نشریه ترویجی

وزارت کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
معاونت ترویج

توصیه هایی بر بهینه سازی کارآیی مصرف آب در اراضی زراعی کشور

تهیه کنندگان : کوروش صادق زاده - عباس کشاورز

دفتر تولید برنامه‌های ترویجی و انتشارات فنی
۱۳۷۹

۵۵۵۱ ک

وزارت کشاورزی
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
معاونت ترویج

توصیه‌هایی بر بهینه‌سازی کارآیی مصرف آب در اراضی زراعی کشور

۱۷۶۹۶

تهیه کنندگان:

کوروش صادق‌زاده ـ کارشناس ارشد مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی

عباس کشاورز ـ عضو هیأت علمی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی

دفتر تولید برنامه‌های ترویجی و انتشارات فنی

معاونت ترویج - ۱۳۷۹

۵۵۵۱

S
٤٩٤,٥
٩ت٢ ص١
ن ٢٠

توصیه‌هایی بر بهینه‌سازی کارآیی مصرف آب در اراضی زراعی کشور

■ تهیه کنندگان: کوروش صادق‌زاده ـ عباس کشاورز

■ ناشر: دفتر تولید برنامه‌های ترویجی و انتشارات فنی معاونت ترویج سازمان تات

■ چاپ: اول

■ سال: ۱۳۷۹

■ آماده‌سازی و چاپ: دفتر خدمات و تکنولوژی آموزشی (نشر آموزش کشاورزی)

■ شمارگان: ۲۰۰۰

■ این نشریه تحت شماره ۷۸/۵۵۶ در تاریخ ۷۸/۱۱/۶ در مرکز اطلاعات و مدارک علمی کشاورزی به ثبت رسید.

تهران، بزرگراه شهید چمران - خیابان تابناک - باغ کشاورزی - سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی (معاونت ترویج) - واحد انتشارات فنی

بسمه تعالی

پیشگفتار:

موضوع حجم مصرفی آب در برابر ماده خشک بحثی اجتناب‌ناپذیر در کشاورزی امروز است.

حسب دستور جناب آقای دکتر کلانتری مقام عالی وزارت کشاورزی از این پس در گزینش کشاورزان نمونه کشور باید به مصرف بهینه آب توجه ویژه صورت گیرد و کشاورز موفق کسی است که تولید بالا را با مصرف کمتری از آب زراعی به دست آورد.

مقاله حاضر دیدگاه و راه‌کارهای لازم را برای مصرف بهینه آب به همراه دارد. این نشریه که به وسیله دوتن از اساتید این رشته نگاشته شده‌است می‌تواند کمک موثری به مروجان و کارشناسان کشاورزی در تمام مناطق کشور به نماید. با آرزوی توفیق خدمتگذاری برای ایرانی سرسبز و آباد.

معاونت ترویج سازمان تات

دیماه ۱۳۷۸

۱ـ مقدمه:

از ۱۶۵ میلیون هکتار اراضی کشور حدود ۵۱ میلیون هکتار را اراضی مناسب جهت عملیات کشت و زرع تشکیل می‌دهد. به خاطر محدودیت منابع آب فقط حدود ۸ میلیون هکتار از این اراضی به صورت فاریاب و ۶ میلیون هکتار دیگر به صورت دیم زیرکشت محصولات زراعی قرارگرفته و ۴ میلیون هکتار دیگر به صورت آیش کشت می‌شوند (آمارنامه کشاورزی، ۱۳۷۸). از طرف دیگر به استناد مطالعات طرح جامع آب، منشأ اصلی منابع آب ایران را ریزش‌های آسمانی بر پهنه جغرافیایی کشور تشکیل می‌دهد که سالانه بالغ بر ۴۱۳ میلیارد مترمکعب می‌گردد. از این مقدار حدود ۹۲ میلیارد مترمکعب به صورت جریانهای سطحی جاری شده، ۲۵ میلیارد مترمکعب مستقیماً به آبخوانهای آبرفتی نفوذ کرده و مابقی بصورت تبخیر و تعرق (از سطح زمین، جنگلها، مراتع، دیم‌زارها و پیکره‌های آبی) از دسترس خارج می‌گردد. علاوه بر منابع آب حاصل از ریزش‌های جوی سالانه حدود ۱۳ میلیارد مترمکعب آب بصورت جریانهای سطحی و از طریق رودخانه‌های مرزی وارد کشور می‌شود که با پیوستن آن به منابع آب سطحی، منابع آب تجدیدپذیر کل و

سطحی کشور به ۱۳۰ و ۱۰۵ میلیارد مترمکعب بالغ می‌گردد. مطالعات و بررسی‌ها نشان می‌دهد که در مقطع سال ۱۳۷۷ از کل منابع آب تجدید شونده حدود ۸۸ میلیارد مترمکعب جهت مصارف بخش‌های کشاورزی، صنعت و معدن و شرب برداشت شده که حدود ۸۳ میلیارد مترمکعب آن به بخش کشاورزی و مابقی به بخشهای صنعت و معدن و آب مشروب شهرها و روستاها اختصاص داشته است (گزارش وزارت نیرو به هیأت دولت، ۱۳۷۷). به همین خاطر تلفات عمده منابع آب کشور نیز به بخش کشاورزی تعلق دارد که حدود ۹۴ درصد از مقدار آب استحصال شده را سالانه به خود اختصاص می‌دهد (درصورتی که این نسبت در کشورهای پیشرفته کمتر از ۶۵ درصد می‌باشد). با توجه به مساحت اراضی تحت آبیاری کشور که وزارت کشاورزی آن را حدود ۸ میلیون هکتار برآورد کرده‌است (آمارنامه کشاورزی، ۱۳۷۸)به نظر می‌رسد هر هکتار از اراضی فاریاب سالانه حدود ده‌هزار مترمکعب آب مصرف می‌کند که نشان از فقدان یک مدیریت آبیاری کارآمد در سطح مزارع دارد.

هر چند که کارآیی آبیاری در اراضی فاریاب کشور حدود ۳۰ درصد عنوان می‌شود ولی مطالعات و بررسی‌ها نشان می‌دهند که این شاخص مهم آبیاری کمتر از میزان فوق می‌باشد. یک مطالعه موردی نشان داد که بازده کل آبیاری در برخی از شبکه‌های سنتی دشتهای خوزستان، تبریز و کرمانشاه بین ۱۳/۵ تا ۲۲ درصد در نوسان است (ابوالقاسمی، ۱۳۷۳). این روند متأسفانه در اراضی آبخور شبکه‌های مدرن آبیاری و زهکشی از شتاب بیشتری برخوردار است بطوری که در اکثر قریب به اتفاق موارد مصرف بی‌رویه و غیراصولی آب علاوه بر تلف کردن بخش عمده‌ای از آب استحصال شده، باعث شوری، قلیائیت و زهدار شدن

اراضی گشته و احداث طرحهای پرهزینه زهکشهای زیرزمینی را موجب گردیده است. مثلاً بازده کل آبیاری در اراضی یکپارچه و پراکنده شبکه آبیاری و زهکشی دز به ترتیب ۳۱ و ۲۱/۲ درصد و حجم آب تخلیه شده به زهکشها در این شبکه تا ۷۰ درصد نیز گزارش شده‌است در صورتی‌که این میزان براساس طراحی‌های اولیه مهندسان مشاور نباید از ۱۹ درصد تجاوز نماید (فاطمی دزفولی و همکاران، ۱۳۷۳).

شاخص مهم‌تر از کارآیی آبیاری در اراضی زراعی کشور کارآیی مصرف آب است. متأسفانه هیچگونه اطلاعاتی از کارآیی مصرف آب در اراضی زراعی کشور موجود نیست (علیزاده، ۱۳۷۳) زیرا تلاشها تاکنون صرف بالابردن تولید در هر واحد اراضی قابل کشت شده، نه هر واحد آب مصرف شده. درصورتی که در شرایط محدودبودن منابع آب و زیادی اراضی قابل کشت (مثل شرایط ایران) هدف بایستی بالابردن تولید به ازای هر واحد آب مصرفی و استفاده بهینه از منابع آب محدود باشد. نظر به اهمیت کارآیی مصرف آب در تولید محصولات کشاورزی ابتدا آن را به صورت مشروح موردبحث قرارمی‌دهیم.

۲ـ تعریف و مفهوم کارآیی مصرف آب:

کارآیی مصرف آب (WUE)[1] برای نشان‌دادن رابطه کمی میان رشد گیاه و مصرف آب به کار برده‌شده و به صورت "مقدار ماده گیاهی تولیدشده به ازای واحد آب مصرف شده" تعریف می‌گردد. متخصصان پیشرو کارآیی مصرف آب را معادل با

1 - Water Use Efficiency

نیازآبی گیاه می‌دانستند. در همین راستا بریگز و شانتز (Briggs & Shantz, 1927) آب مورد نیاز حدود یکصد و پنجاه نوع گیاه را در اکران (Akron ناحیه‌ای در شرق کلرادو) تعیین نمودند. آب مصرف شده به ازای هر گرم ماده خشک تولیدشده بسیار متغیر بوده و از ۲۱۶ گرم برای ارزن تا ۱۳۱ گرم برای نوعی علف محلی به اسم فرانسریا (Franseria) نوسان داشت. هدف از این تحقیق در آن زمان بررسی این فرضیه بود که نیاز آبی کم برای گیاهان به معنی مقاومت بالا در برابر خشکی می‌باشد که امروزه نادرستی آن محرز شده‌است. نکته جالبی که این تحقیق نشان داد این واقعیت بود که برای واحد ماده خشک تولیدشده نمی‌توان دقیقاً مقدار مشخصی آب قائل شد، زیرا آن به عوامل متعددی وابسته است. به همین خاطر نسبت عملکرد به مقدار آب مصرف شده که گمان می‌رفت معادل با نیاز آبی گیاه باشد ابتدا به نسبت تعرق[1] و سپس به کارآیی مصرف آب تغییر نام داد.

