

مقاله شماره ۱۴

موضوع:

«کم آبیاری تنظیم شده»، اهمیت و ضرورت آن در شرایط ایران

توسط:

جمشید خیرابی، سیداسد... اسدالهی، محمدرضا انتصاری

علیرضا توکلی و علیرضا سلامت

گروه کاری نیاز آبی گیاهان و مدیریت محصولات زراعی

کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

#### چکیده:

یکی از اهداف آبیاری، بدانگونه که در تعریف علمی و مهندسی آن آمده است «استفاده حداکثر از واحد حجم آب» در شرایط محدودیت منابع آب می‌باشد. در این حالت جیره کاهش داده می‌شود، و بجای «آبیاری کامل»، کم آبیاری صورت می‌پذیرد. آثار تبعی و طبیعی کم آبیاری کاهش عملکرد است. تحقیقات محلی، و استفاده از مدلها و توابع تجربی - ریاضی «مصرف آب - عملکرد» میزان کاهش را به ازای سطوح مختلف کم آبیاری نشان می‌دهد. در «کم آبیاری کلاسیک» برای اینکه این کاهش حداقل باشد برنامه‌ریزی آبیاری، مدیریت و تمهیدات زراعی بگونه‌ای خاص صورت می‌پذیرد که آنرا «کم آبیاری تنظیم شده» (REGULATED DEFICIT IRRIGATION) می‌نامیم. در روش «کم آبیاری»، با آب صرف جوئی شده، می‌توان سطح کشت را گسترش داد و عملکرد کل را افزایش داد. اینکه «کم آبیاری» تا کجا باید پیش برود و در چه سطحی باید متوقف شود؟ موضوع بهینه سازی آن است تا اینکه حداکثر عملکرد و سوددهی را تضمین نماید.

در شرایط ایران بعلاوه محدودیت منابع آب، «کم آبیاری تنظیم شده»، و بهینه سازی آن که همانا استفاده حداکثر از واحد حجم آبست امر ضروری است، و لازم است در طراحی همه پروژه‌ها مورد توجه قرار بگیرد. برای اینکه، بر اساس تحقیقات محلی و مدل‌های کلاسیک توابع «مصرف آب-عملکرد» تنظیم و تحلیل می‌شود و «کم آبیاری»، متناسب با شرایط پروژه، چه از نظر عملکرد و چه از نظر سود خالص بهینه سازی می‌شود. در این مقاله پس از بحث در مورد کم آبیاری تنظیم شده، و تاکید بر اهمیت و ضرورت آن در شرایط ایران جدیدترین، و کاراترین مدل‌های بهینه سازی توضیح داده شده، و مثالی ارائه گردیده است.

در مقاله‌ای تحت عنوان «تعریف علمی، مهندسی آبیاری» آمده است:

«آبیاری به عنوان تکنیک مهندسی، عبارتست از تامین کمبود نیاز آبی سطوح تحت کشت محصولات کشاورزی و کشتهای آبی مکانیزه، بطوریکه با توجه به شرایط اقتصادی، فنی، اجتماعی، طبیعی و غیره، و با رعایت کلیه اصول، مبانی و مفاهیم زراعی، و با استفاده از مناسبترین دستاوردهای تکنولوژی معاصر، و با حفظ و حراست کامل ودایم از آب و خاک، محیط طبیعی و عرصه کشت گیاهی، بتوان آب را - و هوا را، به موقع - و به اندازه در اختیار گیاه قرار داد، بطوریکه حداکثر استفاده از واحد حجم آب (در شرایطی که آب کم است) و یا از واحد اراضی (در شرایطی که زمین کم است) به عمل آید. هدف نهائی آبیاری رشد بهینه کشتهای آبی، بالارفتن راندمان محصولات کشاورزی، گسترش عمرانهای محلی، منطقه‌ای و ملی است، به طوریکه اقتصاد اصیل و برنامه‌ریزی شده در زمینه کشاورزی رونق گیرد و فرهنگ سالم روستائی شکوفا گردد».

در این تعریف کلاسیک بسط فراز مربوط به «... تامین کمبود نیاز آبی سطوح تحت کشت ...» موضوع «آبیاری کامل»، مباحث و تعاریف مربوط به تبخیر و تعرق واقعی، پتانسیل، پتانسیل ماگزیم، باران موثر، ضریب رشد گیاهی، و راندمانهای آبیاری است. بیان ماهوی و معنائی آنها همانا استفاده حداکثر از واحد اراضی در شرایط محدودیت زمین است که در اینصورت آبیاری بصورت کامل انجام می‌شود و آب مورد نیاز، زمان آبیاری، جیره آبیاری و فواصل آن طبق موازین کلاسیک و پایه تعیین می‌گردد.

