کمبود رطوبت در عمق موثر توسعه ریشه‌ها است.

e: عمق لایه سطحی خاک است که از آن تبخیر صورت می‌گیرد و جزو تلفات به حساب می‌آید.

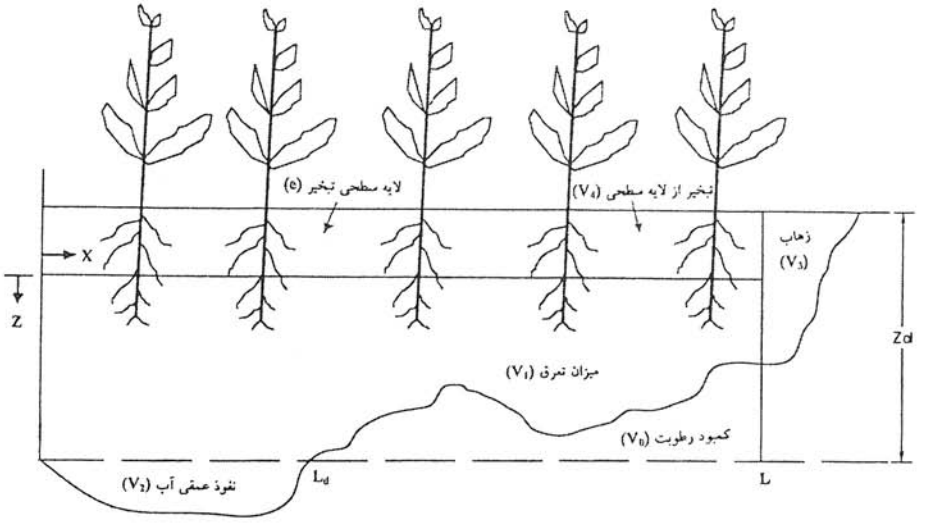
V: کل آب ورودی قطعه آبیاری است.

آقایان بلر، و اسمردان[1] (۱۹۸۸) راندمانی تحت عنوان راندمان «کمبود» به «مازاد» $(E_{d/c})$ به صورت زیر تعریف کرده‌اند:

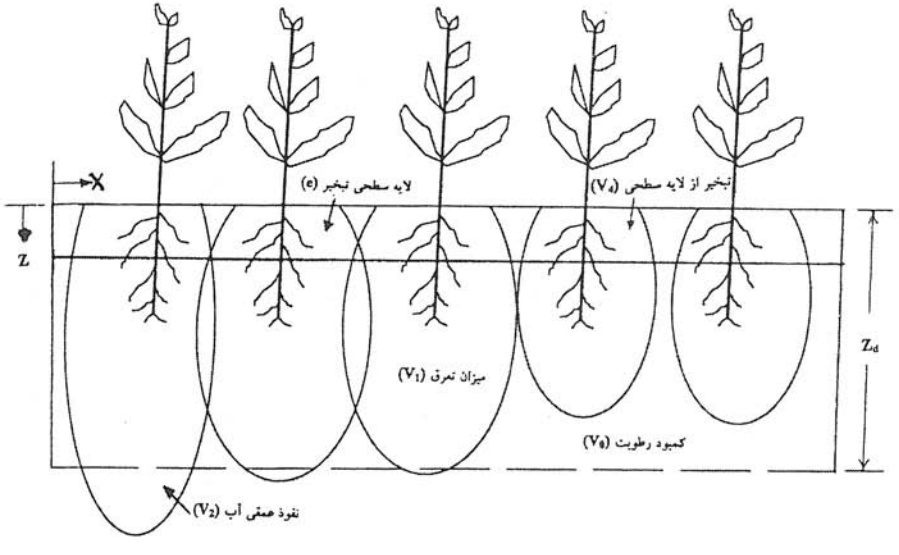
$$E_{d/c}=\frac{\text{مقدار آبیکه در عمق توسعه ریشه‌ها ذخیره شده}}{\text{کمبود آب ذخیره شده در عمق توسعه ریشه‌ها + مقدار آبیکه وارد قطعه آبیاری شده}} \qquad [۲-۲۱]$$

با اینکه این راندمان به تنهایی می‌تواند کارآیی مدیریت آبیاری را از نظر مشکل کمبود رطوبت مطلوب در عمق موثر توسعه ریشه‌ها، پس از آبیاری (و یا بارندگی) نشان دهد، با اینحال نمی‌تواند سهم و نقش تعرق را در مقایسه با تبخیر (در رابطه با عملکرد محصول) مشخص نماید. و حال آنکه راندمان کل (E_g) علاوه بر موارد مزبور می‌تواند تلفات آب را به صورت تبخیر لایه سطحی خاک مورد ارزیابی قرار دهد. در این جا فقط آبی که در نهایت به مصرف مفید رسیده، و یا آبی که به هر صورت تلف شده است مد نظر قرار می‌گیرد. چنین برداشت و تعریفی از راندمان، در ضمن، امکان می‌دهد تا بتوان رابطه تنگاتنگی بین عوامل مدیریتی آبیاری مزرعه و عملکرد محصول برقرار کرد.

1- Blair & Smerdon



شکل ۴-۲- نیمرخ نفوذ آب پس از آبیاری (سطحی و یا بارانی)



شکل ۵-۲- نیمرخ نفوذ آب پس از آبیاری قطره‌ای

با مراجعه به اشکال فوق در شرایطی که عمق موثر توسعه ریشه‌ها به رطوبت مطلوب رسیده باشد و کمبودی وجود نداشته باشد (طول واحد آبیاری L_d باشد) با توجه به تعاریف مربوط به راندمان کاربرد آبیاری (E_a)، راندمان ذخیره (E_s)، راندمان یکنواختی توزیع (U_c) و راندمان کمبود به مازاد $(E_{d/e})$، این راندمان‌ها را می‌توان به صورت روابط زیر نوشت:

راندمان کاربرد $E_a=\frac{V_1+V_4}{V_1+V_2+V_3+V_4}$ [۲-۲۲]

راندمان ذخیره $E_s=\frac{V_1+V_4}{V_1+V_4+V_0}$ [۲-۲۳]

راندمان «کمبود» به «مازاد» $E_{d/e}=\frac{V_1+V_4}{V_1+V_2+V_3+V_4+V_0}$ [۲-۲۴]

$$U_c= 1-\frac{\Sigma|Y|}{Mn}=1-\frac{\Delta Z_{avg}}{M}$$ [۲-۲۵]

$$U_c= 1 - \frac{V'_2+V'_0}{V'_1+V'_2} = \frac{V'_1+V'_2-V'_2-V'_0}{V_1+V_2}$$ [۲-۲۶]

$$Uc=\frac{V'_1-V'_0}{V'_1+V'_2}$$ [۲-۲۷]

از طرفی در صورتیکه Z_d (عمق آب لازم جهت تأمین رطوبت مطلوب در محدوده توسعه ریشه‌ها) معادل Z_{avg} باشد، می‌توان نوشت:

$$V'_1=V_1+V_4$$

$$V'_2= V_2$$

$$V'_0=V_0$$

لذا می‌توان نوشت:

$$Uc=\frac{V'_1-V'_0}{V_1+V_2+V_4} \qquad [۲-۲۸]$$

در روابط فوق:

V_0، V_1 تا V_4 :قبلاً تعریف شده‌اند.

$Z_{avg}=M$: میانگین آب رسیده به n نقطه از مزرعه است.

$\Sigma |Y|$: جمع قدر مطلق انحرافات آب رسیده به هر نقطه از مزرعه، از میانگین است.

n : تعداد نقاط اندازه‌گیری است.

$\frac{\Sigma |Y|}{n}=Z_{avg}$: میانگین جمع قدر مطلق انحرافات آب رسیده به هر نقطه از مزرعه، از میانگین آب رسیده به n نقطه از مزرعه است.

V'_1 : آب ذخیره شده در خاک، بالای Z_{avg} است.

V'_2 : آب ذخیره شده در خاک، زیر Z_{avg} است.

V'_0 :کمبود آب، در بالای Z_{avg} است.

۲-۱۲-۱-۲- راندمان جامع آبیاری یا راندمان ترکیبی یا راندمان کل (E_g)

راندمان جامع آبیاری که برای مدیریت آبیاری در مزرعه به کار می‌رود به قرار زیر تعریف می‌شود:

$$E_g=\frac{\text{مقدار آبیکه صرف تعرق گیاه می‌شود}}{\text{کل آب ورودی به قطعه آبیاری + کمبود آب در منطقه توسعه ریشه‌ها}} \qquad [۲-۲۹]$$

و یا:

$$E_g=\frac{V_1}{V_1+V_2+V_3+V_4+V_0} \qquad [۲-۳۰]$$

در اینجا آب تبخیر شده سطحی (و یا آب پاشیده شده روی شاخ و برگ) به عنوان تلفات در نظر گرفته شده است چرا که مورد استفاده گیاه قرار نگرفته است. لذا میزان

آبیکه در سطح خاک تا عمق توسعه موثر ریشه‌ها ذخیره شده، بخشی از آن (ضریب α) صرف تعرق و بخشی دیگر صرف تبخیر می‌شود لذا می‌توان نوشت:

$$V_1=\alpha(V_1+V_4) \qquad [۲-۳۱]$$

که در آن α ضریب تعرق نامیده می‌شود.

لذا:

$$E_g=\frac{\alpha(V_1+V_4)}{V_1+V_2+V_3+V_4+V_0} \qquad [۲-۳۲]$$

E_g بین صفر تا ۱ (راندمان صفر درصد و ۱۰۰ درصد) نوسان می‌کند. راندمان صفر مربوط به شرایطی است که آب مصرفی صرف تعرق نشود $(\alpha=0)$ و راندمان ۱۰۰٪ مربوط به موقعی است که رواناب نفوذ عمقی، و کمبود آب در عمق موثر توسعه ریشه‌ها وجود نداشته باشد و از طرفی α معادل واحد باشد.

مرتبط کردن رابطه E_g به E_a و E_s:

رابطه [۲-۳۲] را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{E_g}{\alpha}=\frac{V_1+V_4}{V_1+V_2+V_3+V_4+V_0} \qquad [۲-۳۳]$$

$$\frac{\alpha}{E_g}=\frac{V_1+V_2+V_3+V_4+V_0}{V_1+V_4} \qquad [۲-۳۴]$$

$$\frac{\alpha}{E_g}=\frac{(V_1+V_2+V_3+V_4)+(V_1+V_4+V_0)-(V_1+V_4)}{V_1+V_4} \qquad [۲-۳۵]$$

$$\frac{\alpha}{E_g}=\frac{V_1+V_2+V_3+V_4}{V_1+V_4}+\frac{V_1+V_4+V_0}{V_1+V_4}-\frac{V_1+V_4}{V_1+V_4} \qquad [۲-۳۶]$$

$$\frac{\alpha}{E_g}=\frac{1}{E_a}+\frac{1}{E_s}-1 \qquad [۲-۳۷]$$

$$E_g = \frac{\alpha\, E_a.E_s}{E_a+E_s-E_a.E_s} \qquad [۲-۳۸]$$

از تفسیر رابطه [۲-۳۸] نتایج زیر به دست می‌آید:

- در صورتیکه E_a معادل واحد باشد (راندمان کاربرد ۱۰۰٪ باشد) E_g معادل αE_s خواهد بود.
- در صورتیکه E_s معادل واحد باشد (راندمان ذخیره ۱۰۰٪ باشد) E_g معادل αE_a خواهد بود.
- در هر دو مورد بالا اگر ضریب α معادل واحد باشد (شرایطی که تمام آب ذخیره شده در عمق توسعه ریشه‌ها صرف تعرق شود) به ترتیب E_s و E_a معادل E_g خواهد بود.

همانگونه که قبلاً گفته شد E_g از دیدگاه نظری می‌تواند ۱۰۰٪ و یا صفر درصد باشد که در عمل چنین درصدهایی تحقق پیدا نمی‌کند. چراکه E_g موقعی می‌تواند ۱۰۰٪ باشد که $E_a=E_s=1$ و α نیز معادل واحد باشد و E_g موقعی صفر می‌شود که $\alpha=0$ باشد (یعنی آب مصرفی مطلقاً صرف گیاه نشود).

این نتیجه همچنین در شرایطی که نفوذ عمقی (V_2) و V_0 مخالف صفر باشد صادق است زیرا U_c با کاهش V_3 از یکسو و E_g با کاهش V_0 از سوی دیگر افزایش می‌یابد. در صورتیکه $V_0=0$ باشد E_g قادر به نشان دادن یکنواختی توزیع نخواهد بود. تنها در اینصورت است که لازم می‌آید برای نشان دادن «راندمان جامع مدیریت آبیاری مزرعه» هم از E_g و هم از U_c استفاده کرد، و آنها را در رابطه با یکدیگر مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. همانگونه که گفته شد:

اگر تلفات عمقی، رواناب، و کمبود آب در عمق موثر توسعه ریشه معادل صفر باشد E_g معادل واحد (راندمان کل ۱۰۰٪) خواهد بود، به عکس اگر آب آبیاری به تمام تلف شود و هیچ بخشی از آن صرف تعرق گیاه نشود E_g معادل صفر خواهد بود.

اگر $U_c=1$ $(V_0=0)$ باشد (یعنی کمبود آب در منطقه توسعه ریشه‌ها وجود نداشته باشد) و α معادل واحد باشد، E_g معادل یک و راندمان جامع ۱۰۰٪ خواهد شد.

لذا می‌توان نوشت:

$$E_g = \alpha\left(1-\frac{V_0}{V_1+V_4+V_0}\right) = a\left(1-\frac{\Sigma|Y|}{M.n}\right) \qquad [۲-۳۹]$$

زیرا در صورتیکه $U_c=1-\frac{\Sigma|Y|}{Mn}=1$ و α نیز معادل واحد باشد E_g معادل U_c خواهد شد.

لذا در صورتیکه E_a و E_s، ۱۰۰٪ باشد E_g مستقیماً با U_c مرتبط می‌شود.

ولی نظر به اینکه در عمل و در مزرعه جریان عمقی و رواناب (جز در حالت‌هایی از کم آبیاری) صفر نیست لذا E_g نمی‌تواند وضعیت U_c را نشان دهد و لازم است جهت تفسیر نتایج U_c و E_g هر دو مورد توجه و تفسیر قرار گیرند.

مثال ۱: در یک آبیاری E_a معادل ۰/۸ (راندمان ۸۰٪) و E_s معادل ۰/۹ (راندمان ذخیره ۹۰٪) است مطلوبست راندمان جامع E_g با فرض اینکه ضریب تعرق (α) معادل واحد باشد ($Uc=$ ٪۸۵).

$$E_g=\frac{\alpha E_a.E_s}{E_a+E_s-E_a.E_s}\times 100$$

$$E_g=\frac{1\times 0/8\times 0/9}{0/8+0/9-0/8\times 0/9}\times 100=\%73/5$$

در این مثال اولاً E_g از U_c مستقل است ثانیاً فرض شده است جیره آبیاری به اندازه لازم و کافی داده شده است ولی به علت عدم یکنواختی توزیع نیاز گیاه به تمامی برطرف نشده است.

مثال ۲ (کم آبیاری):

$E_a=\%100, E_s=\%80, U_c=\%80$

در اینصورت: $E_g=E_s=\%80$ خواهد بود.

مثال ۳ (کم آبیاری):

$E_a=\%100,\ E_s=\%50,\ U_c=\%70,$

$E_g=E_s=\%50$

مثال ۴ (کم آبیاری، و ٪۴۰ =U_c):

E_a= ٪۱۰۰, E_s= ٪۴۰

E_g= E_s

به طوریکه ملاحظه می‌شود E_g مستقل از راندمان یکنواختی توزیع می‌باشد.

مثال ۵: در این مثال عمق توسعه ریشه‌ها به رطوبت مطلوب رسیده، لذا راندمان ذخیره ٪۱۰۰، ولی راندمان کاربرد آب (E_a) ٪۸۰ و U_c معادل ٪۹۰ است، از آنجا: $E_g = E_a$ (با فرض $\alpha=1$) بدست می‌آید.

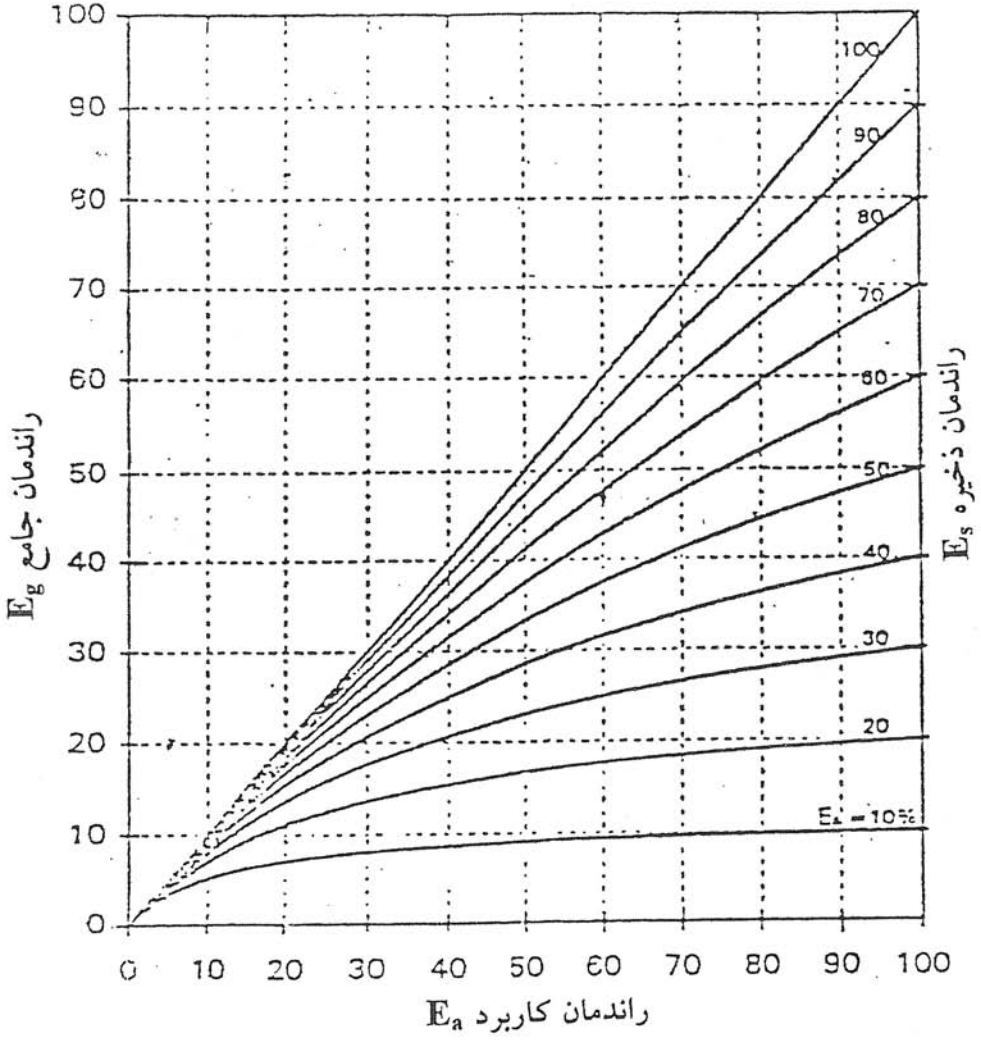
در شکل (۶-۲) رابطه E_a و E_s با E_g (با فرض $\alpha=1$) داده شده است به طوریکه ملاحظه می‌شود کاهش هریک از راندمانهای کاربرد (E_a) و ذخیره (E_s) (و کاهش توأمان آنها) موجب کاهش راندمان جامع E_g می‌گردد.

ضریب تعرق (α)

ضریب تعرق را می‌توان از طریق تحقیقات مستقیم و یا براساس شبیه‌سازی‌ها و با استفاده از مدلهای کامپیوتری، برای محصولات مختلف بدست آورد. ضریب تعرق بیشتر تحت تأثیر دوره‌های مختلف رشد، رژیم آبیاری به ویژه از نظر دور آبیاری، اقلیم و نوع محصول قرار دارد. ولی به طور کلی میزان این ضریب در ماههای اول رشد که سایه‌انداز گیاه و شاخص سطح برگ (*LAI*) کم است، و نیز در دوره آخر رشد و مرحله رسیدگی که فعالیت فیزیولوژیکی گیاه کاهش می‌یابد کمتر از دوره‌هایی است که پوشش گیاهی زیاد است و یا گیاه دوره‌های فعال را می‌گذراند (و یا هردو).

آبیاری بارانی از روی شاخ و برگ نیز می‌تواند در کاهش ضریب تعرق موثر باشد.

یادآوری: در حال حاضر بیشترین تلاش و هدف محققان در این جهت است که کلیه پارامترهای اثرگذار در تبخیر ـ تعرق را در چهارچوب ضریب گیاهی K_c مورد توجه و بررسی قرار دهند و مسایل مربوطه را حل نمایند. حتی در فرمول پنمن مانتیس، تلاش محققان در این جهت است که اصولاً K_c به عنوان پارامتر مستقل حذف شود و وارد فرمول گردد.



شکل ۶ـ۲ـ راندمان کاربرد (E_a)، رابطه بین راندمان جامع (E_g)، کاربرد (E_a) و ذخیره (E_S) (با فرض α=۱)

در این دیدگاه، که اصولی‌تر و علمی‌تر هم هست، تبخیر ـ تعرق، به عنوان یک پدیدهٔ واحد (فیزیکی ـ بیولوژیکی) بدون تفکیک پدیده تبخیر از تعرق، به حساب می‌آید و مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

در ضمن یادآور می‌شود که برآورد و یا اندازه‌گیری تعرق گیاهان از جنبه‌های کاربردی عملی نیست مگر اینکه در برنامه طرح‌های تحقیقاتی پیش‌بینی شده باشد.

در شکل (۷ـ۲) نمونه‌هایی از نیمرخ نفوذ با مقادیر و شرایط مختلف از نظر راندمان‌های کاربرد (E_a)، ذخیره (E_s) راندمان یکنواختی توزیع (U_c) و رابطه آنها با راندمان جامع، با فرض اینکه $a=1$ باشد، در روش‌های آبیاری سطحی، نشان داده شده است.

ـ در پروفیل‌های a,b,c راندمان کاربرد ۱۰۰٪ است بدین معنی که نفوذ عمقی و رواناب وجود ندارد (خط نقطه چین عمق مؤثر توسعه ریشه‌ها است) و تلفات تبخیر لایه سطحی خاک نیز صفر است ($\alpha=1$)، ولی راندمان ذخیره و یکنواختی توزیع کمتر از ۱۰۰٪ است. این حالت بیشتر در کم آبیاری [۱] اتفاق می‌افتد. در این حالت $E_a=E_s$ است.

ـ در شکل‌های d و e و f جیره آبیاری (عمق آبیاری در هر نوبت) به طور کامل به مزرعه داده شده است، ولی با اینحال در عمل به دلیل مشکلات مربوط به مدیریت آبیاری (و یا دلایل فنی و اجتناب‌ناپذیر دیگر) راندمان ذخیره و یکنواختی توزیع صد در صد نیست. در اینحالت E_g با استفاده از رابطه [۳۸ـ۲] محاسبه می‌شود.

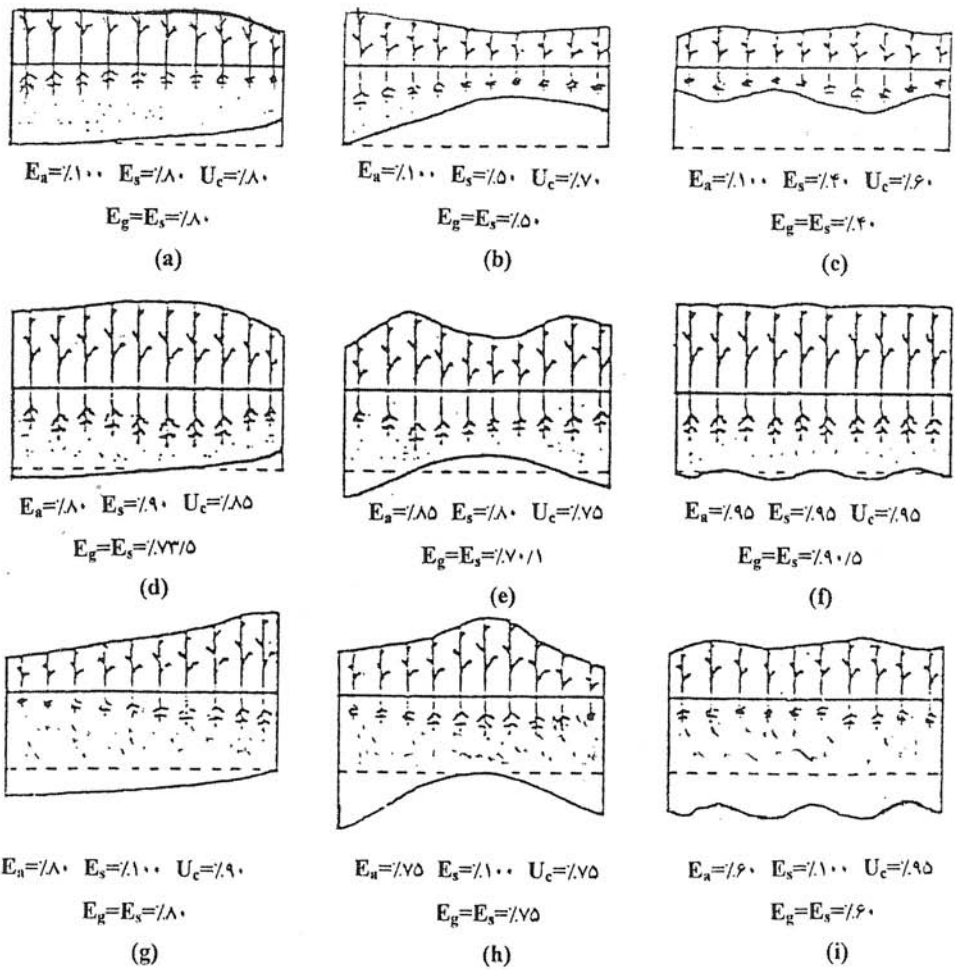
در شکل‌های g و h و I فقط راندمان ذخیره ۱۰۰٪ است ولی راندمان کاربرد و یکنواختی توزیع در شرایط ۱۰۰٪ قرار ندارند. در اینحالت $E_g=E_a$ خواهد بود.

همانگونه که ملاحظه می‌شود E_g به عنوان شاخص مناسب در دو حالت، درجه کارآیی مصرف آب، و نحوه مدیریت آبیاری مزرعه را نشان می‌دهد و با بکارگیری آن می‌توان دید بهتری روی راندمان، به صورت کلان و جامع پیدا کرد.

۳ـ۱۲ـ۱ـ۲ـ نتیجه:

راندمان جامع (E_g)، در برگیرنده راندمان‌های کاربرد، ذخیره، یکنواختی و توزیع است و در این رابطه روی پدیده تعرق بعنوان مصرف مفید آب تأکید شده است.

1- Deficit irrigation



شکل ۷ـ۲ـ مقدار راندمان جامع در رابطه با نیمرخ‌های آبی مختلف در روش‌های آبیاری سطحی

(در این شکل‌ها خطوط فوقانی، تغییرات کارآیی و درجه کفایت آبیاری را در طول واحد آبیاری نشان می‌دهد)

ضریب تعرق (α) پدیده واحد فیزیکی بیولوژیکی را به دو مؤلفه تبخیر آب از لایه سطحی خاک (به عنوان مصرف غیر مفید) و ذخیره آب در عمق مؤثر توسعه ریشه‌ها که صرف تعرق می‌شود (به عنوان مصرف مفید) تقسیم می‌کند و مورد توجه قرار می‌دهد.
در رابطه با مقدار آب آبیاری در هر نوبت و ارتباط آن با E_g سه حالت قابل تشخیص است:

- حالت اول: کم آبیاری (جیره آبیاری کمتر از مقدار مورد نیاز است)، در این حالت رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$E_g = \alpha E_s \qquad [۲-۴۰]$$

- حالت دوم: تأمین و توزیع آب مورد نیاز به اندازه لازم و کافی ولی همراه با نفوذ عمقی بی‌رویه و در نتیجه کمبود رطوبت در عمق توسعه ریشه‌ها، که در اینصورت رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$E_g = \frac{\alpha E_a E_s}{E_a + E_s - E_a E_s} \qquad [۲-۴۱]$$

- حالت سوم: آبیاری سنگین و بیش از مقدار مورد نیاز، که در نتیجه نفوذ عمقی، بیش از حد نرمال و طبیعی خواهد بود. در اینحالت در صورتیکه کمبود رطوبت در عمق توسعه ریشه‌ها وجود نداشته باشد رابطه زیر بر قرار خواهد بود:

$$E_g = \alpha E_a \qquad [۲-۴۲]$$

ضریب α را می‌توان با روش‌های مدیریتی صحیح به ویژه در اقالیم خشک و نیمه‌خشک افزایش داد که موجب استفاده بیشتر و بهتر از آب، و افزایش عملکرد محصول به ازای مصرف واحد آب خواهد بود.

۱۳-۱-۲- نگاه واقع‌گرایانه به راندمان‌های آبیاری و نقد آن

همانگونه که در مباحث قبلی تشریح شد آب مورد نیاز گیاه در دوران رشد (و یا دوره‌های مختلف رشد) با در دست داشتن تبخیر - تعرق گیاه مرجع (ET_o)، ضریب

گیاهی (K_c)، باران مؤثر (E_r) و در صورت لزوم آب شستشو (یا کسر شستشو L_F)، راندمان کاربرد آبیاری (E_a) در روش‌های سطحی و راندمان یکنواختی توزیع (CU) در روش‌های تحت فشار محاسبه می‌شود.

ارقام به دست آمده از این محاسبات، برآوردها و اندازه‌گیری انواع راندمان‌های آب و آبیاری، تلفات مخزن، راندمان انتقال آب، راندمان کاربرد، راندمان یکنواختی توزیع و راندمان جامع و غیره، پروژه‌های تأمین آب، آبرسانی و آبیاری را (در تمام سطوح از تهیه و تأمین آب، تا انتقال، و توزیع در مزرعه و ظرفیت شبکه آبیاری و سازه‌های مربوطه، همچنین برنامه و تقویم آبیاری، و آبیاری «به موقع به اندازه» حفظ و حراست کامل و دائم از محیط زیست نباتی) تحت تأثیر مستقیم خود قرار می‌دهد و عامل بسیار مهم و اساسی در طراحی و اجرا و مدیریت پروژه‌های آب و آبیاری است، و هرگونه خطا و عدم دقت در تعیین ارقام مزبور کاستی‌های بسیاری را به همراه می‌آورد. به همین دلیل هم، از حدود یک قرن به این سو، به ویژه در نیم قرن اخیر تحقیقات و تفحصات و کنکاش‌های بسیاری در سطح جهان، مراکز پژوهشی، آموزشی، اجرایی و ترویجی جهت تدقیق آن به کار بسته شده، و هنوز هم این رشته سر دراز دارد.

در همه جای دنیا، به ویژه در ایران در رابطه با درجه دقت و صحت پارامترهای مزبور و اثرگذار در تعیین آب مورد نیاز گیاهان (طبق عادت و یا مشکلات کار) بیشترین توجه به تبخیر ـ تعرق مرجع و ضریب گیاهی معطوف است. در مورد باران مؤثر نیز در مناطق مرطوب روی این پارامتر و برنامه‌ریزی و مدیریت آبیاری جهت استفاده حداکثر ممکن از نزولات آسمانی توجه ویژه مبذول می‌گردد. ولی در مناطق خشک و نیمه‌خشک (مثل اکثر نقاط ایران) این عامل چندان اثرگذار نیست. در رابطه با آب شستشو نیز به علت پایین بودن راندمان کاربرد آبیاری در ایران، این موضوع چندان تعیین‌کننده نمی‌باشد، چرا که نفوذ عمقی زیاد آب آبیاری عملاً نقش آب شستشو را ایفا می‌کند.

ولی در مورد راندمان‌های آبیاری، و در مراکز و مراجع علمی و مهندسی، و متون مربوطه چندان حساسیتی به آن نشان داده نمی‌شود، و پیچیدگی موضوع به جهات کاربردی، مشکلات برآورد و اندازه‌گیری آن در همه واحدهای زراعی، به ویژه در مرحله طراحی پروژه (و قبل از اجرا) موجب شده است. که در این مورد برآوردهای کلی و

معیارهای تقریبی مورد قبول کارشناسان قرار بگیرد و این کار طی سال‌های متمادی و در تمام عرصه‌ها و در مراحل طراحی و اجرا در مراجع علمی به ویژه نهادهای اجرایی، آنقدر تکرار شده، که طبق عادت و براساس سهل انگاری مزمن، به راحتی و بدون وسواس از کنار آن می‌گذرند و ارقام کلی و تقریبی را در تمام پروژه‌ها لحاظ می‌کنند.

به عنوان مثال این ارقام به طور متوسط در روش آبیاری نشتی حدود ۵۰٪، در روش نواری حدود ۶۰٪، در روش بارانی حدود ۷۰٪ و در آبیاری قطره‌ای حدود ۸۵٪ در نظر گرفته می‌شود. با این که این ارقام مقادیر آب مورد نیاز ناخالص گیاهان را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، ولی در عمل نمی‌توان ادعا کرد که در مزارع مختلف، و با شرایط کاملاً متفاوت به ویژه از نظر مدیریت آبیاری، چنین برآوردها و برداشت‌هایی از راندمان (مبتنی بر ارقام فوق‌الذکر) تحقق عینی پیدا می‌کند.

در مورد راندمان آبیاری‌های سنتی ارقام بسیار پائین، و آشفته‌ای (از ۱۵٪ تا حدود ۲۵٪ و در دهه اخیر ۷ تا ۹۰ درصد) ذکر می‌شود بدون این که به این سؤال پاسخ داده شود که در این روش‌ها که قطعات کوچک است و علی‌الاصول باید راندمان کاربرد بسیار بالا باشد، چگونه و به چه دلیل راندمان اینقدر پایین می‌آید. ثانیاً آب تلف شده در مقیاس‌های مختلف محلی (یک مزرعه)، منطقه‌ای (یک دشت) و استانی (یک حوضه آبریز) آیا مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرد، و یا به آب‌های زیرزمینی می‌پیوندد، و یا اینکه از چرخه (به دلایل مختلف) خارج می‌شود، یا کیفیت آن کاهش می‌یابد، و یا موجب تخریب خصوصیات فیزیکی خاک می‌شود و یا موجب بالا آمدن آب زیرزمینی می‌گردد، که ایجاد شبکه زهکشی زیرزمینی را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد.