کارآیی مصرف آب را می‌توان به طرق مختلفی تعریف نمود. اگرونومیست‌ها آن را نسبت ماده خشک تولیدشده به ازای واحد آب مصرف شده تعریف می‌کنند. به این طرز تلقی از کارآیی مصرف آب اصطلاحاً کارآیی مصرف آب واقعی[2] گفته می‌شود که نشان می‌دهد به ازای هر واحد ماده خشک تولیدشده واقعاً چقدر آب مصرف شده است.

از آنجاکه اساس تولید و مصرف در گیاهان فتوسنتز و تعرق می‌باشد به همین خاطر فیزیولوژیست‌های گیاهی کارآیی مصرف آب را "نسبت فتوسنتز به تعرق به ازای واحد سطح برگ یا واحد بوته گیاه در یک دوره زمانی معین" تعریف می‌کنند. چون

1 - Transpiration Ratio

2 - Actual Water Use Efficiency

فتوسنتز اساس تولید در گیاهان و تعرق اساس مصرف آب می‌باشد به همین خاطر به این نوع برداشت از کارآیی مصرف آب اصطلاحاً کارآیی مصرف آب پایه[۱] گفته می‌شود.

قسمت‌های خارجی برگ گیاه با مواد مومی یا چربی از قبیل کوتین (Cutin)، سابرین (Suberin) و یا با بافت‌های کرکی پوشیده شده، به طوری که باعث می‌گردند گیاه آب خود را حفظ نموده و از پژمردگی و مرگ محفوظ بماند. برروی کوتیکول برگ روزنه‌های متعددی وجوددارد که توسط سلول‌های محافظ[۲] احاطه می‌شوند. به مجموعه این دو استوماتا[۳] گفته می‌شود. پوشیده‌شدن سطح برگ با کوتین که تقریباً غیرقابل نفوذ به آب است، تعرق را منحصر و محدود به روزنه‌های برگ می‌کند. روزنه‌ها مثل دریچه اطمینان عمل می‌کنند به طوری که گیاه با باز و بسته کردن آنها حالت تعادل بین تعرق و جذب آب ایجاد می‌کند و این برای ادامه حیات آن ضروری است. در مورد مقاومت‌هایی که در مسیر حرکت بخار آب و دی‌اکسیدکربن از سطح سلول‌های برگ و هوا و بالعکس وجوددارند، گفتنی است که روی سطح برگ لایه نازکی از هوا (به ضخامت چند میلی‌متر) وجوددارد که ساکن بوده و عبور مولکول‌های بخار آب و گازکربنیک از آن به صورت پخشیدگی[۴] می‌باشد، در نتیجه این لایه در مقابل حرکت مولکول‌های بخار آب و گازکربنیک مقاومتی ایجاد می‌نماید که آن را به ترتیب با r_a و r'_a نمایش می‌دهند.

مقاومت دیگر در مسیر حرکت مولکول‌های بخار آب و گازکربنیک بین هوا و سلول‌های برگ، به علت وجود روزنه‌های برگ می‌باشد که قطرشان از چند میکرون

---

1 - Basic Water use Efficiency
2 - Gaurd Cells
3 - Stomata
4 - Diffusion

تجاوز نمی‌کند. همچنان که گفته شد حرکت مولکول‌های بخار آب و گازکربنیک از سطح سلول‌های پارانشیمی به فضای زیرروزنه‌ها و همچنین از خود روزنه‌ها به صورت پخشیدگی ملکولی است و مانع یا مقاومتی که سرراه حرکت آنها ایجاد می‌شود با r_s و r_s نمایش داده می‌شود (لازم به ذکر است که مقاومت‌های r_a و r_s و همچنین r'_a و r'_s به صورت سری به هم متصل می‌شوند). آب غیر از مسیر روزنه‌ها می‌تواند از مسیر دیگری نیز به خارج راه پیدا کند و این مسیر از طریق سلول‌های پارانشیمی و سلول‌های رویی برگ و لایه کوتیکول می‌باشد. اما از آنجا که نفوذپذیری کوتیکول نسبت به آب بسیار پایین است بنابراین مقاومت موجود در این مسیر زیاد بوده و تعرقی که از آن صورت می‌گیرد در مقایسه با تعرق روزنه‌ها بسیار ناچیز می‌باشد.

با اینکه سازوکار حرکت مولکول‌های بخار آب و گازکربنیک بین هوا و سلول‌های برگ به صورت پخشیدگی مولکولی می‌باشد ولی دوفرق اساسی بین آنها وجوددارد: نخست اینکه پخشیدگی مولکول‌های بخار آب ۱/۵۶ برابر بیشتر از پخشیدگی مولکول‌های گازکربنیک می‌باشد. (یامقاومت برای پخشیدگی در مورد گازکربنیک ۱/۵۶ برابر بیشتر از مولکول‌های بخارآب می‌باشد). علت این امر در این حقیقت نهفته است که سرعت پخشیدگی گازها با ریشه جرم ملکولی آنها نسبت عکس دارد و هرچه جرم مولکولی گازها بیشتر گردد سرعت پخشیدگی آنها نیز کاهش خواهدیافت. دوم مقاومت مزوفیلی برگ برای پخشیدگی گازکربنیک بین دیواره سلولی و کلروپلاست‌ها بسیار زیاد می‌باشد، در صورتی که مقدار این مقاومت برای پخشیدگی ملکول‌های بخار آب جزئی بوده و از آن می‌توان صرف نظر کرد.

با توجه به مطالب فوق معادله ریاضی کارآئی مصرف آب به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$WUE = \frac{0.64\ \Delta C_{co2}\ (r_a + r_s)}{\Delta C_{wv}\ (r_a + r_s + r_m)} \qquad (۱)$$

که در آن:

ΔC_{wv} = گرادیان غلظت بخار آب بین سلول‌های برگ و اتمسفر

ΔC_{co2} = گرادیان غلظت گازکربنیک بین کلروپلاست‌ها و اتمسفر

r_a = مقاومت لایه مرزی برای پخشیدگی بخار آب (برحسب ثانیه بر سانتی‌متر)

r_s = مقاومت برگ برای پخشیدگی بخار آب (برحسب ثانیه بر سانتی‌متر)

r'_a = مقاومت لایه مرزی برای پخشیدگی گازکربنیک (برحسب ثانیه بر سانتی‌متر)

r'_s = مقاومت برگ برای پخشیدگی گازکربنیک (برحسب ثانیه بر سانتی‌متر)

r_m = مقاومت مزوفیلی برگ که شامل تمام مقاومت‌های موجود به پخشیدگی گازکربنیک بین کلروپلاست‌ها و هوای بین سلولی است (برحسب ثانیه بر سانتی‌متر)

اهمیت معادله (۱) در این است که اثر توامان عوامل محیطی و گیاهی را برروی کارآیی مصرف آب نشان می‌دهد و با استفاده از آن می‌توان عوامل مؤثر در بهینه‌سازی کارآیی مصرف آب را تجزیه و تحلیل فیزیکی کرد.

۳ـ عوامل مؤثر بر کارآیی مصرف آب:

عوامل مؤثر بر کارآیی مصرف آب به سه دسته عوامل محیطی، عوامل گیاهی و عوامل مدیریتی تقسیم می‌شوند:

۳ ـ ۱ ـ عوامل محیطی مؤثر بر کارآیی مصرف آب:

معادله (۱) نشان می‌دهد که کارآیی مصرف آب اساساً به سه عامل گرادیان غلظت بخار آب، گرادیان غلظت گازکربنیک و مقاومت‌های مسیر وابسته است. در این بین،

رطوبت نسبی هوا مؤثرترین عامل در کارآیی مصرف آب می‌باشد، بدین معنی که با کاهش آن گرادیان غلظت بخار آب بین سلول‌های برگ و اتمسفر بیشتر شده که نتیجه آن افزایش تعرق می‌باشد در صورتی که فتوسنتز بدون تغییر باقی‌می‌ماند مگر در مواردی که روزنه‌ها به خاطر کاهش پتانسیل آب یا اثر مستقیم رطوبت هوا بر آنها مسدود شوند. نتیجه این اتفاقات کاهش کارآیی مصرف آب می‌باشد. نتیجه ملموس و کاربردی که می‌توان از این یافته علمی گرفت این است که اساساً کارآیی مصرف آب گیاهان در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمتر از مناطق مرطوب می‌باشد و هرگونه کوشش برای رساندن WUE گیاهان زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به سطح WUE مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب عملاً بی‌ثمر خواهدبود.

معادله (۱) نشان می‌دهد که افزایش غلظت گازکربنیک هوا باعث افزایش کارآیی مصرف آب می‌گردد. با اینکه گزارش‌های متعددی مبنی بر افزایش غلظت گازکربنیک هوا در سطح جهانی طی دهه‌های اخیر موجود می‌باشد ولی امکان افزایش آن در محصولات زراعی بسیاراندک بوده و می‌توان فشار جزئی آن را برابر با ۰/۰۳۳ اتمسفر (P_{Co2} = 0.033 At) درنظر گرفت. در مورد غلظت گازکربنیک در فضای بین سلولی برگ گیاهان بین دانشمندان اتفاق نظر وجودندارد. با اینکه عده‌ای از متخصصان غلظت آن را در فضای بین سلولی برگ گیاهان صفر درنظر گرفته‌اند ولی عدهٔ دیگر معتقدند که غلظت آن حداقل برای گیاهان زراعی با نظام فتوسنتزی C3[1] بایستی بیشتر از ۲۰۰ppm باشد تا تکافوی واکنش‌های

۱ – گیاهان زراعی با نظام فتوسنتزی C_3 گیاهانی هستند که اولین ترکیب آلی ساخته شده در چرخه کالوین آنها، در طی فرآیند فتوسنتز، یک ترکیب آلی ۳ کربنه به نام اسید ۳ ـ فسفوگلیسریک می‌باشد.