فراز دیگر، مربوط به استفاده حداکثر از واحد حجم (در شرایطی که آب کم است) موضوع «کم آبیاری» است که در مقدمه نشریه شماره یک گروه آب مورد نیاز گیاهان و مدیریت محصولات زراعی (موضوع خلاصه مقالات کم آبیاری) و مقدمه نشریه شماره دو این گروه (موضوع دستورالعملهای کم آبیاری)، به تفصیل از آن سخن رفته، و انواع آن تبیین گردیده است.

آبیاری در مفهوم علمی و مهندسی خود، بدانگونه که تعریف شد، دارای دو هدف اصلی، بعنوان دو رکن اساسی است، که در دور استای مستقل از هم، و با دوجهت‌گیری متفاوت، و به تمام مغایر با یکدیگر دنبال می‌شود، و بسته به شرایط، یکی از دو هدف زیر انتخاب و پیگیری می‌گردد:

حالت اول: در مناطقی که محدودیت اراضی عامل غالب به حساب می‌آید با هدف «استفاده حداکثر از واحد اراضی».

حالت دوم: در شرایطی که آب عامل محدودکننده است، با هدف «استفاده حداکثر از واحد حجم آب».

میزان اهمیت هر یک از این اهداف دوگانه، برای برنامه ریز، همیشه و همه جایکسان نیست، و بسته به موقعیت زمانی و مکانی دارای درجاتی است و به شرایط طرح بستگی دارد.

مهمترین مولفه تشدید، در حالت اول، مربوط به مناطقی است که محدودیت زمین توأم با فراوانی آب باشد، و در حالت ثانی مربوط به شرایطی است که محدودیت آب بازیادت زمین همراه باشد.

بطوریکه اعتلاء درجات اهمیت هر یک از اهداف و شدت آن مربوط به دامنه حدهای فراوانی «آب» و «خاک»، و درجه واگرایی، و فاصله موجود بین این حدهاست.

در یک منطقه اگر نسبت آب به اراضی را ضریب فراوانی  $\frac{\text{آب}}{\text{زمین}}$  بنامیم، این ضریب در حالت اول بزرگتر از واحد و در حالت دوم کوچکتر از واحد خواهد بود.

در هر یک از حالت‌های دوگانه فوق هر چه این ضریب از واحد فاصله بگیرد و دوری گزیند شدت اهمیت هدف مربوطه بیشتر خواهد بود. لذا سیاست‌گذاران، برنامه ریزیهای آب و آبیاری، تعیین یکی از دو هدف مزبور و تاکید بر شدت آن، تعیین اولویتها، مدیریت آب، و به تبع آن انتخاب روشها، مدلها و سیستم‌ها، محاسبه، مشاهده و کنترل دائم (MONITORING) و غیره، در شرایطی که کمبود اراضی وجود دارد (حالت اول) با شرایط کمبود آب (حالت دوم) به تمام متفاوت، و چه بسا مغایر است. لذا در برنامه ریزیهای آبیاری، اعم از سطح ملی، استانی، منطقه‌ای و محلی، لازم است به این جهت گیری، متناسب با درجات شدت هدف مربوطه و تناسب کمبود یا فراوانی هر عامل نسبت به دیگری، و «ضریب فراوانی  $\frac{\text{آب}}{\text{زمین}}$ » وزن و بهائی در خور داده شود، که بنا به ضرورت ذیلاً بیشتر تشریح می‌گردد.

## ۱- ضریب فراوانی آب به زمین < ۱:

در مناطق مرطوب «ضریب فراوانی  $\frac{\text{آب}}{\text{زمین}}$ » بزرگتر از واحد است و مقدار آن از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت می‌باشد. هر چه این ضریب بزرگتر باشد هدف اول در راستای «استفاده حداکثر از واحد اراضی» تشدید می‌گردد و برجسته تر می‌شود.

## ۲- ضریب فراوانی آب به زمین > ۱:

بعکس در مناطق خشک و نیمه خشک، این ضریب بسیار کمتر از واحد است. در چنین شرایطی هدف دوم در راستای «استفاده، حداکثر از واحد حجم آب» دنبال می‌شود. در شرایط ایران اهمیت این موضوع با توجه به اولویت کشاورزی و بالا بودن ضریب رشد جمعیت، و بسیاری مولفه‌های دیگر باز هم بیشتر است.