دلایل اصلی تلفات آب، در روش‌های آبیاری سنتی به قرار زیر است:

- به دلیل توزیع گردشی بین حقابه‌برها و یا به علت ناآگاهی بهره‌برداران. توضیح این که مهمترین عامل تلفات آب اینست که آبیاری «به موقع و به اندازه» صورت نمی‌گیرد. به عنوان مثال حقابه‌بر هر ده روز یک بار جیره آبیاری به میزان ۱۰ سانتیمتر را در تمام دوران رشد از فروردین، تا آبان ماه در اختیار گیاه قرار می‌دهد. در حالی که شرایط اقلیمی در این ماه‌ها، و تغییرات عمق موثر توسعه ریشه‌ها در ماه‌های مختلف، نوع گیاه و خاک و شرایط و دوره‌های بحرانی ایجاب می‌کند که در طول فصل مقدار آب در هر نوب آبیاری با مقادیر

و فواصل کاملاً متفاوت به مزرعه داده شود.

- بخش عظیمی از آب آبیاری در شبکه‌های روستایی که در شرایط بسیار بد فنی از نظر شکل، و ابعاد، و پوشش، وجود علف‌های هرز، طولانی بودن و پیچ و خم‌دار بودن، تعدد انهار و عدم مراقبت، نگهداری و لایروبی، شیب نامتناسب، استفاده احشام از این آب‌ها، عبور وسایط نقلیه از مسیر انهار و تخریب آنها و غیره تلف می‌شود.

- یکی دیگر از عوامل، تراکم بوته است که همه جا مناسب و متناسب نیست. بسیار مشاهده می‌شود که در یک باغ که با روش کرتی سنتی آبیاری می‌شود برای آبیاری دو تا سه اصله درخت کرت را پر از آب می‌کنند.

- به هدر دادن آب توسط کشاورزان در مناطقی که آب خیلی فراوان یا خیلی ارزان است، یکی از دلایل تلفات به شمار می‌رود. به طوری که مشاهده شده است در چنین مناطقی آبیاری شبانه (به دلیل بالا بودن هزینه آبیاری و پایین بود نرخ آب) در انهار رها می‌شود و هرز می‌رود.

- عدم اجرای قانون اساسی در رابطه با آب، و نبود کنترل کامل دولت روی منابع آب، صدمات جبران ناپذیری به این منابع و مصرف صحیح آب‌های کشور وارد کرده است. توضیح این که با تلقی از آب به عنوان انفال (یعنی آن چیزی که به عموم ملت تعلق دارد) طبق نص قانون اساسی، لازم می‌بود مالکیت کلیه منابع آب در اختیار دولت می‌بود تا به طور ضابطه‌دار (مثل آب شهری) به نقاط مصرف تحویل دهد.

- وغیره.

در متون علمی به این مسایل ریشه‌ای توجه نمی‌شود، و کلیه کارهای سطحی که در مورد برآورد و اندازه‌گیری راندمان آبیاری انجام گرفته، (و روی آنها عنوان «تحقیق» نیز گذاشته شده) هیچگاه به ریشه‌ها اشاره نشده است و با انجام یک سری اندازه‌گیری‌ها، ارقامی هم ذکر شده است، به عنوان نمونه:

- در یک مطالعه راندمان بازده آبیاری در شیراز در سه نوبت ۱۲٪، ۷۶٪ و ۲۰٪ و راندمان انتقال ۵۴ درصد اعلام شده است.

- در یک مطالعه دیگری راندمان آبیاری منطقه‌ای به وسعت ۵۰۰۰ هکتار را ۲۱ درصد اعلام کرده‌اند، و راندمان آبیاری یک کشت و صنعت زیر شبکه دز حداکثر ۳۷ و به طور

متوسط ۳۲ درصد برآورد شده است.

- آزمایشات در شبکه‌های سنتی دشت‌های خوزستان و تبریز و کرمانشاه انجام گرفته و متوسط بازده انتقال ۲۳ تا ۵۰٪ و متوسط بازده کاربرد در مزرعه ۴۵ تا ۶۰ درصد و بازده کل ۱۳/۵ تا ۲۲ درصد اعلام شده است.

- در مطالعه دیگری در شهریار، هشتگرد و کمال‌آباد که روی روش آبیاری شیاری تحت کشت چغندرقند انجام شده راندمان کاربرد آب در سه مزرعه ۱۱٪ و ۵۷٪ و ۴۱٪ اعلام شده است.

- جالب این که در یک مطالعه در استان چهارمحال بختیاری در اراضی پراکنده روی روش آبیاری شیاری راندمان کاربرد اراضی غیر یکپارچه بیشتر از اراضی یکپارچه نشان داده شده است!

- در مطالعه دیگری که در کرمان و اصفهان و ارومیه و گرگان روی بازده کاربرد آب در روش‌های سطحی سنتی انجام شده، راندمان در طول فصل رشد را بسیار متغیر تشخیص داده‌اند!، و در اصفهان و ارومیه حداقل راندمان ۱۶/۷ (دقت تا ۰/۷ نیز اعجاب‌انگیز است) و حداکثر ۶۴/۹! برآورد گردیده است.

- در مزارع برنج شمال (فومن رشت و لاهیجان) در شرایطی که از رواناب سطحی در پایین‌دست استفاده شود راندمان در مزارع مختلف ۵۱/۲٪ (!) و ۴۹٪ و ۴۹/۴٪ و در حالت استفاده از رواناب در این مزارع راندمان به ترتیب ۷۳/۴ و ۷۳/۳ و ۷۲/۳ بوده است.

- در مطالعه دیگری که در خراسان در ۶ مزرعه انجام شده، راندمان از ۵٪ تا ۹۰٪ گزارش شده است. تلفات آب در شبکه‌های روستایی و در مزارع سنتی با توجه به عوامل و دلایل ریشه‌ای که قبلاً به آنها اشاره شد نیازی به تحقیقات گسترده ندارد. ارقام به دست آمده نیز منشاء هیچگونه نتیجه‌گیری علمی، یا کاربردی نیست.

۱۴-۱-۲- پیشنهادات جهت برون رفت از بحران آب:

الف - تلقی از منابع آب به عنوان انفال، و مالکیت تمام و کمال آن توسط دولت و تحویل ضابطه‌دار به نقاط مصرف.

ب ـ تدوین قانون توزیع عادلانه آب در کشاورزی، مناسب و مترقی و متناسب با مشکلات و نیازها.

پ ـ تمرکز کلیه تصمیم‌گیری‌ها در رابطه با منابع آب در یک مرکز

ت ـ اصلاح روش‌های آبیاری سنتی (حدود ۴۰٪ با روش‌های ترویجی، حدود ۲۰٪ با روش‌های آبیاری سطحی جدید و حدود ۳۰٪ توسط روش‌های آبیاری تحت فشار) با این توضیح که در حال حاضر حدود ۱۰ تا ۱۵٪ از روش‌های سنتی اصلاح شده و یا قابل قبول می‌باشد.

ث ـ تشکیل انواع تشکل‌ها، تعاونی‌ها، و اتحادیه‌های روستایی، به ویژه تعاونی‌های توزیع.

ج ـ بیمه محصولات کشاورزی

چ ـ مکانیزه کردن کشت‌های آبی، و در اختیار قرار گرفتن بخش اعظم صنعت کشور در خدمت کشت‌های آبی مکانیزه.

ح ـ اعتلاء وضع اقتصادی، فرهنگی، دانش فنی، و سطح سواد روستائیان و روستازادگان تا بتوانند آبیاری‌های مدرن و کشاورزی جدید را به خوبی و به سهولت پذیرا باشند و اجرا و مدیریت نمایند.

خ ـ تغییر الگوی کشت

د ـ بهره‌برداری و بهره‌وری بیشتر، بهتر و حداکثر از واحد آب به جای واحد اراضی، چه از نظر عملکرد، و چه از نظر سود خالص حاصله (بسته به هدف بهره‌بردار)

این موضوع بیشتر در رابطه با «کم آبیاری» قرار دارد، که اکثراً موقعی ضرورت پیدا می‌کند که منابع آب محدود و اراضی بالنسبه زیاد باشد. (مثل اکثر شرایط ایران). در این صورت و چنین شرایطی استفاده بیشتر از واحد آب (به جای واحد اراضی) امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

چه بسا در شرایطی هم که آب فراوان است، در رابطه با سود بیشتر و یا حداکثر، کم آبیاری ضرورت پیدا می‌کند. توضیح این که در بسیاری از شرایط و در پروژه‌های آبیاری، نقطه ماگزیمم منحنی عملکرد (که مربوط به آبیاری کامل است) با ماگزیمم منحنی سود خالص منطق نیست.

نظر به اهمیت کم آبیاری در شرایط ایران، جهت توضیحات بیشتر خواننده را به کتاب دستورالعمل‌های کم‌آبیاری از انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی (گروه کار آب مورد نیاز گیاهان) ارجاع می‌دهد.

یادآوری‌های مهم:

به دلیل بحران آب در کشور، و حرکت در جهت کم‌آبیاری توصیه می‌شود:

۱ـ در رابطه با تعیین آب مورد نیاز گیاهان، با توجه به نشریات گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران (۱۳۴۹)، جاماب و موسسه تحقیقات خاک و آب (۱۳۷۶) و سند ملی آب (۱۳۷۹) حداکثر استفاده لازم به عمل آید.

۲ـ در ایستگاه‌های پرآمار از ارقام به دست آمده از روش پنمن مانتیس و در رابطه با K_c و باران مؤثر از نشریه موسسه تحقیقات خاک و آب استفاده شود [۱].

۳ـ در ایستگاه‌های کم آمار و بدون آمار (که محاسبه تبخیر ـ تعرق با روش پنمن مانتیس میسر نبوده و از روش‌های دیگری استفاده شده است) از ارقام حداقل (مندرج در نشریات فوق) برای ماه‌های مختلف (مستقل از روشی که برای محاسبه به کار رفته است) استفاده شود.

۴ـ از کل آب مورد نیاز ناخالص دوران رشد محصولات که به صورت نهایی برآورد و محاسبه شده و لازم است تأمین شود ۲۰٪ آن کسر شود. این کار اگر در جهت تدقیق باشد که تحصیل حاصل است و در غیر این صورت در جهت «کم آبیاری» است که به نوبه خود مفید خواهد بود.

۵ـ در کارهای تحقیقاتی، جهت تعیین آب مورد نیاز گیاهان لازم است از آمار هواشناسی همان سال استفاده شود. نشریه حاضر در چنین مواردی می‌تواند به صورت کاربردی وسیعاً مورد استفاده کارشناسان قرار بگیرد که خود، یکی از اهداف مهم تهیه این اثر است.

۱ـ گروه کار آب مورد نیاز گیاهان، کمیته ملی آبیاری و زهکشی، در سال ۱۳۸۰ نشریه‌ای تحت عنوان «مقایسه تطبیقی روش پنمن مانتیس با روش‌های FAO_{24}» تألیف کرده است که در آن ETO (متوسط روزانه ماه‌های مختلف) برای بیش از ۶۰ ایستگاه پرآمار براساس روش پنمن مانتیس و سایر روش‌های فائو ۲۴ (غیر از روش تشتک) محاسبه شده است.

۲ـ۲ـ محاسبه و برآورد آب شستشو در آبیاری جهت کنترل شوری

۱ـ۲ـ۲ـ مقدمه

در هر آبیاری املاح محلول موجود در آب آبیاری وارد خاک می‌گردد. تحت فرایند تبخیر ـ تعرق، آب از خاک خارج شده و املاح باقی می‌مانند. چنانچه آب شستشو به آب آبیاری جهت شستشوی املاح افزوده نشود (و آب لازم از محوطه ریشه‌ها به افق‌های پایین‌تر نفوذ ننماید) در اینصورت پدیده فوق رخ می‌دهد. لذا بمنظور اجتناب از این امر لازم است آب شستشو به آب آبیاری اضافه شود.

در این قسمت پس از مروری بر مبانی، محاسبات لازم جهت اعمال آب شستشو ارائه خواهد گردید.

۲ـ۲ـ۲ـ اثرات شوری

نمک محلول در آب خاک، تبخیر را کاهش و جذب آب توسط ریشه را تقلیل می‌دهد. نمک‌های محلول کل انرژی پتانسیل آب خاک را کاهش می‌دهد. تحت این شرایط گیاه جهت جذب آب لازم است نیروی بیشتری را اعمال نماید. علاوه بر این نمک‌ها می‌توانند مسمومیت‌های یونی در گیاه پدید آورده و متابولیسم گیاه و رشد آن را دچار مشکل نمایند.

اثرات شوری بسته به نوع آبیاری می‌تواند اشکال مختلفی داشته باشد. در آبیاری بارانی جذب کلرورسدیم در سرتاسر برگ‌ها می‌تواند باعث بروز مسمومیت در همه گونه‌های گیاهی گردد. با آبیاری سطحی و قطره‌ای معمولاً شرایط مسمومیت یونی در باغات پدیدار می‌گردد همچنین بالا بودن یون سدیم باعث کمبود کلسیم در تمامی گونه‌های گیاهی می‌گردد.

۳ـ۲ـ۲ـ آستانه مقاومت به شوری

شوری آب و خاک معمولاً بصورت هدایت الکتریکی بیان می‌گردد. در مناطقی که با شوری آب و خاک مواجه هستیم تا زمانیکه هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک (EC_e) کمتر از حد آستانه ($EC_{e\ treshold}$) باشد کاهش محصول حاصل نمی‌گردد، امّا چنانچه هدایت الکتریکی عصاره اشباع از حد آستانه فراتر رود در این صورت راندمان تولید

بصورت خطی (با شیب b) با افزایش شوری کاهش می‌یابد.

مقاومت گیاهان به شوری متفاوت می‌باشد. برخی از آنها در شوری‌های بالا محصول دهی قابل قبولی نسبت به برخی دیگر دارند، به این دلیل که قادرند تعادل اسمزی را بهتر حفظ کنند و آب بیشتری از خاک شور جذب نمایند و یا اینکه در مقابل مسمومیت یونی حاصل از شوری مقاوم‌تر می‌باشند.

۴-۲-۲- رابطه عملکرد با شوری

کاهش عملکرد در اثر شوری، بصورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = ۱ - (EC_e - EC_{e\ treshold}) \frac{b}{۱۰۰} \qquad [۲-۴۳]$$

که در آن:

Y_m: ماکزیمم عملکرد قابل انتظار زمانی که شوری عصاره اشباع خاک از حد آستانه کمتر باشد.

Y_a: عملکرد واقعی کشت

EC_e: متوسط هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک در ناحیه ریشه‌ها، (dSm^{-1}).

$EC_{e\ treshold}$: هدایت الکتریکی عصاره اشباع هنگام شروع به کاهش عملکرد یا هدایت الکتریکی عصاره اشباع آستانه، (dSm^{-1}).

b: کاهش عملکرد به ازای افزایش یک واحد EC_e، $(\% / dSm^{-1})$

این معادله برای حالتی است که EC_e بیشتر از $EC_{e\ treshold}$ باشد.

آستانه شوری و همچنین شیب خط کاهش محصول برای گیاهان مختلف در جدول شماره (۲-۲) ارائه شده است.

رابطه شوری و عملکرد در نشریه شماره ۲۹ و ۴۸ سازمان خواربار جهانی ارائه شده است که اغلب آنها براساس مطالعاتی است که آب موجود در خاک در عمق ۰/۳ تا ۰/۶ متری (با توجه به نوع کشت) در حد پتانسیل و بالاتر حفظ شده است. در بررسی‌های مذکور برای محاسبات آماری نمونه‌ها از مزارع شاهدی برداشت شده که در آنها آب سهل‌الوصول خاک (RAW) در فاصله بین دو آبیاری تخلیه می‌شود.

جدول ۲ـ۲ـ آستانه شوری و شیب خط کاهش محصول برای گیاهان مختلف

ردیف	گیاه[۱]	آستانه کاهش عملکرد محصول (dS/m) (a)	شیب کاهش عملکرد به ازاء هر واحد افزایش پس از آستانه تحمل (b)	طبقه‌بندی گیاه از نظر تحمل به شوری
۱	لوبیا	۱	۱۹	S
۲	بادام	۱/۵	۱/۹	S
۳	زردآلو	۱/۶	۲۴	S
۴	هویج	۱	۱۴	S
۵	گریپ‌فروت	۱/۸	۱۶	S
۶	پیاز	۱/۲	۱۶	S
۷	پرتقال	۱/۷	۱۶	S
۸	هلو	۱/۷	۲۱	S
۹	آلو	۱/۵	۱۸	S
۱۰	توت‌فرنگی	۱	۳۳	S
۱۱	یونجه	۲	۷/۳	MS
۱۲	کلم	۱/۸	۹/۷	MS
۱۳	شبدر	۱/۵	۱۲	MS
۱۴	شبدر برسیم	۱/۵	۵/۷	MS
۱۵	ذرت علوفه‌ای	۱/۸	۷/۴	MS
۱۶	ذرت دانه‌ای	۱/۷	۱۲	MS
۱۷	خیار	۲/۵	۱۳	MS
۱۸	کتان	۱/۷	۱۲	MS
۱۹	انگور	۱/۵	۹/۶	MS
۲۰	کاهو	۱/۳	۱۳	MS
۲۱	بادام زمینی	۱/۷	۲۹	MS
۲۲	فلفل	۱/۵	۱۴	MS
۲۳	سیب زمینی	۱/۷	۱۲	MS
۲۴	تربچه	۱/۲	۱۳	MS
۲۵	شالی (برنج)	۳	۱۲	MS
۲۶	اسفناج	۲	۷/۶	MS
۲۷	نیشکر	۱/۷	۵/۹	MS
۲۸	گوجه‌فرنگی	۲/۵	۹/۹	MS
۲۹	ذرت شیرین	۱/۷	۱۲	MS
۳۰	جو علوفه‌ای	۶	۷/۱	MT
۳۱	چغندر	۴	۹	MT
۳۲	سویا	۵	۲۰	MT
۳۳	گندم	۶	۷/۱	MT
۳۴	جو دانه‌ای	۸	۵	T
۳۵	خرما	۴	۳/۶	T
۳۶	چغندرقند	۷	۵/۹	T
۳۷	پنبه	۷/۷	۵/۲	T

۱- پسته، انار، انجیر و روناس نیز از گیاهان مقاوم به شوری می‌باشند.

S= حساس MS= نیمه حساس MT= نیمه مقاوم T = مقاوم

مثال:

در صورتی که عصاره اشباع خاک در کشت پیاز ۴ دسی‌زیمنس بر متر باشد عملکرد پتانسیل چند درصد خواهد بود.

با توجه به جدول (۲ـ۲) کاهش عملکرد به ازاء افزایش یک واحد EC_e برای پیاز ۱۶ و هدایت الکتریکی عصاره اشباع آستانه ۱/۲ دسی‌زیمنس بر متر می‌باشد با استفاده از رابطه /۲ـ۴۳/:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = ۱-(۴-۱/۲)\times\frac{۱۶}{۱۰۰}=۰/۵۵$$

به عبارت دیگر ۴۵٪ افت محصول در اثر شوری خواهد بود.

در جدول (۲ـ۳) عملکرد پتانسیل گیاهان مختلف به ازاء شوری‌های مختلف آب آبیاری و عصاره اشباع خاک داده شده است.

جدول ۳ـ۲ـ سطوح مختلف مقاومت گیاه نسبت به شوری آب آبیاری و عصاره اشباع خاک با عملکردهای مختلف

سبزیجات

محصول	عملکرد پتانسیل	٪۱۰۰		٪۹۰		٪۷۵		٪۵۰		ماگزیمم
	نام لاتین	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe
چغندر	Beets	۴/۰	۲/۷	۵/۱	۳/۴	۶/۸	۴/۵	۹/۶	۶/۴	۱۵
بروکلی	Broccli	۲/۸	۱/۹	۳/۹	۲/۶	۵/۵	۳/۷	۸/۲	۵/۵	۱۳/۵
گوجه فرنگی	Tomatoe	۲/۵	۱/۷	۳/۵	۲/۳	۵/۰	۳/۴	۷/۶	۵/۰	۱۲/۵
خیار	Cucumber	۲/۵	۱/۷	۳/۳	۲/۲	۴/۴	۲/۹	۶/۳	۴/۲	۱۰
طالبی	Cantaloupe	۲/۲	۱/۵	۳/۶	۲/۴	۵/۷	۳/۸	۹/۱	۶/۱	۱۶
اسفناج	Spinach	۲/۰	۱/۳	۳/۳	۲/۲	۵/۳	۳/۵	۸/۶	۵/۷	۱۵
کلم‌پیچ	Cabbage	۱/۸	۱/۲	۲/۸	۱/۹	۴/۴	۲/۹	۷/۰	۴/۶	۱۲
سیب‌زمینی	Potato	۱/۷	۱/۱	۲/۵	۱/۷	۳/۸	۲/۵	۵/۹	۳/۹	۱۰
ذرت شیرین	Sweet Corn	۱/۷	۱/۱	۲/۵	۱/۷	۳/۸	۲/۵	۵/۹	۳/۹	۱۰
سیب‌زمینی	Potato Sweet	۱/۵	۱/۰	۲/۴	۱/۶	۳/۸	۲/۵	۶/۰	۴/۰	۱۰/۵
فلفل	Pepper	۱/۵	۱/۰	۲/۲	۱/۵	۳/۳	۲/۲	۵/۱	۳/۴	۸/۵
کاهو	Lettuce	۱/۳	۰/۹	۲/۱	۱/۴	۳/۲	۲/۱	۵/۲	۳/۴	۹
تربچه	Radish	۱/۲	۰/۸	۲/۰	۱/۳	۳/۱	۲/۱	۵/۰	۳/۴	۹
پیاز	Onion	۱/۲	۰/۸	۱/۸	۱/۲	۲/۸	۱/۸	۴/۳	۲/۹	۷/۵
هویج	Carrot	۱/۰	۰/۷	۱/۷	۱/۱	۲/۸	۱/۹	۴/۶	۳/۱	۸
لوبیا سبز	Beans	۱/۰	۰/۷	۱/۵	۱/۰	۲/۳	۱/۵	۳/۶	۲/۴	۶/۵

ادامه جدول ۳ـ۲ـ

نباتات زراعی

محصول	عملکرد پتانسیل	٪۱۰۰		٪۹۰		٪۷۵		٪۵۰		ماگزیمم
	نام لاتین	FCe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe
جو	Berley	۸/۰	۵/۳	۱۰	۶/۷	۱۳	۸/۷	۱۸	۱۲	۲۸
پنبه	Cotton	۷/۷	۵/۱	۹/۶	۶/۴	۱۳	۸/۴	۱۷	۱۲	۲۷
چغندر قند	Sugarbeet	۷/۰	۷/۴	۸/۷	۵/۸	۱۱	۷/۵	۱۵	۱۰	۲۴
گندم تابستانه	Wheat	۶/۰	۴/۰	۷/۴	۴/۹	۹	۶/۴	۱۳	۸/۷	۲۰
گلرنگ	Safflower	۵/۳	۳/۵	۶/۲	۴/۱	۸	۵/۰	۱۰	۶/۶	۱۴/۵
سویا	Soybean	۵/۰	۳/۳	۵/۵	۳/۷	۶	۴/۲	۷	۵/۰	۱۰
سورگوم	Sorghum	۴/۰	۲/۷	۵/۱	۳/۴	۷	۴/۸	۱۱	۷/۲	۱۸
بادام زمینی	Groundnut	۳/۲	۲/۱	۳/۵	۲/۴	۴	۲/۷	۵	۳/۳	۶/۵
برنج	Rice	۳/۰	۲/۰	۳/۸	۲/۶	۵	۳/۴	۷	۴/۸	۱۱/۵
سسبانیا	Sesbania	۲/۳	۱/۵	۳/۷	۲/۵	۶	۳/۹	۹	۶/۳	۱۶/۵
ذرت	Corn	۱/۷	۱/۱	۲/۵	۱/۷	۴	۲/۵	۶	۳/۹	۱۰
کتان صنعتی	Flax	۱/۷	۱/۱	۲/۵	۱/۷	۴	۲/۵	۶	۳/۹	۱۰
باقلا	Broadbean	۱/۶	۱/۱	۲/۶	۱/۸	۴	۲/۰	۷	۴/۵	۱۲
لوبیا صنعتی	Cowpea	۱/۳	۰/۹	۲/۰	۱/۳	۳	۲/۱	۵	۳/۲	۸/۵
لوبیا	Beans	۱/۰	۰/۷	۱/۵	۱/۰	۲	۱/۵	۴	۲/۴	۶/۵

ادامه جدول ۳-۲-

نباتات علوفه‌ای

محصول	عملکرد پتانسیل	٪۱۰۰		٪۹۰		٪۷۵		٪۵۰		ماگزیمم
	نام لاتین	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe
برموداگراس	Bermuda grass	۶/۹	۴/۶	۸/۵	۵/۷	۱۰/۸	۷/۲	۱۴/۷	۹/۸	۲۲/۵
جو (علوفه)	Barley (hay)	۶/۰	۴/۰	۷/۴	۴/۹	۹/۵	۶/۳	۱۳/۰	۸/۷	۲۰
چمن دائمی	Perenial ryr-grass	۵/۶	۳/۷	۶/۹	۴/۶	۸/۹	۵/۹	۱۲/۲	۸/۱	۱۹
شبدر	Trefoil	۵/۰	۳/۳	۶/۰	۴/۰	۷/۵	۵/۰	۱۰/۰	۶/۷	۱۵
ماشک	Vetch	۳/۰	۲/۰	۳/۹	۲/۶	۵/۳	۳/۵	۷/۶	۵/۰	۱۲
سودان گراس	Sudan grass	۲/۸	۱/۹	۵/۱	۳/۴	۸/۶	۵/۷	۱۴/۴	۹/۶	۲۶
چاودار وحشی	Wildrye	۲/۷	۱/۸	۴/۴	۲/۹	۶/۹	۴/۶	۱۱/۰	۷/۴	۱۹/۵
یونجه	Alfalfa	۲/۰	۱/۳	۳/۴	۲/۲	۵/۴	۳/۶	۸/۸	۵/۹	۱۵/۵

ادامه جدول ۳ـ۲ـ

درختان میوه

محصول	عملکرد پتانسیل	٪۱۰۰		٪۹۰		٪۷۵		٪۵۰		ماگزیمم
	نام لاتین	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe
خرما	Date palm	۴/۰	۲/۷	۶/۸	۴/۵	۱۰/۹	۷/۳	۱۷/۹	۱۲	۲۳
زیتون و انار	Olive pome granate									
گریب فروت	Grapefruit	۱/۸	۱/۲	۲/۴	۱/۶	۳/۴	۲/۲	۴/۹	۳/۳	۸
پرتقال	Orange	۱/۷	۱/۱	۲/۳	۱/۶	۳/۲	۲/۲	۴/۸	۳/۲	۸
لیمو	Lemon	۱/۷	۱/۱	۲/۳	۱/۶	۳/۳	۲/۲	۴/۸	۳/۲	۸
سیب	Apple									
گلابی	Pear	۱/۷	۱/۰	۲/۳	۱/۶	۳/۳	۲/۲	۴/۸	۳/۲	۸
گردو	Walnut	۱/۷	۱/۱	۲/۳	۱/۶	۳/۳	۲/۲	۴/۸	۳/۲	۸
هلو	Peach	۱/۷	۱/۱	۲/۲	۱/۴	۲/۹	۱/۹	۴/۱	۲/۷	۶/۵
زردآلو	Apricot	۱/۶	۱/۱	۲/۰	۱/۳	۲/۶	۱/۸	۳/۷	۲/۵	۶
انگور	Grape	۱/۵	۱/۰	۲/۵	۱/۷	۴/۱	۲/۷	۶/۷	۴/۵	۱۲
بادام	Almond	۱/۵	۱/۰	۲/۰	۱/۴	۲/۸	۱/۹	۴/۱	۲/۷	۷

ادامه جدول ۳ـ۲ـ

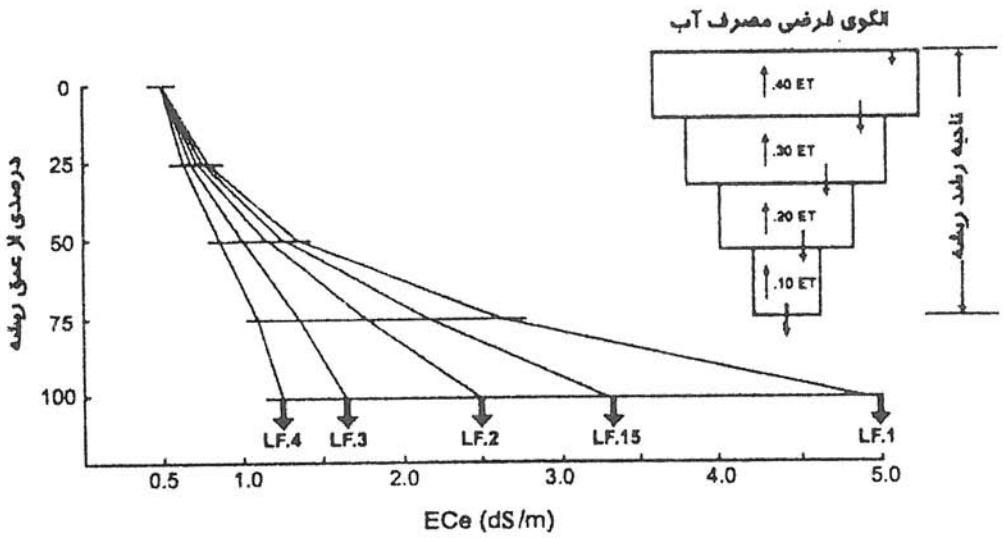
درختان میوه

محصول	عملکرد پتانسیل	٪۱۰۰		٪۹۰		٪۷۵		٪۵۰		ماگزیمم
	نام لاتین	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe	ECw	ECe
تمشک	Blackberry	۱/۵	۱/۰	۲/۰	۱/۳	۲/۶	۱/۸	۳/۸	۲/۵	۶
آووکادو	Avocado	۱/۳	۰/۹	۱/۸	۱/۲	۲/۵	۱/۷	۳/۷	۲/۴	۶
تمشک خوراکی	Raspberry	۱/۰	۰/۷	۱/۴	۱/۰	۲/۱	۱/۴	۳/۲	۲/۱	۵/۵
ذرت علوفه	Corn(forage)	۱/۸	۱/۲	۳/۲	۲/۱	۵/۰	۳/۵	۸/۶	۵/۷	۱۵/۵
شبدر	Clover	۱/۵	۱/۰	۳/۲	۲/۱	۵/۹	۳/۹	۱۰/۳	۶/۸	۱۶
شبدر	Clover, alsike, lad-ino	۱/۵	۱/۰	۲/۳	۱/۶	۳/۶	۲/۴	۵/۷	۳/۸	۱۰

۵-۲-۲-کسر آبشویی LF[1]

به قسمتی از آب آبیاری که جهت شستشوی املاح از محوطه ریشه‌ها عبور کرده و به افق‌های پایین‌تر نفوذ می‌نماید کسر آبشویی اطلاق می‌گردد.

در شکل (۸-۲) شوری خاک در حالت‌های مختلف *LF* نمایش داده شده است. همانگونه که در این شکل مشهود است در یک خاک با شوری ثابت آب آبیاری (یک دسی‌زیمنس بر متر)، هرچه مقدار کسر آبشویی بیشتر باشد شوری خاک در میزان پایین‌تری کنترل می‌گردد.



شکل ۸-۲-اثر شوری آب آبیاری (EC_W) بر شوری عصاره اشباع خاک (EC_e) در ناحیه ریشه‌ها با آبشویی‌های متفاوت

1- Leaching fraction

۶ـ۲ـ۲ـ آب شستشوی مورد نیاز

همانگونه که بحث آن گذشت زمانیکه با مشکل شوری مواجه هستیم به منظور کنترل نمک، لازم است که آب شستشو به آب خالص مورد نیاز افزوده شود تا آب اضافی، نمک‌های تجمع یافته را به افق‌های پایین‌تر منتقل نماید.

برای آبیاری سطحی و بارانی از طریق رابطه زیر نسبت آب شستشوی مورد نیاز قابل محاسبه می‌باشد:

$$LR = \frac{EC_w}{5EC_e - EC_w} \qquad [۲-۴۴]$$

که در آن:

LR: نسبت آب شستشوی مورد نیاز (بدون بعد).

EC_w: هدایت الکتریکی آب آبیاری، (dSm^{-1}).

EC_e: هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک با توجه به عملکرد قابل انتظار زارع، (dSm^{-1}).

برای آبیاری با تواتر بالا مانند آبیاری قطره‌ای از رابطه زیر استفاده می‌گردد:

$$LR = \frac{EC_w}{2(max\ EC_e)} \qquad [۲-۴۵]$$

عمق ناخالص آب مورد نیاز از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$d_g = \frac{d_n}{(1 - LR)} \qquad [۲-۴۶]$$

که در آن:

d_g: عمق ناخالص آب آبیاری، (میلیمتر یا سانتیمتر).

d_n: عمق خالص آب آبیاری، (میلیمتر یا سانتیمتر).

۷ـ۲ـ۲ـ مقایسه آب شستشوی مورد نیاز و راندمان کاربرد آبیاری

تلفات کاربرد آبیاری به دو عامل بستگی دارد که شامل رواناب سطحی و نفوذ عمقی می‌باشد. چنانچه راندمان کاربرد آبیاری پایین باشد نفوذ عمقی عملاً نقش شستشوی

مورد نیاز را ایفاء خواهد نمود. در این صورت ابتدا مقدار عمق خالص آب مورد نیاز (d_n) محاسبه شده سپس نفوذ عمقی برآورد می‌شود. چنانچه نفوذ عمقی بیش از شستشوی مورد نیاز بود. دیگر احتیاجی به آب اضافی بمنظور شستشو نمی‌باشد. البته این مطلب زمانی صحیح است که تمامی تلفات آب به صورت نفوذ عمقی باشد.