کربوکسیلاسیون مشاهده شده در این گیاهان را بنماید (Kramer, 1983)

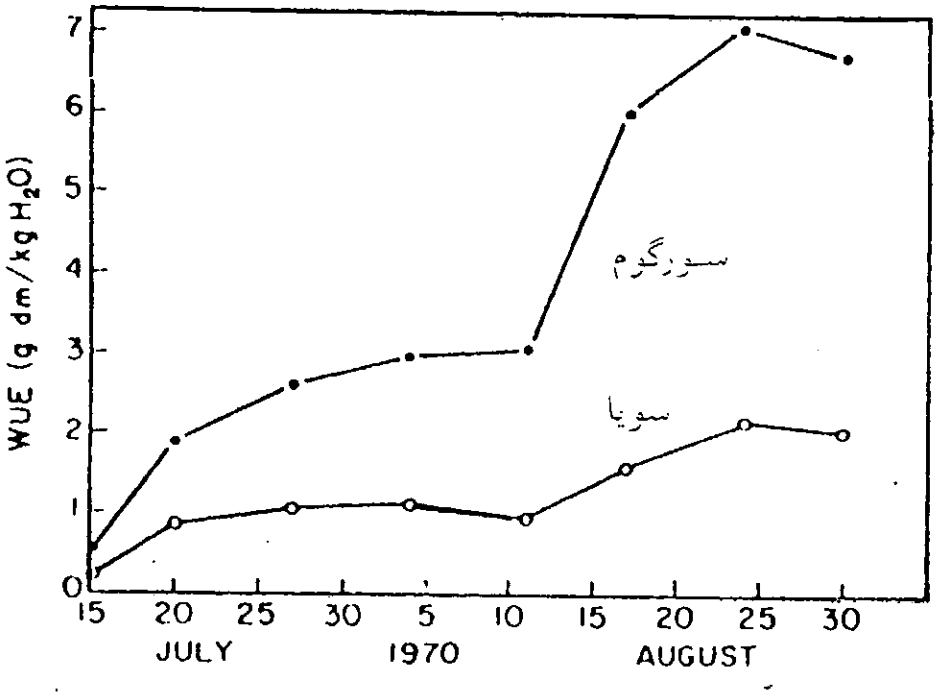
غلظت گازکربنیک در فضای بین سلولی گیاهان تابعی از نوع گیاه بوده و در هرحال برای گیاهان C3بیشتر از گیاهان C4[1] می‌باشد. معادله (۵) پیش‌بینی می‌نماید که در شرایط اقلیمی مشابه کارآیی مصرف آب گیاهان C4 بایستی از کارآیی مصرف آب گیاهان C3 بیشتر باشد. آزمایش‌های مزرعه‌ای متعددی نیز این پیش‌بینی را تأیید می‌نمایند. بریگز و شانتز گزارش کرده‌اند که کارآیی مصرف آب ذرت (گیاهی با نظام فتوسنتزی C4) حدود ۲/۵ برابر یونجه (گیاهی با نظام فتوسنتزی C3) می‌باشد. کارآیی مصرف آب سورگوم (گیاه C4) نیز حدود سه برابر سویا (گیاه C3) می‌باشد. این مطلب هم در مورد عملکرد کل و هم در مورد عملکرد دانه به‌ازای هر واحد آب تلف شده در اثر تبخیر و تعرق مصداق دارد(شکل ـ ۱ را ببینید).

علاوه بر گرادیان غلظت گازکربنیک دلایل دیگری هم در مورد بالابودن WUE گیاهان C4 نسبت به گیاهان C3 ارائه شده‌است. ترکیبات آلی حاصل از فرآیند فتوسنتز در ذرت و سورگوم (گیاهان C4) اغلب از نوع هیدرات‌های کربن می‌باشند، در صورتی که ترکیبات نهایی حاصل از فرآیند فتوسنتز در گیاهان C3(نظیر یونجه و سویا) اغلب پروتئین یا روغن می‌باشد که برای سنتز آنها مقدار آب بیشتری لازم است. اصولاً هرچه ترکیبات آلی حاصل از فرآیند فتوسنتز از نظر ساختمانی پیچیده‌تر باشد به همان اندازه مصرف آب توسط گیاه بالارفته و WUE کاهش خواهدیافت. ظاهراً گیاهان C4 کنترل روزنه‌ای بهتری داشته و آب خاک را به تأنی و

---

۱ – گیاهان زراعی با نظام فتوسنتزی C_4 گیاهانی هستند که اولین ترکیب آلی ساخته شده در چرخه کالوین آنها، در طی فرآیند فتوسنتز، یک ترکیب آلی ۴ کربنه به نام اسید اگزوالوستیک می‌باشد.

آهستگی تخلیه نموده به طوری که دارای کارآیی تعرق بهتری می‌باشند.



شکل ۱ ـ اختلاف در کارآیی مصرف آب سویا و سورگوم

دلیل دیگر بالابودن WUE گیاهان C4 نسبت به گیاهان C3 به نسبت مقاومت مزوفیلی به مقاومت روزنه‌ای برمی‌گردد که در بخش ۳ـ۲ بحث خواهدشد.

از دیگر عوامل محیطی مؤثر بر کارآیی مصرف آب می‌توان درجه حرارت و تشعشع را نام برد. درجه حرارت باعث بالارفتن غلظت ملکول‌های بخار آب در فضای سلولی برگ‌ها شده و تشعشع نیز باعث بازشدن روزنه‌ها می‌گردد که هر دو باعث افزایش تعرق و کاهش کارآیی مصرف آب می‌گردند.

عامل محیطی دیگر باد می‌باشد که با حرکت در لایه مرزی باعث کاهش r_a شده و تعرق را زیاد و کارآیی مصرف آب را کاهش می‌دهد.

۳ ـ ۲ ـ عوامل گیاهی مؤثر بر کارآیی مصرف آب:

عمده‌ترین عامل گیاهی مؤثر بر کارآیی مصرف آب اختلافات مربوط به نسبت مقاومت مزوفیلی به مقاومت روزنه‌ای است. گیاهان از نظر استفاده از گازکربنیک به سه دسته گیاهان سه کربنه، گیاهان چهارکربنه و گیاهان CAM[۱] تقسیم می‌شوند. در گیاهان سه کربنه علاوه بر گرادیان غلظت گازکربنیک، بالابودن مقاومت مزوفیلی و پایین‌بودن مقاومت روزنه‌ای به ترتیب باعث کاهش فتوسنتز و افزایش تعرق می‌گردد در نتیجه این گیاهان دارای کمترین کارآیی مصرف آب می‌باشند. در حالی که در گیاهان چهارکربنه مقاومت مزوفیلی (r_m) کم و مقاومت روزنه‌ای (r_s) زیاد می‌باشد که نتیجه آن افزایش فتوسنتز و کاهش تعرق و بالارفتن کارآیی مصرف آب می‌باشد. گیاهان CAM دارای این قابلیت هستند که در طول شب روزنه‌های خود را بازگذاشته و کارآیی مصرف آب را به شدت بالا برند. به طوری که کارآیی مصرف آب گیاهان CAM به چندین برابر WUE گیاهان C3 نیز می‌تواند برسد. نکته‌ای که بایستی به آن توجه داشت این است که بالابودن کارآیی مصرف آب در گیاهان CAM به معنی بالابودن تولید در آنها نیست زیرا این گیاهان محدودیت استفاده از Co2 دارند و اصولاً تولید در آنها بسیار کم است. ولی همین تولید کم به آب بسیار کم نیاز دارد که نتیجه آن افزایش WUE است.

نکته جالبی که از معادله (۱) می‌توان استنتاج کرد پاسخ به این سؤال قدیمی است که آیا با تنش رطوبتی کارآیی مصرف آب نیز کاهش می‌یابد یا نه؟ در پاسخ به این سؤال می‌توان

---

۱ – Crassulacean Acid Metabolism ـ گیاهان دارای متابولیسم کراسولایی (CAM) گیاهانی هستند که در آنها CO2 در طول شب به اسیدهای آلی تبدیل شده و pH شیره سلولی کاهش می‌یابد. در طول روز و با حضور نور اسیدهای آلی به هیدرات‌های کربن تبدیل شده و pH شیره سلولی افزایش می‌یابد. از مهمترین تیره‌های گیاهان CAM می‌توان به Orchidaceae, Agavaceae, Cacctacea اشاره کرد.

گفت که مقاومت مزوفیلی برگ بسته به نوع گیاه و ساختمان درونی برگ از گونه‌ی به گونه دیگر فرق می‌کند و اگر کمیت آن در مقایسه با $r_a + r_s$ زیاد باشد در این صورت می‌توان از $r_a + r_s$ در مقایسه با آن صرف‌نظر کرد. در چنین حالتی هرگونه تنش رطوبتی باعث افزایش مقاومت روزنه‌ای شده و کارآیی مصرف آب را بهبود خواهد بخشید. در چنین مواقعی تلفات آب در اثر تعرق بیشتر از فتوسنتز کاهش یافته که نتیجه آن بالا رفتن کارآیی مصرف آب می‌باشد. اگر مقاومت مزوفیلی در مقایسه با r_a+r_s کوچک باشد در این صورت نسبت مقاومت‌ها ثابت مانده و تنش رطوبتی اثری بر کارآیی مصرف آب نخواهد داشت.