## ۱- اهمیت و ضرورت کم آبیاری در شرایط ایران:

در ایران ضریب فراوانی آب به زمین بسیار پائین است، بطوریکه با فرض استحصال حداکثر آب بمیزان ۱۲۰ میلیارد متر مکعب، و با فرض متوسط آب مورد نیاز خالص برای هر هکتار معادل ۵۰۰۰ متر مکعب در سال، و

متوسط راندمان آبیاری ۵۰٪، ضریب فراوانی آب به زمین، در کل کشور و در شرایط ایده آل، حدود ۰/۲۴ بدست می‌آید، در صورتیکه در حال حاضر این ضریب (با توجه به ۶/۵ میلیون هکتار کشت آبی و ۵۰ میلیون هکتار پتانسیل اراضی قابل آبیاری) حدود ۰/۱۳، و رقم بسیار پائینی است. بنابراین استفاده از «کم آبیاری» امر بسیار ضروری است.

نسخه پیچی نظری کم آبیاری حدود چهاردهه پیش توسط زنده یاد مهندس روح‌ا... فرزانه بنیان‌گذار آبیاری و آبادانی (AGRICULTURAL ENGINEERING) در آموزش عالی کشور، استاد و مدیر سابق این گروه در دانشگاه تهران، در قالب «راندمان ذخیره» صورت پذیرفت، و از آن پس نیز توسط شاگردان ایشان، تحت این عنوان مورد تدریس و تحقیق قرار گرفت، و در دو دهه اخیر، تحت عنوان تنش رطوبتی، به بسیاری از برنامه‌های آموزشی و پژوهشی دانشگاهها و پاره‌ای مراکز تحقیقاتی تسری پیدا کرد، ولی در بخش اجرا، (با اینکه پس از گذشت چند دهه، اخیراً جرقه‌هایی از بارقه امیدبخش می‌خورد) هنوز هم «کم آبیاری» در مفهوم دقیق آن، بدانگونه که شایسته ضرورت‌های جدی است، جا نیفتاده است.

توضیح اینکه در ایران از اوایل سده چهاردهم (هش) که عصر آبیاری نوین آغاز شد، تاکنون آبیاری، و پروژه‌های بزرگ و کوچک آبی، نه بعلت ضرورت بلکه بصورت عادت، همواره و همه جا بر اساس معیارهای «آبیاری کامل» مبتنی بر مفاهیم تبخیر تعرق پتانسیل ماگزیم « $ET_0$  یا  $ET_{pmax}$  یا  $ET_r$ »، تبخیر تعرق محصول « $ET_c$  یا  $ET_p$ »، ضرائب گیاهی ( $K_c$ )، باران موثر ( $R_e$ ) و راندمان آبیاری ( $E_a$ ) اجرا شده است که به دو دلیل زیر صلاح کار نبوده است:

۱- «آبیاری کامل» در شرایطی انجام می‌شود که هدف «استفاده حداکثر از واحد اراضی» باشد، و این روش، همانگونه که گفته شد، مشمول و درخور مناطقی است که در آنها «ضریب فراوانی آب به زمین بیشتر از واحد باشد».

۲- «آبیاری کامل» با «هدف استفاده حداکثر از واحد اراضی»، در هر حالت، به شرطی موجه و معقول است که همراه با آبیاری کامل سایر عوامل تولید، علل و اسباب کشت و کار و شرایط کاشت و داشت در حد کمال باشد، والا این شیوه آبیاری جز هدر دادن آب حاصلی نخواهد شد.

این هر دو شرط در اکثر نقاط ایران و در اکثر حالات برقرار نبوده و نیست. چراکه در مورد شرط نخست همانگونه که ذکر شد، «ضریب فراوانی آب به زمین» بسیار کمتر از واحد است و در مورد شرط ثانی نیز، جز آبیاری که بطور کامل انجام گرفته است، بقیه شرایط زراعی و عوامل موثر در عملکرد در حد کمال نبوده است. بطوریکه طی اینهمه سال عملکرد کشتهای آبی ایران نسبت به استانداردهای بین‌المللی بسیار پائین بوده است.

با وجود این، در ایران، وطی اینهمه سال، آبیاری کامل بصورت عادت ناهنجار درآمده و تکرار شده است. در گذشته عامل، کمی جمعیت، درآمدهای کلان نفتی، امکان تهیه سهل و ساده و ارزان قیمت مواد غذایی از بازارهای بین‌المللی به این غفلت مسئولان و سهل‌انگاری کارشناسان طراح دامن زده است.