مثال:

اگر عملکرد پتانسیل قابل انتظار زارع برای کشت سیب‌زمینی ۷۵٪، هدایت الکتریکی آب آبیاری ۳ دسی‌زیمنس بر متر، عمق خالص آبیاری ۱۰ سانتیمتر، راندمان کاربرد آب ۷۵٪ و مزرعه با روش سطحی آبیاری شود عمق ناخالص آبیاری را محاسبه کنید.

از جدول (۳-۲) مقدار EC_e برای عملکرد پتانسیل ۷۵٪، ۳/۸ دسی‌زیمنس بر متر به دست می‌آید.

$$LR = \frac{EC_w}{5EC_e - EC_w} = \frac{3}{5\times 3/8 - 3} = 0/19$$

$$1 - LR = 1 - 0/19 = 0/81$$

با توجه به اینکه راندمان کاربرد (۷۵٪) کمتر از نیاز آبشویی (۸۱٪) می‌باشد لذا تلفات نفوذ عمقی عملاً وظیفه شستشو را نیز انجام خواهد داد. لذا در نظر گرفتن آب برای آبشویی لازم نیست در نتیجه عمق ناخالص آبیاری برابر خواهد بود با:

$$d_g = \frac{d_n}{E_a} = \frac{10}{0/75} = 13/33 cm$$

۳ـ۲ـ باران مؤثر و روش‌های مختلف اندازه‌گیری و برآورد آن

۱ـ۳ـ۲ـ مفهوم باران مؤثر

باران مؤثر بوسیله متخصصان رشته‌های مختلف و حتی توسط افراد متخصص در یک رشته با توجه به نوع نگاه آنها به این مفهوم به صورت‌های متفاوتی تعریف شده است. بطور مثال یک مهندس هیدروالکتریک، بارانی را که برای به گردش در آوردن توربین‌ها جهت تولید برق مورد استفاده قرار می‌گیرد باران مؤثر می‌داند و یا یک متخصص آب زیرزمینی، بارانی را که باعث افزایش ذخیره آب‌های زیرزمینی می‌شود باران مؤثر در نظر می‌گیرد. یا از نظر یک متخصص زهکشی، بارانی که باعث ایجاد زهاب می‌شود در محاسبات زهکشی جزو باران مؤثر در نظر گرفته می‌شود. از نظر یک مهندس تأسیسات آبیاری، بارشی مؤثر محسوب می‌شود که باعث صرفه‌جویی در یک نوبت آبیاری شود. از نظر یک متخصص آب‌های سطحی، آن قسمت از باران، مؤثر می‌باشد که باعث ایجاد رواناب شود.

از نظر متخصصین آبیاری هم تعاریف مختلفی برای مفهوم باران مؤثر ارائه شده است که کاملترین آنها توسط داستن [1] به صورت زیر بیان شده است:

«باران مؤثر به قسمتی از باران سالیانه یا فصلی گفته می‌شود که در محل ریزش به طور مستقیم یا غیرمستقیم (بدون استفاده از پمپاژ و غیر آن) برای تولید محصول، مفید واقع می‌شود. در این تعریف، دوره مورد اشاره از ابتدای اولین عملیات زراعی تا آخرین آن (آخر فصل آبیاری و برداشت محصول) موردنظر است.

تعریف ساده‌تر و نه چندان دقیق دیگری از باران مؤثر بشکل زیر ارائه شده است: «باران مؤثر به آن قسمت از باران می‌گویند که در خاک نفوذ کرده و در منطقه توسعه ریشه‌های گیاه ذخیره شود و مورد استفاده گیاه قرار گیرد».

۲ـ۳ـ۲ـ شبکه پیمایش باران

برای درک بهتری از مفهوم باران مؤثر لازم است پیمایش باران را بهتر بشناسیم.

1- Dastane

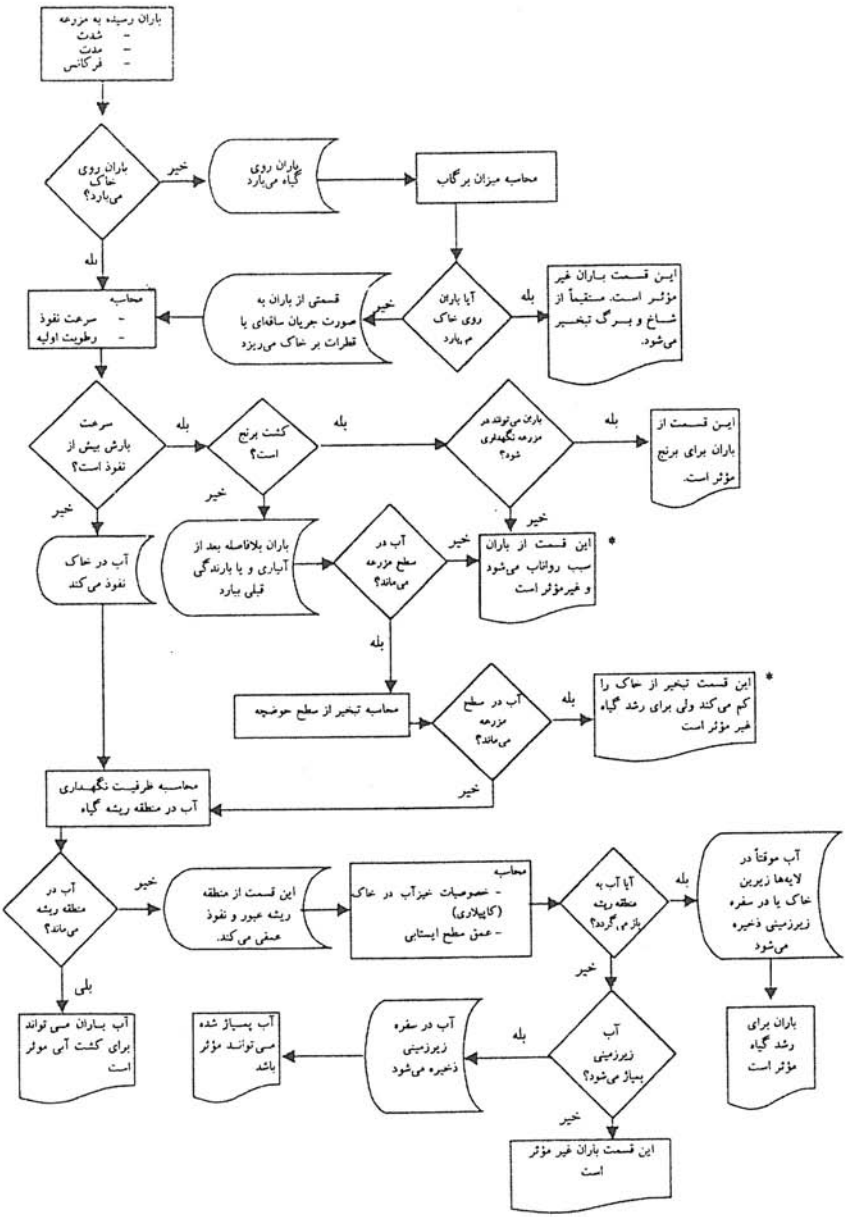
برای این منظور مسیر حرکت باران در شکل (۹-۲) نشان داده شده است.

چنانکه در این شکل مشاهده می‌شود مقداری از باران قبل از آنکه به سطح مزرعه برسد در بین راه تبخیر می‌شود که اندازه‌گیری این مقدار بسیار دشوار است و در هیچ محاسبه‌ای ملحوظ نمی‌شود. ولی این پدیده باعث افزایش رطوبت هوا، کاهش دما و در نتیجه بطور غیر مستقیم باعث کاهش مقدار تبخیر تعرق گیاه می‌شود. لذا این قسمت از باران تا حدی مؤثر می‌باشد. باران رسیده به سطح مزرعه ممکن است با گیاه برخورد کند (برگاب)، که بخشی از آن توسط شاخ و برگ گیاه نگهداری می‌شود و تقریباً تمام آن به تدریج تبخیر می‌شود [۱] و به اتمسفر باز می‌گردد. این قسمت از باران بطور مستقیم در تأمین نیاز آبی گیاه اثرگذار نیست ولی بطور غیر مستقیم در کاهش تبخیر ـ تعرق و نیاز آبی مؤثر است. بخش دیگری از باران که به گیاه برخورد کرده است بصورت قطرات آب و یا جریان ساقه‌ای [۲] همراه با آن قسمت از باران که مستقیماً روی خاک فرود آمده است به سطح مزرعه می‌رسد. اگر ضریب نفوذ خاک کمتر از شدت بارش باشد قسمتی بصورت رواناب سطحی جریان پیدا کرده و خارج می‌گردد [۳] و بقیه نفوذ می‌کند و بخش کوچکی هم تبخیر می‌شود. بخش تبخیر شده بطور غیرمستقیم در تأمین نیاز آبی گیاه مؤثر است. بارانی که در خاک نفوذ کرده است اگر در منطقه ریشه ذخیره شود مفید و مؤثر خواهد بود در غیر اینصورت به صورت نفوذ عمقی از منطقه ریشه خارج می‌گردد. اگر آبی که به اعماق نفوذ کرده بواسطه صعود شعریه (کاپیلار) به منطقه ریشه گیاه بازگردد و یا با نفوذ خود به زیر ناحیه ریشه‌دوانی باعث شستشوی نمک خاک شود (خاکشویی)، جزء باران مؤثر بحساب می‌آید. آبی که به صورت نفوذ عمقی به سفره آب زیرزمینی می‌پیوندد جزو باران موثر محسوب نمی‌شود.

۱- قسمت بسیار ناچیزی ممکن است توسط شاخه و برگ گیاه جذب شود.

2- Stem flow

۳- اگر مزرعه تحت کشت برنج و یا گیاهانی باشد که بصورت غرقابی آبیاری می‌شوند آبی که در مزرعه باقی‌بماند مؤثر است. یا اگر از رواناب در پایین‌دست استفاده مجدد شود در برنامه‌ریزی جامع آب، جزء باران مؤثر محسوب می‌گردد.



* از نظر آقای داستین (FAO25) این قسمت‌ها از باران مؤثر است چون باعث افزایش رطوبت و کاهش دمای گیاه می‌شود و بطور غیر مستقیم در کاهش مقدار تبخیر تعرق مؤثر است.

شکل ۹-۲- شبکه پیمایش باران

۳ـ۳ـ۲ـ عوامل تأثیرگذار بر باران مؤثر

عوامل متعددی روی مقدار باران مؤثر تأثیر می‌گذارند که این عوامل ممکن است به تنهایی و یا مشترکاً روی باران مؤثر اثرگذار باشند. در ضمن گاهی این عوامل روی هم اثر متقابل دارند. بطورکلی هر عاملی که روی میزان رواناب، نفوذپذیری و تبخیر - تعرق اثر بگذار روی مقدار باران مؤثر هم تأثیر خواهد داشت. این عوامل بطورکلی به چهار دسته کلی تقسیم می‌شوند: ۱ـ عوامل جوی ۲ـ عوامل آب و خاک ۳ـ عوامل گیاهی ۴ـ عوامل مدیریتی.

این عوامل به صورت جزء به جزء در ادامه ارائه شده و درباره هر عامل و نحوه تأثیر آن بر باران مؤثر بصورت مختصر توضیح داده خواهد شد.

۱ـ۳ـ۳ـ۲ـ عوامل جوی

این عوامل، هم بشکل مستقیم (مثل باران) و هم بشکل غیرمستقیم (مثل دما)، روی مقدار باران مؤثر اثر داشته و به دوگروه تقسیم می‌شوند.

- **خصوصیات باران (بارش [۱])**

اصلی‌ترین عامل در مقدار باران مؤثر خصوصیات خود باران است و تأثیر این عامل به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار بیشتر است. زیرا اصلی‌ترین عامل محدودکننده باران مؤثر در این مناطق مقدار بارندگی است.

- مقدار بارش: مهم‌ترین خصوصیت باران که روی مقدار باران مؤثر اثر می‌گذارد مقدار باران است. به هر میزان که مقدار باران افزایش یابد مقدار باران مؤثر افزایش می‌یابد. ولی عملاً بعلت ایجاد محدودیت توسط عوامل دیگر، درصد باران مؤثر کاهش می‌یابد. به عنوان مثال در منطقه‌ای که بارندگی سالانه آن ۱۴۰۰ میلی‌متر است ممکن است ۷۰۰ میلیمتر آن مؤثر باشد. پس باران مؤثر آن ۵۰٪

۱- در اینجا عمداً اصطلاح بارش را بکار بردیم تا انواع دیگر باراش مثل برف، تگرگ را هم شامل شود. لازم به یادآوری است که در منابع هر دو اصطلاح باران مؤثر و بارش مؤثر بکار می‌رود.

است. ولی در منطقه‌ای که ۱۵۰ میلیمتر در سال بارندگی دارد ممکن است ۱۲۰ میلیمتر آن مؤثر باشد که باران مؤثر ۸۰٪ خواهد بود.

- شدت بارش: باران‌های با شدت بالا، باعث ایجاد رواناب بیشتری نسبت به باران‌های با شدت کمتر می‌شوند. در نتیجه مقدار بارانی که به داخل خاک نفوذ می‌کند کمتر است پس مقدار باران مؤثر به نسبت شدت باران کاهش می‌یابد.
- توزیع زمانی بارش: اگر توزیع بارندگی‌ها در طول فصل رشد، یکنواخت باشد درصد باران مؤثر آن بیشتر از بارندگی‌هایی خواهد بود که دارای یکنواختی توزیع کمتری هستند. به زبان ساده‌تر بارندگی‌هایی با مقدار کم ولی مکرر، که یکنواختی توزیع بهتری داشته باشند مؤثرتر از بارندگی‌هایی هستند که زیاد بوده ولی توزیع مناسبی نداشته باشند.
- زمان بارش: بارندگی‌هایی که در دوره حداکثر مصرف و یا زمانی که گیاه حساسیت زیادی به کمبود آب دارد (مثلاً دوران گلدهی) می‌باشند بیشتر مؤثر هستند. همچنین بارندگی‌هایی که بلافاصله بعد از آبیاری مزرعه بوقوع می‌پیوندند کمتر مؤثر هستند. بارندگی‌هایی که در دوره اعمال تنش (توسط زارع) (مثلاً در چغندرقند و یا انگور، در انتهای فصل رشد جهت افزایش عیار قند) بوقوع بپیوندند نه تنها مؤثر نیستند بلکه مضر هم هستند.
- دمای بارش[1]: هر قدر دمای آب باران بالاتر باشد قابلیت نفوذ آن در خاک افزایش پیدا می‌کند. برف در مقایسه با انواع دیگر نزولات جوی (صرفنظر از اینکه ممکن است به واسطه سرمازدگی به گیاه صدمه بزند) بیشتر مؤثر است. چون به تدریج ذوب شده و فرصت نفوذ آب بیشتر است.

● سایر عوامل جوی

بطور کلی این عوامل روی مقدار تبخیر ـ تعرق تأثیر دارند. هر قدر مقدار تبخیر ـ تعرق بیشتر شود میزان باران مؤثر هم بیشتر خواهد شد. این عوامل عبارتند از:

۱- منظور از دمای بارش دمای قطرات آب در زمان رسیدن به سطح خاک است.

- دمای هوا: یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در مقدار تبخیر ـ تعرق دمای هوا است. هر قدر درجه حرارت هوا بیشتر باشد تبخیر ـ تعرق بیشتر می‌شود و در نتیجه درصد باران مؤثر افزایش می‌یابد.
- تشعشع: تشعشع خورشید باعث افزایش دمای آب، خاک و گیاه می‌شود و همانگونه که توضیح داده شد تغییر در دمای هوا بطور غیر مستقیم بر روی مقدار باران مؤثر اثر دارد. تغییر در دمای خاک و گیاه باعث تغییر در مقدار تبخیر از خاک و تعرق از گیاه می‌شود که بطور غیر مستقیم روی مقدار باران مؤثر اثر می‌گذارد.
- رطوبت هوا: هر اندازه مقدار رطوبت نسبی افزایش یابد مقدار تبخیر ـ تعرق کاهش می‌یابد و در نتیجه مقدار باران مؤثر کم می‌شود. به همین دلیل در مناطق کویری که رطوبت هوا در آنها پایین است درصد باران مؤثر بسیار بیشتر از مناطق مرطوب است.
- باد: باد با دو مؤلفه سرعت و جهت مشخص می‌شود. با افزایش سرعت باد مقدار تبخیر ـ تعرق افزایش یافته و با افزایش تبخیر ـ تعرق مقدار باران مؤثر هم بیشتر می‌شود. جهت باد هم بسته به اینکه از روی مناطق گرمتر یا سردتر، یا مناطق مرطوب‌تر و یا خشک‌تر عبورکند [۱] باعث افزایش و یا کاهش تبخیر ـ تعرق و در نتیجه تغییر در مقدار باران مؤثر می‌شود.

۲ـ۳ـ۳ـ۲ـ عامل توپوگرافی، پستی و بلندی، پیکرشناسی زمین (ژئومورفولوژی)[۲]

ناهمواری‌های زمین روی مقدار رواناب سطحی و در نتیجه روی مقدار باران مؤثر تأثیر می‌گذارد ناهمواری‌های زمین بوسیله عوامل ذیل روی باران مؤثر تأثیر دارد:

- شیب: در زمین‌های مسطح در مقایسه با زمین‌های شیب‌دار آب به مدت

۱- اثر واحه‌ای

۲- در اینجا اصطلاح «توپوگرافی» به ناهمواری‌های اراضی با مقیاس محلی (مزرعه) و اصطلاح «پستی و بلندی» به ناهمواری‌ها با مقیاس منطقه‌ای بکار برده می‌شود. پیکرشناسی زمین روی ناهمواری‌ها با مقیاس حوضه آبخیز و آبریز اثر می‌گذارد. در ضمن از اصطلاح «ناهمواری‌های زمین» در مفهوم عام آن استفاده می‌شود.

طولانی‌تری روی زمین می‌ماند. و در نتیجه فرصت نفوذ بیشتری دارد و لذا مقدار رواناب کاهش یافته و مقدار نفوذ افزایش می‌یابد، در نتیجه مقدار باران مؤثر افزایش می‌یابد.

هر اندازه سطح زمین دارای توپوگرافی نامنظم، پستی و بلندی بیشتری (چاله‌ها و حوضچه‌های سطحی) باشد مقدار بیشتری از باران به صورت چالاب[۱] در می‌آید که قسمت زیادی از آن به خاک نفوذ می‌کند و باعث افزایش مقدار باران مؤثر می‌شود.

۳ـ۳ـ۳ـ۲ـ عامل خاک

خاک بعنوان یک مخزن، آب را در خود ذخیره می‌کند و به تدریج آن را در اختیار گیاه قرار می‌دهد. در نتیجه تمام مشخصاتی از خاک که باعث افزایش ظرفیت نگهداری و نفوذپذیری خاک شور میزان باران مؤثر را هم افزایش می‌دهد. که این مشخصات عبارتند از:

- بافت: به طور کلی در خاک‌های ریز بافت [۲] ظرفیت نگهداری آب خاک در مقایسه با خاک‌های درشت بافت بیشتر است. در خاک‌های درشت بافت نفوذپذیری و قابلیت حرکت آب به حالت اشباع به اعماق پایین‌تر از خاک‌های ریز بافت بیشتر است. بنابراین بطور قطع نمی‌توان گفت کدام در کدام خاک میزان باران مؤثر بیشتر است.
- ساختمان [۳]: خاک‌هایی که دارای ساختمان مناسب (به صورت خاکدانه‌های درشت و بدون زاویه) هستند در مقایسه با خاک‌های بدون ساختمان (مثل لیمون کمپکت) و یا نامناسب (خاکدانه‌های ریز و زاویه‌دار) دارای نفوذپذیری بیشتری هستند و باران مؤثر در آنها بیشتر است.

۱- چالاب به آبهایی که در قسمت‌های پست زمین و گودال‌ها جمع می‌شود گفته می‌شود.

۲- با فرض اینکه از نظر ساختمان و غیره ساختمان در شرایط یکسانی می‌باشند.

۳- طرز قرارگرفتن ذرات تشکیل‌دهنده خاک را ساختمان خاک می‌نامند.

ثبات ساختمان خاک [۱]: خاکدانه‌های که ثبات کمتری دارند، هنگام آبیاری پراکنده شده و موجب کاهش نفوذپذیری می‌شوند که در نتیجه مقدار باران مؤثر کاهش می‌یابد.

- تخلخل: تخلخل مستقیماً از بافت و ساختمان خاک ناشی می‌شود. خاک هر قدر دارای تخلخل بالاتر و خلل و فرج درشت‌تر باشد باعث افزایش باران موثر می‌شود.
- مواد آلی: افزایش مواد آلی علاوه بر افزایش ثبات ساختمان باعث افزایش قابلیت نگهداری و نفوذپذیری آب در خاک می‌شود و در نتیجه مقدار باران موثر را افزایش می‌دهد.
- قلیائیت خاک: افزایش مقدار نمک‌های سدیم‌دار خاک باعث از هم پاشیدگی خاکدانه‌ها می‌شود که در نتیجه مقدار باران مؤثر کاهش می‌یابد.
- شوری: در خاک‌هایی که نمک وجود دارد اگر از تأثیر منفی این نمک‌ها روی خصوصیات فیزیکی خاک صرفنظرکنیم بارندگی که باعث شستشوی نمک خاک (آبشویی) می‌شود جزو باران مؤثر محسوب می‌شود. حتی اگر در فصل غیر زراعی ببارد. پس تحت شرایط یکسان در خاک‌هایی شور مقدار باران مؤثر بیشتر است.
- رطوبت اولیه: در زمان بارش باران، خاکی که دارای رطوبت کمتری است دارای ظرفیت آبگیری و سرعت نفوذ بیشتری است که در نتیجه مقدار باران مؤثر بیشتر می‌شود.
- عمق خاک: هرچه خاک عمیق‌تر باشد ظرفیت نگهداری آن بیشتر می‌شود و در نتیجه مقدار باران مؤثر افزایش می‌یابد.
- زهکشی عمقی خاک: هر عاملی که باعث افزایش سرعت حرکت آب به حالت اشباع بطرف اعماق شود باعث افزایش باران مؤثر می‌شود زیرا در زمان بارش باران آب سریع‌تر به اعماق خاک نفوذ کرده و نفوذپذیری سطحی افزایش پیدا

۱- مقاومت خاکدانه‌ها را در مقابل عوامل مختلف به ویژه در برخورد با آب را ثبات ساختمان خاک گویند.

می‌کند.

۴ـ۳ـ۳ـ۲ـ آبیاری

انجام آبیاری علاوه بر آنکه بطور مستقیم روی مقدار باران مؤثر اثر دارد بطور غیر مستقیم نیز بواسطه تأثیر آن روی خصوصیات خاک و گیاه روی باران مؤثر نقش دارد. هرچه مقدار آب آبیاری (جیره و عمق آبیاری) بیشتر باشد قسمت بیشتری از ظرفیت نگهداری خاک پر می‌شود و در نتیجه مقدار باران مؤثر کم می‌شود.

- مواد معلق: مواد معلق (موجود در آب، و یا ذرات خاک حاصل از تخریب ساختمان خاک) بعد از نفوذ آب به داخل خاک در خلل و فرج آن رخنه می‌کنند و باعث کم شدن نفوذپذیری و سرعت حرکت آب در خاک می‌شوند و در نتیجه مقدار باران مؤثر را کاهش می‌دهند.
- کیفیت آب آبیاری: مقدار و نوع نمک‌های محلول در آب آبیاری تأثیر مستقیمی روی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک دارند و تقریباً تأثیرات نمک‌های موجود در خاک و آب آبیاری روی مقدار باران مؤثر مشابه است.
- لزجت: با افزایش لزجت آب آبیاری هدایت هیدرولیکی و نفوذپذیری آب در خاک کم می‌شود و در نتیجه مقدار باران مؤثر کاهش پیدا می‌کند.

۵ـ۳ـ۳ـ۲ـ آب زیرزمینی

آب زیرزمینی علاوه بر آنکه بطور غیرمستقیم و بواسطه تأثیر روی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک روی مقدار باران مؤثر اثر دارد به صورت مستقیم نیز روی مقدار باران مؤثر اثر دارد که در زیر توضیح داده می‌شود:

- کیفیت آب زیرزمینی: در مناطق که آب زیرزمینی از نظر کیفی برای آبیاری قابل استفاده نیست آب بارانی که به لایه‌های تحتانی زمین نفوذ می‌کند اگر بعد از مخلوط شدن با آب زیرزمینی باعث بالارفتن کیفیت آب زیرزمینی به میزانی که جهت آبیاری قابل استفاده گردد این مقدار از بارندگی می‌تواند جزو باران مؤثر محسوب می‌شود.
- عمق سطح ایستابی: در مناطقی که سطحی ایستابی نزدیک سطح زمین می‌باشد

با توجه به صعود موئینه‌ای (کاپیلاری) مقدار زیادی از ظرفیت خاک توسط آب زیرزمینی شده و در نتیجه مقدار باران مؤثر کم می‌شود.

۶ـ۳ـ۳ـ۲ـ عوامل گیاهی

گیاه بعنوان مصرف‌کننده آب یکی از عوامل عمده تأثیرگذار بر مقدار باران مؤثر است. میزان مصرف آب گیاه را با عامل تبخیر ـ تعرق می‌سنجند. بنابراین هر عاملی که به نوعی روی مقدار تبخیر ـ تعرق اثرگذار باشد روی مقدار باران مؤثر هم اثر خواهد داشت.

- عمق توسعه ریشه‌ها: گیاهانی که دارای ریشه عمیق هستند به دلیل استفاده از آب تا اعماق بیشتری از خاک مقدار باران مؤثر را افزایش می‌دهند.
- پوشش: گیاهانی که دارای درجه پوشش بیشتری هستند باعث کاهش مقدار رواناب می‌شوند و در نتیجه مقدار باران مؤثر را افزایش می‌دهند.

۷ـ۳ـ۳ـ۲ـ عوامل مدیریتی

عوامل مدیریتی به علت تأثیری که روی مقدار رواناب و نفوذپذیری خاک دارند به طور مستقیم یا غیر مستقیم، روی مقدار باران مؤثر اثر دارند. عوامل مدیریتی عبارتند از:

- مقدار آب آبیاری: در مناطقی که در فصل بارندگی آبیاری صورت می‌گیرد سعی می‌شود جیره کامل در اختیار مزرعه گذاشته نشود تا از باران‌های احتمالی، بلافاصله پس از آبیاری، بتوان استفاده کرد.
- نحوه کشت: بطور کلی روش‌هایی از کشت که باعث افزایش نفوذ و کاهش رواناب سطحی شود (مثلاً کشت روی خطوط تراز) باعث افزایش مقدار باران مؤثر می‌شود.
- تسطیح: به هر میزان که درجه تسطیح زمین افزایش یابد زمان و فرصت نفوذ افزایش پیدا می‌کند و در نتیجه مقدار باران مؤثر زیاد می‌شود.
- عملیات حفاظتی: عملیات حفاظتی مانند تراس‌بندی، پشته‌بندی، مالچ‌پاشی، ایجاد گودال جهت افزایش مقدار چالاب یا ایجاد حوضچه‌هایی جهت

جمع‌آوری رواناب سطحی باعث افزایش زمان نفوذ و کاهش رواناب می‌شود و در نتیجه باعث افزایش مقدار باران مؤثر می‌شود.

- مواد جاذب رطوبت: بطور کلی استفاده از مواد «جاذب رطوب» چه به صورت طبیعی (مثل مواد آلی، پرلیت) و چه به صورت مصنوعی آن (مثل پلیمر *BT75*) باعث افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک می‌شود و در نتیجه مقدار باران مؤثر را زیاد می‌کند.
- زهکشی: در مناطق با زهکشی خوب ظرفیت خاک برای نگهداری آب باران که کیفیت خوبی دارد بالا است و در نتیجه مقدار باران مؤثر بیشتر است (این مسئله خصوصاً در مناطق شور بیشتر حایز اهمیت است).
- استفاده مجدد از آب: در مناطق که از رواناب حاصل از بارندگی در مناطق پایین‌دست استفاده می‌شود مقدار باران مؤثر بیشتر است.
- کم آبیاری: در صورت اعمال کم‌آبیاری چون همواره قسمتی از ظرفیت خاک خالی است و گیاه تمام آب مورد نیاز خود را دریافت نمی‌کند در صورت بارش باران مقدار بیشتری از آن مؤثر است.
- مدیریت رواناب: با انجام عملیاتی مثل ایجاد حوضچه جمع‌آوری رواناب، تزریق آب به سفره زیرزمینی، پخش سیلاب و آبخوان دارای می‌توان باعث افزایش بارش مؤثر شد.

۴-۳-۲- روش‌های تعیین مقدار باران مؤثر در پروژه‌های آبیاری

بطور کلی روش‌های تعیین باران مؤثر به سه گروه عمده زیر تقسیم می‌شوند:

الف - روش‌های اندازه‌گیری مستقیم

ب - روش‌های برآورد بوسیله فرمول‌های تجربی

ج - روش‌های مبتنی بر بیلان آب خاک

۱-۴-۳-۲- روش‌های اندازه‌گیری مستقیم

در روش‌های اندازه‌گیری مستقیم مقدار باران مؤثر را به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود لذا جزء دقیق‌ترین روش‌ها می‌باشند.

الف ـ روش اندازه‌گیری تغییرات رطوبت خاک

در این روش رطوبت موجود در خاک قبل و بعد از هر بارندگی اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از فرمول زیر مقدار باران مؤثر تعیین می‌شود.

$$E_r=M_2-M_1+ET \qquad [۲-۴۷]$$

که در آن:

M_1 : رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه‌ها قبل از بارندگی (میلیمتر).

M_2 : رطوبت خاک در عمق توسعه ریشه‌ها بعد از بارندگی (میلیمتر).

ET : تبخیر ـ تعرق گیاهی در فاصله بین دو اندازه‌گیری (میلیمتر).

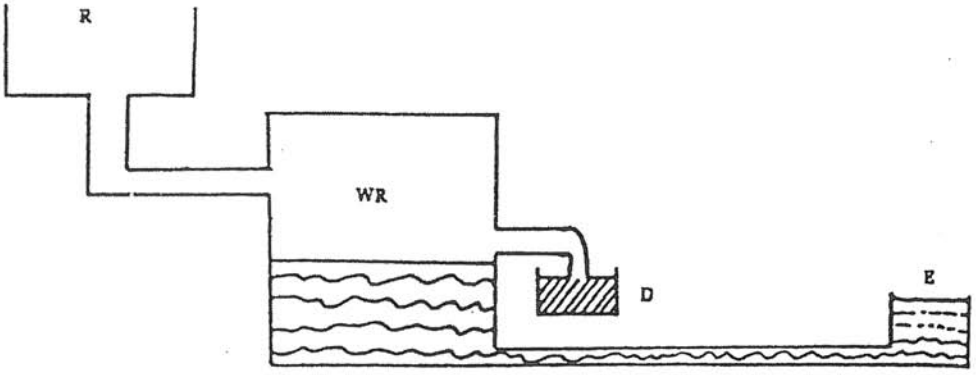
ب ـ استفاده از باران سنج تجمعی

در این روش از دستگاه باران‌سنج تجمعی که در شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است استفاده می‌شود. این دستگاه توسط استانهیل [1] ابداع شده و از یک دریافت‌کننده به صورت یک مخزن که ظرفیتی معادل ظرفیت خاک دارد و یک سطح تبخیر که معرف تبخیر ـ تعرق گیاه است تشکیل شده است. در این روش آب اضافه بر ظرفیت مخزن که به زهکش می‌ریزد اندازه‌گیری و جزو غیر مؤثر باران محسوب می‌شود.

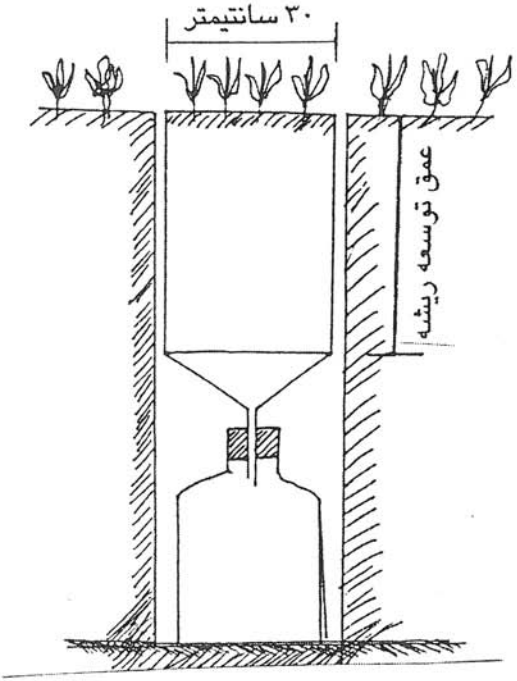
پ ـ روش رامداس [2]

رامداس در سال ۱۹۶۰ دستگاهی ابداع کرد که در شکل (۲-۱۱) نشان داده شده است. این دستگاه از یک استوانه به قطر Cm ۳۰ و ارتفاعی معادل عمق توسعه ریشه گیاه موردنظر و یک قیف و یک جمع‌کننده تشکیل شده است. در این روش مثل روش قبلی قسمتی از باران که در زهکش جمع می‌شود اندازه‌گیری و جزو باران غیر مؤثر در نظر گرفته می‌شود.

1- Stanhill *2- Ramdas*



شکل ۱۰-۲- باران سنج تجمعی برای اندازه‌گیری باران مؤثر



شکل ۱۱-۲- دستگاه رامداس برای اندازه‌گیری باران مؤثر

ت ـ لیسیمتر (جعبه کشت)

لیسیمترها دارای انواع مختلف، مثل لیسیمتر زهکش‌دار، وزنی، فشاری، الکترونیکی و غیره می‌باشند و بیشتر برای اندازه‌گیری تبخیر - تعرق پتانسیل گیاه مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرند. ولی گاهی هم برای اندازه‌گیری باران مؤثر بکار می‌روند.
با استفاده از لیسیمتر تمام اجزاء بیلان آب خاک اندازه‌گیری می‌شود و با استفاده از معادله بیلان مقدار باران مؤثر هم اندازه‌گیری قرار می‌گیرد.