مطالعات مزرعه‌ای بی‌شماری توسط محققان مختلف درستی این نظریه را تأیید کرده و شواهد نشان می‌دهد که به طور کلی تنش رطوبتی کارآیی مصرف آب را افزایش داده و یا اثری بر آن ندارد (صادق‌زاده، ۱۳۷۷). با وجود این ناگفته نماند که شواهدی نیز در مورد کاهش کارآیی مصرف آب در اثر تنش رطوبتی مخصوصاً در گیاهان C4 وجود دارد.(Fisher and Tuner, 1978)

از دیگر عوامل گیاهی مؤثر بر کارآیی مصرف آب فضای آسمانه گیاهی[1] است که میزان نفوذ نور به قسمت‌های تحتانی پوشش گیاهی و به تبع آن شدت فتوسنتز را کنترل می‌کند. در گیاهان با اشباع نوری پایین نفوذ نور به قسمت‌های تحتانی پوشش گیاهی بیشتر شده، در نتیجه فتوسنتز در واحد سطح افزایش می‌یابد که نتیجه آن بالا رفتن کارآیی مصرف آب می‌باشد.

۳ ـ ۳ ـ عوامل مدیریتی مؤثر بر کارآیی مصرف آب:

مدیریت خاک، آب و گیاه به دلیل تأثیر عمیقی که بر شدت تبخیر تعرق (ET) دارد

1 - Plant Canopy

عامل مهمی در بهینه‌سازی کارآیی مصرف آب می‌باشد. تبخیرتعرق (ET)[1] از دو مؤلفه تعرق (T) و تبخیر (E) تشکیل یافته که دومی نقشی در تولید نداشته و هرچه بیشتر کاهش یابد به همان نسبت باعث بهبود و افزایش WUE خواهدشد. گزارش‌های متعددی از نقاط مختلف دنیا وجوددارد و در آنها تأکید شده که تبخیر از سطح خاک (E) قسمت قابل ملاحظه‌ای از آب مصرفی گیاهان را تشکیل داده، بدین طریق قسمت اعظم آب منطقه ریشه را تلف می‌کند. براساس گزارش هاشمی دزفولی کوپر و همکاران (Cooper et al, 1987) دریافتند که بالغ بر ۳۰ تا ۳۵ درصد از آب مصرفی جو در شمال سوریه به صورت تبخیر از سطح خاک تلف شده‌است. هامبلین و همکاران (Hamblin et al, 1990) در تحقیق مشابهی اظهار کرده‌اند که حدود ۳۴ تا ۶۱ درصد از آب مصرفی گندم در استرالیای غربی را تبخیر از سطح خاک تشکیل داده‌است. تحقیقات متعددی که در نقاط مختلف دنیا برروی گیاهان زراعی مختلف انجام گرفته همگی مؤید حقیقت فوق است. این مقدار قابل توجه تلفات آب، بسیاری از دانشمندان را بر آن داشت تا پیشنهاد نمایند هر مدیریتی که تبخیر از سطح خاک راکاهش دهد عملکرد و کارآیی مصرف آب را بالا خواهدبرد. روش‌های متعددی برای کاهش تبخیر از سطح خاک وجود دارند که عمده‌ترین آنها عبارتند از:

استفاده از بقایای گیاهی (مالچ) در سطح مزرعه، بهبود فواصل کاشت و تراکم بوته، کنترل عمق و تناوب آب آبیاری، کنترل علف‌های هرز و کشت مخلوط. در بین روش‌های آبیاری، آبیاری زیرزمینی بالاترین کارآیی مصرف آب را دارد زیرا در این شیوه تبخیر از سطح خاک به حداقل می‌رسد.

علاوه بر مدیریت آب، مدیریت کود نیز تأثیر شایانی در افزایش کارآیی مصرف

1 - Evapotranspiration

آب دارد. جدول (۱) که از تحقیقات شپرد و همکاران (Shepherd et al, 1987) اقتباس و توسط هاشمی دزفولی گزارش شده اثرات کود بر روی WUE در شمال سوریه را نشان می‌دهد. تحقیقات چندساله در نقاط مختلف سوریه نشان داده که حتی در مناطقی که با محدودیت آب روبرو هستند استفاده از کودهای شیمیایی مخصوصاً P و N (N به ویژه در مناطق مرطوب‌تر) منجر به افزایش WUE گشته است. نکته جالبی که از این جدول استنتاج می‌شود این است که مصرف کود بدون بالابردن مصرف آب، رشد گیاه و به تبع آن کارآیی مصرف آب را افزایش داده‌است. البته در مناطق پرباران استفاده از کود مصرف آب توسط گیاه را نیز بالا برده‌است.

جدول شماره ۱ ـ تأثیر کود بر وزن اندام‌های هوایی، مصرف آب و کارآیی مصرف آب در گیاه جو در شمال سوریه

فصل زراعی	منطقه	کود	وزن اندام‌های هوایی (t ha-1) (tha^{-1})	مصرف آب (mm)	کارآیی مصرف آب Kg $ha^{-1}mm^{-1}$
۱۹۸۱-۸۲	Jindiress	+	۸/۶۶	۳۱۴	۲۷/۶
		-	۴/۳۵	۳۲۲	۱۳/۵
	Breda	+	۶/۱۸	۲۳۲	۲۶/۶
		-	۳/۸۹	۲۳۲	۱۶/۸
	Khamasser	+	۲/۶۴	۲۰۹	۱۲/۶
		-	۱/۳۲	۲۰۸	۶/۳
۱۹۸۲-۸۳	Jindiress	+	۱۰/۲۴	۳۳۲	۳۰/۸
		-	۶/۹۲	۳۰۸	۲۲/۵
	Breda	+	۴/۵۴	۲۳۵	۱۹/۳
		-	۲/۶۲	۲۲۸	۱۱/۵
	Khamasser	+	۴/۸۸	۲۲۷	۲۱/۵
		-	۲/۸۷	۲۲۴	۱۲/۸

(اقتباس از هاشمی دزفولی، ۱۳۷۳)

تأثیر عمده کودها در رشد و توسعه سریع اندام‌های هوایی و افزایش پنجه‌زنی می‌باشد که باعث به‌وجود آمدن پوشش گیاهی متراکم می‌گردد (Bolton, 1980).

پوشش گیاهی گسترده از یک طرف شاخص سطح برگ[1] و در نتیجه انرژی تشعشعی جذبی را بالا برده که منجر به افزایش فتوسنتز می‌گردد و از طرف دیگر با سایه‌اندازی روی سطح خاک از مقدار تبخیر آب می‌کاهد که نتیجه آن افزایش کارآیی مصرف آب می‌باشد.

جدول شماره ۲ ـ اثرات کود ازته و آبیاری تکمیلی بر عملکرد دانه و کارآیی مصرف آب سورگوم

تیمار	میزان کود ازته (tha^{-1})	عملکرد دانه (tha^{-1})	مصرف آب (m-m)	کارآیی مصرف آب ($kgha^{-1}mm^{-1}$)
بدون آبیاری	۰	۳/۳	۴۰۵	۷/۹۵
(فقط آب باران)	۲۵	۳/۵	۴۴۰	۷/۹۵
	۹۰	۴/۰	۴۴۰	۹/۱۰
۵۰ درصد E به‌طور هفتگی	۰	۴/۱	۵۵۰	۷/۴۵
جبران شده	۲۵	۵/۵	۵۵۰	۱۰/۰۰
(آبیاری تکمیلی)	۹۰	۶/۳	۵۵۰	۱۱/۴۵
۱۰۰ درصد E به‌طور هفتگی	۰	۴/۲	۷۰۰	۶/۰۰
جبران شده	۲۵	۶/۰	۷۰۰	۸/۵۷
(آبیاری تکمیلی)	۹۰	۷/۸	۷۰۰	۱۱/۱۴

(اقتباس توسط هاشمی دزفولی)

مدیریت توأمان کود و آبیاری حکایت از یک رابطه متقابل پیچیده دارد. جدول (۲) اثرات کود و آبیاری تکمیلی[2] برروی عملکرد دانه و کارآیی مصرف آب

1 - Leaf Area Index

2 - Supplemental Irrigation

سورگوم را نشان می‌دهد. همچنانکه ملاحظه می‌شود با افزایش آبیاری (بدون مصرف کود) با اینکه عملکرد دانه بالارفته است ولی کارآیی مصرف آب کاهش یافته‌است. از طرف دیگر در تمامی تیمارها با کوددهی عملکرد دانه افزایش یافته و کارآیی مصرف آب نیز ابتدا افزایش و سپس کاهش یافته‌است که نشان از یک رابطه متقابل پیچیده بین کود و آبیاری دارد. نکته مهمی که بایستی در تولید محصولات زراعی در نظر داشت این حقیقت است که حداکثر عملکرد همواره عملکرد اقتصادی نبوده و الزاماً به معنای حداکثر کارآیی مصرف آب نیست زیرا در خاک‌هایی که از قدرت حاصلخیزی و باروری پایین برخوردارند آبیاری ممکن است هدررفتن آب باشد. همچنین در چنین حالتی سطح خاک دائماً مرطوب شده و تبخیر از سطح نیز افزایش می‌یابد.