خوشبختانه اینک در سطح اجرا و در میان مسئولان طراز اول صنعت آب کشور مفهوم «استفاده حداکثر از واحد حجم آب» که روی دیگر سکه «کم آبیاری» است بتدریج جای خود را پیدا می‌کند. امیداینکه این تفکر متعالی هر چه بیشتر جا بیفتد و برنامه‌ریزیها، سیاست‌گذاریهای آب و آبیاری را به تمام متاثر سازد، و در این میان بر کارشناسان و مراجع علمی، تحقیقاتی، آموزشی، از جمله بر کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، محافل و مجامع علمی و کارگاهها و سمینارها است که به این جا افتادن کمک رسانند.

## ۲- بهینه سازی و تحلیل اقتصادی کم آبیاری:

در بهینه سازی و ارزیابی «اقتصادی کم آبیاری» تغییرات کل عملکرد، مبتنی بر افزایش سطح زیرکشت (با آب صرفه جوئی شده) از یکسو، و تغییرات سود خالص مبتنی بر تفاضل هزینه‌ها و درآمدها از سوی دیگر، بعنوان دو محور اساسی در نظر گرفته می‌شوند. جهت و شدت این تغییرات تابع بسیاری از فاکتورهای موثر، مثل روش آبیاری، سطح و درجه کم آبیاری (میزان مصرف آب)، برنامه ریزی و مدیریت آبیاری، استفاده و یا عدم استفاده از آب صرفه جوئی شده برای گسترش سطح زیرکشت، عوامل جوی، هزینه‌های آب و آبیاری و تولید، قیمت محصول، درآمد کل و غیره است. برخی از این عوامل تحت کنترل مدیر مزرعه و برخی دیگر مثل نیوار خارج از کنترل اوست.

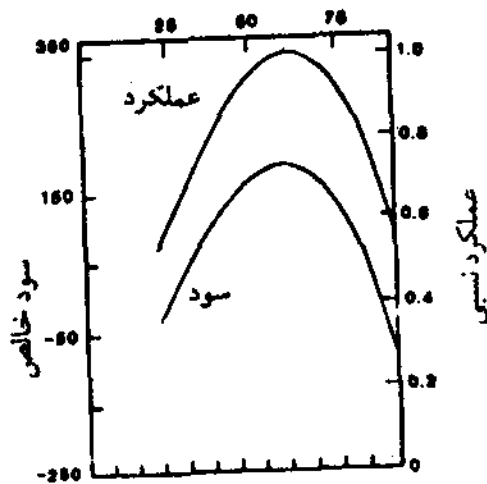
«کم آبیاری» آنگاه بعنوان روش کلاسیک، و مطابق موازین فنی و مهندسی تلقی می‌شود که در آن کلیه شرایط بگونه‌ای فراهم شود که گیاه از کم آبی کمترین صدمه را تحمل نماید. باین نوع کم آبیاری «کم آبیاری تنظیم شده» REGULATED DEFICIT IRRIGATION می‌نامیم. در کم آبیاری تنظیم شده، یکی از مهمترین و در عین حال مشکلترین مراحل کار، بهینه سازی آن از نظر عملکرد و یا سود خالص است. در کم آبیاری تنظیم شده باید به این پرسش پاسخی در خود داده شود که حد بهینه کم آبیاری کجا است و چگونه است؟ بطوریکه به ازای افزایش سطح کشت (با آب صرفه‌جوئی شده) عملکرد، و یا سود خالص ماگزیمم باشد.

برای اینکار لازم است:

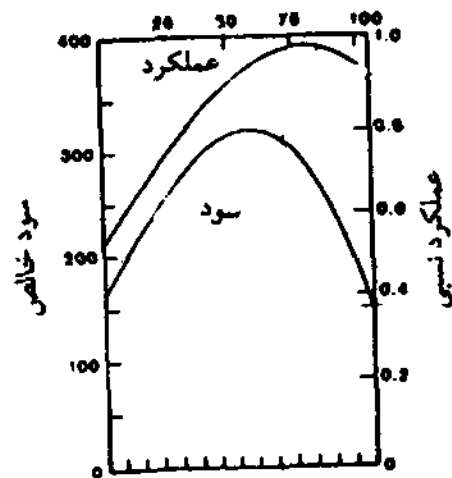
- ۱- افت عملکرد در رابطه با مصرف آب (سطوح مختلف کم آبیاری) بر اساس تحقیقات محلی روشن شود.
- ۲- کل هزینه‌ها و درآمدها، در هر طرح، طبق موازین علم اقتصاد کشاورزی مشخص گردد.
- ۳- با استفاده از مدلها و روابط «تجربی-ریاضی»، توابع تغییرات «مصرف آب-عملکرد» - «مصرف آب - سود خالص» برقرار شود و منحنی‌های مربوطه در روی یک محور مختصات ترسیم، و آنگاه روند صعود و نزول آنها، ضریب زاویه، نقاط ماگزیمم منحنی‌ها از نظر تقدم و تاخر نسبت بهم، بررسی و مورد تجزیه و تحلیل و نتیجه‌گیری قرار بگیرد.