۲ـ۴ـ۳ـ۲ـ روش‌های برآورد باران مؤثر با استفاده از فرمول‌های تجربی

در این روش‌ها با استفاده از فرمول‌ها و نمودارهای تجربی که توسط متخصصان مختلف تهیه و ارائه شده، مقدار باران مؤثر بدست می‌آید. مزیت این روش‌ها در این است که کم هزینه بوده و کاربرد آنها آسان می‌باشد. ولی این اشکال را هم دارند که هر کدام از این روش‌ها در شرایط و در محلی خاص ابداع شده‌اند و لذا جهت استفاده از آنها در شرایط و مناطق دیگر باید به این مسئله توجه شود.

الف ـ معادله رنفرو

رنفرو معادله زیر را برای برآورد میزان باران مؤثر پیشنهاد کرده است:

$$E_r = E \times Rg + A \qquad [۲-۴۸]$$

که در آن:

Er : باران مؤثر، (میلیمتر).
Rg : باران فصل رشد، (میلیمتر).
A : متوسط عمق آبیاری، (میلیمتر).
E : تابعی از نسبت آب مصرفی گیاه (CU) به باران فصل رشد (Rg)، که از جدول (۲ـ۴) به دست می‌آید.

جدول ۴ـ۲ـ نسبت E برای برآورد باران مؤثر در معادله رنفرو

CU/R_g	E	CU/R_g	E
۰	۰	۲/۴	۰/۷۲
۰/۲	۰/۱۰	۲/۶	۰/۷۵
۰/۴	۰/۱۹	۲/۸	۰/۷۷
۰/۶	۰/۲۷	۳/۰	۰/۸۰
۰/۸	۰/۳۵	۳/۵	۰/۸۴
۱/۰	۰/۴۱	۴/۰	۰/۸۸
۱/۲	۰/۴۷	۴/۵	۰/۹۱
۱/۴	۰/۵۲	۵/۰	۰/۹۳
۱/۶	۰/۵۷	۶/۰	۰/۹۶
۱/۸	۰/۶۱	۷/۰	۰/۹۸
۲/۰	۰/۶۵	۹/۰	۰/۹۹
۲/۲	۰/۶۹		

مثال: در منطقه‌ای میزان بارندگی و تبخیر ـ تعرق در فصل رشد به ترتیب برابر ۴۰۰ و ۷۰۰ میلیمتر و متوسط عمق آب آبیاری ۱۰۰ میلیمتر می‌باشد. میزان باران مؤثر را با استفاده از روش رانفر به دست آورید.

$$\frac{CU}{Rg}=\frac{۷۰۰}{۴۰۰}=۱/۸$$

با استفاده از جدول (۴ـ۲) و برای نسبت $\frac{CU}{Rg}=۱/۸$ مقدار E برابر ۰/۶ به دست می‌آید.

$$Er= ۰/۶\times۴۰۰+۱۰۰=۳۴۰$$

بنابراین میزان باران مؤثر برابر ۳۴۰ میلیمتر می‌باشد.

ب ـ روش دفتر احیای اراضی ایالات متحده امریکا *(USBR)*

در این روش که توسط استام [1] ارائه شده متوسط باران ماهانه و یا فصلی خشک‌ترین پنج سال متوالی به اجزاء یک اینچی تقسیم شده و برای هر جزء درصدی بعنوان باران مؤثر در نظر گرفته می‌شود مقادیر این درصدها از جدول (۵ـ۲) بدست می‌آید. همانطورکه مشاهده می‌شود برای اولین اینچ بین ۹۰ تا ۱۰۰ درصد، برای دومین اینچ بین ۸۵ تا ۹۵ درصد و برای هفتمین اینچ فقط صفر تا ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است و برای مقادیر بیشتر بارندگی، درصدی جهت باران مؤثر ملحوظ نشده است.

مثال: اگر در منطقه‌ای متوسط بارندگی پنج سال متوالی خشک برابر ۱۷۵ میلیمتر باشد میزان باران مؤثر را با روش *USBR* محاسبه کنید.

با استفاده از جدول (۵ـ۲) میزان باران مؤثر را می‌توان بین ۸۶/۴ تا ۱۲۰/۶ در نظر گرفت.

جدول ۵ـ۲ـ باران مؤثر براساس جزءهای بارندگی ماهیانه (روش دفتر احیای اراضی ایالات متحده)

محدوده افزایش بارندگی		درصد	محدوده باران مؤثر به طور تجمعی	
اینچ	میلیمتر	(حداقل و حداکثر)	اینچ	میلیمتر
۰-۱	۰/۰-۲۵/۴	۹۰-۱۰۰	۰/۹۰-۱/۰۰	۲۲/۹-۲۵/۴
۱-۲	۲۵/۴-۵۰/۸	۸۵-۹۵	۱/۷۵-۱/۹۵	۴۴/۴*-۴۹/۵**
۲-۳	۵۰/۸-۷۶/۲	۷۵-۹۰	۲/۵۰-۲/۸۵	۶۳/۵-۷۲/۴
۳-۴	۷۶/۲-۱۰۱/۶	۵۰-۸۰	۳/۰۰-۳/۶۵	۷۶/۲-۹۲/۷
۴-۵	۱۰۱/۶-۱۲۷/۰	۳۰-۶۰	۳/۳۰-۴/۲۵	۸۳/۸-۱۰۷/۹
۵-۶	۱۲۷/۰-۱۵۲/۴	۱۰-۴۰	۳/۴۰-۴/۶۵	۸۶/۴-۱۱۸/۱
بیشتر از ۶	بیشتر از ۱۵۲/۴	۰-۱۰	۳/۴۰-۴/۷۵	۸۶/۴-۱۲۰/۶

** ۴۹/۵=۲۵/۴×۰/۹۵+۲۵/۴

* ۴۴/۴=۲۵/۴×۰/۸۵+۲۲/۹ و

1- *Stamm*

پ ـ روش نسبت تبخیر ـ تعرق به بارندگی

در این روش که در هند ابداع شده است. ابتدا روزهای فصل رشد با توجه به نوع خاک، تبخیر ـ تعرق و نوع گیاه طبق جدول (۶ـ۲) دسته‌بندی شده و سپس دسته‌های بدون بارندگی از محاسبات حذف می‌شود. آنگاه نسبت تبخیر ـ تعرق به کل بارندگی هر دسته بدست می‌آید و به عنوان درصد باران مؤثر در نظر گرفته می‌شود. سپس معدل این درصدها بعنوان درصد باران مؤثر ماهانه یا سالانه بدست می‌آید. نمونه این محاسبات در جدول شماره (۷ـ۲) آمده است.

جدول ۶ـ۲ـ شمار روزها در یک گروه برای انواع مختلف خاک و شرایط متفاوت اقلیمی

گیاه	متوسط تبخیر و تعرق ماهیانه (میلیمتر در روز)	بافت خاک و گنجایش آن برای ذخیره آب (میلیمتر)		
		خیلی سنگین (بیشتر از ۱۲۰)	سنگین (۱۲۰-۸۰)	متوسط (۸۰-۴۰)	سبک (کمتر از ۴۰)
برنج	۳-۱۲	۷	۴	۳	۲
گیاهان دیگر	بیشتر از ۶	۱۵	۱۰	۷	۴
	کمتر از ۶	۳۰	۱۵	۱۰	۷

مثال: منطقه‌ای دارای خاک سنگین می‌باشد و در آن محصولی غیر از برنج کشت می‌شود. میزان باران مؤثر را با استفاده از روش نسبت تبخیر ـ تعرق به بارندگی به دست آورید؟

با استفاده از جدول (۶ـ۲) برای خاک سنگین و گیاهان غیر از برنج دوره محاسباتی ۱۰ روزه به دست می‌آید. سپس میزان بارندگی و تبخیر ـ تعرق برای این دوره‌ها را به دست می‌آوریم که نمونه‌ای از آن در جدول (۷ـ۲) در ستون‌های دوم و سوم آورده شده است. ستون چهارم از تقسیم ستون دوم به ستون سوم به دست می‌آید و در صورتی که این نسبت بیش از ۱۰۰ شد عدد ۱۰۰ را در نظر می‌گیریم. در ستون پنجم متوسط ماهانه نسبت‌ها ستون چهارم بدون در نظر گرفتن مقادیر صفر به

دست می‌آید. در آخر هم متوسط باران فصل رشد از میانگین اعداد ستون پنجم محاسبه می‌گردد. که برای این مثال برابر ۸۰ درصد به دست آمده است.

جدول ۷ـ۲ـ نمونه محاسبات باران مؤثر به روش نسبت تبخیر ـ تعرق به بارندگی

دوره	تبخیر و تعرق بالقوه (میلیمتر)	بارندگی (میلیمتر)	درصد نسبت	متوسط درصد نسبت برای هرماه
ژوئیه ۱۰-۱	۶۰	۸۰	۷۵	
۲۰-۱۱	۸۰	۰	۰	۸۷
۳۱-۲۱	۶۵	۶۰	۱۰۰	
اوت ۱۰-۱	۶۰	۱۵۰	۴۰	
۲۰-۱۱	۶۵	۱۰۰	۶۵	۶۰
۳۱-۲۱	۶۰	۸۰	۷۵	
سپتامبر ۱۰-۱	۶۰	۶۰	۱۰۰	
۲۰-۱۱	۷۰	۴۰	۱۰۰	۱۰۰
۳۰-۲۱	۸۰	۲۰	۱۰۰	
اکتبر ۱۰-۱	۸۰	۰	۰	
۲۰-۱۱	۸۵	۰	۰	۷۵
۳۱-۲۱	۶۰	۸۰	۷۵	
کل	۸۲۵	۶۷۰	-	۳۲۲
معدل	-	-	-	۸۰ درصد

ت ـ روش سرویس حفاظت خاک ایالات متحده امریکا *(USDA)*

این روش در سال ۱۹۶۷ و با استفاده از اطلاعات ۵۰ ساله ۲۲ ایستگاه هواشناسی در ایالات متحده امریکا بدست آمده است.

در این روش با استفاده از رابطه زیر مقدار باران مؤثر محاسبه می‌شود.

$$E_r = f(IR) \times (1/25 R^{0/824} - 2/03) \times 10^{0/000955 ET} \qquad [۲-۴۹]$$

که در آن:

E_r : باران مؤثر ماهانه، (میلیمتر).

ET : تبخیر ـ تعرق ماهانه، (میلیمتر).

R : بارندگی ماهانه، (میلیمتر).

$f(IR)$: تابعی از عمق خالص آبیاری است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$f(IR)= ۰/۵۳+۰/۵۱۶(IR)-۸/۹۴\times۱۰^{-۵}(IR)^{۲}+۲/۳۲\times۱۰^{-۷}(IR)^{۳} \quad [۲-۵۰]$$

با توجه به اینکه استفاده از رابطه بالا در محاسبات مشکل است. براساس این رابطه جدول (۸-۲) و (۹-۲) تهیه گردیده است که با استفاده از آن مقدار باران مؤثر به راحتی تعیین می‌گردد.

مثال: در منطقه‌ای میزان بارندگی و تبخیر ـ تعرق به ترتیب برابر ۲۰۰ و ۲۵۰ میلیمتر و عمق خالص آبیاری برابر ۱۰۰ میلیمتر می‌باشد میزان باران مؤثر را با استفاده از روش اداره حفاظت خاک ایالات متحده به دست آورید.

با استفاده از جدول (۸-۲) و یا فرمول مربوطه مقدار باران مؤثر با توجه به میزان بارندگی و تبخیر ـ تعرق برابر ۱۶۸ میلیمتر به دست می‌آید.

با استفاده از جدول (۹-۲) میزان ضریب اصلاحی با توجه عمق خالص آبیاری برابر ۱/۰۲ به دست می‌آید.

بنابراین میزان باران مؤثر برابر است با: $۱۶۸\times۱/۰۲=۱۷۱/۴$

ث ـ روش هرشفلد

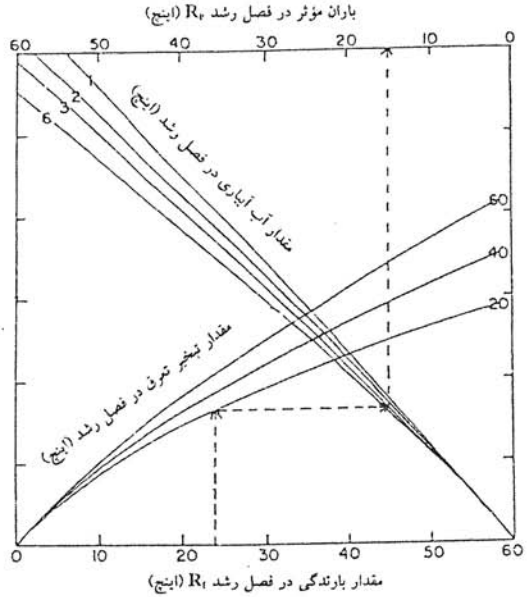
این روش در سال ۱۹۶۴ توسط هر شفلد و با استفاده از آمار ۲۲ ایستگاه هواشناسی در ایالات متحده امریکا ارائه شده است و با روش قبلی شباهت بسیاری دارد و عوامل مؤثر در محاسبه مقدار باران مؤثر در هر دو روش یکی است. فقط در این روش مقدار باران مؤثر در فصل رشد و با استفاده از نمودار شکل (۱۲-۲) تعیین می‌شود.

جدول ۸ـ۲ـ متوسط باران مؤثر ماهیانه در رابطه با متوسط باران ماهیانه و متوسط آب مصرفی ماهیانه

متوسط بارندگی ماهیانه میلیمتر	متوسط آب مصرفی ماهیانه، میلیمتر												
	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰	۱۷۵	۲۰۰	۲۲۵	۲۵۰	۲۷۵	۳۰۰	۳۲۵	۳۵۰
	متوسط باران مؤثر ماهیانه، میلیمتر													
۱۲/۵	۷/۵	۸/۰	۸/۷	۹/۰	۹/۲	۱۰/۰	۱۰/۵	۱۱/۲	۱۱/۷	۱۲/۵	۱۲/۵	۱۲/۵	۱۲/۵	۱۲/۵
۲۵/۰	۱۵/۰	۱۶/۲	۱۷/۵	۱۸۰	۱۸/۵	۱۹/۷	۲۰/۵	۲۲/۰	۲۴/۵	۲۵/۰	۲۵/۰	۲۵/۰	۲۵/۰	۲۵/۰
۳۷/۵	۲۲/۵	۲۴/۰	۲۶/۲	۲۷/۵	۲۸/۲	۲۹/۲	۳۰/۵	۳۳/۰	۳۶/۲	۳۷/۵	۳۷/۵	۳۷/۵	۳۷/۵	۳۷/۵
۵۰/۰	۲۵	۳۲/۲	۳۴/۵	۳۵/۷	۳۶/۷	۳۹/۰	۴۰/۵	۴۳/۷	۴۷/۰	۵۰/۰	۵۰/۰	۵۰/۰	۵۰/۰	۵۰/۰
۶۲/۵		۳۹/۷	۴۲/۵	۴۴/۵	۴۶/۰	۴۸/۵	۵۰/۵	۵۳/۷	۵۷/۵	۶۲/۵	۶۲/۵	۶۲/۵	۶۲/۵	۶۲/۵
۷۵/۰		۴۶/۲	۴۹/۷	۵۲/۷	۵۵/۰	۵۷/۵	۶۰/۲	۶۳/۷	۶۷/۵	۷۵/۰	۷۵/۰	۷۵/۰	۷۵/۰	۷۵/۰
۸۷/۵		۵۰/۰	۵۶/۷	۶۰/۲	۶۳/۷	۶۶/۰	۶۹/۷	۷۳/۷	۷۷/۷	۸۴/۵	۷۸/۵	۷۸/۵	۷۸/۵	۷۸/۵
۱۰۰/۰			۶۳/۷	۶۷/۷	۷۲/۰	۷۴/۲	۸۷/۷	۸۳/۰	۸۷/۷	۹۵/۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۱۲/۵			۷۰/۵	۷۵/۰	۸۰/۲	۸۲/۵	۸۷/۲	۹۲/۷	۹۸/۰	۱۰۵	۱۱۱	۱۱۲	۱۱۲	۱۱۲
۱۲۵/۰			۷۵/۰	۸۱/۵	۸۷/۷	۹۰/۵	۹۵/۷	۱۰۲	۱۰۸	۱۱۵	۱۲۱	۱۲۵	۱۲۵	۱۲۵
۱۲۵/۰				۸۸/۷	۹۵/۲	۹۸/۷	۱۰۴	۱۱۱	۱۱۸	۱۲۶	۱۳۴	۱۳۷	۱۳۷	۱۳۷
۱۵۰/۰				۹۵/۲	۱۰۲	۱۰۶	۱۱۲	۱۲۰	۱۲۷	۱۳۶	۱۴۳	۱۵۰	۱۵۰	۱۵۰
۱۶۲/۵				۱۰۰	۱۰۹	۱۳	۱۲۰	۱۲۸	۱۳۵	۱۴۵	۱۵۳	۱۶۰	۱۶۲	۱۶۲
۱۷۵/۰					۱۱۵	۱۲۰	۱۲۷	۱۳۵	۱۴۳	۱۵۴	۱۶۴	۱۷۰	۱۷۵	۱۷۵
۱۸۷/۵					۱۲۱	۱۲۶	۱۳۴	۱۴۲	۱۵۱	۱۶۱	۱۷۰	۱۷۹	۱۸۵	۱۸۷
۲۰۰/۰					۱۲۵	۱۳۳	۱۴۰	۱۴۸	۱۵۸	۱۶۸	۱۷۸	۱۸۸	۱۹۶	۲۰۰
۲۲۵						۱۴۴	۱۵۱	۱۶۰	۱۷۱	۱۸۲				
۲۵۰						۱۵۰	۱۶۱	۱۷۰	۱۸۳	۱۹۴				
۲۷۵							۱۷۱	۱۸۱	۱۹۴	۲۰۵				
۳۰۰							۱۷۵	۱۹۰	۲۰۳	۲۱۵				
۳۲۵								۱۹۸	۲۱۳	۲۲۴				
۳۵۰								۲۰۰	۲۲۰	۲۳۲				
۳۷۵									۶۲۵	۲۴۰				
۴۰۰										۲۴۷				
۴۲۵										۲۵۰				
۴۵۰	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰	۱۲۵	۱۵۰	۱۷۵	۲۰۰	۲۲۵	۲۵۰				

جدول ۹ـ۲ـ ضرایب اصلاح باران موثر ماهانه (جدول ۸ـ۲) در رابطه با عمق خالص آبیاری (در هر نوبت)

IR میلیمتر	$f(IR)$	IR میلیمتر	$f(IR)$	IR میلیمتر	$f(IR)$
۱۰/۰۰	۰/۶۲۰	۳۱/۲۵	۰/۸۱۸	۷۰/۰۰	۰/۹۹۰
۱۲/۵۰	۰/۶۵۰	۳۲/۵۰	۰/۸۲۶	۷۵/۰۰	۱/۰۰۰
۱۵/۰۰	۰/۶۷۶	۳۵/۰۰	۰/۸۲۴	۸۰/۰۰	۱/۰۰۴
۱۷/۵۰	۰/۷۰۳	۳۷/۵۰	۰/۸۶۰	۸۵/۰۰	۱/۰۰۸
۱۸/۷۵	۰/۷۲۰	۴۰/۰۰	۰/۸۷۶	۹۰/۰۰	۱/۰۱۲
۲۰/۰۰	۰/۷۲۸	۴۵/۰۰	۰/۹۰۵	۹۵/۰۰	۱/۰۱۶
۲۲/۵۵	۰/۷۴۹	۵۰/۰۰	۰/۹۳۰	۱۰۰/۰۰	۱/۰۲۰
۲۵/۰۰	۰/۷۷۰	۵۵/۰۰	۰/۹۴۷	۱۲۵/۰۰	۱/۰۴۰
۲۷/۵۰	۰/۷۹۰	۶۰/۰۰	۰/۹۶۳	۱۵۰/۰۰	۱/۰۶۰
۳۰/۰۰	۰/۸۰۸	۶۵/۰۰	۰/۹۷۷	۱۷۵/۰۰	۱/۰۷۰



شکل ۱۲ـ۲ـ رابطه باران مؤثر فصل رشد (R_e) با عوامل بارندگی فصل رشد (R_t)، مقدار تبخیر ـ تعرق فصل رشد (c) و آب مورد نیاز خالص (I).

ه ـ روابط منطقه‌ای

این روابط برای مناطق خاص و تحت شرایط خاص از نظر اقلیم، آب، خاک، گیاه، اکوسیستم، روش آبیاری و غیره بدست آمده‌اند. تنوع این روش‌ها بسیار زیاد است. ولی استفاده از آنها در مناطق دیگر مجاز نیست. مگر اینکه در منطقه موردنظر این فرمول‌ها واسنجی و اصلاح شوند. نمونه‌ای از این روابط توسط نگارنده برای مناطقی از ایران محاسبه گردیده است.

و ـ روش‌های ارائه شده در برنامه *Cropwat* فائو:

در این برنامه سه روش جهت تعیین باران مؤثر ارائه شده است که عبارتند از:

روش اول:

این روش توسط سرویس حفاظت خاک اداره کشاورزی ایالات متحده آمریکا ارائه شده و از روابط زیر برای برآورد باران مؤثر استفاده می‌شود:

اگر $R< ۲۵۰mm$ باشد: $$E_r=R\frac{(۱۲۵-۰/۲R)}{۱۲۵} \qquad [۲-۵۱]$$

اگر $R> ۲۵۰mm$ باشد: $$E_r=۱۲۵+۰/۱R \qquad [۲-۵۲]$$

روش دوم:

این روش که توسط فائو تهیه و ارائه شده است، براساس آمار مناطق خشک و نیمه‌خشک بدست آمده است. و از روابط زیر برای محاسبه باران مؤثر با احتمال وقوع ۸۰ درصد استفاده می‌شود[۱]:

$$E_r= ۰/۶R-۱۰ \qquad R<۷۰mm \qquad [۲-۵۳]$$

۱- احتمال وقوع ۸۰ درصد یعنی اینکه مثلاً در یک دوره ۵ ساله ۴ سال بارندگی به اندازه یا بیشتر از آن مقدار می‌بارد.

$$E_r = ۰/۸R - ۲۴ \qquad R > ۷۰ mm \qquad [۲-۵۴]$$

که در آن:

E_r : باران مؤثر (میلیمتر).

R : باران (میلیمتر).

مثال: در منطقه‌ای میزان متوسط باران در ماه اوت برابر ۱۷۵ میلیمتر است میزان باران مؤثر را با دو روش فائو و حفاظت خاک ایالات متحده به دست آورید؟

روش حفاظت خاک:

$$ER = ۱۷۵ \frac{(۱۲۵ - ۱۷۵ \times ۰/۲)}{۱۲۵} = ۱۲۶ \text{ میلیمتر}$$

روش فائو

$$ER = ۰/۸ \times ۱۷۵ - ۲۴ = ۱۱۶$$

روش سوم

در این روش باران مؤثر در هر منطقه برابر درصدی از کل باران ریزش شده در آن منطقه در نظر گرفته می‌شود. و تعیین این درصد با استفاده از اطلاعات محلی بدست می‌آید.

۳-۴-۳-۲- روش بیلان آب خاک

با توجه به گسترش روزافزون کاربرد کامپیوتر و استفاده از آن در علوم آب استفاده از مدل‌های محاسباتی و ریاضی مبتنی بر بیلان آب خاک (که قبلاً استفاده از آنها بسیار مشکل بود) آسان شده است. بطور کلی اصل اولیه در این مدل‌ها حل معادله

بیلان آب خاک است. معادله کلی بیلان به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\Delta S = R + IR - ET - DR \qquad [۲-۵۵]$$

که در آن:

ΔS : تغییرات رطوبت خاک (میلیمتر)

R : بارندگی (میلیمتر)

IR : آبیاری (میلیمتر)

DR : زهکشی (میلیمتر)

در هر مدل با توجه به دقت و نگرش طراح مدل، محاسبات و فرمول‌های مورد استفاده متفاوت است. که علاقه‌مندان جهت اطلاعات بیشتر می‌توانند به منابع دیگر مراجعه کنند. ولی برای آشنایی اولیه مثالی که محاسبات آن براساس یک مدل بسیار ساده بیلان آب خاک انجام شده در جدول (۲-۱۰) آمده است. در این مثال مقدار ظرفیت نگهداری خاک در عمق مؤثر توسعه ریشه برابر ۱۰۰ میلیمتر فرض شده است

در این جدول در ستون اول، دوم و سوم به ترتیب تاریخ، بارندگی و تبخیر ـ تعرق آورده شده است. ستون چهارم از تفاضل ستون دوم و سوم (ET_p ـ بارندگی) به دست می‌آید.

ستون پنجم از جمع میزان رطوبت در روز قبل و میزان تغییر در رطوبت (ستون چهارم) به دست می‌آید. در صورتی که میزان رطوبت خاک محاسبه شده کمتر از ۵۰ میلیمتر شود (حد پایین رطوبت خاک برای گیاه) به این میزان ۵۰ میلیمتر (میزان

خالص آبیاری) اضافه می‌گردد. و در صورتی که میزان رطوبت خاک بیش از ۱۰۰ میلیمتر (ظرفیت نگهداری خاک در عمق توسعه ریشه) آب مازاد بر ۱۰۰ میلیمتر به صورت زهاب خارج می‌شود که به ترتیب در ستون‌های ششم و هفتم میزان آبیاری و زهکشی آورده شده است.

میزان باران مؤثر طی این دوره برابر است با تفاضل کل بارندگی از کل آب مازاد (زهکشی) که برابر است با: $ER = ۶۲۵ - ۳۸۶ = ۲۳۹$

جدول ۱۰-۲- محاسبات نمونه در روش بیلان آب خاک

تاریخ	بارندگی	ET_p	تغییر ذخیره در خاک	تعادل ذخیره درخاک	آبیاری	آب مازاد (زهکشی)
۱	۱۰۰	۶	۹۴	۹۴	-	۰
۲	۲۵	۸	۱۷	۱۰۰	-	۱۱=(۹۴+۱۷)-۱۰۰
۳	۰	۹	-۹	۹۱*	-	۰
۴	۰	۹	-۹	۸۲	-	۰
۵	۰	۸	-۸	۷۴	-	۰
۶	۰	۹	-۹	۶۵	-	۰
۷	۱۰۰	۵	۹۵	۱۰۰	-	۶۰=(۶۵+۹۵)-۱۰۰
۸	۱۰۰	۴	۹۶	۱۰۰	-	۹۶=(۱۰۰+۹۶)-۱۰۰
۹	۵۰	۸	۴۲	۱۰۰	-	۴۲=(۱۰۰+۴۲)-۱۰۰
۱۰	۰	۱۰	-۱۰	۹۰	-	۰
۱۱	۰	۱۱	-۱۱	۷۹	-	۰
۱۲	۰	۱۱	-۱۱	۶۸	-	۰
۱۳	۰	۱۲	-۱۲	۵۶	-	۰
۱۴	۰	۱۲	-۱۲	۴۴	۵۰	۰
۱۵	۰	۱۱	-۱۱	۸۳**	-	۰
۱۶	۰	۱۱	-۱۱	۷۲	-	۰
۱۷	۰	۱۰	-۱۰	۶۲	-	۰
۱۸	۰	۱۱	-۱۱	۵۱	-	۰
۱۹	۰	۱۰	-۱۰	۴۱	۵۰	

ادامه جدول ۱۰-۲-

تاریخ	بارندگی	ET_p	تغییر ذخیره در خاک	تعادل ذخیره درخاک	آبیاری	آب مازاد (زهکشی)
۲۰	۰	۱۰	-۱۰	۸۱***	-	۰
۲۱	۰	۱۱	-۱۱	۷۰	-	۰
۲۲	۰	۱۲	-۱۲	۵۸	-	۰
۲۳	۰	۱۲	-۱۲	۴۶	-	۰
۲۴	۵۰	۸	۴۲	۸۸	-	۰
۲۵	۱۰۰	۶	۹۴	۱۰۰	-	۸۲=(۸۸+۹۴)-۱۰۰
۲۶	۱۰۰	۵	۹۵	۱۰۰	-	۹۵=(۱۰۰+۹۵)-۱۰۰
۲۷	۰	۱۰	-۱۰	۹۰	-	۰
۲۸	۰	۱۰	-۱۰	۸۰	-	۰
۲۹	۰	۱۰	-۱۰	۷۰	-	۰
۳۰	۰	۱۰	-۱۰	۶۰	-	۰
کل	۶۲۵	۲۷۹			۱۰۰	۳۸۶

(۹۰-۱۰۰)=۹۱* و (۱۱-۵۰+۴۴)=۸۳** و (۱۰-۵۰+۴۱)=۸۱***

۵-۳-۲- ارزیابی روش‌های مختلف

به طورکلی روش‌های اندازه‌گیری مستقیم میزان باران مؤثر دارای دقت بالایی هستند ولی این استفاده از این روش‌ها بسیار وقت‌گیر و پرهزینه می‌باشد. بنابراین قابلیت کاربرد کمی دارند و فقط برای واسنجی روش‌های تجربی مورد استفاده قرارگیرند. در میان این روش‌ها روش رامداس ساده‌تر و کم هزینه‌تر و دارای قابلیت کاربرد بیشتری است. روش استفاده از لیسیمتر دارای دقت بیشتری می‌باشد. که برای کارهای تحقیقاتی از آن استفاده می‌شود.

روش بیلان آب خاک و قابلیت کاربرد زیادی دارد. این روش احتیاج به اطلاعات هواشناسی زیادی دارد که در صورت وجود این اطلاعات دقیق‌ترین روش محاسبه میزان باران موثر می‌باشد.

استفاده از فرمول‌های تجربی کم هزینه و آسان می‌باشد ولی این روش‌ها نسبت به

روش‌های بیلان آب خاک و روش‌های اندازه‌گیری مستقیم دقت کمتری دارند. از میان فرمول‌های تجربی معادله رانفر و روش اداره احیای اراضی ایالات متحده دقت خوبی ندارد. روش نسبت تبخیر ـ تعرق به بارندگی دارای دقت نسبتاً خوبی است و برای برآورد کلی باران مؤثر در برنامه‌ریزی آبیاری به کار می‌رود. استفاده از روش سرویس حفاظت خاک ایالات متحده رضایتبخش است. و روش فائو برای مناطق خشک توصیه می‌گردد.

روش‌های تجربی دیگر هم که باران مؤثر درصدی از کل بارندگی در نظر گرفته می‌شود. فقط برای شرایط خاص (منطقه‌ای، اقلیمی، گیاهی و...) قابل استفاده است.

منابع فصل دوم:

۱ـ بای بوردی، محمد، ۱۳۷۲. فیزیک خاک. انتشارات دانشگاه تهران.

۲ـ بای بوردی، محمد، ۱۳۷۲. رابطه آب و خاک. انتشارات دانشگاه تهران.

۳ـ تشکری، محسن، تحلیلی بر راندمان‌های آبیاری (ترجمه)، انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

۴ـ خیرابی، جمشید، ۱۳۷۵. آبیاری قطره‌ای و ناگفته‌ها، قسمت اول و دوم، ماهنامه آب، خاک، ماشین، شماره‌های ۲۱ و ۲۲.

۵ـ خیرابی، جمشید، ۱۳۷۵. فرآیندهایی در عمق توسعه ریشه‌ها و راندمان کاربرد آب آبیاری، (ترجمه). ماهنامه آب، خاک، ماشین.

۶ـ خیرابی، جمشید، ۱۳۷۵. نقد و جمع‌بندی گردهمایی ۲۲ آذر ماه ۷۴ در وزارت کشاورزی موضوع: توسعه روش‌های آبیاری تحت فشار، مسایل مطروحه و راه‌حل‌ها، ماهنامه آب، خاک، ماشین شماره ۱۶ فروردین ماه.

۷ـ خیرابی، جمشید، سیداسدا... اسدالهی، ۱۳۷۳. تعریف و تبیین واژه‌شناختی آبیاری‌های کلاسیک، غیر کلاسیک (سنتی) و نیمه کلاسیک، سالنامه کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

۸ـ خیرابی، جمشید، سیداسدا... اسدالهی، ۱۳۷۳. تعریف علمی و مهندسی آبیاری، ماهنامه آب، خاک، ماشین شماره ۲ بهمن ماه.

۹ـ خیرابی، جمشید، متون درسی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران.

۱۰ـ خیرابی، جمشید، مبانی نظری و کاربردی آبیاری قطره‌ای، در دست انتشار.

۱۱ـ خیرابی ، جمشید و همکاران، ۱۳۷۵. دستور العملهای کم آبیاری، نشریه شماره دو کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.

۱۲ـ سپاسخواه، علیرضا، زندپارسا، ۱۳۷۵. تعیین تبخیر ـ تعرق گیاه مرجع براساس برخی از عوامل قابل اندازه‌گیری در ایستگاههای هواشناسی در ایران، مجموعه مقالات ششمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر ، کرمان.

۱۳ـ سپاسخواه، علیرضا، برآورد تبخیر ـ تعرق گیاه کنجد در باجگاه، مجموعه

مقالات ششمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان
۱۴ـ عابدی، محمدجواد، و همکاران. ۱۳۸۱. استفادهاز آب‌های شور در کشاورزی پایدار، انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران.
۱۵ـ علیزاده، امین و عوض کوچکی، ۱۳۷۰. اصول زراعت در مناطق خشک، جلد اول انتشارات دانشگاه مشهد.
۱۶ـ علیزاده، امین، ۱۳۶۸. اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه مشهد.
۱۷ـ علیزاده، امین، ۱۳۷۲. طراحی سیستم‌های آبیاری، انتشارات دانشگاه مشهد.
۱۸ـ فرزانه، روحا...، استاد و مدیر سابق گروه مهندسی آبیاری و آبادانی ـ متون درسی.
۱۹ـ نجمائی، محمد، ۱۳۶۹. اصول هیدورلوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

20- Abtew, W., and J. Obeysekera, 1994. Lysimeter stady of Evapo traspiration of cattails and comparison of therr estimotion methods. ASAE 38 (1): 121-129

21- Allen, R. G., C. E. Brock Way, and J.R. Bus ch. 1978. Planning optimal irrigation and appliction systems: TETON FLOOD DAMAGED LANDS.University of Idaho Moscow, Idaho.