۴ـ راهکارهای بهینه‌سازی کارآیی مصرف آب:

عمده‌ترین تدبیرهای بهینه‌سازی کارآیی مصرف آب اصلاح ژنتیکی گیاهان، استفاده از بازدارنده‌های تعرق[1] و گزینه‌های مدیریتی می‌باشد. در حالی‌که گزینه‌های مدیریتی عمدتاً به کاهش تبخیر آب از سطح خاک می‌پردازد، بازدارنده‌های تعرق باعث انسداد موقت روزنه‌ها و کاهش تعرق می‌گردند و هدف اصلی از اصلاح ژنتیکی گیاهان نیز تولید و پرورش گیاهانی با مقاومت به خشکی و WUE بالا می‌باشد. گزینه‌های مدیریتی به عنوان پیشنهادهای اجرایی در بهبود کارآیی مصرف آب بعداً بحث خواهد شد.

---

1 - Antitranspirants

۴ ـ ۱ ـ اصلاح ژنتیکی گیاهان:

دراصلاح ژنتیکی گیاهان به‌منظور بهبود کارآیی مصرف آب، تعدادزیادی از گونه‌های گیاهی تحت تنش رطوبتی موردمطالعه قرار می‌گیرند. ارقامی که عملکرد در واحد سطح (یا واحد بوته) و WUE بالائی دارند را انتخاب می‌کنند و آن دسته از خصوصیات ساختمانی و فرآیندهائی که باعث بهبود WUE در آنها شده‌است را مطالعه کرده و پس از تعیین و شناسایی آنها، این صفات را به عنوان صفات غالب به گیاهان دیگر انتقال می‌دهند.

در دهه‌های گذشته دانشمندان ژنتیک گیاهی بیشتر به دنبال صفات و خصوصیاتی از گیاه بودند که به نحوی با مقاومت به خشکی مرتبط بودند، ولی مقاومت به خشکی طیف وسیعی از صفات را شامل می‌شود و به نظر می‌رسد برای برنامه اصلاح ژنتیکی چندان مناسب نباشد(صادق‌زاده، ۱۳۷۷). در علم ژنتیک امروزه با استفاده از ابزار مهندسی (مهندسی ژنتیک) دنبال آن دسته از خواص مورفولوژیکی (از قبیل سیستم ریشه‌ای عمیق، کوتیکول ضخیم و ...) و فیزیولوژیکی (تنظیم اسموتیکی، استوماتای حساس و ...) هستند که به نحو مؤثری بر عملکرد تأثیر می‌گذارند.

یکی از تکنیک‌های کارآمد در اصلاح ژنتیکی گیاهان به منظور بالابردن کارآیی مصرف آب استفاده از تکنیک تبعیض ایزوتوپ کربن[۱] می‌باشد. کربن موجود در لیتوسفر و اتمسفر کره زمین دارای دو نوع ایزوتوپ C_6^{12} و C_6^{13} می‌باشد بطوری که حدود ۱/۱ درصد از آنها به صورت کربن و بقیه به صورت C_6^{12} می‌باشد. بعضی از گیاهان C3 در هنگام تثبیت[۲] کربن در طی فرآیند فتوسنتز با استفاده از آنزیم روبیسکو[۳] بر علیه C_6^{13} تبعیض قائل می‌شوند بطوری نسبت C_6^{13} موجود در

1 - Carbon Isotop Discrimination
2 - Assimilation
3 - Rubisco

بافت‌های گیاهان به C_6^{13} موجود در طبیعت کمتر از واحد می‌گردد. دلیل این امر ممکن است به خاطر کوچک بودن ضریب انتشار C_6^{13} در مقایسه با C_6^{12} باشد. درجه تبعیض (طبیعت $^{13}Co_2$ / (برگ $^{13}Co_2$ = Δ) در گونه‌های مختلف C3 متفاوت بوده و گونه‌هایی که از درجه تبعیض بیشتری (Δ کوچکتر) برخوردارند WUE بالایی دارند. درستی این فرضیه در آزمایش‌های متعددی که در آنها شرایط محیطی تحت کنترل بوده‌اند تأیید شده و تحقیقاتی که در این مورد انجام شده‌اند همگی نشان داده‌اند که همبستگی منفی معنی‌داری بین Δ و WUE وجوددارد. بنابراین با استفاده از این تکنیک می‌توان گونه‌هایی که دارای Δ کوچکتر و WUE بالاتر می‌باشند را انتخاب نمود(صادق‌زاده، ۱۳۷۷).

۴ ـ ۲ ـ استفاده از بازدارنده‌های تعرق برای افزایش کارآیی مصرف آب:

حالت خاصی از تدبیرهای مدیریتی استفاده از بازدارنده‌های تعرق است. این مواد باعث انسداد موقت روزنه‌ها و کاهش تعرق می‌گردند. سابقه استفاده از این اثر بازدارندگی به حدود ۳۰۰ سال قبل از میلاد مسیح برمی‌گردد. بشر از سالیان قبل هنگام انتقال گیاهان از یک منطقه به منطقه دیگر سطح آن را با پوشش مناسبی می‌پوشاند تا تلفات آب به حداقل برسد. این فن باعث حفظ فشارتورمی [1] تا توسعه مجدد سیستم ریشه‌ای می‌گردد و این باعث ادامه حیات گیاه با حداقل آسیب به مجموعه حیاتی و راه‌کارهای رشد و نمو می‌گردد.

در مدیریت استفاده از بازدارنده‌های تعرق دو گزینه مطرح است:

1 - Turgur Pressure

۱ ـ استفاده از مواد پوشاننده سطح خارجی برگها.

۲ ـ استفاده از مواد شیمیائی بازدارنده تعرق.

از آنجاکه نفوذ گازکربنیک به داخل سلول‌های برگ از محل روزنه‌ها صورت می‌گیرد. بنابراین انسداد موقت روزنه‌ها همزمان با کاهش تعرق، فتوسنتز را نیز می‌کاهد. ولی از آنجاکه مقاومت مزوفیلی برگ نسبت به ورود گازکربنیک به داخل سلول‌های برگ در مقایسه با خروج ملکول‌های بخار آب از فضای بین‌سلولی بیشتر می‌باشد. بنابراین ۵۰ درصد افزایش در مقاومت لایه مرزی و مقاومت سطح برگ ($r_a + r_s$) باعث کاهش ۵۰ درصدی در تعرق می‌گردد ولی فتوسنتز تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند در نتیجه کارآیی مصرف آب ۵۰درصد افزایش می‌یابد. اگر $r_m = r_a + r_s$ باشد در این صورت افزایش ۵۰ درصدی $r_a + r_s$ باعث کاهش ۵۰ درصد تعرق و ۲۵ درصد فتوسنتز می‌گردد. تحقیقات زیادی توسط متخصصان مختلف صورت گرفته و همگی مؤید حقیقت فوق است. استفاده از فنیل مرکوریک استات تعرق را در کتان بیشتر از فتوسنتز کاهش داده‌است. مورد دیگر استفاده از اسید آبسزیک (ABA)[1] است که باعث انسداد موقت روزنه‌ها و کاهش شدت تعرق می‌گردد. نکته مهمی که در استفاده از مواد شیمیایی بازدارنده تعرق بایستی به آن توجه داشت این است که این ترکیبات اصولاً حاوی موادسمی می‌باشند و اثرات بازدارنده بر رشد و نمو گیاهان دارند (صادق‌زاده، ۱۳۷۷).

مواد پوشاننده اکثراً موادی از قبیل امولسیون‌های پلی‌وینیل، پلی‌اتیلن، شیره‌های گیاهی و الکل‌های سنگین (مثل هگزادکانول) می‌باشند. کارآیی این مواد در کاهش

1 - Abscisic Asid

تعرق بسته به نوع گیاه، مرحله رشد، شرایط جوی و زمان مصرف می‌باشد. گزارش‌های متعددی وجوددارد که استفاده از این مواد باعث افزایش اندازه میوه‌ها و بهبود کیفیت پس از برداشت آنها می‌گردد.

نکته مهمی که در استفاده از بازدارنده‌های تعرق بایستی به آن توجه داشت این است که جلوگیری از تعرق باعث بالارفتن درجه حرارت برگ شده و احتمالاً اثرات سوئی بر جذب و انتقال موادغذایی نیز داشته‌باشد.

۴ ـ ۳ ـ گزینه‌های مدیریتی جهت بهینه‌سازی کارآئی مصرف آب:

معادله (۱) را می‌توان به صورت زیر بسط داد:

$$WUE = \frac{T(N/T)}{E + D + I + T + R} \qquad (۲)$$

که در آن:

R رواناب حاصل از پساب‌های آبیاری، D زهاب، I آب ساختمانی گیاه (حدود یک درصد تعرق را شامل می‌شود) بوده و سایر علائم قبلاً تعریف شده‌اند. در آبیاری‌های سنجیده و مناسب مقادیر D و R ناچیز بوده و در نتیجه معادله (۲) را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$WUE = \frac{N/T}{I + E/T} \qquad (۳)$$

معادله(۳) از نظر مدیریت مزرعه بسیارمهم است زیرانشان می‌دهدتنها در صورتی که تبخیر ازسطح خاک از بین رودکارآیی مصرف آب‌برابر باکارآیی تعرق بوده و در غیر این صورت همواره‌از آن کمترخواهد بود.از مهم‌ترین روش‌هایی که بااستفاده از آنها می‌توان کارآیی مصرف آب را در سطح مزارع بهبود بخشید می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

ـ همچنان‌که گفته شد تبخیر از سطح خاک نقشی در رشد و عملکرد گیاه نداشته،

بنابراین بایستی حتی‌الامکان کاهش داده شود. کارآمدترین سیستم آبیاری در این مورد سیستم‌های آبیاری زیرزمینی[۱] و زیرسطحی[۲] می‌باشند که در آنها تبخیر از سطح خاک به حداقل ممکن می‌رسد. در سیستم‌های آبیاری سطحی با استفاده از مالچ‌های گیاهی و سنتتیک و مصرف موادشیمیائی، کنترل عمق و تناوب آبیاری، بهبود فواصل کاشت و تراکم گیاه می‌توان تبخیر از سطح خاک را مهار نمود.