در زیر نمونه‌هایی از این توابع، برای دو طرح «کم آبیاری تنظیم شده»، که توسط آقای هارگریوز مطالعه شده، آمده است (شکل ۱ و ۲)

## آب مصرفی بر حسب سانتیمتر



شکل ۲



شکل ۱

شکل ۱ و ۲: توابع «آب مصرفی - عملکرد» و «آب مصرفی - سود خالص» در دو طرح کم آبیاری ۱ و ۲

بطوریکه مشاهده می‌شود ماگزیم عملکرد همیشه منطبق با ماگزیم سود خالص نیست.

در این منحنی‌ها نقطه شروع - جهت شیب (صعودی و یا نزولی) - شدت و تندى شیب (ضریب زاویه) - نقاط ماگزیم و تقدم و تاخر آنها نسبت به یکدیگر، مولفه‌هائی هستند که بر اساس آنها تجزیه و تحلیل لازم، و نتیجه‌گیری و بهینه‌سازی کم آبیاری انجام می‌شود.

### ۳- مدل‌هائی «تجربی-ریاضی» جهت برپائی توابع «مصرف آب-عملکرد» و «مصرف آب-سود»

مدلهائی جهت برقراری رابطه بین مصرف آب و عملکرد و یا سود خالص، و ترسیم منحنی‌ها تغییرات عملکرد و سود با سطوح مختلف کم آبیاری، توسط اساتید فن چون جنسن (JENSEN 1966) - مین‌هاس (MINHAS, 1974) استوارت - (STEWART, 1974)، همکاران و دیگران، برای شرایط مختلف پیشنهاد شده است که در آنها با در دست داشتن افت عملکرد بازای سطوح مختلف کم آبیاری (براساس تحقیقات محلی)، تبخیر تعرق واقعی (REAL EVAPOTRANSPIRATION) و تبخیر تعرق پتانسیل (POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION) - عملکرد ماگزیم بازای تبخیر تعرق پتانسیل (آبیاری کامل)، راندمان آبیاری (آب مصرفی) - هزینه‌های تولید در واحد سطح، درجه محدودیت آب و یا محدودیت عوامل کاربرد و بکارگیری آن، قیمت آب، و کل درآمدها (در واحد سطح) و غیره، توابع «مصرف آب - عملکرد» - «مصرف آب - سود خالص» برقرار می‌گردد. براساس تجزیه و تحلیل این توابع و منحنی‌ها و نتیجه‌گیری‌های لازم از

آن، برای هر طرح و پروژه، متناسب با شرایط، عمل بهینه سازی که مهمترین اقدام در امر «کم آبیاری تنظیم شده» برای دفاتر فنی و محافل مهندسی، و طراحان بحساب می آید، صورت می گیرد.

ذیلاً یک مدل ساده، خطی که توسط استوارت ارائه گردیده، پیشنهاد شده است، و مدل کاملتری که توسط انگلیش پیشنهاد شده است تشریح می گردد. نظر به اهمیت مدل انگلیش مثالی هم در این مورد حل، و مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرد.

### ۳/۱ - مدل استوارت (STEWART, 1974)

این مدل که توسط آقای استوارت پیشنهاد شده، و توسط آقایان دورنبوس (DOORENBOS) و کاسام (KASSAM) تصحیح گردیده است بقرار زیر نوشته می شود:

$$1 - \frac{Y_a}{Y_{max}} = K_y \left( 1 - \frac{ET_a}{ET_{max}} \right)$$

که در آن :

$Y_a$ : عملکرد محصول در شرایط کم آبیاری (تبخیر تعرق واقعی  $ET_a$ ) است.

$Y_{max}$ : عملکرد محصول در شرایط آبیاری کامل (تبخیر تعرق پتانسیل  $ET_{max}$ ) است

$K_y$ : ضریبی است که درجه کاهش عملکرد را به تبخیر تعرق واقعی مرتبط می سازد.