22- Allen R.G., 1986. A penman for all seasons. J. Irrig. and Darin. Eng., ASCE 112 (4): 348 - 368

23- Allen, R.G., M.E. Jensen, and J.L. Wright, 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agronomy Journal 81:650 - 662

24- Allen, R.G., M. Smith, L.S. Perera 1994. An update for the Dehinition. ICID Bultin 43 (2) ;1-92

25- Allen, R.G., S.P. Luis, and D. Raes, 1998. Crop evapotranspiratiion - Guidelines for Computing crop water requirement-FAO Irr. and Dra. Paper. No. 56.

26- Chow, V.T., 1964. Hand book of Applied Hydrology.

27- Cooley, K.R., and S.D. Idso, 1980. Effects of lily pads on evaportation. water Resources Research, 16 (3): 605 - 606

28- Dastane, N.G., 1974. Effective rain fall in irrgated agriculture. Irrigation and Drainage Paper No. 25, FAO

29- FAO, 1992. A comuter program for Irrigation planing & managment. Irr. and Dri. Paper No. 64

30- George, H.F., Hargreares and A. Zohrabi. 1984. Economic consideration. J. of Irrgation and Drainage Vol. 110, No. 4.

31- Hansen, V.E., O.W. Israelsen, and G.E. Stringham. 1980. Irrigation principales and practices, 4h edition. Newyork: John wiley and Sons.

32- Her shfield, D.M. Effeetive rainfall and irrigation water requirement. J. of Irr. and Dri. Div, ASCE 90: IR2: 3920: 33 - 47

33- Hayes, G.I., and J.H. Buell, 1955. Water and forests trees also need water at the right time and place. In water year book , USDA: 219 - 228

34- Jensen, M.E., 1980. Design and operation of farm irrigation systems. St. Joseph, Michigan. American society of agricultural engineers.

35- Jensen, M.E., R.D. Burman and R.G. Allen. 1990. Evapotronspiration and irrigation water requirements. ASCE, Manual. No. 70

36- Jong, R.D. and D.R. Cameron, 1979. Computer simulation model for predicting soil water content Profiles. Soil Sci. 128 (1): 41-48

37- Kheyrabi, DJ., 1966. Influence de la texture des sols sur leur stabilite structurale. bull. de L'Academie des sciences de paris, seried, paris, PP: 485-487.

38- Kheyrabi, DJ., 1974. Influence de profondeur des racines sur l'utilite de l'eau pour les plantes. I. N. R. A. toulouse.

39- Kheyrabi, DJ., 1977. Study of the influence of various types of porsity on wate disribution by drip method, (experimental model study in laboratory). ICID bulletin, Vol. 26, No. 2. P. 47-61.

40- Lang, R., Measurement of evaporation from Land and water Surfaces. Tech. BULL. 817: 1-143

41- Miller, A. and J.C. Thompson, 1970. Elements of Meterology. Ohio, Merrill pub . co.

42- Ogrosky, H.O. and U. Mocks, 1964. Hydrology of agricultural lands sec 21 in Hand book of Hdrology by V. T. Chow.

43- Painter and Carran, 1978. What is irrigation efficiency?. Soil and Water (New zealand).

44- Potwardhan, A.S., J.L. Nieber and E.L. Johns, 1990. Effective rainfall estimation methods. J. of Irr. and Drin. Eng. ASCE , 116 (2) : 182 - 193

45- Ramdas, L.A. 1960. crops and weather in India

46- Rao, A.S., R. Thomas and K. Laksmanan, 1988. Measurement of effective rainfall in oxisols of cocont and Cassave Land Uses. Idojaras, Budapest, 92 (5): 263 - 68

47- Rays, D.R., 1973. Agronomic practices in field crops under favourobe and unfavourable and Rainfall conditions paper presented at 1 st SIDA/FAO seminar for plant scientists in Africa and the Near East, Cairo.

48- Stan hill, G. 1958. An irrgation Geuge for commercical use in field and gluss House Practice J. Agri. Eng Res. 3: 292 - 98

فصل سوم

برنامه‌ریزی آبیاری

تهیه کنندگان:

دکتر علی‌اصغر فرشی

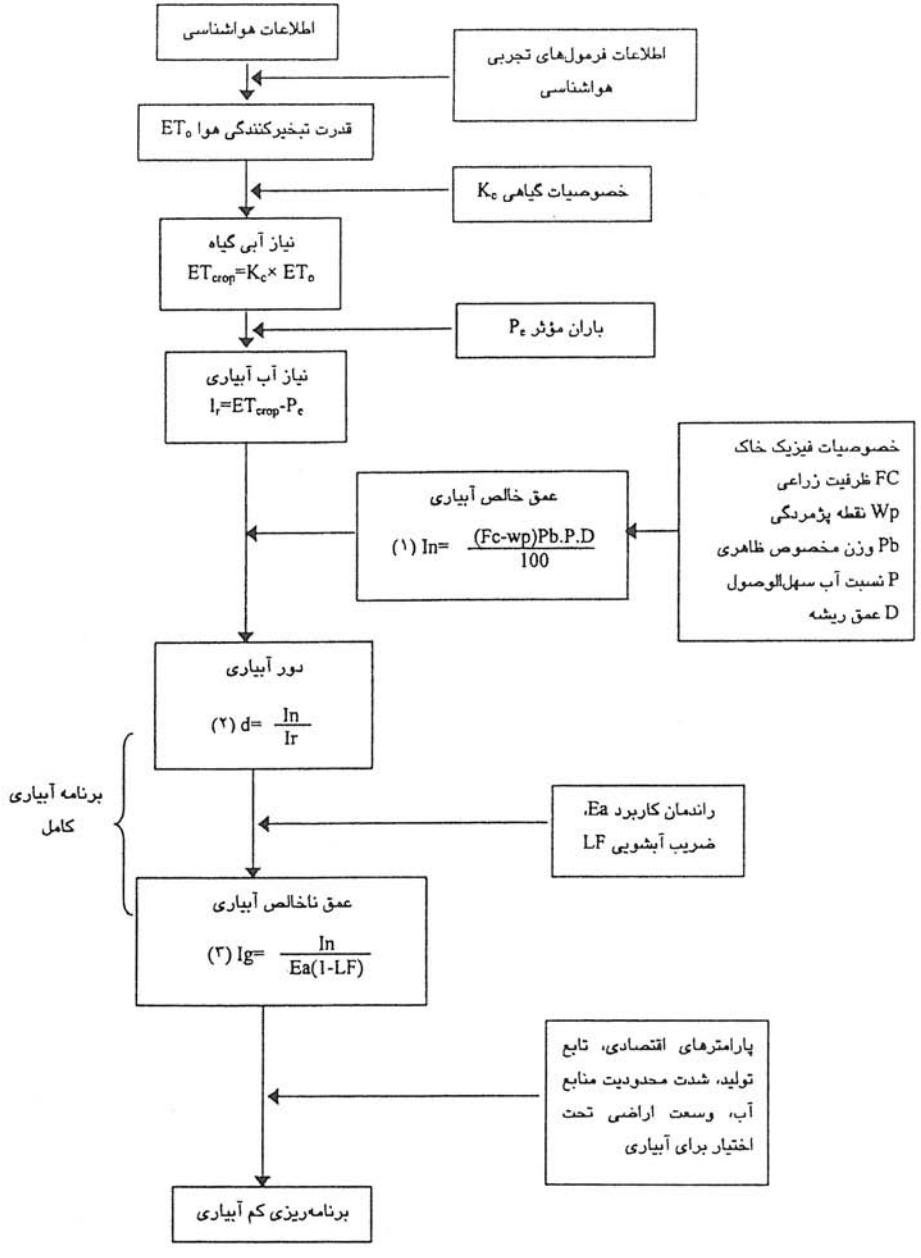
مهندس علیرضا سلامت

۱ـ۳ـ مقدمه

در این فصل با استفاده از پارامترهایی که در فصل اوّل «تعیین نیاز آبی گیاهان» و فصل دوّم (تعیین نیاز آب آبیاری) تعیین گردید با معرفی خصوصیات فیزیکی خاک مؤثر در برنامه‌ریزی آبیاری و همچنین عمق ریشه، در مرحله اول برنامه آبیاری یعنی تعیین دور و عمق آبیاری در حالت کافی بودن منابع آب به صورت آبیاری کامل و در مرحله بعد با معرفی پارامترهای اقتصادی، تابع تولید، میزان محدودیت منابع و وسعت اراضی تحت آبیاری، برنامه آبیاری در حالات مختلف کم آبیاری ارائه می‌گردد. روش کار در شمای شکل (۱ـ۳) نشان داده شده است. چنانچه در این شکل مشاهده می‌شود ابتدا با استفاده اطلاعات هواشناسی و با استفاده از فرمول‌های تجربی قدرت تبخیرکنندگی هوا (ET_o) تعیین و با منظور نمودن خصوصیات گیاهی نیاز آبی گیاه موردنظر تعیین می‌گردد. در مرحله بعدی با منظور نمودن باران مؤثر نیاز آب آبیاری و با استفاده از خصوصیات فیزیکی از قبیل ظرفیت زراعی (FC)، نقطه پژمردگی (WP)، نسبت آب سهل‌الوصول P، وزن مخصوص ظاهری (Pb) و عمق ریشه (D) عمق خالص آب آبیاری تعیین می‌گردد. در مرحله بعدی با وارد نمودن راندمان کاربردی E_a و ضریب آبشویی LF در عمق خالص عمق ناخالص آبیاری و نهایتاً با تقسیم نمودن عمق خالص در نیاز آبی دور آبیاری d تعیین می‌گردد. به عبارت دیگر در این مرحله برنامه آبیاری (دور و عمق) در حالت کافی بودن منابع آب در طول دوره رشد مشخص می‌شود. در مرحله آخر با در اختیار داشتن تابع تولید (رابطه آب و محصول) و شدت محدودیت منابع آب و وسعت اراضی تحت اختیار برای آبیاری با در نظر گرفتن پارامترهای اقتصادی، مدیریت آبیاری به صورت کم آبیاری در شرایط محدود بودن منابع آب تعیین می‌شود.

۲ـ۳ـ خصوصیات فیزیکی خاک

خصوصیات فیزیکی خاک نقش اساسی را در برنامه‌ریزی آبیاری دارا می‌باشد که در این بخش آندسته از خصوصیات و ویژگیهای خاک که در مسائل آبیاری کاربرد بیشتری دارند مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.



شکل ۱ـ۳ـ الگوریتم برنامه‌ریزی آبیاری

۱ـ۲ـ۳ـ اندازه یا ابعاد ذرات خاک

اندازه یا ابعاد ذرات خاک براساس سه تقسیم‌بندی اروپایی، بین‌المللی و USDA در جدول (۱ـ۳) ارائه گردیده است. در همین رابطه ذرات بزرگتر از دو سانتی‌متر به سنگ و ذراتی که قطرشان بین دو سانتی‌متر و دو میلی‌متر بوده بنام سنگریزه و ذرات کوچکتر از دو میلی‌متر به نام ریزدانه‌ها معروف می‌باشند. لازم به ذکر است که طبقه‌بندی اروپائی و USDA کلاسهای مختلف خاک را به طور کاملتر و دقیق‌تر بیان می‌نمایند.

جدول ۱ـ۳ـ طبقه‌بندی اندازه و ابعاد ذرات خاک

قطر ذرات به میلی‌متر ۲	USDA	بین‌المللی	اروپایی	قطر ذرات به میلی‌متر ۲
۱	شن خیلی درشت	شن درشت	شن درشت	۰/۶
۰/۵	شن درشت		شن متوسط	۰/۲
۰/۲۵	شن متوسط			
۰/۱	شن ریز	شن ریز	شن ریز	۰/۰۶
۰/۰۵	شن خیلی ریز		سیلت درشت	۰/۰۲
	سیلت	سیلت	سیلت متوسط	۰/۰۰۶
۰/۰۰۲			سیلت ریز	۰/۰۰۲
	رس	رس	رس درشت	۰/۰۰۰۶
			رس متوسط	۰/۰۰۰۲
			رس ریز	

۲ـ۲ـ۳ـ بافت خاک

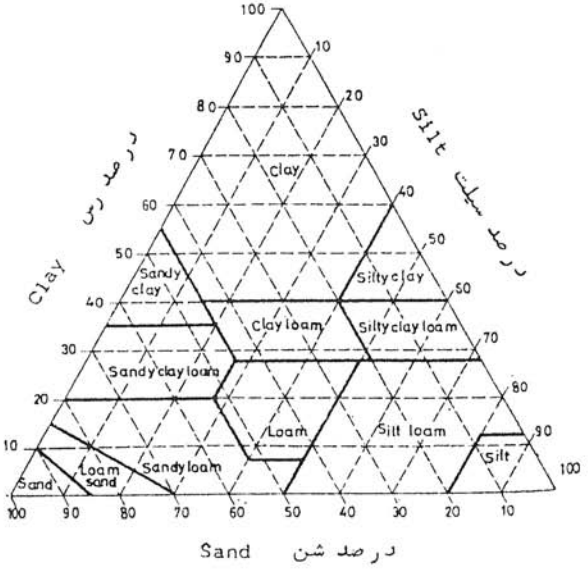
بافت خاک در تعریف مقدار نسبی هریک از ذرات شن، سیلت و رس موجود در خاک می‌باشد. تعیین بافت خاک از نقطه نظر ارزیابی زمین مورد استفاده برای کشت از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. طبق بررسی‌های بعمل آمده بهترین خاکهای زراعی آنهایی هستند که دارای میزان ۱۰ الی ۲۰ درصد رس، ۸۰ـ۷۰ درصد سیلت و شن (به مقدار مساوی از هر کدام) باشد. برای تعیین بافت خاک نیز روشهای گوناگونی ابداع گردیده که

یکی از آنها روش رسوب‌گذاری است که ابعاد ذرات مختلف موجود در یک خاک براساس سرعت رسوب آنها مشخص می‌گردد.

با افزایش نسبت شن و سیلت در خاک، رطوبت قابل استفاده گیاه کاهش یافته که دلیل آن ظرفیت رطوبتی کم این گونه خاکها می‌باشد، ولی در عوض میزان نفوذپذیری آب و هوا به واسطه خلل و فرج درشت موجود در این گونه خاکها زیاد است. در خاکهایی که نسبت رس در آنها زیاد بوده میزان رطوبت قابل استفاده برای گیاه به واسطه ظرفیت نگهداشت رطوبتی بالای این گونه خاکها بیشتر است منتهی نیروی مکش بیشتری برای دریافت آب از خاک لازم می‌باشد. در این نوع خاک میزان نفوذپذیری آب و هوا به علت کاهش تخلخل نسبی کم می‌باشد.

انواع بافت‌های خاک را بسته به نسبت ذرات، رس، لوم و شن به دوازده نوع تقسیم نموده‌اند که در شکل (۲ـ۳) نشان داده شده است. انواع بافت خاک عبارتند از:

الف ـ بافت شنی، ب ـ شن لومی، پ ـ لوم شنی، ت ـ لوم، ث ـ لوم سیلتی، ج ـ سیلت، چ ـ لوم رس شنی، ح ـ لوم رسی، خ ـ لوم رس سیلتی، د ـ رس شنی، ذ ـ رس سیلتی، ر ـ رس.



شکل ۲ـ۳ـ مثلث بافت خاک

با استفاده از مثلث بافت خاک و نسبت مقادیر ذرات مختلف تشکیل‌دهنده خاک (یعنی رس، سیلت و شن) می‌توان بافت خاک را تعیین نمود. بعنوان مثال در صورتیکه مقدار رس خاک برابر با ۱۵ درصد، سیلت برابر با ۳۵ درصد و شن موجود در خاک نیز برابر با ۵۰ باشد آنگاه از روی مثلث بافت خاک، بافت آن، لومی خواهد بود (در مثلث بافت خاک با هاشور مشخص شده است).

۳ـ۲ـ۳ـ ساختمان خاک

ساختمان خاک در تعریف، طرز اتصال و قرارگرفتن ذرات شن، سیلت و رس در خاک می‌باشد. ساختمان خاک بر خلاف بافت، خصوصیت کیفی بوده و بطور مستقیم قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. ساختمان خاک بر خلاف بافت خاک خصیصه ایست که دائماً در اثر تغییر شرایط زیست محیطی، فعالیت موجودات زنده، عملیات کاشت، داشت و برداشت در حال تغییر بوده و در حاصلخیزی خاک نیز نقش مهمی را ایفا می‌نماید.

پایداری ساختمان خاک به عواملی چون نیروی چسبندگی، نیروی پیوستگی، کانی‌های رس، هوا و مواد آلی بستگی دارد. ساختمان خاک در میزان انتقال، جذب و عبور آب از لایه‌های خاک نقش مهمتری از بافت خاک دارد.

۴ـ۲ـ۳ـ وزن مخصوص حقیقی خاک

وزن مخصوص حقیقی خاک حاصل تقسیم جرم خاک (فاز جامد) بر حجم ذرات جامد خاک بوده که در بیشتر خاکها حدود ۲/۶ تا ۲/۷ گرم بر سانتی‌متری مکعب می‌باشد (رابطه ۱ـ۳).

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \qquad [۳ـ۱]$$

که در آن:

ρ_s: وزن مخصوص حقیقی، (گرم بر سانتی‌متر مکعب).

M_s: جرم ذرات جامد خاک، (گرم).

V_s : حجم ذرات جامد خاک، (سانتی‌متر مکعب).

وزن مخصوص حقیقی خاک بیشتر به جنس مواد تشکیل‌دهنده فاز جامد خاک بستگی دارد. هرچه این مواد سنگینتر باشد وزن مخصوص حقیقی بیشتر می‌شود. خاکهائیکه دارای مواد آلی قابل ملاحظه‌ای هستند بدلیل سبکی این مواد وزن مخصوص حقیقی کمتری دارند.

۵ـ۲ـ۳ـ وزن مخصوص ظاهری

وزن مخصوص ظاهری حاصل تقسیم جرم ذرات جامد خاک بر حجم کلی خاک بوده که همواره از وزن مخصوص حقیقی خاک کوچکتر است. وزن مخصوص ظاهری از ۱/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب در خاک‌های شنی تا ۱/۱ گرم بر سانتی‌متری مکعب، در خاکهای رسی متفاوت می‌باشد. رابطه زیر بیانگر وزن مخصوص ظاهری خاک می‌باشد:

$$\rho_b=\frac{M_v}{V_t} \qquad [۳ـ۲]$$

که در آن:

ρ_b: وزن مخصوص ظاهری خاک، (گرم بر سانتی‌متر مکعب).

M_v : وزن ذرات جامد خاک، (گرم).

V_t : حجم کل توده خاک، (سانتی‌متر مکعب).

۶ـ۲ـ۳ـ تخلخل خاک

نسبت تخلخل در هر خاک نشانگر میزان و حجم خلل و فرج در خاک بوده و مقدار آن از ۰/۳ در خاکهای درشت بافت (شنی) تا ۰/۶ در خاکهای ریزبافت (رسی) متغیر بوده لیکن اندازه خلل و فرج در خاکهای درشت بافت نسبت به خاکهای ریزدانه بزرگتر می‌باشد. خلل و فرج موجود در خاک در جذب آب و هوا و انتقال آن به ناحیه توسعه ریشه‌ها، هدایت حرارتی خاک و توسعه ریشه‌ها چه در سطح و چه در عمق نقش بسزایی دارد. تخلخل خاک با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$F=\frac{V_a+V_w}{V_s+V_a+V_w}=\frac{V_f}{V_t} \qquad [۳ـ۳]$$

که در آن:

V_a: حجمی که توسط هوای موجود در خاک اشغال گردیده، (سانتیمتر مکعب).

V_s: حجمی که توسط ذرات جامد خاک اشغال گردیده، (سانتیمتر مکعب).

V_w: حجمی که توسط آب موجود در خاک اشغال گردیده، (سانتیمتر مکعب).

V_t: حجم کل خاک، (سانتیمتر مکعب).

V_f: حجم خلل فرج خاک، (سانتیمتر مکعب).

F: نسبت تخلخل، (بدون بعد).

رابطه بین تخلخل و وزن مخصوص ظاهری خاک به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$F=\frac{\rho_s-\rho_b}{\rho_s}=1-\frac{\rho_b}{\rho_s} \qquad [۳-۴]$$

که در آن:

P_b: وزن مخصوص ظاهری خاک، (گرم بر سانتیمتر مکعب).

P_s: وزن مخصوص حقیقی خاک، (گرم بر سانتیمتر مکعب).

تخلخل خاک به دو بخش تخلخل موثر یا درشت و تخلخل ریز تقسیم‌بندی گردیده که اهمیت تخلخل موثر یا خلل و فرج درشت اغلب برای عبور هوا و انتقال آن به ناحیه توسعه ریشه‌ها موثر بوده و خلل و فرج ریز برای عبور آب و هدایت آنها به سمت ریشه در اثر نیروی موئینگی یا کاپیلارته می‌باشد.

۳-۳- رطوبت خاک

رطوبت خاک در زمان آبیاری افزایش یافته و پس از آن در اثر تبخیر - تعرق کاهش می‌یابد. لذا رطوبت خاک بطور دائم و پیوسته با زمان در حال تغییر می‌باشد. رطوبت خاک را می‌توان براساس واحد وزنی (رطوبت وزنی) یا واحد حجم (رطوبت حجمی) یا ارتفاع آب به ارتفاع خاک بیان نمود.

۱ـ۳ـ۳ـ رطوبت وزنی

رطوبت وزنی خاک از تقسیم جرم آب موجود در خاک بر جرم ذرات جامد خاک بدست می‌آید. رطوبت وزنی بصورت نسبی یا درصد بیان می‌گردد. در صد رطوبت وزنی از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\%\theta_m=\frac{M_w}{M_s}\times 100 \qquad [۳ـ۵]$$

که در آن:

θ_m: رطوبت وزنی، (درصد).

M_w: وزن آب موجود در خاک، (گرم).

M_s: جرم ذرات جامد خاک، (گرم).

برای اندازه‌گیری رطوبت وزنی، از خاک نمونه برداری نموده و در قوطی‌های مخصوص که وزن آن‌ها قبلاً مشخص شده قرار می‌دهند. در قوطی‌ها را کاملاً بسته تا از تبخیر آب نمونه جلوگیری شود. سپس به آزمایشگاه برده و با ترازوی دقیق توزین می‌شود (وزن نمونه مرطوب + وزن قوطی). سپس در قوطی را باز کرده و در داخل اتوکلاو با حرارت ۱۰۵ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شود. مدت نگهداری نمونه در اتوکلاو تا موقعی خواهد بود که دیگر کاهش وزنی را با گذشت زمان نداشته باشیم (در خاک بافت سبک ۱۸ ساعت و در بافت سنگین حداکثر ۴۸ ساعت). در این موقع قوطی را از اتوکلاو برداشته شده و توزین می‌نمایند (وزن نمونه خاک خشک + وزن قوطی). حال با استفاده از رابطهٔ [۳ـ۵] بصورت زیر:

$$\%\theta_m=\frac{\text{وزن نمونه خاک خشک با قوطی} - \text{وزن نمونه خاک مرطوب با قوطی}}{\text{وزن قوطی نمونه} - \text{وزن خاک خشک شده با قوطی}}\times 100 \qquad [۳ـ۶]$$

درصد وزنی رطوبت بدست می‌آید.

۲ـ۳ـ۳ـ رطوبت حجمی

رطوبت حجمی، حاصل تقسیم حجم آب موجود در خاک (V_w) بر حجم کل توده خاک (V_t) بوده که بصورت نسبی یا درصد بیان می‌شود. رطوبت حجمی در خاک‌های شنی در حالت اشباع برابر ۴۰ تا ۵۰ درصد، در خاکهای با بافت متوسط (لومی) حدود ۵۰ درصد و در خاکهای ریزدانه (رسی) به ۶۰ درصد نیز می‌رسد. رطوبت حجمی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\theta_v=\frac{V_w}{V_t}\times ۱۰۰=\frac{V_w}{V_s+V_f}\times ۱۰۰ \qquad [۳ـ۷]$$

که در آن:

θ_v: رطوبت حجمی، (درصد).

بقیه پارامترها قبلاً تعریف شده‌اند.

رابطه بین رطوبت وزنی و رطوبت حجمی خاک به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\theta_v = \theta_m \times \frac{\rho_b}{\rho_w} \qquad [۳ـ۸]$$

که در آن:

P_b: وزن مخصوص ظاهری خاک، (گرم بر سانتیمتر مکعب).

P_w: وزن مخصوص آب، (گرم بر سانتیمتر مکعب).

از آنجاکه وزن مخصوص آب تقریباً برابر ۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده، لذا:

$$\theta_v=\theta_m\times\rho_b \qquad [۳ـ۹]$$

۳ـ۳ـ۳ـ ارتفاع آب به ارتفاع خاک

روش دیگر بیان رطوبت خاک بصورت ارتفاع آب به ارتفاع خاک می‌باشد. برای تعیین آن کافی است که نسبت حجمی رطوبت خاک را در عمق آن ضرب نماییم:

$$I_w=\frac{\theta_v\times d}{۱۰۰} \qquad [۳ـ۱۰]$$

که در آن:

I_w: ارتفاع آب، (سانتیمتر).

θ_v: درصد رطوبت حجمی خاک، (درصد).

d: عمق خاک، (سانتیمتر).

در صورتیکه در رابطه [۱۰ـ۳] بجای عمق خاک، عمق مؤثر ریشه (جدول ۲ـ۳) قرار داده شود. ارتفاع آب در عمق ریشه بدست می‌آید.

جدول ۲ـ۳ـ عمق ریشه گیاهان مختلف، بخش سهل‌الوصول آب و بر حسب میلیمتر در یک متر خاک با بافت‌های مختلف (با در نظرگرفتن تبخیر ـ تعرق برابر ۶ـ۵ میلیمتر در روز)

(به نقل از نشریه FAO24)

محصول	عمق ریشه D	بخش آب سهل الوصول P	آب سهل‌الوصول خاک (میلیمتر درمتر خاک)		
			ریزبافت	متوسط‌بافت	درشت‌بافت
یونجه	۱/۰-۲/۰	۰/۵۵	۱۱۰	۷۵	۳۵
موز	۰/۵-۰/۹	۰/۳۵	۷۰	۵۰	۲۰
جو	۱/۰-۱/۵	۰/۵۵	۱۱۰	۷۵	۳۵
لوبیا	۰/۵-۰/۷	۰/۴۵	۹۰	۶۵	۳۰
چغندر	۰/۶-۱/۰	۰/۵	۱۰۰	۷۰	۳۵
کلم	۰/۴-۰/۵	۰/۴۵	۹۰	۶۵	۳۰
هویج	۰/۵-۱/۰	۰/۳۵	۷۰	۵۰	۲۰
کرفس	۰/۳-۰/۵	۰/۲	۴۰	۲۵	۱۰
مرکبات	۱/۲-۱/۵	۰/۵	۱۰۰	۷۰	۳۰
شبدر	۰/۶-۰/۹	۰/۳۵	۷۰	۵۰	۲۰
کاکائو		۰/۲	۴۰	۳۰	۱۵
پنبه	۱/۰-۱/۷	۰/۶۵	۱۳۰	۹۰	۴۰
خیار	۰/۷-۱/۲	۰/۵	۱۰۰	۷۰	۳۰

ادامه جدول ۲ـ۳ـ

محصول	عمق ریشه D	بخش آب	آب سهل‌الوصول خاک (میلیمتر درمتر خاک)		
		سهل الوصول P	ریزبافت	متوسط‌بافت	درشت‌بافت
خرما	۱/۵-۲/۵	۰/۵	۱۰۰	۷۰	۳۰
میوه‌جات	۱/۰-۲/۰	۰/۵	۱۰۰	۷۰	۳۰
کتان	۱/۰-۱/۵	۰/۵	۱۰۰	۷۰	۳۰
غلات	۰/۹-۱/۵	۰/۶	۱۲۰	۸۰	۴۰
غلات زمستانه	۱/۵-۲/۰	۰/۶	۱۲۰	۸۰	۴۰
انگور	۱/۰-۲/۰	۰/۳۵	۷۰	۵۰	۲۰
علوفه	۰/۵-۱/۵	۰/۵	۱۰۰	۷۰	۳۰
بادام زمینی	۰/۵-۱/۰	۰/۴	۸۰	۵۵	۲۵
کاهو	۰/۳-۰/۵	۰/۳	۶۰	۴۰	۲۰
ذرت	۱/۰-۱/۷	۰/۶	۰۱۲۰	۸۰	۴۰
ذرت سیلو		۰/۵	۱۰۰	۷۰	۳۰
خربزه	۱/۰-۱/۵	۰/۳۵	۷۰	۵۰	۲۵
زیتون	۱/۲-۱/۷	۰/۶۵	۱۳۰	۹۵	۴۵
پیاز	۰/۳-۰/۵	۰/۲۵	۵۰	۳۵	۱۵
خرما	۰/۷-۱/۱	۰/۶۵	۱۳۰	۹۰	۴۰
نخود	۰/۶-۱/۰	۰/۳۵	۷۰	۵۰	۲۵
فلفل	۰/۵-۱/۰	۰/۲۵	۵۰	۳۵	۱۵
آناناس	۰/۳-۰/۶	۰/۵	۱۰۰	۶۵	۳۰
سیب زمینی	۰/۴-۰/۶	۰/۲۵	۵۰	۳۰	۱۵
گلرنگ	۱/۰-۲/۰	۰/۶	۱۲۰	۸۰	۴۰
سیسال	۰/۵-۱/۰	۰/۸	۱۵۵	۱۱۰	۵۰

ادامه جدول ۲ـ۳ـ

محصول	عمق ریشه D	بخش آب سهل الوصول P	آب سهل‌الوصول خاک (میلیمتر درمتر خاک) ریزبافت	متوسط‌بافت	درشت‌بافت
سورگوم	۱/۰-۲/۰	۰/۵۵	۱۱۰	۷۵	۳۵
سوژا	۰/۶-۱/۳	۰/۵	۱۰۰	۷۵	۳۵
اسفناج	۰/۳-۰/۵	۰/۲	۴۰	۳۰	۱۵
توت فرنگی	۰/۲-۰/۳	۰/۱۵	۳۰	۲۰	۱۰
چغندرقند	۰/۷-۱/۲	۰/۵	۱۰۰	۷۰	۳۰
نیشکر	۱/۲-۲/۰	۰/۶۵	۱۳۰	۹۰	۴۰
آفتاب‌گردان	۰/۸-۱/۵	۰/۴۵	۹۰	۶۰	۳۰
سیب‌زمینی	۱/۰-۱/۵	۰/۶۵	۱۳۰	۹۰	۴۰
شیرین					
تنباکو	۰/۵-۱/۰	۰/۳۵	۷۰	۵۰	۲۵
زودرس					
تنباکو		۰/۶۵	۱۳۰	۹۰	۴۰
دیررس					
گوجه فرنگی	۰/۷-۱/۵	۰/۴	۱۸۰	۶۰	۲۵
سبزیجات	۰/۳-۰/۶	۰/۲	۴۰	۳۰	۱۵
گندم	۱/۰-۱/۵	۰/۵۵	۱۰۵	۷۰	۳۵
گندم رسیده		۰/۹	۱۸۰	۱۳۰	۵۵
کل آب قابل استفاده			۲۰۰	۱۴۰	۶۰

در شرایط اقلیمی خشک ($ET_o > ۶$) ۱۰٪ از P کاسته شده و در شرایط مرطوب ($ET_o < ۶$) ۱۰٪ به P اضافه شود.

۴ـ۳ـانواع آب در خاک (نقطه اشباع، ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی، خاک خشک شده در اتوکلاو)

آب موجود در خاک از یک حد بالایی بنام ظرفیت زراعی یا ظرفیت مزرعه تا حد پایینی بنام نقطه پژمردگی دائم برای گیاه قابل جذب می‌باشد که آن را آب قابل استفاده می‌نامند. هر چه از نقطه ظرفیت زراعی (FC) به سمت نقطه پژمردگی دائم (PWP) نزدیک شویم حصول آب توسط گیاه از محیط خاک دشوارتر گردیده و گیاه با تنش رطوبتی روبرو می‌گردد. در همین رابطه نیز درصد تخلیه مجاز رطوبت، میزان آبی است که می‌تواند از محیط خاک تخلیه گردیده بدون اینکه گیاه با تنش رطوبتی، روبرو شود که آن را رطوبت سهل الوصول می‌نامند. در این بخش انواع آب در خاک مورد بحث قرار می‌گیرد.

۱ـ۴ـ۳ـ نقطه اشباع

رطوبت نقطه اشباع خاک زمانی رخ می‌دهد که کلیه خلل و فرج خاک از آب پرشده باشند. نقطه اشباع در بافتهای مختلف خاک متفاوت می‌باشد. حجم کل خلل و فرج یک خاک رسی به مراتب از یک خاک شنی بیشتر بوده و به همین دلیل رطوبت حجمی در نقطه اشباع در خاکهای رسی از خاکهای شنی بیشتر است.

۲ـ۴ـ۳ـ ظرفیت زراعی

مقدار آب موجود در خاک راکه نیروی ثقل قادر به تخلیه آن نمی‌باشد، ظرفیت زراعی نامیده می‌شود. در این حالت نیروی مکش خاک حدود $\frac{۱}{۳}$ اتمسفر خواهد بود. این نیرو در خاکهای شنی درشت بافت به $\frac{۱}{۱۰}$ اتمسفر تقلیل یافته و در خاکهای رسی به $\frac{۱}{۲}$ اتمسفر می‌رسد.

۳ـ۴ـ۳ـ نقطه پژمردگی دائم

حد پایینی رطوبت قابل استفاده گیاه را نقطه پژمردگی دائم می‌خوانند. در این حالت جذب آب توسط گیاهان مختلف برای جلوگیری از پژمردگی کافی نمی‌باشد. میزان نیروی

مکش خاک نیز در این نقطه حدود ۱۵ اتمسفر خواهد بود.

۴ـ۴ـ۳ـ خاک خشک شده در اتو

خاک خشک به خاکی اطلاق می‌شود که بمدت کافی در دمای ۱۰۵درجه سانتیگراد در اتوکلاو قرار داده شود. منظور از مدت کافی، مدتی است که پس از آن دیگر کاهش وزن نمونه در اثر از دست دادن رطوبت مشاهده نگردد.

۵ـ۴ـ۳ـ آب ثقلی

مقدار آب موجود بین نقطه اشباع و ظرفیت زراعی را آب ثقلی می‌نامند. این آب به علت خارج شدن سریع از خاک با نیروی ثقل و همچنین شرایط عدم تهویه‌ای که در خاک ایجاد می‌نماید قابل استفاده گیاه نمی‌باشد.