ـ یک روش بسیار موثر در بهبود کارآیی مصرف آب در آبیاری شیاری (فارو یا شیاری یا جویچه‌ای) استفاده از آبیاری یک در میان شیارها به صورت متناوب یا فاروهای پشته پهن با دوردیف محصول می‌باشد. کارآیی این روش در صرفه‌جویی آب مصرفی در نقاط مختلف دنیا تأیید شده‌است. در این حالت میزان آب مصرف شده تا ۴۰ درصد نیز کاهش می‌یابد. با آب آبیاری صرفه‌جویی شده اراضی بیشتری را می‌توان به زیر کشت برد.

ـ در سیستم‌های آبیاری شیاری و نواری رواناب شیارها و نوارها نباید وارد زهکش‌ها شود بلکه در اراضی پایین دست بایستی مورداستفاده قرارگیرد. اگر ترکیب شیمیایی پسابهای آبیاری چندان مطلوب نباشد بایستی با تغییر الگوی کشت از آن استفاده بهینه کرد. در اراضی زراعی که دارای شبکه زهکش زیرزمینی می‌باشند با تغییر الگوی کشت از آب زهکش‌ها نیز بایستی جهت کشت و زرع استفاده کرد. اگر غلظت عناصر سنگین در زهاب خروجی بیشتر از حد بحرانی باشد بایستی از ورود آنها به رودخانه‌ها جلوگیری کرده و آنها را مستقیماً به حوضچه‌های تبخیر هدایت کرد.

ـ در سیستم‌های آبیاری نواری و شیاری به‌منظور تسریع در مرحلهٔ پیشروی و

---

1 - Subirrigation

2 - Sub - Surface Irrigation

کاهش نفوذ عمقی می‌توان ابتدا جریان بیشتری را واردکرده، سپس با رسیدن آب به انتهای نوار یا شیار جریان را کم یا حتی به نصف تقلیل داد(به این شیوه اصطلاحاً Cut-back گفته می‌شود). بدین منظور در آبیاری شیاری بهتر است ابتدا با دوسیفون آب را وارد شیار کرده سپس با رسیدن آب به انتهای شیار یکی از سیفون‌ها را برداشت. بایستی توجه داشت تا دبی ورودی به داخل شیار یا نوار بیشتر از دبی فرسایشی نباشد. با اعمال این شیوه راندمان الگوی توزیع بهتر شده، مقدار آب آبیاری کمتری مصرف شده و در ضمن از کمیت رواناب و نفوذ عمقی نیز کاسته می‌شود.

ـ روش دیگر در بهینه سازی کارآیی آبیاری در سیستم آبیاری شیاری استفاده از تکنیک LID[1] است. در این تکنیک طول جویچه به چهار قسمت تقسیم می‌شود. نصف آن آبیاری کامل شده، ربع سوم با رواناب حاصل آبیاری شده و ربع آخر آبیاری نمی‌گردد. مطالعات متعدد نشان داده که کارآئی مصرف آب در این شیوه نسبت به حالت معمولی بیشتر است.

ـ جهت افزایش راندمان آبیاری در سیستم آبیاری نواری بهتر است طول نوار را بیشتر از مقدار محاسبه شده انتخاب کنیم تا روانابی که قراراست از زمین خارج شود به قسمت اضافی نواریخته شود. اگر به خاطر محدودیت طول زمین امکان افزایش طول نوار میسر نباشد در این صورت بهتر است با مسدودکردن انتهای نوار دبی ورودی به آن را کم کنیم تا کارآیی آبیاری و کارآیی مصرف آب افزایش یابد.

ـ در سیستم‌های آبیاری کرتی و نواری بهتر است قسمت‌های اولیه نوار یا کرت کاملاً تسطیح شود تا آب به صورت یکنواخت در سطح زمین شود. سپس در فواصل

1 - Limited Irrigation Dryland

بعدی به آنها شیب مناسب داده شود. این تکنیک باعث بهبود راندمان الگوی توزیع[1] و کارائی کل آبیاری می‌گردد.

ـ در خاک‌های رسی بایستی شیارها کم عمق و عریض ساخته شوند تا سطح تماس آب با خاک بیشتر شده و سریعتر جذب شود در غیر این صورت آب قبل از اینکه جذب شود سریعاً به انتهای شیار خواهد رسید. در چنین شرایطی ممکن است بذرهایی که در بالای پشته‌ها قرارگرفته‌اند جوانه‌نزده و عملکرد به شدت کاهش یابد. در خاک های سبک بافت بایستی شیارها عمیق و باریک ساخته شوند تا نفوذ عمقی کم شده و آب بتواند بدون تلفات زیاد به انتهای شیار برسد. گزینه دیگر برای کمک به جوانه‌زدن بذر در بالای پشته‌ها این است که ابتدا پشته‌ها کاملاً مرطوب شده یا شیارها کم عمق ساخته شوند. در طول فصل رشد و همزمان با گسترش سیستم ریشه‌ای، شیارها نیز عمیق شده تا میزان نفوذ آب نیز بیشتر گردد. نکته دیگر این که در خاک‌های سبک بافت چون حرکت جانبی آب در خاک کمتر است بایستی شیارها نزدیک به هم احداث شوند (اگر فاصله شیارها ۰/۵ متر انتخاب شود بهتر است).

ـ در شرایطی که عمق خاک زراعی کم بوده و امکان تسطیح اراضی وجودنداشته باشد بهتر است از نوارهای شیبدار استفاده شود. استفاده از این روش برای اراضی که نفوذپذیری کم تا متوسط داشته باشند توصیه می‌شود اگر نفوذپذیری خاک بسیار پایین باشد به هیچ وجه نباید از این روش برای آبیاری مزارع استفاده کرد زیرا برای آنکه خاک تا عمق موردنظر مرطوب شود بایستی مدت زمان آبیاری بیشتر گردد. این کار باعث تلفات شدید آب به صورت رواناب و کاهش کارآئی آبیاری می‌گردد.

---

1 - Distribution Pattern Efficiency

ـ کم آبیاری بهینه یکی از راهکارهای اساسی برای افزایش کارائی مصرف آب در اراضی فاریاب کشور است. ولی بایستی توجه داست که کمبود آب در برخی از مراحل بحرانی رشد اثرات خود را کاملاً نشان می‌دهد. دورنبوس و پروت (Doorenbos & Pruitt, 1977) برای محصولات زراعی مختلف مراحل بحرانی ـ از نظر اعمال تنش آبی ـ را مشخص کرده‌اند (جدول ـ ۳). وقتی که عملکرد یک گیاه را عصاره (مانند قند یا روغن) یا اجزاء زایشی آن تشکیل دهد (مانند دانه و میوه) حساسیت مراحل مختلف رشد به تنش آبی در مقایسه با حالتی که علوفه عملکرد گیاه محسوب می‌شود بیشتر است. به عنوان یک اصل کلی می‌توان گفت که گیاهان زراعی مقاوم به خشکی در مقایسه با ارقام حساس، حساسیت کمتری به تنش آبی در مراحل بحرانی رشد از خود نشان می‌دهند. از نظر مقاومت به خشکی دوران رشد گیاه به سه مرحله عمده تقسیم می‌شود که هر یک در حدود یک سوم فصل رشد را تشکیل می‌دهند. این مراحل عبارتند از:

مرحله اول: این مرحله از ابتدای رویش گیاه تا آغاز گلدهی طول می‌کشد.

مرحله دوم: مرحله رشد اصلی برگ، ساقه و گسترش تاج که با تجمع سریع ماده خشک و افزایش اندامهای هوائی همراه بوده و تاثیر زیادی در افزایش مکانهای تولید میوه دارد.

مرحله سوم: شامل دوران میوه‌دهی و بذردهی تا مرحله رسیدگی فیزیولوژیک می‌باشد. در این دوره وزن دانه مشخص می‌گردد(تولید و پرشدن دانه در غلات در این مرحله صورت می‌گیرد). در این مرحله سطح برگ و فتوسنتز کاهش می‌یابد (درگندم رسیدگی فیزیولوژیک همبستگی خوبی باکاهش سبزی برگ و میزان تنفس دارد). در گیاهان چندساله مثل سورگوم تبخیر و تعرق آخر فصل، بعد از رسیدگی فیزیولوژیک، تاثیر معنی‌داری بر عملکرد دانه ندارد.