این رابطه خطی است و در بسیاری از شرایط، و موارد، بعنوان راه حل ساده و کاربردی مورد استفاده قرار می گیرد ولی برای پروژه های بزرگ مدل انگلیش توصیه می شود که کامل و جامع است، و پارامترهای بیشتری را منظور می کند و معادله را در دو حالات محدودیت اراضی و منابع آب حل می نماید.

### ۳/۲ مدل انگلیش و همکاران (English et al, 1990):

این مدل که الگوریتمی برای استفاده بهینه از آب برای محصول است توسط انگلیش و ارلوب (English & orlob) ارائه شده است. مدل بهینه سازی را در دو حالت زیر در نظر می گیرد:

الف) بهینه سازی هنگامی که زمین محدود است.

ب) بهینه سازی هنگامی که آب محدود است.

توضیح اینکه در شرایطی هم که یک عامل وابسته به آب محدود باشد این امر به مثابه محدودیت آب بحساب می آید. برای مثال محدودیت انرژی قابل دسترس، همانند محدودیت در میزان آب قابل پمپاژ محسوب می گردد.

آقای انگلیش این مدل، و روابط مربوطه را براساس پارامترهای تعریف شده زیر طراحی و ارائه نمود:

A : کل سطح زیر کشت و تحت آبیاری بر حسب هکتار.

WT : کل آب تامین شده بر حسب متر مکعب.

W : مقدار آب مصرفی برای واحد سطح مزرعه بر حسب متر مکعب در هکتار.

$y(W)$  : عملکرد درواحد سطح، تابعی از آب مصرفی بر حسب کیلوگرم در هکتار.

$c(W)$  : هزینه‌های تولید درواحد سطح، تابعی از آب مصرفی بر حسب واحد پول.

$P_c$  : قیمت واحد وزن محصول (کیلوگرم) بر حسب واحد پول.

$i_l(W)$  : درآمد خالص از واحد سطح بر حسب واحد پول در هکتار.

$I_f(W)$  : درآمد خالص مزرعه از کل اراضی آبیاری شده بر حسب واحد پول.

$I_f(W)$  بر اساس تابعی از درآمد خالص از واحد سطح تحت آبیاری به قرار زیر بدست می‌آید:

$$I_f(W) = A \cdot i_l(W) \quad (1)$$

درآمد خالص از هر هکتار تابعی از قیمت محصول، عملکرد، هزینه‌ها و آب مصرفی است.

$$i_l(W) = P_c y(W) - c(W) \quad (2)$$

سطح آبیاری شده (A)، ممکن است، تابعی از آب مصرفی باشد. بدین معنی که اگر منابع آب محدود باشد، مدیر مزرعه می‌تواند زمین کافی را تحت آبیاری قرار دهد، مشروط به اینکه با استفاده از "کم آبیاری" سطح زیر کشت را با میزان مصرف آب هماهنگ نماید.

با توجه به کل حجم آب تامین شده و عمق آب مصرفی در برنامه ریزی کم آبیاری، کل سطح آبیاری شده بر حسب هکتار از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$A = \frac{WT}{W} \quad (3)$$

تبصره: مساحت A بسته به اینکه آبیاری بطور کامل، و یا بصورت کم آبیاری انجام بگیرد متفاوت خواهد بود و به سطح کم آبیاری بستگی خواهد داشت.

مقدار آب مصرفی که عملکرد ماکزیمم را به همراه دارد ( $W_m$ )، می‌تواند با مشتق گیری از تابع تولید، تخمین زده شود:

$$\frac{\partial y(W)}{\partial W} = 0 \quad (4)$$

برای تعیین مقدار آب مصرفی که سود خالص را در شرایط محدودیت زمین به ماکزیمم می‌رساند، از معادله (1)، بر حسب W، مشتق جزئی گرفته می‌شود:



$$\frac{\partial I_f(W)}{\partial W} = A \frac{\partial i_l(W)}{\partial W} + i_l(w) \frac{\partial A}{\partial W} \quad (5)$$

وقتی که زمین عامل محدوده کننده باشد،  $A$  ثابت فرض می شود و با مساوی صفر قرار دادن مشتق و حذف  $A$  ، مقدار بهینه آب مصرفی  $(W_1)$  ، با معادله زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial i_l(W)}{\partial W} = 0 \quad (6)$$

این معادله مشتق معادله (۲) است که مساوی صفر قرار داده شده است. وقتی که آب عامل محدود کننده است ،  $A$  تابعی از  $W$  است و همچنانکه ذکر شد مصرف بهینه آب  $(W_W)$  با معادله (۵) تعیین می گردد.