۶ـ۴ـ۳ـ آب قابل استفاده گیاه

فاصله بین حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی، آب قابل استفاده هر گیاه محسوب می‌گردد. این حد در خاکهای مختلف متفاوت بوده که باید مد نظر قرار گیرد.

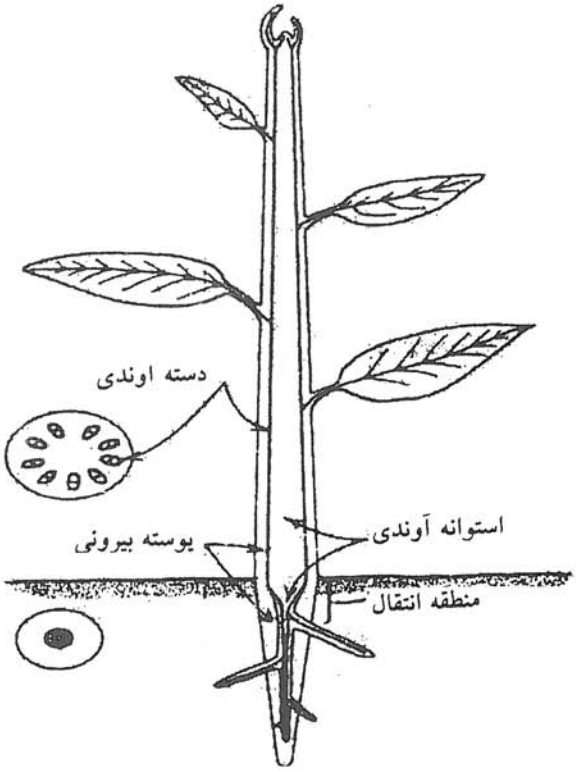
۷ـ۴ـ۳ـ آب سهل‌الوصول

میزان آبیست که گیاه می‌تواند بدون روبرو شدن با تنش آبی، آن را از خاک جذب نموده و مورد استفاده قرار دهد. آب سهل الوصول بسته به نوع گیاه و بافت خاک متفاوت بوده که مقادیر آن در جدول (۲ـ۳) به تفصیل درج گردیده است.

۵ـ۳ـ مدل زنجیره خاک، گیاه و اتمسفر (SPAC)

SPAC زنجیره پیوسته خاک، گیاه و اتمسفر می‌باشد (شکل ۳ـ۳). آب در طول حیات گیاه بطور مداوم و پیوسته در این زنجیره در حرکت است. آب در خاک مدام بطرف ریشه حرکت کرده و توسط آن جذب می‌گردد و سپس از طریق آوندهای چوبی خود را به برگ‌ها رسانده و بصورت بخار (تعرق) خارج می‌گردد. اگر این جریان در قسمتی از

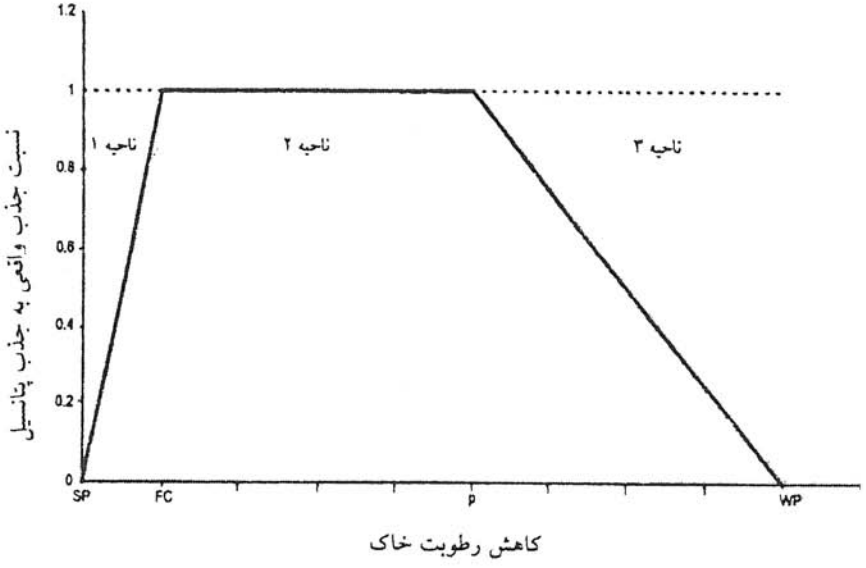
زنجیره قطع گردد، گیاه ابتدا پژمرده شده و سپس می‌میرد. در گیاه سالم وقتی کلیه عوامل رشد بصورت بهینه باشد شدت جریان این حرکت به حداکثر خود می‌رسد. در



شکل ۳ـ۳ـ حرکت آب در زنجیره پیوسته خاک، گیاه و اتمسفر (مدل SPAC)

این حالت مقدار آن توأم با میزان آبی که از سطح خاک تبخیر می‌گردد، تبخیر ـ تعرق پتانسیل (ET_{pot}) را تشکیل می‌دهند. در تبخیر ـ تعرق پتانسیل عامل محدودکننده جریان برای یک گیاه معین عوامل جوی از قبیل میزان تشعشع، درجه حرارت، سرعت باد و نم نسبی است، که با استفاده از این عوامل و خصوصیات گیاه مقدار آن قابل محاسبه می‌باشد. در حالتی که تبخیر ـ تعرق بصورت پتانسیل انجام می‌گیرد تغییرات رطوبت خاک بایستی در حد بهینه یا در حد رطوبت سهل‌الوصول باشد، که معمولاً این شرایط در اقالیم خشک و نیمه‌خشک با کمک آبیاری کامل صورت می‌گیرد. در صورتیکه رطوبت خاک

کمتر از رطوبت سهل‌الوصول باشد شدت جریان در مدل SPAC کاهش می‌یابد و مقدار آن کمتر از تبخیر ـ تعرق پتانسیل می‌گردد که آنرا تبخیر ـ تعرق حقیقی (ET_{act}) می‌نامند. در این شرایط گیاه تحت تنش رطوبتی بوده و کم آبیاری صورت می‌گیرد. در این حالت کنترل جریان در مدل SPAC از اتمسفر به خاک منتقل شده و در مرحله جذب آب بوسیله ریشه صورت می‌گیرد. بر اساس نظریه هوقلند[1] و همکاران (۱۹۸۱) مدل جذب ریشه (که تقریباً با صرفنظر نمودن از مقدار ناچیز آبی که در پیکره گیاهی باقی می‌ماند، همان شدت تعرق می‌باشد) با تغییرات رطوبت خاک بصورت شکل (۴ـ۳) می‌باشد.



شکل ۴ـ۳ـ مدل هوقلند، تغییرات نسبی جذب آب توسط ریشه با کاهش رطوبت خاک

در این شکل تغییرات نسبی جذب آب یا کاهش رطوبت خاک (اشباع) تا نقطه پژمردگی دائم نشان داده شده است. چنانکه در این شکل مشاهده می‌گردد، در نقطه اشباع، جذب آب در اثر عدم وجود هوا در منطقه ریشه کاملاً متوقف می‌شود. با کاهش رطوبت خاک از نقطه اشباع و ورود هوا به خاک، میزان جذب آب بتدریج افزایش یافته و در نقطه ظرفیت

1- Hoogland

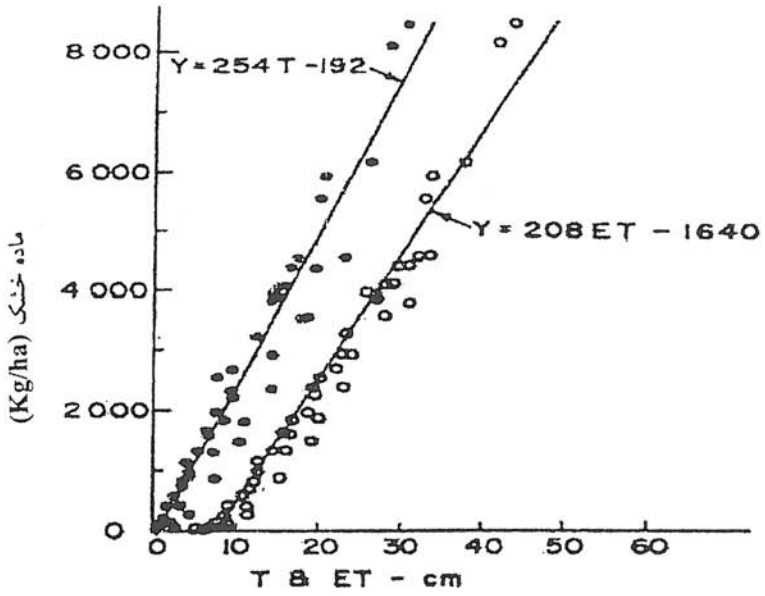
زراعی به حداکثر مقدار خود یعنی ۱ می‌رسد. با کاهش رطوبت خاک از نقطه F.C. تا مصرف آب سهل‌الوصول، مقدار جذب نسبی در حداکثر مقدار خود می‌ماند و پس از آن شروع به کاهش نموده تا در نقطه پژمردگی به صفر برسد. بنابراین براساس این مدل با کاهش رطوبت خاک از نقطه اشباع تا نقطه پژمردگی سه منطقه خواهیم داشت: ۱ـ از نقطه اشباع تا نقطه ظرفیت زراعی که ناحیه تنش هوا می‌باشد. ۲ـ از نقطه ظرفیت زراعی تا نقطه پایان آب سهل الوصول که ناحیه بدون تنش است و ۳ـ از نقطه پایان آب سهل‌الوصول تا نقطه پژمردگی که ناحیه تنش رطوبتی است. در آبیاری کامل تغییرات رطوبت خاک در طول رشد گیاه در منطقه ۱ و ۲ می‌باشد. لازم به توضیح است منطقه ۱ یا منطقه تنش هوا در خاک‌های دارای بافت سبک و یا در روش‌های آبیاری نقطه‌ای مثل آبیاری قطره‌ای کم بوده و قابل صرفنظر کردن می‌باشد. در این برنامه آبیاری میزان تبخیر ـ تعرق و رشد گیاهان و همچنین مقدار مصرف آب آبیاری خالص حداکثر می‌باشد. در شرایط کم آبیاری حدود تغییرات رطوبت خاک علاوه بر منطقه ۱ و ۲ به منطقه ۳ نیز که منطقه تنش رطوبتی می‌باشد می‌رسد. در منطقه ۳ میزان تبخیر ـ تعرق کاهش یافته و کمتر از تبخیر ـ تعرق پتانسیل می‌گردد، در نتیجه میزان جذب آب توسط ریشه و به تبع آن میزان تعرق، تبخیر ـ تعرق و مصرف آب کاهش پیدا کرده و میزان رشد نیز کمتر از رشد پتانسیل می‌شود.

۱ـ۵ـ۳ـ رابطه مقدار کل محصول (Y) باتعرق (T) و تبخیر ـ تعرق (ET):

وقتی که میزان آب عامل محدودکننده رشد است، بستگی شدیدی بین مقدار کل ماده تولید شده با مقدار کل تعرق وجود دارد. این رابطه معمولاً خطی بوده و از مبدأ مختصات یا از نزدیک آن شروع و به نقطه حداکثر تعرق (T_{pot}) حداکثر محصول (Y_{pot}) می‌رسد. T_{pot} در عمل در صورتیکه رطوبت خاک در طول فصل رشد توسط بارندگی یا آبیاری در حد بهینه (منطقه ۲ شکل ۴ـ۳) باشد حاصل می‌گردد.

همبستگی زیادی بین تعرق با تبخیر ـ تعرق وجود دارد. معمولاً رابطه میزان کل ماده خشک تولید شده با تبخیر ـ تعرق خطی است. این خط ممکن است از مرکز محور مختصات یا نزدیک آن برای گیاهان دائمی و از سمت راست مبدأ مختصات برای گیاهان یکساله عبور کند. در حالت اخیر قبل از آنکه گیاه تازه کشت شده بتواند شروع به تجمع

مقدار قابل توجهی ماده خشک نماید، تبخیر زیادی از سطح خاک صورت می‌گیرد. مدیریت آبیاری و عملیات زراعی در مرحله اولیه رشد در محل تقاطع رابطه با محور تبخیر ـ تعرق اثر می‌گذارد. در شکل (۵ـ۳) روابط ماده خشک تولید شده را با تعرق و تبخیر ـ تعرق برای سورگوم دانه‌ای که توسط هنکس [۱] تعیین شده بعنوان نمونه نشان داده شده است. عموماً این روابط خطی می‌باشند، وقتی از حالت خطی خارج می‌شوند، انحراف معمولاً در سطوح بیشتر ET یا T اتفاق می‌افتد. اختلالات تهویه‌ای خاک، ورس گیاه و یا سایر عوامل که در رطوبت بالای خاک باعث کندی رشد می‌شوند، علت انحراف رابطه از حالت خطی است.

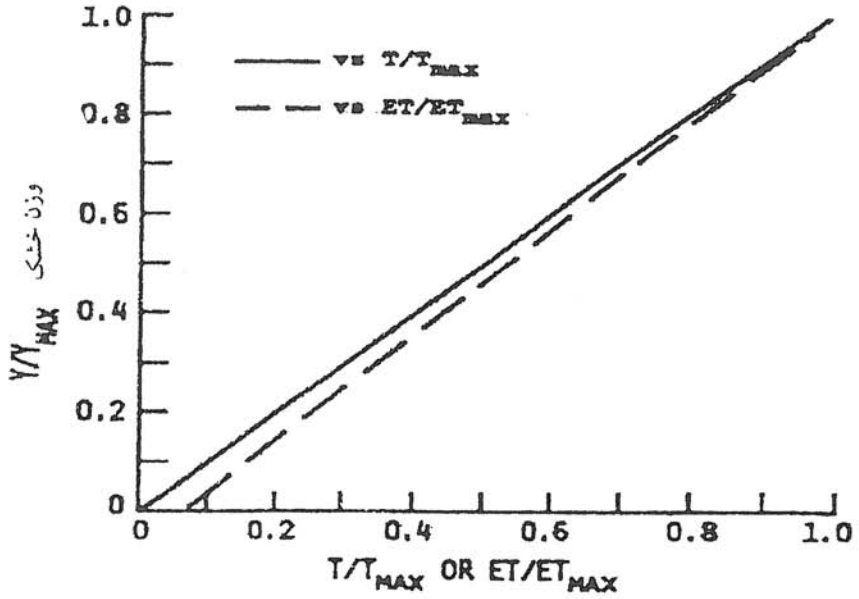


شکل ۵ـ۳ـ روابط محصول با مقدار تعرق گیاهی (T) و تبخیر ـ تعرق (ET)

در عمل برای سادگی، روابط خطی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ضریب همبستگی رابطه میزان کل ماده خشک تولید شده با تعرق بیشتر از تبخیر ـ تعرق است ولی چون تعیین

1- hanks

تعرق گیاهی مشکل بوده و تبخیر ـ تعرق بسادگی قابل اندازه‌گیری است بنابراین در عمل بیشتر از رابطه ماده خشک تولید شده با تبخیر ـ تعرق استفاده می‌گردد. اگر در شکل (۵ـ۳) بجای مقادیر مطلق، مقادیر نسبی ($ET_{act}/ET_{pot}, Y_{act}/Y_{pot}$) بکار رود رابطه جامعتر شده و بصورت شکل (۶ـ۳) قابل ارائه است.



شکل ۶ـ۳ـ روابط محصول نسبی با تعرق نسبی T_{act}/T_{pot} و تبخیر ـ تعرق نسبی ET_{act}/ET_{pot}

در این حالت اگر مقادیر Y_{pot} و T_{pot} برای گیاه و شرایط اقلیمی معینی برآورد گردد، مقدار محصول در رابطه با مقدار تبخیر ـ تعرق انجام شده محاسبه می‌شود. این، اساس مدل‌های رشد و تولید محصول در رابطه با مقدار تبخیر ـ تعرق را تشکیل می‌دهد. سازمان خواربار جهانی (FAO) در نشریه آبیاری و زهکشی شماره ۳۳ خود، رابطه نسبت کاهش محصول با نسبت کاهش تبخیر ـ تعرق را به صورت زیر ارائه نموده است:

$$[1 - \frac{Y_{act}}{Y_{pot}}] = Ky[1 - \frac{ET_{act}}{ET_{pot}}] \qquad [۳-۱۱]$$

که در آن:

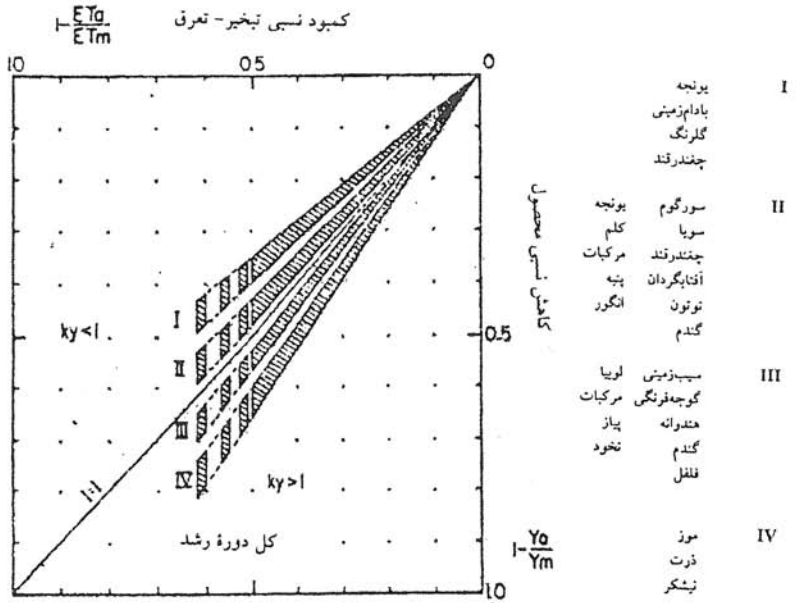
Y_{act} و Y_{pot} : به ترتیب مقدار محصول واقعی و پتانسیل.

ET_{act} و ET_{pot} : به ترتیب مقدار تبخیر ـ تعرق واقعی و پتانسیل.

Ky : ضریب تولید محصول می‌باشد.

مقدار ضریب تولید محصول، Ky بستگی دارد به نوع گیاه و مقاومت آن به خشکی. معمولاً ارقام کوچکتر از ۱ دال بر مقاومت بیشتر گیاه به خشکی و ارقام بزرگتر از ۱ دال بر مقاومت کمتر گیاه به خشکی است. در شکل (۷ـ۳) روابط عمومی کاهش نسبی محصول با کاهش نسبی تبخیر ـ تعرق برای گیاهان مختلف نشان داده شده است.

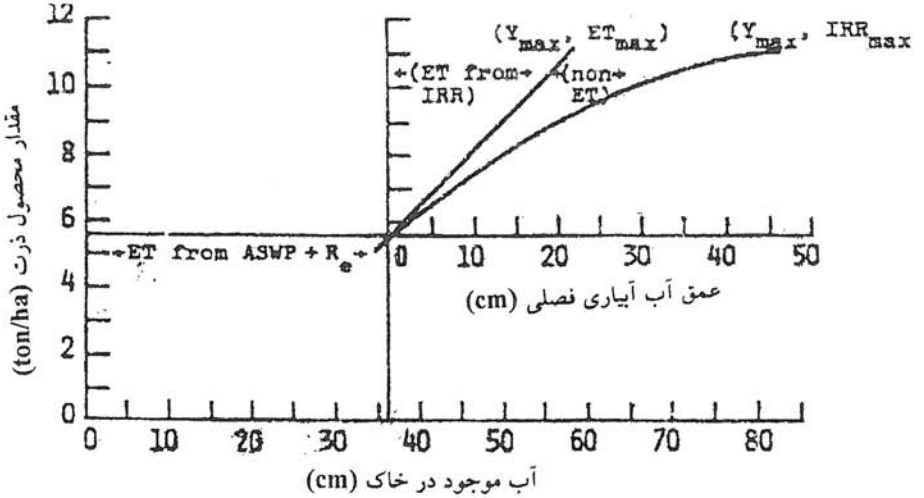
همچنین مقدار Ky بسته به مراحل مختلف گیاه تغییر می‌کند، در مراحل مقاوم به خشکی مقدار آن کوچکتر و در مراحل حساس بزرگتر است. استفاده ازاین ضرایب نیاز آب آبیاری خالص برای تولید مقادیر نسبی محصول برای گیاهان عمده زراعی کشور درکتاب برآورد آب موردنیاز گیاهان عمده زراعی وباغی کشور تعیین وارائه گردیده است.



شکل ۷ـ۳ـ گروه‌بندی گیاهان براساس نسبت کاهش محصول در رابطه با نسبت کاهش تبخیر ـ تعرق

۲ـ۵ـ۳ـ رابطه مقدار کل محصول (Y) با آب آبیاری (Irr.) و کل آب مورد استفاده گیاه در مزرعه (FWS)

در کشت آبی کل آب مورد استفاده گیاه در مزرعه در صورتیکه شرایط امکان استفاده ریشه گیاه از آب سفره زیرزمینی موجود نباشد، از مجموع آب قابل استفاده در خاک قبل از کشت (ASWP)، بارندگی مؤثر (Re) و کل آب آبیاری (Irr.) بدست می‌آید. هاگان [۱] و استیوارت [۲] رابطه میزان محصول با تبخیر ـ تعرق فصلی (ET) و کل آب آبیاری را بصورت شکل (۸ـ۳) ارائه نموده‌اند.



شکل ۸ـ۳ـ رابطه تولید محصول با مقادیر مختلف آب آبیاری و کل آب استفاده شده توسط گیاه در مزرعه

همانطوریکه در شکل (۸ـ۳) مشاهده می‌شود، در شرایط دیم آب گیاه فقط از آب قابل استفاده خاک قبل از کشت و بارندگی مؤثر تأمین می‌شود. در سطح بالای نقطه دیم رابطه ET حاصل از آب آبیاری با عملکرد و رابطه کل آب آبیاری (جزء ET و غیر non-ET، که آب هدر رفته است) با عملکرد، از نقطه O به ترتیب تا نقطه حداکثر عملکرد Y_{max}-

1- Hagan 2- Stewart

حداکثر تبخیر ـ تعرق ET_{max} و حداکثر عملکرد Y_{max} - حداکثر عمق آبیاری Irr_{max} نشان داده شده است.

چنانچه از شکل (۸ـ۳) استنباط می‌گردد، با افزایش مقدار آب آبیاری جهت نیل به کسب حداکثر محصول جزء غیر ET آب آبیاری (nonET) افزایش پیدا نموده و باعث انحراف بیشتر رابطه Y-Irr از رابطه Y-ET می‌گردد. با مدیریت خوب آبیاری می‌توان از هدر رفت آب به صورت آبدوی سطحی یا نفوذ عمقی و یا باقی ماندن آب قابل استفاده درموقع برداشت محصول، کاسته ومنحنی Y-Irr را به خط Y-ET نزدیک نمود. مدیریت خوب در جهت کاهش تبخیر از سطح خاک بخصوص در مواقع اولیه رشد گیاهان یکساله نیز باعث افزایش شیب رابطه Y-ET و همچنین نزدیکی آن به محور Yها خواهد شد.

۶ـ۳ـ برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط بهینه (بدون تنش) بمنظور کسب حداکثر محصول از واحد سطح

در این قسمت برنامه آبیاری یعنی عمق و دور آبیاری در شرایط بدون تنش خشکی و برای تولید حداکثر محصول با استفاده از مطالبی که قبلاً بیان گردیده ارائه خواهد شد.

۱ـ۶ـ۳ـ عمق خالص آب آبیاری (d_n)

در رابطه (۱۰ـ۳) اگر بجای عمق خاک عمق موثر ریشه قرار داده شود و بجای درصد حجمی رطوبت درصد افزایش حجمی رطوبت توسط آبیاری منظور گردد، رابطه عمق خالص آب آبیاری بصورت زیر قابل ارائه خواهد بود.

$$dn=\frac{(\theta_{v2} - \theta_{v1})\times D}{۱۰۰} \qquad [۳ـ۱۲]$$

که در آن:

θ_{v2}: در صد حجمی رطوبت پس از آبیاری،

θ_{v1}: درصد حجمی رطوبت قبل از آبیاری،

D: عمق ریشه، (میلیمتر).
dn: عمق خالص آب آبیاری، (میلیمتر).

اگر در این رابطه بجای درصد حجمی رطوبت با استفاده از رابطه [۳-۹] درصد وزنی قرار داده شود رابطه بصورت زیر خواهد بود:

$$dn=\frac{(\theta_{m2} - \theta_{m1}) \times \rho_b \times D}{۱۰۰} \qquad [۳-۱۳]$$

که در آن:
θ_{m2} : درصد وزنی رطوبت پس از آبیاری.
θ_{m1} : درصد وزنی رطوبت قبل از آبیاری.
D : عمق مؤثر ریشه گیاه موردنظر (میلیمتر).

در شرایط آبیاری بهینه و بدون تنش، رطوبت خاک در عمق ریشه پس از آبیاری به ظرفیت زراعی می‌رسد ($\theta_{m2} = \theta_{mfc}$). همچنین آبیاری موقعی انجام می‌گیرد که کاهش رطوبت خاک برابر مقدار آب سهل‌الوصول باشد، بعبارت دیگر رطوبت خاک در موقع آبیاری از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\theta_{m1}= \theta_{mpwp} + (\theta_{mfc} - \theta_{mpwp}) (1 - P) \qquad [۳-۱۴]$$

که در آن:
θ_{mpwp} : درصد وزنی رطوبت در نقطه پژمردگی دائم.
θ_{mfc} : درصد وزنی رطوبت در نقطه ظرفیت زراعی.
p : نسبت آب سهل‌الوصول یا نسبت تخلیه مجاز.

با ادغام رابطه [۳-۱۳] با رابطه [۳-۱۴] و با منظور نمودن ($\theta_{m2} = \theta_{mfc}$) رابطه عمق

خالص آب آبیاری بصورت زیر در می‌آید:

$$dn = \frac{(\theta_{mfc} - \theta_{mpwp}) \times \rho_b \times P \times D}{۱۰۰} \qquad [۳-۱۵]$$

مقادیر P و D از جدول (۲-۳) برای گیاهان مختلف قابل استخراج می‌باشد.

۲-۶-۳- لایه‌های محدودکننده رشد ریشه گیاهان

لازم به ذکر است زمانی که با لایه‌های محدودکننده رشد در خاک روبرو می‌شویم باید بجای استفاده از عمق ریشه گیاه در روابط [۱۲-۳] تا [۱۵-۳]، از عمق لایه محدودکننده خاک استفاده نمود. بعضی از لایه‌های محدودکننده خاک عبارتند از:

الف - لایه شخم

انجام عملیات شخم بطور متوالی بمرور زمان سبب می‌گردد تا یک لایه متراکم و غیرقابل نفوذ در زیر لایه شخم (در عمق ۳۰ سانتیمتری) تشکیل گردد. اگر شدت تراکم در این لایه بحدی باشد که ریشه نتواند در آن نفوذ نماید در این حالت باید عمق لایه محدودکننده را بجای عمق ریشه‌ها در نظر گرفت. البته در این حالت بهتر است با انجام عملیات شخم عمیق (زیرشکن) نسبت به رفع مشکل اقدام نمود.

ب - لایه‌های غیر قابل نفوذ

در بعضی از خاکها یک لایه غیرقابل نفوذ حاوی سنگریزه، یا قلوه سنگ وجود دارد که از نفوذ طبیعی ریشه به اعماق خاک جلوگیری می‌نماید. در این حالت نیز بجای استفاده از عمق ریشه گیاه باید عمق لایه محدودکننده را در روابط [۱۲-۳] تا [۱۵-۳] استفاده نمود، مگر آنکه عمق لایه محدودکننده بیش از عمق طبیعی ریشه باشد.

پ - لایه‌های محدودکننده شیمیایی

بعضی از لایه‌ها حاوی مقادیر زیادی از مواد شیمیایی مختلف همچون گچ و آهک

می‌باشند که این مواد رشد ریشه گیاه را محدود می‌نماید. در این حالت نیز اگر عمق این لایه کمتر از عمق طبیعی گیاه باشد در رابطه [۱۵-۳] عمق این لایه بجای عمق ریشه گیاه قرار داده می‌شود.

۳-۶-۳- عمق ناخالص آب آبیاری (dg)

عمق ناخالص آب آبیاری برابر است با عمق خالص آب آبیاری که از رابطه [۱۵-۳] بدست می‌آید تقسیم بر راندمان کاربرد آبیاری:

$$dg = \frac{dn}{E_a} \times ۱۰۰ \qquad [۱۶-۳]$$

که در آن:

dg: عمق ناخالص آب آبیاری، (سانتیمتر یا میلیمتر).

E_a: راندمان کاربرد آبیاری، (درصد).

(راندمان کاربرد آبیاری نسبت میزان آبی است که در منطقه توسعه ریشه‌ها ذخیره گردیده به مقدار آبی که وارد قطعه آبیاری شده است).

۴-۶-۳- دور آبیاری (F)

دور یا فاصله آبیاری مدت زمان بین شروع دو آبیاری متوالی بوده که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$F = \frac{dn}{ET_p} \qquad [۱۷-۳]$$

که در آن:

ET_p: تبخیر ـ تعرق پتانسیل، (میلیمتر بر روز) (مقدار تبخیر ـ تعرق پتانسیل از فصل اول کتاب قابل استخراج می‌باشد).

F: دور آبیاری (روز).

۳ـ۷ـ برنامه‌ریزی آبیاری در شرایط کم آبیاری

کم آبیاری به منظور صرفه‌جوئی در مصرف آب و افزایش سود خالص انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه شیب تابع محصول ـ آب، با افزایش آب مصرفی کاهش پیدا می‌کند[1]. بنابراین افزایش مقدار آب آبیاری تا حدودی مقرون به صرفه خواهد بود. بعبارت دیگر تأمین کامل آب مورد نیاز گیاه برای کسب حداکثر تولید از واحد سطح (روش ارائه شده در بند ۶ـ۳) که در آن منحنی موازی با محور Xها می‌گردد، حداکثر سود را عاید نمی‌نماید. بنابراین بایستی توجه داشت که برای کسب حداکثر سود معمولاً آبیاری باید کمتر از نیاز آبی گیاه یا بصورت کم آبیاری صورت گیرد. اگر توجه کنیم که در کم آبیاری از جیره آبی گیاه کم می‌گردد و به تبع آن میزان تولید از حد پتانسیل کاهش پیدا می‌کند به این نتیجه می‌رسیم که در شرایط کم آبی بایستی ابتدا سعی شود تا حد امکان از هدر رفت آب در مرحله انتقال و انجام عملیات آبیاری جلوگیری شود بعبارت دیگر راندمان آبیاری افزایش داده شود و پس از آن اقدام به کم آبیاری گردد. با افزایش راندمان آبیاری شیب تابع محصول ـ آب، افزایش خواهد یافت که نتیجه آن هم کسب محصول بیشتر و هم سود بیشتر خواهد بود. انجام کم آبیاری به دو صورت امکان‌پذیر است:

۱ـ کاهش عمق آبیاری

۲ـ کاهش تعداد آبیاری یا افزایش دور آبیاری

در حالت اول عمق آب آبیاری کمتر از مقداری که از رابطه [۱۵ـ۳] بدست می‌آید، داده می‌شود. در اینصورت عمق ریشه کم شده و مشکلات کاهش سطح تماس ریشه با خاک ظاهر می‌گردد. در روش دوم کم آبیاری با افزایش دور آبیاری از مقداری که از رابطه [۱۷ـ۳] بدست می‌آید حاصل می‌گردد. این روش مزایایی نسبت به روش اوّل دارد، که عبارتند از:

- رشد عمیق‌تر ریشه و نتیجتاً سطح تماس بیشتر آن با خاک
- کاهش دفعات آبیاری و در نتیجه صرفه‌جوئی در هزینه‌های کارگری
- کاهش هدر رفت آب بصورت تبخیر سطحی

1- Diminishing Retwm Function

برای اعمال کم آبیاری نیاز به تعیین رابطه محصول ـ آب است (شکل ۸ـ۳). برای رسم این منحنی می‌توان ابتداء از نتیجه آزمایشات مزرعه‌ای که در آن مقدار تولید محصول در رابطه با مقادیر مختلف آب آبیاری تعیین شده است استفاده نمود. سپس از مدل‌های کامپیوتری موجود (بعنوان نمونه نرم‌افزار سوپرفیت[۱]) بهترین منحنی را برای این نقاط تطبیق داد. تعداد نقاط تعین شده هر قدر بیشتر باشد دقت کار بیشتر می‌گردد. در صورتیکه نقاط تعیین شده در آزمایشات کم باشد می‌توان با استفاده از مدل‌هایی که رشد گیاه را در رابطه با مقدار آب آبیاری همانندسازی می‌کنند نقاط بیشتری را پیدا نموده و دقت کار را افزایش داد. برای انجام این آنالیز ترسیمی علاوه بر منحنی محصول ـ آب، مقدار بارندگی در طول کشت و همچنین میزان آب قابل استفاده قبل از شروع کشت و پس از برداشت محصول نیز مورد نیاز است. در شکل (۹ـ۳) نمونه‌ای از این آنالیز ساده گرافیکی برای زراعت ذرت جهت توصیه مقدار آب آبیاری در شرایط کم آبیاری به منظور نیل به اهداف مشروحه در زیر نشان داده شده است.