جدول ۳ ـ مراحل رشد حساس به کم‌آبیاری در گیاهان زراعی

نوع گیاه	مراحل بحرانی رشد از نظر اعمال کم‌آبیاری
گندم	در خلال مراحل آبستنی، خوشه‌دهی و دوهفته قبل از گرده‌افشانی
جو	مرحله اولیه آبستنی < مرحله خمیری نرم < شروع مرحله پنجه‌دهی یا رسیدگی فیزیولوژیک
ذرت	مرحله گرده‌افشانی از دوران ظهور گلهای نر تا متورم شدن دانه < قبل از ظهور گلهای نر < مرحله پرشدن دانه < اگر گیاه از ابتدای فصل رشد با تنش آبی مواجه نشود و تنها در دوران گرده‌افشانی با تنش رطوبتی مواجه شود به شدت به تنش اعمال شده حساسیت نشان خواهدداد.
یولاف	از شروع دوران ظهور خوشه تا خوشه‌دهی کامل
سورگوم	مرحله ظهور ریشه‌های ثانویه (نگهدارنده) و مرحله پنجه‌دهی تا مرحله آبستنی < مراحل خوشه‌دهی، گلدهی و تشکیل دانه < دوره پرشدن دانه
غلاف دانه ریز	از مرحله آبستنی تا مرحله خوشه‌دهی
یونجه	در دوران اولیه پس از برداشت علوفه ـ در آغاز مرحله گلدهی به منظور تولید بذر
شبدر	در تمام دوران رشد به رطوبت کافی نیاز داشته و در صورت تنش رطوبتی به شدت حساسیت نشان می‌دهد(مخصوصاً در مرحله قبل از برداشت).
سویا	مرحله گلدهی و پرشدن غلاف و احتمالاً در دوره حداکثر رشد رویشی
نخود	در شروع گلدهی و متورم شدن غلاف‌ها
بادام‌زمینی	مرحله گلدهی و نمو بذر < مرحله بین جوانه‌زدن و گلدهی ـ آخر فصل رشد
انواع لوبیا	مراحل گلدهی و تشکیل غلاف < مرحله رسیدگی فیزیولوژیک دانه(اگر گیاه تا این دوره با تنش رطوبتی مواجه نباشد و تنها در این مرحله با کم‌آبی مواجه شود عملکرد به شدت تحت تأثیر قرارخواهدگرفت.
چغندرقند	سه تا چهار هفته پس از سبزشدن
آفتابگردان	احتمالاً در خلال مراحل تشکیل بذر و گلدهی ـ مرحله نمو بذر
کتان	مرحله گلدهی و تشکیل غوزه < مرحله رشد اولیه < بعد از تشکیل غوزه
نیشکر	دوره حداکثر رشد رویشی
سیب‌زمینی	بعد از تشکیل غده‌ها و در مرحله گلدهی تا برداشت به شدت به تنش رطوبتی حساس است.
هندوانه	از زمان گلدهی تا برداشت
گوجه‌فرنگی	زمانی که گل‌ها تشکیل شده و میوه‌ها به سرعت درحال بزرگ‌شدن هستند.
توت فرنگی	مرحله نمو میوه تا رسیدگی فیزیولوژیک
تربچه	در خلال دوره توسعه ریشه
مرکبات	مرحله گلدهی و تشکیل میوه ـ اگر در دوران گلدهی درخت با قطع آبیاری و تنش رطوبتی مواجه شودبه‌شدت بر گلدهی اثرات منفی خواهد داشت. در چنین حالتی اگر محتوای رطوبتی خاک را بالا نگه داریم این پدیده ممکن است کنترل شود.
هلو و گیلاس	در دوران رشد سریع میوه تا قبل از رسیدگی کامل
زردآلو	در خلال دوران نمو جوانه گل و گلدهی
زیتون	درست قبل از گلدهی و در خلال بزرگ شدن میوه

(اقتباس از Doorenbos and Pruit ،1977)

در مطالعه مراحل عمده رشد فیزیولوژیک در دانه‌ها مرحله اول در مقایسه با مرحله دوم و مراحل اولیه پرشدن دانه در مرحله سوم کمتر بحرانی است. در اوایل مرحله اول با توجه با اینکه پوشش گیاهی کمتری سطح خاک را می‌پوشاند به همین خاطر هرگونه تنش رطوبتی منجر به کاهش تبخیر از سطح خاک لخت می‌گردد تا تعرق. در نتیجه اعمال کم‌آبیاری در این مرحله با حساسیت زیادی مواجه نخواهدشد. در مرحله دوم همزمان با رشد و نمو گیاه حساسیت به تنش آبی نیز بیشتر می‌شود. با افزایش جوانه‌زنی هم تعداد بذر در واحد سطح و هم وزن بذور تولیدشده افزایش می‌یابد. در کم‌آبیاری تعداد دانه نسبت به وزن آنها حساسیت بیشتری به تنش آبی دارد. در گندم و سورگوم دانه‌ای، تعداد دانه در ارتباط تنگاتنگ با تجمع ماده خشک در طی مرحله دوم می‌باشد. به همین خاطر برنامه‌ریزی کم آبیاری بایستی طوری باشد تا گیاه در این دوره، مخصوصاً در ۲ تا ۳ هفته قبل از جوانه‌زنی و در حین جوانه‌زنی مواجه با کمبود آب نباشد. پنبه در طی مرحله دوم رشد قادر به تشکیل محلهای میوه‌دهی زیادی است. پس از این مرحله ریزش برخی از غنچه‌ها و غوزه‌های جوان طبیعی است اما تحت شرایط تنش رطوبتی ریزش تشدید می‌گردد. بنابراین، این مرحله در مدیریت آبیاری پنبه از لحاظ اهمیت با مرحله دوم گندم و سورگوم دانه‌ای شباهت دارد.

طی مرحله سوم حساسیت گندم و سورگوم دانه‌ای به تنش رطوبتی از متوسط در زمان تشکیل و اوائل پرشدن دانه تاکم در اواخر مرحله پرشدن دانه متغیر است. دوره حساس حدوداً در ده روز اول پس از گرده‌افشانی است(در حدود $\frac{1}{4}$ تا $\frac{1}{3}$ ابتدای مرحله سوم در گندم، سورگوم، آفتابگردان و مرحله نمو غوزه در پنبه). دراین مرحله فرآیندهای مرتبط باتنش رطوبتی می‌تواند منجر به کاهش تعداد میوه در واحد سطح

شود. مرحله شیری شدن دانه نسبت به تنش رطوبتی بسیار حساس است به طوری که باعث چروک‌شدن دانه و کاهش عملکرد می‌شود.

توجه به یافته‌های علمی و فنی فوق در برنامه‌ریزی و مدیریت کم آبیاری اهمیت فراوانی دارد چراکه اجازه قطع آبیاری را در این دوره‌ها فراهم می‌سازد. قطع آبیاری در مرحله سوم به مدت یک تا سه هفته در گیاهان مقاوم به خشکی که در خاکهایی با ظرفیت انبارش رطوبتی زیاد رشد می‌کنند باعث کاهش معنی‌داری در عملکرد دانه نمی‌گردد. حساسیت کم به تنش رطوبتی انتهای فصل در مورد چغندرقند نیز صادق است. مطالعاتی که در کالیفرنیا در مورد چغندرقند در خاکهای عمیق انجام شده نشان داد که قطع آبیاری به مدت ۳ تا ۵ و یا حتی ۷ هفته قبل از برداشت با اینکه موجب کاهش ۵۰درصدی در تبخیر تعرق آخر فصل شده و کل تبخیر و تعرق فصل رشد را نیز حدود ۱۵ درصد کم می‌کند ولی باعث کاهش عیار قند چغندرقند نمی‌گردد. مطالعات متعدد دیگر حاکی از کاهش تبخیر تعرق فصل رشد و افزایش کارآئی مصرف آب چغندرقند با اعمال کم آبیاری می‌باشد.

برای گیاهان زراعی دیگر نظیر پنبه و یونجه بذری آبیاری انتهای فصل باعث تحریک رشد رویشی می‌شود. پنبه جهت پایان گلدهی و آغاز تشکیل غوزه‌های انتهایی فصل به یک دوره تنش آبی نیازمند است. میزان آب آبیاری نباید بیشتر از ۵۰ درصد تبخیر و تعرق باشد تا غوزه‌های موجود بطور طبیعی توسعه یافته و از تشکیل غوزه‌های جدید ممانعت شود. تنش‌های انتهای فصل از رشد رویشی جدید در پنبه جلوگیری کرده و باعث تسریع در بلوغ (رسیدگی) و بهبود کیفیت محصول می‌شود. در یونجه بذری تنش آبی سبک باعث گرده‌افشانی و تحریک تولید گل شده و منجر به افزایش تولید بذر شود.

ـ در جاهایی که محدودیت منابع آب وجوددارد یا هزینه‌های تسطیح اراضی خیلی بالاست و یا در زمین‌های سنگلاخی و تپه ماهوری استفاده از سیستم‌آبیاری قطره‌ای توصیه می‌گردد.

ـ سیستم آبیاری قطره‌ای برای گیاهانی که از ارزش اقتصادی بالاتری برخوردارند (Cash Crops) یا در گیاهانی که فاصله کاشت آنها بیشتر است مناسب می‌باشد. هرچند که از این شیوه جهت آبیاری بعضی از گیاهان ردیفی نیز استفاده می‌شود ولی کاربرد آن برای زراعت این نظیر غلات، یونجه و گیاهان ردیفی توجیه اقتصادی ندارد.