مشتقات معادله ، ۵ و ۶ بصورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{\partial i_l(W)}{\partial W} = P_c \frac{\partial y(W)}{\partial W} - \frac{\partial c(W)}{\partial W} = 0 \quad (7)$$

معادله برای اِپتیمم آب مصرفی وقتی که زمین محدوده کننده باشد  $(W_1)$ ، به قرار زیر نوشته می شود:

$$P_c \frac{\partial y(W)}{\partial W} = \frac{\partial c(W)}{\partial W} \quad (8)$$

و زمانیکه با محدودیت آب مواجه باشیم خواهیم داشت:

$$\frac{\partial I_f(W)}{\partial W} = 0 \quad (9)$$

و

$$A \frac{\partial i_l(W)}{\partial W} + i_l(W) \frac{\partial A}{\partial W} = 0 \quad (10)$$

وقتی که سطح زیر کشت تابعی از آب مصرفی باشد:

$$\frac{\partial A}{\partial W} = - \frac{WT}{W^2} \quad (11)$$

با جایگزینی در معادله ۱۰ خواهیم داشت:

$$\frac{WT}{W} \left( P_c \frac{\partial y(W)}{\partial W} - \frac{\partial c(W)}{\partial W} \right) + (P_c y(W) - c(W)) \left( - \frac{WT}{W^2} \right) = 0 \quad (12)$$

و با ساده کردن معادله فوق:

$$W \left[ P_c \frac{\partial y(W)}{\partial W} - \frac{\partial c(W)}{\partial W} \right] = P_c y(W) - c(W) \quad (13)$$

$W$  ای که در معادله (۱۳) صدق می‌کند،  $W_W$  می‌باشد.

حل معادله ۸ و ۱۳ نسبت به  $W$ ، مقادیر آب مصرفی بهینه،  $W_1$  و  $W_W$  را بدست می‌دهد. سمت چپ معادله ۸ بیانگر تولید و سمت راست این معادله، بیانگر هزینه‌هاست.

برای بدست آوردن در آمد خالص از هر هکتار، کافی است عمق آب مصرفی مربوطه را در معادله ۲ قرار دهیم. برای مثال با جایگزینی  $W_m$  در معادله ۲، درآمد خالص از یک هکتار مساحت تحت آبیاری بدست می‌آید:

$$i_l(W_m) = P_c y(W_m) - c(W_m) \quad (14)$$

و درآمد خالص در کل مساحت تحت آبیاری از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I_f(W_m) = \frac{WT}{W_m} \cdot i_l(W_m) \quad (15)$$

برای مثال اگر تابع تولید را به صورت معادله درجه ۲ و تابع هزینه‌ها را درجه یک فرض نمائیم، در این صورت خواهیم داشت:

$$y(W) = a_1 + b_1 W + c_1 W^2 \quad (16)$$

$$c(W) = a_2 + b_2 W \quad (17)$$

که  $y(W)$ ، تابع تولید (عملکرد) و  $c(W)$ ، تابع هزینه‌ها است. و  $a_1$ ،  $b_1$ ،  $c_1$ ،  $a_2$  و  $b_2$  ضرایب ثابت رابطه می‌باشند که بر اساس نوع محصول و آب مصرفی و درآمدها و هزینه‌ها، بدست می‌آیند.  $W$  عمق آب مصرفی می‌باشد. با مشتق گیری از تابع تولید و مساوی صفر قرار دادن آن، عمق آب مصرفی در آبیاری کامل (عملکرد ماکزیمم یا درآمد ناخالص ماکزیمم) بدست می‌آید:

$$\frac{\partial y(W)}{\partial W} = b_1 + 2c_1 W = 0 \quad (18)$$

$$W_m = -\frac{b_1}{2c_1} \quad (19)$$

اِپتیم عمق آب مصرفی، و تئیکه آب محدودیت ندارد براساس معادله (۸) به قرار زیر بدست می‌آید:

$$W_1 = \frac{b_2 - P_c b_1}{2P_c c_1} \quad (20)$$

و

اِپتیم عمق آب مصرفی، و تئیکه با محدودیت آب مواجه هستیم براساس معادله ۱۳، بقرار زیر بدست می‌آید:

$$W_W = \left( \frac{P_c a_1 - a_2}{P_c c_1} \right)^{0.5} \quad (21)$$

باتوجه به منحنی توابع تولید و هزینه، عمقی از آب مصرفی ( $W_{el}$ ) وجود دارد که سود خالص ناشی از آن برابر سودخالص ناشی از آبیاری کامل ( $W_m$ ) می‌شود.