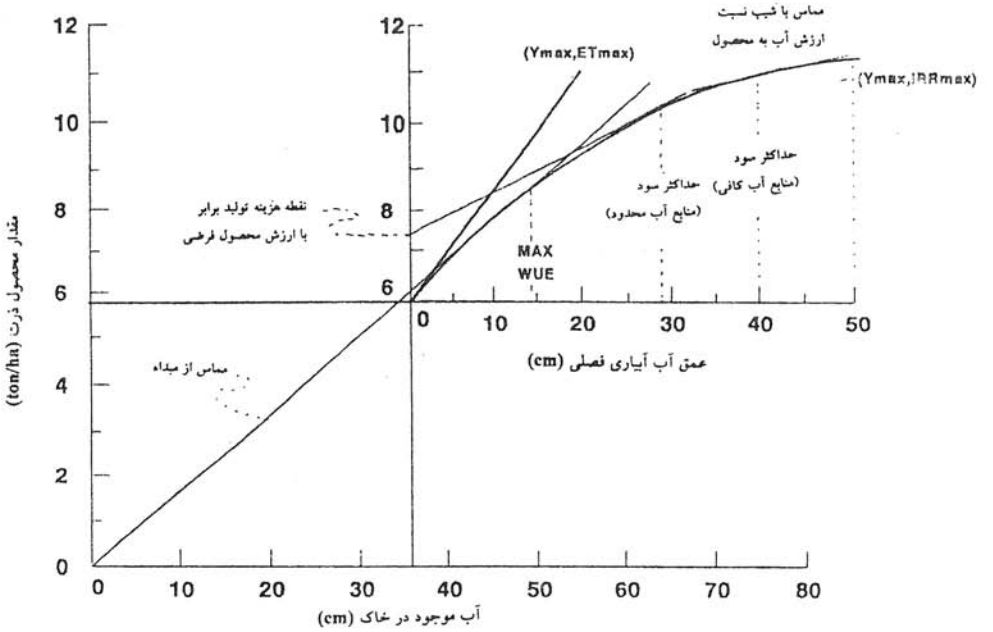
۱ـ۷ـ۳ـ توصیه مقدار آب آبیاری جهت کسب حداکثر کارآیی مصرف آب (WUE)[۲]

در این حالت بدون توجه به مسائل اقتصادی حداکثر محصول از واحد آب مصرف شده حاصل می‌گردد. هر چند که افزایش مقدار آب آبیاری از این حد ممکن است از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد، ولی در کل از مقدار کارآیی مصرف آب می‌کاهد. به طور کلی این مقدار آب توصیه شده حداقل آبی است که جهت کسب حداکثر (WUE) بایستی به مزرعه داده شود، حتی اگر کمبود منابع آب باعث کاهش سطح زیر کشت گردد. برای تعیین عمق آب آبیاری در این حالت کافی است که از مبداء مختصات O خطی را به منحنی Y-Irr مماس نماییم. محل تماس نشان‌دهنده حداکثر توصیه آب آبیاری در شرایط حداکثر کارآیی آب می‌باشد. در بررسی موردنظر (شکل ۹ـ۳) عمق کل آب مصرفی برای کسب حداکثر کارآیی حدود ۴۵ سانتیمتر بوده که ۱۴ سانتیمتر آن را آب آبیاری و بقیه (۳۱ سانتیمتر) را آب حاصل از بارندگی و آب موجود در خاک تشکیل

1- Super Fit

2- Water use Efficiency

می‌دهند. در این مقدار آب آبیاری مصرفی، میزان تولید ذرت حدود ۸ تن در هکتار می‌گردد که کارآیی آب مصرفی به حداکثر مقدار خود یعنی ۵/۷ کیلوگرم به ازاء هر مترمکعب آب مصرفی می‌رسد.



شکل ۹ـ۳ـ آنالیز گرافیکی توصیه عمق آب آبیاری در شرایط مختلف برای زراعت ذرت

۲ـ۷ـ۳ـ توصیه مقدار آب در کم آبیاری جهت کسب حداکثر سود در شرایط کافی بودن منابع آب آبیاری

افزایش عمق آب آبیاری از حد Max WUE هر چند که باعث کاهش WUE می‌گردد، ولی ممکن است از نظر اقتصادی قابل‌قبول بوده و باعث افزایش سود خالص شود. با توجه به اینکه تابع محصول آب آبیاری به فرمی است که با افزایش عمق آب آبیاری شدت افزایش محصول کاهش پیدا می‌کند [1] بنابراین این افزایش را تا حدی می‌توان ادامه داد که هزینه آبیاری هر واحد افزایش آب آبیاری برابر با ارزش هر واحد

1- Diminishing return function

محصول افزوده شده باشد. به عبارت ریاضی در این نقطه تساوی زیر برقرار می‌شود:

$$\frac{D(Y)}{D(Irr)} = \frac{P(Irr)}{P(Y)} \qquad [۳-۱۸]$$

که در آن:

P(Irr): قیمت ارزش واحد آب اضافه داده شده.

P(Y): قیمت ارزش واحد محصول اضافه شده.

D(Y): افزایش محصول.

D(Irr): افزایش عمق آب آبیاری.

در رابطه [۳-۱۸]، P(Irr)/P(Y) را شیب نسبت قیمت [1] می‌نامند. با تماس شیب قیمت با منحنی محصول ـ آب، مقدار آب آبیاری جهت کسب حداکثر سود در شرایط کافی بودن منابع آب به دست می‌آید. در مماس کردن خط با شیب تابع تولید باید به مقیاس‌ها توجه شود که با هم مطابقت داشته باشند. در شکل (۳-۹) با فرض اینکه قیمت واحد آب (سانتیمتر ارتفاع آب در هکتار یا ۱۰۰مترمکعب) ۳ دلار و قیمت هر تن محصول ذرت ۵۴ دلار می‌باشد. شیب نسبت قیمت ۰/۰۵۷=۵۴÷۳ یا با زاویه ′۲۵ و °۳ خواهد بود که در مقدار آب آبیاری ۴۰ سانتیمتر به منحنی مماس می‌گردد. مقدار محصول در این عمق آب آبیاری ۱۱/۲ تن می‌باشد. بعبارت دیگر اگر ظرفیت منابع آب آبیاری به اندازه‌ای باشد که بتوان آبیاری تمام سطح مزرعه را با ۴۰ سانتیمتر ارتفاع آب انجام داد بایستی برای کسب حداکثر سود از مزرعه با این مقدار آب آبیاری نمود و به عملکرد ۱۱/۲ تن در هکتار اکتفا کرد. در صورت موجود بودن آب بیشتر از این مقدار هر چند که با افزایش عمق آبیاری عملکرد افزایش می‌یابد ولی از نظر اقتصادی این افزایش مقرون به صرفه نخواهد بود. هر مقدار ارزش آب کمتر و یا ارزش محصول بدست آمده بیشتر باشد نسبت شیب قیمت کمتر شده و نقطه تماس بطرف انتهای منحنی یا آب بیشتر و محصول بیشتر تغییر می‌کند و برعکس، هر چه ارزش آب بیشتر و ارزش محصول کمتر باشد شیب تندتر شده و نقطه به

1- Price Ratio

طرف ابتدای منحنی یعنی آب کمتر و محصول کمتر منتقل می‌شود.

۳ـ۷ـ۳ـ توصیه مقدار آب در کم آبیاری جهت کسب حداکثر سود در شرایط محدود بودن منابع آب

در اینجا مقدار کل آب آبیاری به حدی نیست که بتوان تمام سطح مزرعه را مطابق مقدار تعیین شده در بند (۲ـ۷ـ۳) برای کسب حداکثر سود در واحد سطح، یعنی ۴۰ سانتیمتر ارتفاع آب، آبیاری نمود. در این حالت، برای کسب حداکثر سود از کل مزرعه بایستی مقدار آب آبیاری از ۴۰ سانتیمتر کاهش داده شود، تا کل زمین آبیاری گردد. برای این کاهش حد مجازی وجود دارد که مقدار آن در اینجا تعیین خواهد شد. ولی اگر پس از این کاهش نیز ظرفیت منابع آب آبیاری موجود تکافوی آبیاری کل زمین را ننماید، در این شرایط بایستی سطح مورد آبیاری بقدری کاهش داده شود تا با این مقدار آب قابل آبیاری گردد. برای تعیین مقدار آب آبیاری در این شرایط نیز می‌توان از منحنی محصول ـ آب (شکل ۹ـ۳) استفاده نمود. بدین منظور در محور عمودی تابع محصول ـ آب آبیاری، میزان تولیدی را که در آن فقط هزینه‌ها تأمین می‌گردد [1] مشخص نمود. (در شکل (۹ـ۳) حدود ۷ تن در هکتار می‌باشد) و سپس از این نقطه خطی به تابع محصول ـ آب، مماس کرد. نقطه تماس نشان‌دهنده حداقل مقدار آب آبیاری جهت کسب حداکثر سود در شرایط محدود بودن منابع آب آبیاری است. مقدار آن در شکل (۹ـ۳)، ۲۸ سانتیمتر ارتفاع آب و عملکرد محصول ۱۰تن در هکتار می‌باشد و اگر حجم منابع آب به حدی نباشد که بتوان کلاً زمین را با این مقدار آب آبیاری نمود بایستی سطح کشت کاهش داده شود. لازم به توضیح است در این حالت فرض بر این بوده که تولید محصول بدون آبیاری (زراعت دیم) که در آن تولید به سطح ۵/۶ تن کاهش می‌یابد اقتصادی نمی‌باشد. در غیر اینصورت اگر تولید دیم سودآور باشد، بعبارت دیگر نقطه (Break return point) در شکل (۹ـ۳) کمتر از ۵/۶ تن گردد، برای تعیین مقدار آب آبیاری در شرایط محدود بودن آب بایستی مقدار آب موجود به کل زمین به نسبت مساوی تخصیص داده شود.

1- Break return point

چنانچه از مثال فوق استنباط می‌گردد در شرایط کم آبیاری مقدار آب آبیاری علاوه بر خصوصیات گیاه و اقلیم که در تعیین مقدار آب در آبیاری کامل مؤثر هستند عواملی چون؛ مقدار آب موجود، سطح کشت در اختیار و پارامترهای اقتصادی از قبیل ارزش آب، ارزش محصول، هزینه‌های آبیاری، هزینه‌های آماده‌سازی زمین و کشت کار نیز مؤثر می‌باشد. ضمن اینکه مقدار آب آبیاری برای کسب حداکثر کارآئی مصرف آب (WUE) با مقدار آب آبیاری برای کسب حداکثر سود کاملاً با هم متفاوت می‌باشد. در این مثال چنانچه فرض کنیم وسعت زمین در اختیار ۱۰۰هکتار باشد. مقدار آب آبیاری در حالت‌های مختلف کم آبیاری طبق جدول (۳ـ۳) خواهد بود. با توجه به ارقام مندرج در این جدول چنانچه هدف مدیر آبیاری کسب حداکثر کارآئی مصرف آب باشد. میزان کل آب آبیاری مصرفی ۱۴۰ هزار مترمکعب (۱۴۰۰ مترمکعب در هکتار) و کل تولید ۸۰۰ تن و سود حاصله ۳۶۰۰ دلار خواهد بود. کارآئی مصرف آب در این حالت به حداکثر مقدار خود یعنی ۵/۷ کیلوگرم برای مصرف هر متر مکعب آب می‌رسد. در حالیکه اگر برای آبیاری این زمین ۴۰۰ هزار مترمکعب آب مصرف گردد (۴۰۰۰ مترمکعب در هکتار) کل تولید به ۱۱۲۰ تن افزایش یافته و سود حاصله به حداکثر مقدار خود یعنی ۱۳۰۸۰ دلار خواهد رسید، علی‌رغم اینکه کارآئی مصرف آب به ۲/۷۵ کیلوگرم بر مترمکعب کاهش پیدا خواهد نمود. مصرف آب بیش از ۴۰۰ هزار مترمکعب هر چند که میزان تولید محصول را ۲۰ تن افزایش می‌دهد ولی سود حاصله به ۱۱۱۶۰ دلار کاهش پیدا می‌کند. حال اگر مقدار آب آبیاری موجود کمتر از ۴۰۰ هزار مترمکعب باشد برای کسب حداکثر سود تا حد ۲۸۰ هزار متر مکعب کل مساحت ۱۰۰ هکتار بایستی به همان نسبت با آب کمتری آبیاری گردد. بعنوان مثال اگر مقدار آب موجود ۳۰۰ هزار مترمکعب باشد آبیاری با ۳۰۰۰ متر مکعب در هکتار انجام می‌گیرد که در اینصورت سود بدست آمده ۱۲۳۰۰ دلار می‌گردد. ولی اگر مقدار آب موجود کمتر از ۲۸۰ هزار مترمکعب باشد حداکثر سود با کاهش سطح کشت تا حدی که بتوان آن را با مقدار ۲۸۰۰ مترمکعب در هکتار آبیاری نمود حاصل می‌گردد.

بعنوان مثال اگر ۲۰۰ هزار مترمکعب آب در اختیار باشد آبیاری ۱۰۰ هکتار (با ۲۰۰۰ مترمکعب در هکتار) فقط ۴۵۰۰ دلار سود عاید می‌کند در صورتیکه آبیاری ۷۱/۵ هکتار (با ۲۸۰۰ مترمکعب در هکتار) مقدار سود به ۷۳۰۰ دلار افزایش می‌یابد.

جدول ۳-۳- انواع مختلف کم آبیاری برای سطح محدود شده در ۱۰۰ هکتار
(۳۵۴ دلار سایر هزینه‌های تولید در هکتار، ۳ دلار ارزش هر ۱۰۰ مترمکعب آب آبیاری و ۵۴ دلار ارزش هر تن محصول)

هدف مدیر آبیاری	مساحت تحت کشت (هکتار)	آب آبیاری مصرفی در هکتار(مترمکعب)	کل آب مصرفی آبیاری (متر مکعب)	تولید در هکتار (تن)	کل تولید (تن)	کارآئی مصرف آب وآبیاری (کیلوگرم بر مترمکعب) WUE	هزینه آب وآبیاری (دلار)	سایر هزینه‌های تولید (دلار)	درآمد ناخالص (دلار)	سود (دلار)
۱-کسب حداکثر کارآئی مصرف آب از هر واحد آب مصرفی WUE	۱۰۰	۱۴۰۰	۱۴۰۰۰۰	۸	۸۰۰	۵۷	۴۲۰۰	۳۵۴۰۰	۴۳۲۰۰	۳۶۰۰
۲-کسب حداکثر سود:										
۲-۱- در شرایطی که آب کافی جهت آبیاری کل زمین با مقدار آب توصیه شده موجود باشد	۱۰۰	۴۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۱۱۲	۱۱۲۰	۲/۸	۱۲۰۰۰	۳۵۴۰۰	۶۰۴۸۰	۱۳۰۸۰
	۱۰۰	۵۰۰۰	۵۰۰۰۰۰	۱۱۴	۱۱۴۰	۲۲۸	۱۵۰۰۰	۳۵۴۰۰	۶۱۵۶۰	۱۱۱۶۰
	۱۰۰	۳۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۱۰۵	۱۰۵۰	۳۵	۹۰۰۰	۳۵۴۰۰	۵۶۷۰۰	۱۲۳۰۰
۲-۲- در شرایطی که آب کافی جهت آبیاری کل زمین با مقدار توصیه شده موجود نباشد	۱۰۰	۲۸۰۰	۲۸۰۰۰۰	۱۰	۱۰۰۰	۳۷۵	۸۴۰۰	۳۵۴۰۰	۵۴۰۰۰	۱۰۲۰۰
	۱۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰۰۰	۸/۵	۸۵۰	۴۲۵	۶۰۰۰	۳۵۴۰۰	۴۵۹۰۰	۴۵۰۰
	۷۱۵	۲۸۰۰	۲۰۰۰۰۰	۱۰	۷۱۵	۳/۵۷	۶۰۰۰	۲۵۳۱۱	۳۸۴۰۰	۷۲۹۹

منابع فصل سوم:

۱ـ بای‌بوردی، محمد، ۱۳۷۲، فیزیک خاک، انتشارات دانشگاه تهران، ۶۷۱ صفحه.
۲ـ بای‌بوردی، محمد، ۱۳۷۲، اصول مهندسی آبیاری، انتشارات دانشگاه تهران، جلد اول
۳ـ فرشی، علی‌اصغر، محمدرضا شریعتی، رقیه جارالهی، محمدرضا قائمی، مهدی شهابی‌فر، میرمسعود مولائی، ۱۳۷۶، برآورد آب مورد نیاز گیاهان عمده زراعی و باغی کشور، موسسه تحقیقات خاک و آب، نشر کشاورزی کرج جلد ۱ و ۲.
4- Farahi, A.A., J. Eeyen, C. Belmass and k.De wyngaent, 1987, Modelling of yield of winter wheat as a function of soil moisture availability. An International, your, Agricultural water management Nether lands, 12 (323-339)
5- Smith, M. 1993. Cropwat, A computer program for Irrigation planning and Management. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 46 Rome. Italy.
6- Jonsen, M. E. 1984. Design and operation of form Irrigation Systems. ASAE-Monograph No.3 Michigan USA.

فصل چهارم

کارآیی مصرف آب در تولید محصولات کشاورزی

تهیه کنندگان:

دکتر حمید سیادت

مهندس صمد دربندی

۱ـ۴ـ مقدمه

در فصل‌های پیشین در مورد آب مورد نیاز گیاهان و راندمان‌های آبیاری بحث شده است. در این فصل موضوع کارآیی مصرف آب از دیدگاه تولید محصول مورد بررسی قرار می‌گیرد. به راستی، گیاهان به عنوان موجود زنده حیاتشان با جذب آب آغاز می‌شود و چگونگی فعالیت‌های حیاتی آنها تا تکمیل فرایند رشد و رسیدن به زمان برداشت، بستگی مستقیم با مقدار آبی دارد که برای پاسخگویی به انرژی تبخیری محیط در دسترس گیاه قرار می‌گیرد. همانگونه که قبلاً توضیح داده شده، انرژی وارده از منبع خورشید و آنچه که از قبل در محیط رشد موجود می‌باشد، مجموعاً به تبخیر ـ تعرق آب از سطح مزرعه تحت کشت گیاه منجر می‌گردد. فرایند «تبخیر ـ تعرق» عمدتاً با خروج آب و بخار از روزنه‌های گیاه در سطح برگ‌ها و در سطح خاک مرطوب صورت می‌گیرد. براین اساس، در شرایطی که آب کافی در اختیار گیاه باشد، به تناسب انرژی تبخیری موجود در محیط، سلول‌های اندام‌های گیاهی به تدریج آب را از دست می‌دهند. چنانچه آب از دست رفته جبران نشود، فعالیت‌های حیاتی گیاه به تدریج متوقف خواهد شد و گیاه به عنوان کارخانه سازنده مواد، از کار باز خواهد ماند.

در شرایطی که آب تنها عامل محدودکننده رشد باشد می‌توان گفت که از دیدگاه فرایندهای فیزیولوژیکی، بین مقدار ماده تولیدی گیاه و مقدار آبی که در ریشه گاه قابلیت جذب دارد رابطه‌ای مستقیم و خطی بر قرار می‌باشد. اما در شرایط غیر آرمانی و در حضور محدودیت‌ها یا تنش‌های محیطی گوناگون مانند کمبود عناصر غذایی، زیادی غلظت نمک‌ها در محلول خاک، یا شرایط محدودکننده دیگر، رابطه مزبور تحت تأثیر قرار گرفته و تغییراتی در آن پدید می‌آید که عمدتاً در جهت دگرگون کردن مقادیر مطلق رابطه آب ـ تولید نمایان می‌شود ولی شکل رابطه تغییر عمده‌ای نمی‌کند. به سخن دیگر، در اکثر موارد می‌توان وجود رابطه‌ای خطی بین آب و تولید را پذیرفت. در همین راستا، معادلات تابع "آب ـ تولید" برای محصولات مختلف که در نشریه شماره ۳۳ از سری انتشارات "مقالات آبیاری و زهکشی" سازمان خوار و بار جهانی *(FAO)* مندرج است به صورت خطی ارایه شده‌اند، گواینکه آن معادلات روابط بین کمبود آب و کاهش تولید ماده خشک را به صورت نسبی (درصدی) و نه براساس مقادیر مطلق ارایه می‌دهند.

گفتنی است که مقدار ماده تولیدی یک گیاه (ماده خشک) شامل کل مواد موجود در اندام‌های مختلف گیاه است و به آن بخش از گیاه که برداشت شده و به بازار مصرف عرضه می‌گردد محدود نمی‌شود. اهمیت توجه به این نکته در آن است که رابطه مقدار آب در دسترس گیاه و مقدار محصول برداشت شده (که جزیی از کل مواد ساخته شده گیاه است) می‌تواند تفاوت‌ها و انحراف‌هایی را از رابطه خطی بین کل ماده خشک و آب نشان دهد. در واقع، تقسیم‌بندی مواد ساخته شده در گیاه و اختصاص آنها به اندام‌های مختلف، فرایندی است که تحت تأثیر عوامل ژنتیکی و مدیریت زراعی تغییر می‌نماید. به سخن دیگر، مقدار محصول قابل عرضه به بازار که فقط بخشی از کل تولید ماده خشک در طول فصل رشد گیاه است. ممکن است در برابر اثر عوامل مدیریت زراعی تغییراتی متفاوت از تغییرات کل ماده خشک داشته باشد و در نتیجه رابطه بین مقدار آب و مقدار محصول قابل عرضه به بازار ممکن است روندی غیر خطی را نشان دهد. با این همه، تولید کل ماده خشک گیاه و مقدار محصول قابل عرضه به بازار معمولاً ارتباط تنگاتنگی با یکدیگر دارند و رابطه هر یک از آنها با مقدار آب برای دیگری نیز به مقدار زیاد صادق است.

در مبحث کارآیی مصرف آب در تولید محصولات کشاورزی، هدف اصلی روشن کردن چگونگی ارتباط بین مقدار آب مصرفی گیاه و مقدار تولید است. این مبحث از آن سبب اهمیت دارد که در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان (که شامل کشور ما نیز می‌شود) اساسی‌ترین عامل محدودکننده تولید مقدار آب موجود برای آبیاری است در حالی که در این مناطق گستره‌های وسیعی از اراضی برای کشت و کار استعداد تولیدی دارند و خاک عامل محدودکننده به حساب نمی‌آید. در چنین شرایطی، به دست آوردن مقدار بهینه تولید محصولات کشاورزی در ازاء مصرف حجم معینی آب هدفی مطلوب محسوب می‌شود و در مواردی برای دستیابی به حداکثر تولید در سطحی گسترده بهترین ضابطه انتخاب سیاست کشت قلمداد می‌گردد.

در فصل حاضر، علاوه بر ارایه نکاتی در مورد مفهوم کارآیی مصرف آب در تولید، نتایج بررسی‌هایی در مورد این کارآیی که برای چند محصول براساس آمار رسمی تولید محصولات کشاورزی در چند استان کشور انجام شده ارایه می‌گردد. علاوه بر آن،

چگونگی استفاده از این مفهوم و اعداد به دست آمده از بررسی‌های مزبور نیز مورد بحث قرار خواهند گرفت.

۲-۴-مفهوم کارآیی مصرف آب در تولید

اساس این مفهوم، رابطه بین آب مصرفی گیاه و تولید (کل ماده خشک) می‌باشد. به سخن دیگر، کارآیی مصرف آب در تولید بیانگر وزن ماده خشک تولید شده در ازاء مقدار آب مصرفی (تبخیر ـ تعرق) گیاه است اگرچه این تعریف مبنای بحث‌ها و معادلات این فصل خواهد بود، اما به خوبی می‌توان در این تعریف به جای تبخیر ـ تعرق گیاه، مقدار آب مصرفی در مزرعه را (با ملحوظ داشتن راندمان کاربرد آب در آبیاری) جانشین کرد و مقدار تولید محصول را به ازاء واحد حجم آب مصرفی در آبیاری به دست آورد. بدیهی است که هرچند مقدار راندمان کاربرد آب در مزرعه کاهش یابد به همان نسبت کارآیی مصرف آب آبیاری در تولید محصولات کم خواهد شد. توجه به این نکته ضروری است که در بعضی گزارش‌ها و مقاله‌ها، اعداد مربوط به کارآیی مصرف آب بدون ذکر مبنای مقایسه درج می‌شود و معلوم نمی‌شود که آیا تبخیر ـ تعرق گیاه یا حجم آب آبیاری با ملحوظ داشتن راندمان کاربرد آب در مزرعه مبنای اعداد گزارش شده می‌باشند. در این موارد گاه ممکن است اعدادی که مبنای محاسباتی آنها متفاوت بوده است مورد مقایسه قرار گیرند و نتیجه‌گیری را مخدوش و نادرست کنند.

براساس تعریف اولیه، کارآیی مصرف آب در تولید را می‌توان به صورت رابطه [۱-۴] نشان داد.

$$WUE = \frac{DM}{T+E} \qquad [۴-۱]$$

که در آن:

WUE (Water Use Efficiency) = کارائی مصرف آب در تولید

DM (dry matter) = ماده خشک (تولید شده)

T (Transpiration) = تعرق (گیاه)

E (Evaporation) = تبخیر (از سطح خاک)

واحدهای اندازه‌گیری عبارت‌های سمت راست رابطه معمولاً کیلوگرم و مترمکعب در هکتار می‌باشند. به سخن دیگر، ماده خشک بر حسب کیلوگرم در هکتار، و «تبخیر - تعرق» برحسب مترمکعب (آب) در هکتار بیان می‌شوند. براین اساس واحد اندازه‌گیری کارآیی مصرف آب برابر کیلوگرم به ازاء مترمکعب به دست می‌آید. در این باره نیز یادآوری می‌شود که در برخی گزارش‌ها، این واحد اندازه‌گیری برمبنای کیلوگرم در هکتار به ازاء میلی‌متر نیز ارایه می‌گردد که از نظر عددی، ده برابر واحد کیلوگرم به ازاء مترمکعب می‌باشد. به این ترتیب بسیار ضروری است که در بیان مقدار عددی کارآیی مصرف آب هم به مبنای محاسبه مقدار آب و هم به واحد اندازه‌گیری آن توجه داشت. این نیز گفتنی است که به حساب آوردن مقدار باران یا حذف آن در این محاسبات از مواردی است که می‌تواند تأثیر عمده‌ای در مقدار عددی *WUE* داشته باشد.

معادله دیگری که برای بیان مفهوم کارآیی مصرف آب در تولید به کار می‌رود برمبنای همان رابطه مستقیم خطی بین ماده خشک تولید شده گیاه و مقدار تعرق می‌باشد که قبلاً توضیح داده‌ایم. این معادله به صورت زیر است:

$$DM = C.T \qquad [۴-۲]$$

در این رابطه، DM و T قبلاً تعریف شده‌اند ولی ضریب C از معادله [۴-۲] به صورت زیر به دست می‌آید:

$$C = \frac{DM}{T} = \text{کارآیی تعرق} \qquad [۴-۳]$$

رابطه [۴-۳] در واقع یک مورد خاص از رابطه [۴-۱] می‌باشد که در آن تبخیر (E) از سطح خاک (مزرعه و از سطح شاخ و برگ و غیره) برابر صفر است. به همین ترتیب می‌توان گفت که در شرایطی که تبخیر از سطح خاک مزرعه و شاخ و برگ ناچیز است (مثلاً بعد از آنکه پوشش گیاهی به صد در صد می‌رسد)، راندمان تعرق برابر کارآیی مصرف آب می‌شود. یعنی:

$$C = WUE \qquad [۴-۴]$$

براین مبنا می‌توان، تغییرات زیر را در رابطه [۱-۴] ایجاد کرد و رابطه‌ای به دست آورد که هر دو عبارت C و WUE در حالت عام نیز در معادله باشند:

$$WUE = \frac{DM}{T+E} = \frac{C.T}{T+E} \qquad [۴-۵]$$

با ساده کردن رابطه [۵-۴] می‌توان رابطه [۶-۴] را به دست آورد:

$$WUE = \frac{C}{1+E/T} \qquad [۴-۶]$$

در معادله اخیر آشکار است که هر چقدر کارآیی تعرق افزایش یابد یا آنکه نسبت تبخیر (E) به تعرق (T) کاهش یابد، کارآیی مصرف آب در تولید زیادتر می‌شود. بر این اساس، مدیریت‌های زراعی و نوع گیاه کاشته شده، هر دو در تعیین مقدار این کارآیی موثرند و برای بهبود بهره‌وری از آب می‌بایست مورد توجه باشند.

گفتنی است که هر چند توضیحات و معادلات ارایه شده عمدتاً برای شرایط فاریاب به کار می‌روند، اما برای شرایط دیم نیز می‌توان از همین معادلات استفاده نمود و کارآیی آب باران را در تولید محصولات مختلف مشخص کرد.

۳-۴- راهکارهای افزایش کارآیی مصرف آب در تولید

به طورکلی، عوامل مؤثر در کارآیی مصرف آب در تولید را می‌توان در سه گروه دسته‌بندی کرد. نخست عوامل اقلیمی هستند که هم در مصرف آب (تبخیر - تعرق) و هم در تأمین آب (بارش‌های آسمانی) نقش اساسی دارند. نیز این عوامل در نحوه رشد گیاه و طول دوره رشد و تولید محصول تأثیر گذارند و بنابراین تولید ماده خشک گیاه هم زیر تأثیر آنهاست. شماری از این عوامل، مانند انرژی تابشی و حرارتی، از یک سو بر مصرف آب اثر می‌گذارند و از سوی دیگر در فرایند فتوسنتز و ساخت مواد به وسیله گیاه نقش دارند. برخی دیگر، مانند نم نسبی هوا و باد، عمدتاً مصرف آب و فرایند «تبخیر - تعرق» را تغییر می‌دهند و نقش مستقیمی در تولید محصول بازی نمی‌کنند. به هر تقدیر تأثیر این عوامل پیچیده است و بیان جزئیات آن در بحث حاضر جایز نیست با این وجود، یادآوری می‌شود که در فضای باز مزارع عوامل اقلیمی را نمی‌توان به سادگی تغییر داد و بنابراین در ارتباط با رابطه این عوامل با کارآیی مصرف آب می‌بایست از تغییر اثر آنها بر گیاه بهره

جست و تلاش نمود تا تغییراتی به نفع افزایش کارآیی مصرف آب به دست آورد. به عنوان نمونه با ایجاد بادشکن‌های مختلف می‌توان اثر باد را در افزایش «تبخیر ـ تعرق» کاهش داد و با کم کردن آب مصرفی گیاه، کارآیی مصرف آب در تولید را زیاد کرد. نیز می‌توان با پاشیدن موادی سفید رنگ روی برگ‌ها، ضریب بازتاب را افزایش داد و در نتیجه تأثیر انرژی تابشی را در افزایش «تبخیر ـ تعرق» مهار کرد. در هر یک از این موارد توجه به هزینه عملیات نیز در اجرای چنین روش‌هایی در مقیاس‌های وسیع از اهمیت برخوردار است.

گروه دوم از روش‌های افزایش کارآیی مصرف آب در تولید، شامل عملیاتی می‌شود که به مدیریت زراعی مناسب مربوط می‌باشند. این عملیات بسیار گوناگون‌اند و از دو راه عمل می‌نمایند. نخست از راه افزایش تولید و بالابردن مقدار محصول برداشت شده از مزرعه. در این زمینه هرگونه اقدامی که به بهبود رشد گیاه موردنظر بیانجامد، مستقیماً در افزایش *WUE* مؤثر خواهد بود. بنابراین کاربرد صحیح نهاده‌های مختلف مانند کود، سم، و ماشین آلات همگی در کارآمد کردن مصرف آب در تولید مؤثراند. دیگر راه افزایش کارآیی، شامل انجام عملیاتی می‌گردد که منجر به کاهش تبخیر مستقیم از سطح خاک می‌شوند. همانگونه که رابطه [۶ـ۴] نشان می‌دهد، کم کردن عبارت E در مخرج کسر به افزایش *WUE* خواهد انجامید. در عمل و در سطح مزارع، برای رسیدن به این هدف می‌توان از راه‌های گوناگونی بهره جست. به عنوان نمونه، کاشت واریته‌هایی از گونه گیاهی موردنظر که سرعت رشد اولیه آنها زیاد باشد باعث خواهد شد که در مراحل اولیه رشد گیاه به سرعت زمین را زیر برگ‌های خود بپوشاند و در نتیجه تبخیر مستقیم آب از خاک برهنه کاهش یافته یا متوقف می‌گردد. راه‌های دیگر برای این منظور استفاده از تراکم بوته بیشتر یا فواصل کوتاهتر کاشت می‌باشد. که در نتیجه پوشش گیاهی زمین در مدت کمی بعد از جوانه‌زنی به حد ۱۰۰٪ برسد. در مواردی نیز استفاده از مالچها برای قطع جریان تبخیر آب از خاک به اتمسفر می‌تواند در افزایش *WUE* مؤثر واقع شود.

افزون بر روش‌های پیش گفته، برای افزایش کارآیی مصرف آب در تولید می‌توان تغییراتی در ساخت ژنتیکی گیاهان به وجود آورد تا این کارآیی در آنها بهبود یابد. روش عمومی کار به این صورت است که ابتدا صفاتی مناسب برای این منظور در نظر گرفته

می‌شود و سپس منبع ژنتیکی هر یک از این صفات در ژنوتیپ‌های مختلف مشخص می‌گردد. در مرحله بعد، بهنژادگران با روش‌های مهندسی ژنتیک، ژن‌های مسئول صفات مزبور را از ژنوتیپ‌های مربوطه به رقم گیاهی موردنظر منتقل می‌نمایند. جستجو و پیدا کردن ژنوتیپ‌های مقاوم به خشکی (یا شوری) نیز جزو این روش‌ها است. به این ترتیب می‌توان ویژگی‌های ژنتیکی متعددی را مورد توجه قرار داد و در یک برنامه تحقیقاتی بهگزینی و بهنژادی آنها را جداسازی کرده و مورد بهره‌برداری قرار داد.

در این ارتباط، ویژگی‌های ژنتیکی متنوعی را می‌توان نام برد. به عنوان نمونه، ژن (های) مسئول زودرس کردن محصول می‌تواند در کوتاه کردن دوره تبخیر ـ تعرق گیاه و در نتیجه کاهش آب مصرفی نقش عمده‌ای داشته باشد. بنابراین چنانچه صفات دیگر واریته‌ای خاص از یک محصول زراعی را ثابت نگه داریم، افزودن ژن "زودرسی" به مجموعه ژنتیکی آن می‌تواند باعث افزایش کارآیی مصرف آب در تولید شود. نمونه‌ای دیگر در این زمینه، ویژگی‌هایی هستند که گیاه را قادر می‌سازند تا در شرایط کم‌آبی دچار افت شدید در فتوسنتز نشود. به سخن دیگر ویژگی‌های ژنتیکی که به گیاه توانایی رشد و جذب آب را در شرایط تنش کم آبی می‌دهند، یا توانایی گیاه در جلوگیری نسبی از خروج آب از روزنه در حالی که فتوسنتز همچنان ادامه دارد، از ویژگی‌هایی هستند که در افزایش کارآیی مصرف آب در تولید مفید خواهند بود. نیز در این زمینه، ژنهایی که گیاه را قادر می‌سازند تا در درجه حرارت‌های پایین و در دوره‌های نسبتاً سرد رشد داشته باشد، در بالا بردن کارآیی مصرف آب نقش مهمی دارند زیرا در چنین دوره‌هایی میزان تبخیر ـ تعرق کم است و در نتیجه نسبت تولید ماده خشک به تبخیر ـ تعرق افزایش می‌یابد.