ـ مشکل عمده سیستم آبیاری قطره‌ای گرفتگی قطره‌چکان‌ها با مواد معلق(ماسه، سیلت، رس و بقایای گیاهی و جانوری) و ترکیبات شیمیائی(کربنات کلسیم و منیزیم، چربی‌ها، کودهای شیمیائی، فسفات و ترکیبات آهن و منگنز) و مواد بیولوژیکی (باکتریها، جلبکها و بقایای میکروبها) است. جهت حل این مشکل یا بایستی از قطره‌چکان‌هایی که امکان گرفتگی آنهاکم است استفاده کرد یا به تصفیه آب قبل از استفاده در سیستم همت گماشت. راه حل دوم موثرتر است. جهت جلوگیری از ورود مواد معلق به داخل سیستم بایستی از فیلتر مناسب استفاده شود(شنی، صافی‌دار و سانتریفوژی یا سیکلونی). جهت تصفیه بیولوژیکی آب آبیاری معمولاً از ترکیبات کلره (هیپوکلریت کلسیم، هیپوکلریک سدیم و گازکلر) استفاده می‌شود. غلظت کلر آزاد در آب آبیاری بایستی بیشتر از ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر باشد (جهت تعیین غلظت کلر آزاد در آب آبیاری می‌توان از کیت‌های سنجش کلر استفاده کرد). تزریق گازکلر به داخل سیستم توسط تانکهای تحت فشار صورت می‌گیرد. جهت تصفیه شیمیائی آب آبیاری بایستی توجه داشت که خطرناکترین ماده شیمیائی جهت

گرفتگی شیمیائی قطره‌چکان‌ها آنیونهای کربنات و بی‌کربنات است که با کاتیون‌های کلسیم و منیزیم آزاد در آب آبیاری ترکیب شده و باعث رسوب کربنات کلسیم و منیزیم در قطره‌چکان‌ها می‌گردد. جهت پی‌بردن به این خطر از شاخص لانژلیر استفاده می‌کنند. اگر این شاخص منفی باشد کربنات کلسیم در سیستم رسوب نخواهدکرد ولی اگر مثبت باشد خطر رسوب کربنات کلسیم در سیستم وجوددارد. برای رفع این خطر معمولاً به آب آبیاری اسید اضافه می‌کنند.

ـ هنگام آبیاری با آب شور در سیستم آبیاری قطره‌ای(مخصوصاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک) در سطح خاک و اطراف پیاز رطوبتی نمک تجمع پیدا می‌کند(به تجمع نمک در اطراف پیاز رطوبتی اصطلاحاً گوشواره نمکی گفته می‌شود). تجمع نمک در انتهای فصل رشد شرایط را برای کشت محصول در فصل زراعی آتی با مشکل مواجه می‌کند. جهت اجتناب از کاهش عملکرد و خطر شورشدن اراضی در درازمدت بهتر است نمک‌ها در پایان فصل زراعی با یک آبیاری سنگین از منطقه فعالیت ریشه‌ها شسته شده و به پایین رانده شوند.

ـ به خاطر تجمع نمک در اطراف پیاز رطوبتی و سطح خاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک، در اثر بارندگی این املاح شسته شده و وارد محیط فعالیت ریشه‌ها می‌گردند. جهت اجتناب از این خطر، همراه با بارش باران سیستم آبیاری قطره‌ای نیز بایستی به کار خود ادامه دهد تا از ورود املاح سطح خاک و محیط بیرونی پیاز رطوبتی به داخل منطقه فعالیت ریشه‌ها جلوگیری شود.

ـ اگر در خاک‌های سبک بافت از سیستم آبیاری قطره‌ای استفاده شود بهتر است دور آبیاری بیشتر از ۱۲ ساعت نباشد. در غیر این صورت تلفات آب به صورت نفوذعمقی بیشتر خواهدشد.

ـ یکی از مزایای آبیاری قطره‌ای کاربرد همزمان کود و سموم دفع آفات با آب آبیاری است. در این شیوه چون کود مستقیماً در اختیار گیاه قرارمی‌گیرد به همین خاطر ضمن بالابودن کارآیی مصرف آب، کارآئی مصرف کود نیز افزایش می‌یابد. در تزریق کود و سم به سیستم آبیاری قطره‌ای بایستی توجه شود که کود و سم از نوع خورنده نبوده و حلالیت بالایی نیز داشته باشند. علاوه بر آن ضمن واکنش ندادن با ترکیبات شیمیائی آب آبیاری با یکدیگر نیز برهم کنشی که منجر به ایجاد رسوب گردد انجام ندهند.

ـ در کود ـ آبیاری بایستی توجه کرد تا هیچ‌وقت کود در سیستم باقی نماند به همین خاطر بهتر است جداقل یک ساعت پس از شروع به کار سیستم تزریق کود شروع شده و یک ساعت قبل از اتمام آبیاری به تزریق کود پایان داده شود تا کودی در داخل لوله باقی نماند.

ـ اسید و کود را نباید همزمان وارد سیستم کرد زیرا ماده حاصل از خاصیت خورندگی بسیار بالایی برخوردار بوده و باعث آسیب جدی به لوله‌ها و اتصالات می‌گردد.

ـ در اسیدشویی سیستم آبیاری قطره‌ای اگر به جای اسیدکلریدریک و اسید سولفوریک از اسیدفسفریک یا اسیدنیتریک استفاده شود بهتر است زیرا این ترکیبات علاوه بر کاهش PH آب آبیاری حاوی دو عنصر پرنیاز ازت و فسفر نیز می‌باشند.

ـ اگر در اسیدشویی سیستم آبیاری قطره‌ای غلظت زیاد اسیدمورد نیاز باشد تزریق آن بایستی درجایی صورت گیرد که پس از آن قطعات فلزی وجودنداشته باشد.

ـ استفاده صحیح و بهنگام از کودهای متعادل باعث افزایش رشد اندام‌های هوایی و قسمت‌های رویشی گیاه شده و ضمن کاستن از تبخیر باعث افزایش عملکرد و کارآیی مصرف آب می‌گردد.

ـ یکی از تکنیک‌های بسیار مؤثر در افزایش کارآیی مصرف آب حفظ و ذخیره

رطوبت در منطقه توسعه ریشه‌ها می‌باشد. عملیاتی که نقش عمده‌ای در حفظ رطوبت خاک دارند عبارتند از: کنترل رواناب، ازدیاد نفوذ آب به خاک، استفاده از روش‌های جمع‌آوری آب[1]، استفاده از مالچ، شخم برای افزایش نفوذپذیری، آیش، کاشت مخلوط، آبیاری تکمیلی، جمع‌آوری آب و تناوب زراعی.

ـ زودکاشتن و انتخاب ارقامی که دارای رشد اولیه سریع می‌باشند مخصوصاً در مناطقی که اواخر تابستان با دوره خشکی مواجه می‌شوند باعث اجتناب گیاهان از برخورد با دورهٔ خشکسالی شده و کارآیی مصرف آب را بهبود می‌بخشد.

ـ تحقیقات متعدد نشان داده که گیاهان در دوران گلدهی و دانه بستن به شدت به تنش رطوبتی حساس هستند. بنابراین در این دوره بایستی از آبیاری تکمیلی استفاده گردد.

ـ ارقام با سیستم ریشه‌ای عمیق و گسترده قادرند رطوبت را از اعماق پایین جذب کرده و کارآیی مصرف آب را بالا برند.

منابع:

۱ ـ آب و توسعه، ۱۳۷۶، استراتژیهای مدیریت ملی منابع آب در کشور، سال ششم، شماره ۱

۲ ـ آمارنامه کشاورزی، سال زراعی ۷۷ـ۱۳۷۶. ۱۳۷۸. اداره کل آمار و اطلاعات، معاونت برنامه‌ریزی و بودجه. وزارت کشاورزی. شماره ۷۸/۰۱

۳ ـ ابوالقاسمی،هادی. ۱۳۷۳. ارزیابی بازدهی آبیاری در تعدادی از شبکه‌های سنتی ایران ـ مجموعه مقالات هفتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران ـ ۳۱ مرداد لغایت ۲ شهریور ـ تهران.

۴ ـ صادق‌زاده، کوروش.۱۳۷۷. کارآیی مصرف آب و راهکارهایی برای بهینه‌سازی آن. مجموعه مقالات علمی ـ ***تخصصی تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی ـ شماره ۱۱.***

1 - Water Harvesting

۵ ـ علیزاده، امین. ۱۳۷۳. بهره‌برداری پایدار از منابع آب در کشاورزی. مجموعه مقالات اولین کنگره برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری امور زیربنایی (آب و خاک) در بخش کشاورزی. ۲۸ ـ ۲۶ شهریور ـ تهران.

۶ ـ فاطمی دزفولی، محمدرضا، اکبر شکراللهی و محمدحسین شیرودی. ۱۳۷۳. تاثیر یکپارچه‌بودن اراضی زراعی در بازدهی شبکه آبیاری دز ـ مجموعه مقالات هفتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران ـ ۳۱ مرداد لغایت ۲ شهریور ـ تهران.

۷ ـ کشاورز، عباس. ۱۳۷۳. توصیه‌هایی بر سیاستها و برنامه‌های آب و آبیاری در ایران. مجموعه مقالات اولین کنگره برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری امور زیربنایی (آب و خاک) در بخش کشاورزی ۲۸ ـ ۲۶ شهریور ـ تهران.

۸ ـ گزارش وزارت نیرو به هیأت دولت. ۱۳۷۷. سیمای بخش آب، آب و فاضلاب، برق، انرژی و یارانه آب و برق. خردادماه ۱۳۷۸.

۹ ـ هاشمی دزفولی، ابوالحسن. ۱۳۷۳. مفهوم کارآیی مصرف آب. مجله پژوهش و سازندگی. شماره ۲۵.

10 - Bolton, F.E. 1980. Optimizing the use of water and nitrogen through soil and crop managment. Plant soil. 58:231-247.

11 - Fischer, R.A.and N.C. Tuner, 1978. Plant productivity in the arid and semi arid zones. Annu. Rev. Plant Physiol. 29: 277-317.

12 - Hamblin, A.,D.Tennant and M.W.Perry, 1990. The cost of dry matter partitioning changes with seasonal supply of water and nitrogen to dryland wheat. Plant and Soil, 122: 47-58.

13 - Kramer, P.J. 1983. Plant and soil Water reltionship. Mc Grow Hill, New York.