۴ـ۴ـ محدوده تغییرات کارآیی مصرف آب در تولید برای چند محصول

براساس معادلات پیش گفته، انتظار می‌رود که گیاهان زراعی مختلف از لحاظ کارآیی مصرف آب در تولید تفاوت‌هایی داشته باشند. این انتظار براساس مقدار تولید محصولات و نیز تفاوت آنها در نیاز آبی است. از آنجا که مقدار محصول گیاهان یکسان نیست «تبخیر ـ تعرق» یا آب مصرفی آنها هم با یکدیگر نابرابر است، نسبت تولید به آب مصرفی در آنها تغییرات زیادی را نشان می‌دهد. در مورد یک گیاه معین هم کارآیی

مصرف آب در تولید ثابت نمی‌ماند و می‌تواند به علت تأثیر شیوه مدیریت زراعی و ویژگی‌های ژنتیکی رقم‌های هرگونه گیاهی، کم یا زیاد شود.

به طور کلی امّا، دانستن محدوده‌ای از اعداد مربوط به کارآیی مصرف آب برای گیاهان مختلف می‌تواند برای بعضی تصمیم‌گیری‌های زراعی و برنامه‌ریزی‌های مربوط به آن مفید باشد. به همین خاطر، اعدادی در این باره از یکی از نشریات سازمان خوار و بار جهانی *(Yield Response to Water. Irrigation and Drainage Paper. No.33)* گرد آوری شده و در جدول (۱-۴) منعکس گردیده است.

جدول ۱-۴-کارآیی آب در تولید چند محصول

(برگرفته از *FAO. Irri. and Drain. Papers. No.33*)

گیاه	آب مورد نیاز *(m.m)*	کارآیی آب در تولید Kg/m^3
انگور	۵۰۰-۱۲۰۰	۲-۴
برنج	۴۵۰-۷۰۰	۰/۷-۱/۱
پنبه دانه	۷۰۰-۱۳۰۰	۰/۴-۰/۶
پیاز	۳۵۰-۵۵۰	۸-۱۰
سوژا	۴۵۰-۷۰۰	۰/۴-۰/۷
سیب‌زمینی	۵۰۰-۷۰۰	۴-۷
ذرت دانه‌ای	۵۰۰-۸۰۰	۰/۸-۱/۶
گندم	۴۵۰-۶۵۰	۰/۸-۱/۰
گوجه فرنگی	۴۰۰-۶۰۰	۱۰-۱۲
چغندرقند	۵۵۰-۷۵۰	۶-۹
نیشکر	۱۵۰۰-۲۵۰۰	۵-۸
یونجه	۸۰۰-۱۶۰۰	۱/۵-۲

علاوه بر آن، اعدادی در مورد محصولات کشاورزی کشور براساس آمارهای تولید هر محصول، منتشره به وسیله وزارت جهاد کشاورزی برای فصل‌های زراعی ۷۶-۱۳۷۵ و

۷۷-۱۳۷۶ به ترتیب در جداول شماره (۲-۴) و (۳-۴) درج شده است. اعداد این جداول با تقسیم کردن میانگین تولید هر محصول در استان مربوطه بر مقدار «تبخیر ـ تعرق» در فصل رشد آن گیاه براساس آمار هواشناسی در همان سال، به دست آمده است. همچنین، در دو ستون دیگر از این جداول، با لحاظ کردن کارآیی آبیاری برابر ۵۰ درصد یا برابر مقداری که با پرسشنامه از کارشناسان و مسئولان به دست آمده، مقدار عددی کارآیی مصرف آب برای هر محصول نوشته شده است.

گفتنی است که اعداد جداول مزبور، اعدادی برآوردی و تقریبی بوده و قابل تغییر می‌باشند. این اعداد محدوده‌ای از کارآیی مصرف اب در تولید را نشان می‌دهند و هدف از ارایه آنها آشنایی بیشتر خوانندگان با مقدار نسبی این کارآیی و نیز برای تأکید بر این نکته است که این مقوله در گیاهان متفاوت یکسان نیست و حتی برای یک گیاه هم در سال‌های مختف ثابت نمی‌ماند. توجه داده می‌شود که محصولاتی مانند سیب‌زمینی یا پیاز که تولید مطلق آنها بسیار بالاتر از گندم و غلات دیگر است، دارای کارآیی بسیار بالایی در مصرف آب برای تولید می‌باشند.

بحث دیگر در این زمینه، تأکید بر این نکته است که تفاوت‌ها در کارآیی مصرف آب نمی‌بایست به تصمیم‌گیری‌های یک جانبه درباره طرح کشت یک منطقه یا یک استان بیانجامد. در سال‌های اخیر که کاربرد عبارت و مفهوم کارآیی مصرف آب در تولید رایج شده است، گاه به نظر می‌آید که برداشت‌هایی شتابزده و احتمالاً نادرست از این مفهوم در سر لوحه برنامه‌ها و هدف‌های برنامه‌ریزان قرار می‌گیرد و اینان بدون توجه به ابعاد مختلف این مقوله، تصمیم‌ها یا توصیه‌هایی اکید ارایه می‌نمایند. به عنوان نمونه، از تأکیدهایی یاد می‌شود که براساس آنها لازم است که کارآیی مصرف آب در تولید ضابطه انتخاب برنامه تولید و مدیریت زراعی قرار گیرد. چنین توصیه‌ای به آن معنی خواهد بود که در انتخاب روش‌های مختلف مدیریت زراعی (مثلاً انتخاب نوع کشت، مقدار و روش آبیاری، کوددهی و مانند آن)، هر روش که کارآیی مصرف آب در تولید را بیشتر افزایش دهد می‌بایست بر دیگر روش‌ها ترجیح داده شده و مورد عمل قرار گیرد.

جدول ۲-۴-کارایی آب در تولید گیاهان مختلف (Kg/m^3) در سال زراعی ۷۶-۱۳۷۵

استان	گندم			جو			یونجه			ذرت			چغندرقند			پنبه			سیب‌زمینی		
	ET_{crop} برمبنای	کارایی ۵۰٪ (۱) برمبنای	کارایی گزارش شده برمبنای	ET_{crop} برمبنای	کارایی ۵۰٪ برمبنای	کارایی گزارش شده برمبنای	ET_{crop} برمبنای	کارایی ۵۰٪ برمبنای	کارایی گزارش شده برمبنای	ET_{crop} برمبنای	کارایی ۵۰٪ برمبنای	کارایی گزارش شده برمبنای	ET_{crop} برمبنای	کارایی ۵۰٪ برمبنای	کارایی گزارش شده برمبنای	ET_{crop} برمبنای	کارایی ۵۰٪ برمبنای	کارایی گزارش شده برمبنای	ET_{crop} برمبنای	کارایی ۵۰٪ برمبنای	کارایی گزارش شده برمبنای
آذربایجان‌غربی	۱/۰۲	۰/۵۱	۰/۳۵۷	۰/۸۵۳	۰/۴۲۶	۰/۲۹۸	۰/۷۱۵	۰/۳۵۷	۰/۲۵۰				۴/۳۵۲	۲/۱۷۶	۱/۵۲۳	-	-		۴/۷۵۲	۲/۳۷۶	۱/۶۶۳
آذربایجان‌شرقی	۰/۸۶۵	۰/۴۳۲		۰/۵۰۷	۰/۲۵۳		۰/۵۶۹	۰/۲۸۴					-	-		-	-		۴/۱۱	۲/۰۵	
اردبیل	۰/۹۲۶	۰/۴۶۳	۰/۵۳۷	۰/۹۰۷	۰/۴۵۳	۰/۵۲۶	۰/۴۶۰	۰/۲۳۰	۰/۲۶۶				۵/۷۷	۲/۸۸	۳/۳۴۶	۰/۳۲	۰/۱۶	۰/۱۸۵	۴/۴۱۸	۲/۲۰۹	۲/۵۶۲
مازندران	۱/۲۴۳	۰/۶۲۱		۱/۳۹۸	۰/۶۹۹		۳/۰۹۸	۱/۵۵					-	-	-	۰/۵۴۵	۰/۲۷۲		-	-	
گلستان	۱/۸۸	۰/۹۴	۰/۶۹۵	۱/۳۷۱	۰/۶۸۵	۰/۵۰۷	-	-	-				-	-	-	۰/۳۷۹	۰/۱۸۹	۰/۱۴۰	۴/۳۷	۲/۱۸۵	۱/۶۱۷
مرکزی	۰/۵۷۶	۰/۲۸۸	۰/۲۳۰	۰/۶۶۳	۰/۳۳۱	۰/۲۶۵	۰/۷۲۶	۰/۳۶۳	۰/۲۹۰				-	-		۰/۲۳۹	۰/۱۲۰	۰/۰۹۵	۲/۷۸	۱/۴۳۵	۱/۱۴۸
تهران	۰/۴۸۱	۰/۲۴۰		۰/۵۷۷	۰/۲۸۸		۰/۶۱۴	۰/۳۰۷					-	-		۰/۳۸	۰/۱۹۰		۲/۹۹۸	۱/۴۹۹	
همدان	۰/۸۵۳	۰/۴۲۶		۰/۷۷۷	۰/۳۸۸		۱/۲۶۸	۰/۶۳۴					۲/۱۸۲	۱/۰۹۱		-	-		۴/۴	۲/۲	
لرستان	۰/۸۴۲	۰/۴۲۱		۰/۶۱۳	۰/۳۰۶		۰/۵۷۷	۰/۲۸۸					۲/۱۶۷	۱/۰۸		-	-		۲/۴۵۷	۱/۲۲۸	
اصفهان	۰/۶۱۳	۰/۳۰۶	۰/۲۰۲	۰/۶۷۳	۰/۳۳۶	۰/۲۲۲	۰/۹۵۴	۰/۴۷۷	۰/۳۱۵				۱/۹۴۳	۰/۹۷۱	۰/۶۴۱	۰/۳۲۹	۰/۱۶۴	۰/۱۰۸	۳/۵۰۲	۱/۷۵۱	۱/۵۵۶
چهارمحال بختیاری	۰/۷۲۸	۰/۳۶۴		۰/۶۴۸	۰/۳۲۴		۰/۸۲۶	۰/۴۱۳					۱/۹۴۸	۰/۹۷۴		-	-		۳/۸۲۸	۱/۹۱۴	
خوزستان	۰/۷۲۴	۰/۳۶۲	۰/۲۸۹	۰/۵۵۵	۰/۲۷۷	۰/۲۲۲	۰/۸۳۰	۰/۴۱۵	۰/۳۳۲				۷/۵۶۱	۳/۷۸	۳/۰۲۴	-	-	-	۴/۰۲۲	۲/۰۱۱	۱/۶۰۸
ایلام	۰/۹۷۵	۰/۴۸۷	۰/۳۱۷	۰/۵۹۸	۰/۲۹۹	۰/۱۹۴	۰/۵۸۱	۰/۲۹۰	۰/۱۸۸				-	-		-	-	-	۳/۱۲	۱/۵۶	۱/۰۱۴
کرمانشاه	۱/۰۳	۰/۵۱۵	۰/۳۶۹	۰/۸۴۹	۰/۴۲۴	۰/۳۲۶	۰/۴۵۸	۰/۲۲۹	۰/۱۷۶				۲/۵۲۴	۱/۲۶۲	۰/۹۷۱	۰/۱۲۵	۰/۰۶۲	۰/۰۴۸	-	-	-

۱- منظور کارایی آبیاری در مزرعه است (Application efficiency)

ادامه جدول ۲ـ۴ـ

استان	گندم			جو			یونجه			ذرت			چغندرقند			پنبه			سیب‌زمینی		
	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ٪۵۰(۱)	برمبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ٪۵۰	برمبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ٪۵۰	برمبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ٪۵۰	برمبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ٪۵۰	برمبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ٪۵۰	برمبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ٪۵۰	برمبنای کارایی گزارش شده
کردستان	۰/۶۲۱	۰/۳۱۰	۰/۱۸۶	۰/۴۸۸	۰/۲۴۴	۰/۱۴۶	۰/۶۷۶	۰/۳۳۸	۰/۲۰۲				۱/۶۹۱	۰/۸۴۵	۰/۵۰۷	-	-	-	۳/۴۵	۱/۷۲۵	۱/۰۳۵
فارس	۰/۸۰۴	۰/۴۰۲	۰/۵۲۲	۰/۵۶۶	۰/۲۸۳	۰/۳۶۸	۰/۵۸۷	۰/۲۹۳	۰/۳۸۱				-	-	-	-	-	-	۵/۲۳۷	۲/۶۱۸	۳/۴۰۴
بوشهر	۰/۶۲	۰/۳۱	۰/۱۸۶	۰/۳۹۸	۰/۱۹۹	۰/۱۱۹	۰/۵۰۳	۰/۲۵۱	۰/۱۵۱				-	-	-	-	-	-	۴/۱۳۴	۲/۰۶۷	۱/۲۴
یزد	۰/۵۶۷	۰/۲۸۳	۰/۳۷۴	۰/۵۰۵	۰/۲۵۲	۰/۳۳۳	۰/۴۸۷	۰/۲۴۳	۰/۳۲۱				۲/۶۸۱	۱/۳۴	۱/۷۶۹	۰/۱۹۶	۰/۰۹۸	۰/۱۲۹	۴/۱۲۳	۲/۰۶۱	۲/۷۲۱
کرمان	۰/۵۵۵	۰/۲۷۷	۰/۲۳۳	۰/۴۰۶	۰/۲۰۳	۰/۱۷۰	۰/۵۸	۰/۲۹	۰/۲۴۳				-	-	-	۰/۱۳۵	۰/۰۶۷	۰/۰۵۶	۲/۴۸۹	۱/۲۴۴	۱/۰۴۵
هرمزگان	۰/۶۶۹	۰/۳۳۴		۰/۵۲	۰/۲۶		۰/۵۶۹	۰/۲۸۴					-	-	-	-	-	-	۲/۹۴۸	۱/۴۷۴	
سیستان و بلوچستان	۰/۳۶۲	۰/۱۸۱	۰/۱۲۶	۰/۳۴۱	۰/۱۷۰	۰/۱۱۹	۰/۹۶۶	۰/۴۸۳	۰/۳۳۸				-	-	-	-	-	-	۴/۵۷۹	۲/۲۸۹	۱/۶۰۲
زنجان	۰/۶۱۲	۰/۳۰۶		۰/۵۷۷	۰/۲۸۸		۰/۴۷۵	۰/۲۳۷					-	-	-	۰/۲۰۲	۰/۱۰۱		۲/۶۱۱	۱/۳۰۵	
خراسان	۰/۵۷	۰/۲۸۵	۰/۲۲۸	۰/۶۱۹	۰/۳۰۹	۰/۲۴۷	۰/۵۸۶	۰/۲۹۳	۰/۲۳۴				-	-	-	۰/۱۶۹	۰/۰۸۴	۰/۰۶۷	۲/۹۵	۱/۴۷۵	۱/۱۸
کهکیلویه و بویراحمد	۰/۶۴۲	۰/۳۲۱		۰/۵۲۷	۰/۲۶۳		۰/۶۵۳	۰/۳۲۶					۲/۳۰۴	۱/۱۵۲		-	-	-	-	-	-
سمنان	۰/۵۵	۰/۲۷۵	۰/۲۴۷	۰/۵۷۰	۰/۲۸۵	۰/۲۵۶	۰/۳۷۷	۰/۱۸۸	۰/۱۶۹				۲/۲۹۸	۱/۱۴۹	۱/۰۳۴	۰/۲۰۱	۰/۱۰۰	۰/۰۹۰	۱/۸۴۹	۰/۹۲۴	۰/۸۴۲
قزوین	۰/۵۵۲	۰/۲۷۶	۰/۲۲۰	۰/۴۰۷	۰/۲۰۳	۰/۱۶۳	۰/۵۹	۰/۲۹۵	۰/۲۳۶				۲/۱۳۸	۱/۰۶۹	۰/۸۵۵	-	-	-	۱/۲۴۵	۰/۶۲۲	۰/۴۹۸
قم	۰/۵۴۸	۰/۲۷۴		۰/۲۲۹	۰/۲۱۴		۰/۶۳۱	۰/۳۱۵					-	-		۰/۲۶۱	۰/۱۳۰		-	-	-

۱- منظور کارایی آبیاری در مزرعه است (Application efficiency)

جدول ۳-۴-کارایی مصرف آب گیاهان مختلف (Kg/m^3) در سال زراعی ۷۷-۱۳۷۶

استان	گندم			جو			یونجه			ذرت			چغندرقند			پنبه			سیب‌زمینی		
	ET_{crop}	بر مبنای کارایی ۵۰٪[1]	بر مبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop}	بر مبنای کارایی ۵۰٪	بر مبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop}	بر مبنای کارایی ۵۰٪	بر مبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop}	بر مبنای کارایی ۵۰٪	بر مبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop}	بر مبنای کارایی ۵۰٪	بر مبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop}	بر مبنای کارایی ۵۰٪	بر مبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop}	بر مبنای کارایی ۵۰٪	بر مبنای کارایی گزارش شده
آذربایجان‌غربی	۱/۱۲۶	۰/۵۶۳	۰/۳۹۴	۱/۰۰۸	۰/۵۰۴	۰/۳۵۳	۰/۸۴۴	۰/۴۲۲	۰/۲۹۵	۰/۹۸۵	۰/۴۹۲	۰/۳۴۴	۴/۸۶	۲/۴۳	۱/۷۰۱	-	-	-	۴/۷۱۸	۲/۳۵۹	۱/۶۵۱
آذربایجان‌شرقی	۰/۹۰۱	۰/۴۵۰		۰/۶۴۵	۰/۳۲۲		۰/۷۹۱	۰/۳۹۵		۰/۶۶۷	۰/۳۳۳		-	-	-	-	-	-	۴/۳۶۷	۲/۱۸۳	
اردبیل	۱/۳۰۶	۰/۶۵۳	۰/۷۵۷	۰/۸۴۹	۰/۴۲۴	۰/۴۹۲	۰/۵۴۵	۰/۲۷۲	۰/۳۱۶	-	-	-	۶/۳۹۸	۳/۲	۳/۷۱	۰/۳۲۷	۰/۱۶۳	۰/۱۸۹	۴/۸۶۳	۲/۴۳۱	۲/۸۲
مازندران	۱/۹۴۹	۰/۹۷۴		۱/۳۸۶	۰/۶۹۳		۱/۱۳	۰/۵۶۵		-	-		-	-	-	۰/۵۳۸	۰/۲۶۹		-	-	-
گلستان	۲/۱۲۴	۱/۰۷۲	۰/۷۹۳	۱/۲۱۵	۰/۶۰۷	۰/۴۴۹	۰/۸۹۲	۰/۴۴۶	۰/۳۳۰	۱/۵۱۹	۰/۷۶	۰/۵۶۲	-	-	-	۰/۴۱۴	۰/۲۱۲	۰/۱۵۳	۳/۹۴۷	۱/۹۷۳	۱/۴۶
مرکزی	۰/۷۷۸	۰/۳۸۹	۰/۳۱۱	۰/۷۳۵	۰/۳۶۷	۰/۲۹۴	۰/۶۱۷	۰/۳۰۸	۰/۲۴۷	۰/۷۶۸	۰/۳۸۴	۰/۳۰۷	-	-	-	۰/۲۰۴	۰/۱۰۲	۰/۰۸۱	۱/۷۷۱	۰/۸۸۵	۰/۷۰۸
تهران	۰/۶۷	۰/۳۳۵		۰/۶۵۱	۰/۳۲۵		۰/۶۹۹	۰/۳۴۹		۰/۷۰۴	۰/۳۵۲		-	-	-	۰/۲۵۱	۰/۱۲۵		۲/۵۲	۱/۲۶	
همدان	۰/۸۶۵	۰/۴۳۲		۰/۸۶۲	۰/۴۳۱		۱/۲۷۱	۰/۶۳۵		۰/۹۷۱	۰/۴۸۵		۲/۹۶۸	۱/۴۸۴		-	-	-	۳/۹۸۲	۱/۹۹۱	
لرستان	۰/۸۵۳	۰/۴۲۶		۰/۷۸۰	۰/۳۹		۰/۵۹	۰/۲۹۵		-	-		۲/۰۴۱	۱/۰۲		-	-	-	۳/۲۸۳	۱/۶۴۱	
اصفهان	۰/۶۷۵	۰/۳۳۷	۰/۲۲۲	۰/۷۲۶	۰/۳۶۳	۰/۲۳۹	۰/۹۱۱	۰/۴۵۵	۰/۳۰۰	۰/۸۰۷	۰/۴۰۳	۰/۲۶۶	۲/۳۶	۱/۱۸	۰/۷۷۵	-	-	-	۳/۷۲۶	۱/۸۶۳	۱/۲۲۹
چهارمحال بختیاری	۰/۶۹۰	۰/۳۴۵		۰/۷۲۴	۰/۳۶۲		۰/۸۶۹	۰/۴۳۴		۰/۷۷۲	۰/۳۸۶		۲/۷۳۱	۱/۳۶۵		-	-	-	۳/۱۸	۱/۵۹	
خوزستان	۰/۷۳۷	۰/۳۶۸	۰/۲۹۵	۰/۴۳۶	۰/۲۱۸	۰/۱۷۴	۰/۷۶	۰/۳۸	۰/۳۰۴	۰/۸۱۲	۰/۴۰۶	۰/۳۲۵	۷/۵۵۴	۳/۷۷	۳/۰۱۲	-	-	-	۴/۴۵۲	۲/۲۲۶	۱/۷۸
ایلام	۱/۴۴	۰/۷۲	۰/۴۶۸	۰/۸۰۰	۰/۴۰۰	۰/۲۶۰	۰/۵۲۵	۰/۲۶۲	۰/۱۷۰	۰/۸۷۶	۰/۴۳۸	۰/۲۸۴	-	-	-	-	-	-	۲/۳۲۲	۱/۱۶۱	۰/۴۲۹
کرمانشاه	۰/۹۷۵	۰/۴۸۷	۰/۳۷۵	۰/۷۱۴	۰/۳۵۷	۰/۲۷۴	۰/۵۲۵	۰/۲۶۲	۰/۲۰۲	-	-	-	۱/۸۸۶	۰/۹۴۳	۰/۷۲۶	۰/۱۳۴	۰/۰۶۷۰	۰/۰۵۱	-	-	-

۱- منظور کارایی آبیاری در مزرعه است (Application efficiency)

ادامه جدول ۳-۴-

استان	گندم			جو			یونجه			ذرت			چغندرقند			پنبه			سیب‌زمینی		
	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ۵۰٪[1]	برمبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ۵۰٪	برمبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ۵۰٪	برمبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ۵۰٪	برمبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ۵۰٪	برمبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ۵۰٪	برمبنای کارایی گزارش شده	ET_{crop} برمبنای	برمبنای کارایی ۵۰٪	برمبنای کارایی گزارش شده
کردستان	۰/۷۵۸	۰/۳۷۹	۰/۲۲۷	۰/۵۲۳	۰/۲۶۱	۰/۱۵۷	۰/۷۳۳	۰/۳۶۶	۰/۲۲۰	۰/۸۵۹	۰/۴۲۹	۰/۲۵۷	-	-	-	-	-	-	۳/۲۷۵	۱/۷۳۷	۱/۰۴
فارس	۰/۷۷۳	۰/۳۸۶	۰/۵۰۲	۰/۵۶۴	۰/۲۸۲	۰/۳۶۶	۰/۶۲۱	۰/۳۱۰	۰/۴۰۳	۰/۷۴۶	۰/۳۷۳	۰/۴۸۵	۱/۴۲۱	۰/۷۱۰	۰/۹۲۳	۰/۲۷۷	۰/۱۳۸	۰/۱۸	۴/۰۳۶	۲/۰۱۸	۲/۶۲۳
بوشهر	۰/۶۳۲	۰/۳۱۶	۰/۱۸۹	۰/۵۲۶	۰/۲۶۳	۰/۱۵۸	۰/۳۵۲	۰/۱۷۶	۰/۱۰۵	۰/۸۴۲	۰/۴۲۱	۰/۲۵۲	-	-	-	-	-	-	۱/۶۹۰	۰/۸۴۵	۰/۵۰۷
یزد	۰/۵۱۷	۰/۲۸۵	۰/۳۱۰	۰/۴۱۹	۰/۲۰۹	۰/۲۷۶	۰/۵۳۲	۰/۲۶۶	۰/۳۵۱	۰/۷۵۱	۰/۳۷۵	۰/۴۹۵	۳/۵۶	۱/۷۸	۲/۳۴۹	۰/۱۸۲	۰/۰۹۱	۰/۱۲۰	۴/۱۲۳	۲/۰۶۱	۲/۷۲۱
کرمان	۰/۵۶۰	۰/۲۸۰	۰/۲۳۵	۰/۵۵۶	۰/۲۷۸	۰/۲۳۳	۰/۶۱۹	۰/۳۰۹	۰/۲۶۰	۰/۷۴۲	۰/۳۷۱	۰/۳۱۱	-	-		۰/۱۲۲	۰/۰۶۱	۰/۰۵۱	۱/۹۱۶	۰/۹۵۸	۰/۸۰۴
هرمزگان	۰/۷۰۲	۰/۳۵۱		۰/۵۱۷	۰/۲۵۸		-	-		-	-		-	-		-	-		۳/۶۹۴	۱/۸۴۷	
سیستان و بلوچستان	۰/۳۶۵	۰/۱۸۲	۰/۱۲۷	۰/۳۴۱	۰/۱۷۰	۰/۱۱۹	۰/۷۴۹	۰/۳۷۴	۰/۲۶۲	۰/۷۱۲	۰/۳۵۶	۰/۲۴۹	-	-		-	-		۳/۹۱۸	۱/۹۵۹	۰/۳۲۱
زنجان	۰/۷۸۴	۰/۳۹۲		۰/۶۱۵	۰/۳۰۷		۰/۴۸۳	۰/۲۴۱		-	-		-	-		۰/۳۴۱	۰/۱۷۰		۲/۲۵۳	۱/۱۲۶	
خراسان	۰/۶۲۹	۰/۳۱۴	۰/۲۵۱	۰/۶۱۷	۰/۳۰۸	۰/۲۴۷	۰/۵۹۴	۰/۲۹۷	۰/۲۳۷	۰/۶۶۲	۰/۳۳۱	۰/۲۶۴	۳/۰۲۲	۱/۵۱۱	۱/۲۰۸	۰/۲۱۶	۰/۱۰۸	۰/۰۸۶	۲/۸۰۲	۱/۴۰۱	۱/۱۲۰
کهکیلویه و بویراحمد	۰/۹۰۱	۰/۴۵		۰/۵۰۵	۰/۲۵۲		۰/۷۱۳	۰/۳۵۶		۰/۸۲۳	۰/۴۱۱		۲/۹۹	۱/۵		-	-		-	-	
سمنان	۰/۶۰۵	۰/۳۰۲	۰/۲۷۲	۰/۵۹۵	۰/۲۹۷	۰/۲۶۷	۰/۴۷	۰/۲۳۵	۰/۲۱۱	۰/۷۰۲	۰/۳۵۱	۰/۳۱۶	۲/۸۶	۱/۴۳	۱/۲۸۷	۰/۱۸۵	۰/۰۹۲	۰/۰۸۳	۱/۷۸۷	۰/۸۹۳	۰/۸۰۴
قزوین	۰/۸۱۶	۰/۴۰۸	۰/۳۲۶	۰/۷۴۱	۰/۳۷۰	۰/۲۹۶	۰/۷۰۲	۰/۳۵۱	۰/۲۸۰	۰/۸۷۳	۰/۴۳۶	۰/۳۴۹	۳/۵۲۴	۱/۷۶۲	۱/۴۱	-	-	-	۲/۰۳۲	۱/۰۱۶	۰/۸۱۳
قم	۰/۶۱۱	۰/۳۰۵		۰/۴۹۷	۰/۲۴۸		۰/۶۵۶	۰/۳۲۸		-	-		-	-		۰/۲۱۲	۰/۱۰۶		-	-	

۱- منظور کارایی آبیاری در مزرعه است (Application efficiency)

چنین توصیه‌ای، هرچند در برداشتی عمومی قابل‌توجه است، در عمل امّا، تنها ضابطه انتخاب نیست و نمی‌بایست در اولویت نخست ضوابط انتخاب جای گیرد. برای روشن شدن مطلب، نمونه‌های گوناگونی را می‌توان ارایه کرد. مثلاً، در اراضی دیم و در سال‌هایی که بارندگی کافی نباشد، انجام یک یا دو نوبت آبیاری تکمیلی از کاهش شدید تولید جلوگیری خواهد کرد زیرا آبیاری مزرعه د رمقایسه با شرایط بدون آبیاری تولید را افزایش خواهد داد. اما غالباً افزایش تولید در اثر آبیاری با حجم معینی آب، از افزایش تولید در اثر آبیاری باد و برابر حجم مزبور بیشتر خواهد بود. این نتیجه با اصل «بازده نزولی» همخوانی دارد زیرا بنابر آن اصل، با زیاد کردن تدریجی مصرف هر نهاده، اثر افزایشی آن در تولید محصول به تدریج کم می‌شود (به فصل سوم کتاب مراجعه شود) . در عین حال باید توجه داشت که با افزایش مصرف آب تا سقف معینی، مقدار مطلق تولید محصول در واحد سطح بیشتر خواهد شد. بنابراین هرچند کارآیی مصرف آب در تولید در ازای مصرف یک حجم آب بیشتر از حالتی است که دو برابر آن حجم آب به کار رود، اما مقدار مطلق تولید در یک واحد سطح، در زمانی که دو حجم آب مصرف شود بیشتر خواهد بود.

بر این اساس، چنانچه مساحت کشت یک محصول قابل گسترش باشد، انتظار می‌رود که با مصرف دو واحد حجم آب در دو واحد سطح خاک، تولید مطلق بیشتری در مقایسه با مصرف همان دو حجم در یک واحد سطح به دست آید. امّا، در مواردی که مساحت کشت (از لحاظ مالکیت زارع یا از لحاظ وجود منابع خاک مناسب) قابل گسترش نباشد می‌بایست دو حجم آب را به همان واحد سطح موجود افزود. نیز در شرایطی که منابع آب در منطقه به قدری کافی باشد که مصرف آن برای تمامی سطح زمین‌های مناسب کشت مقدور باشد می‌بایست به همین صورت عمل کرد تا تولید مطلق در کل زمین‌های آبیاری شده به حداکثر برسد. به سخن دیگر، در این شرایط نمی‌توان ضابطه بیشتر بودن «کارآیی آب در تولید» را ملاک انتخاب روش آبیاری قرار داد، بلکه می‌بایست روشی را که تولید مطلق بیشتری را فراهم می‌کند انتخاب کرد.

گفتنی است که در مواردی نیز احتمال دارد جنبه‌های اقتصادی تولید از اهمیت بیشتری در برابر کارآیی مصرف آب برخوردار باشد. مثال بارزی دراین باره می‌توانند از

مقایسه کشت گندم و زعفران روشن شود. این دو محصول از لحاظ نیاز آبی تقریباً همسان می‌باشند اما تولید دانه گندم آبی در حدود ۳۰۰۰ کیلوگرم در هکتار است در حالی که زعفران در حدود ۳کیلوگرم در هکتار محصول می‌دهد. بنابراین کارآیی مصرف آب در تولید زعفران تقریباً یک هزارم گندم است. با این همه، واضح است که نمی‌توان به دلیل بیشتر بودن کارآیی مصرف آب در گندم، کاشت آن را در همه جا به زعفران ترجیح داد و کاشت زعفران را متوقف کرد. بازده اقتصادی تولید به ازاء حجم ثابتی از آب در انتخاب محصول نقش بارزی دارد که می‌تواند بر کارآیی مصرف آب در تولید رجحان و اولویت یابد.

منابع فصل چهارم:

۱ـ بی‌نام، ۱۳۷۷. آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۷۶-۱۳۷۵. وزارت کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و بودجه، اداره کل آمار و اطلاعات.

۲ـ بی‌نام، ۱۳۷۸. آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۷۷-۱۳۷۶. وزارت کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و بودجه، اداره کل آمار و اطلاعات.

۳ـ بی‌نام، ۱۳۷۹. آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۷۸-۱۳۷۷. وزارت کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و بودجه، اداره کل آمار و اطلاعات.

۴ـ بی‌نام، ۱۳۸۰. آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۷۹-۱۳۷۸. وزارت کشاورزی، معاونت برنامه‌ریزی و بودجه، اداره کل آمار و اطلاعات.

۵ـ سیادت، حمید و صمد دربندی، ۱۳۸۱. کارآیی آب در تولید محصولات کشاورزی، خلاصه مقالات کارگاه آموزشی نگرش کاربردی به مدیریت آبیاری در شرایط کم‌آبی، کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۲۳ خرداد ۱۳۸۱.

6- Doorenbos, J., and A. H. Kassam, 1986. Yield response to water. Irrigation and Drainage paper. No. 33.

On - Farm Irrigation Water Management

Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID)

Working Group on "Sustainable Use of Natural Resources for Crop Production"

Written By:

A.A. Farshi
H. Siadat
S. Darbandi
M.R. Entesari
J. Kheirabi
M. Mirlatifei
A.R. Salamat
M.H. Sadat

Edited By:

A.A. Farshi
S. Darbandi

On - Farm Irrigation Water Management

Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID)

Working Group on "Sustainable Use of Natural Resources for Crop Production"

No.76 - 2003

ISBN: 964-6668-43-7 شابک: ۷-۴۳-۶۶۶۸-۹۶۴

کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

تهران - خیابان وحید دستگردی (ظفر) - خیابان شهید کارگزار - خیابان شهرساز پلاک ۲۴ - طبقه دوم

تلفن: ۲۲۵۷۳۴۸ نمابر: ۲۲۷۲۲۸۵

On-Farm Irrigation Water Management

Iranian National Committee on
Irrigation and Drainage (IRNCID)

Pub. No.76
ISBN:964-6668-43-7
شابک: ۷-۴۳-۶۶۶۸-۹۶۴