$$W_{el} = \frac{b_2 - P_c b_1 + Z_1}{2P_c c_1} \quad (22)$$

$$Z_1 = [(P_c b_1 - b_2)^2 - 4P_c c_1 \left( \frac{P_c b_1^2}{4c_1} - \frac{b_1 b_2}{2c_1} \right)]^{0.5} \quad (23)$$

### مثال کاربردی مدل انگلیش

این مثال بیانگر چگونگی کاربرد معادلات فوق می‌باشد و تحقیقی است که توسط انگلیش و همکارانش در سال ۱۹۸۷ در حوضه کلمبیا (ایالات متحده)، بر روی گندم زمستانه در مزارع مختلف انجام شده است. در این بررسی توابع ریاضی "آب مصرفی-عملکرد" و "آب مصرفی-هزینه‌ها" بدست آمده و عمق بهینه آب مصرفی در دو حالت محدودیت منابع آب و محدودیت زمین، تجزیه و تحلیل گردیده است.

کل عمق آب مصرفی سالیانه در آبیاری کامل برابر ۶۱۵ میلی‌متر براساس مدل پنمن (کالیبره شده با شرایط محلی) بدست آمده است، لذا کل حجم آب مصرفی برحسب متر مکعب در هر هکتار ۶۱۵۰ متر مکعب خواهد بود. در حالت بدون آبیاری (دیم)، عملکرد برابر ۱۹۵۰ کیلوگرم در هکتار بوده است. تابع تولید از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$y(W) = 1445 + 242/13 W - 1/96954 W^2$$

که در آن:

$y(W)$ : عملکرد گندم بر حسب کیلوگرم در هکتار است.

W : عمق آب مصرفی برحسب سانتیمتر است.

تابع هزینه براساس داده های جدول ۱ بصورت زیر بدست آمد:

$$c(W) = 482/3 + 7/79 W$$

که در آن  $c(W)$  کل هزینه های تولید می باشد.

(در ادامه محاسبات قیمت گندم ( $P_c$ ) هر کیلو، ۱۵٪ دلار (۴۵۰ ریال) در نظر گرفته می شود.)

توابع تولید و هزینه در شکل های ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است.

جدول ۱ - هزینه های ثابت و متغیر تولید در هکتار (برحسب دلار آمریکا)

انواع هزینه ها	هزینه های تولید (\$/ha)
۱- هزینه های ثابت (سالانه): - تجهیزات و لوازم آبیاری - ماشین آلات مزرعه - عملیات زراعی (شخم زدن، کاربرد مواد شیمیائی و کاشت)	۱۵۲/۳۶ ۱۱۶/۲۳ ۱۱۴/۷۳
کل هزینه های ثابت	۳۸۳/۳۲
۲- هزینه های متغیر با دو سطح عملکرد:	
الف - بدون آبیاری: (تولید ۱۹۵۰ کیلوگرم در هکتار). - هزینه کود نیتروژنه، ۲۲/۵ کیلوگرم در هکتار (از قرار هر کیلوگرم ۱/۲۷۶ دلار) - بذر - هزینه های برداشت	۲۸/۷۰ ۶/۹۲ ۶۳/۳۶
کل هزینه های متغیر در حالت دیم (بدون آبیاری)	۹۸/۹۸
ب- با آبیاری: (۴/۲ سانتیمتر در هر نوبت و با ده نوبت آبیاری) (تولید ۸۱۳۸ کیلوگرم در هکتار) - هزینه های آبیاری - کود نیتروژنه، ۱۱۷/۹ کیلوگرم در هکتار (از قرار هر کیلوگرم ۱/۲۷۶ دلار) - بذر - هزینه های برداشت	۱۳۷/۵۹ ۱۵۰/۴۴ ۲۹/۶۵ ۱۰۹/۷۶
کل هزینه های متغیر در حالت آبیاری	۴۲۷/۴۴

کل هزینه‌های تولید (برای یک هکتار، و برحسب دلار آمریکا) از حاصل جمع هزینه‌های ثابت و متغیر بدست می‌آید:

$$\text{کل هزینه‌های تولید در شرایط بدون آبیاری} = ۳۸۳/۳۲ + ۹۸/۹۸ = ۴۸۲/۳۰ \text{ (\$/ha)}$$

$$\text{کل هزینه‌های تولید در شرایط آبیاری} = ۳۸۳/۳۲ + ۴۲۷/۴۴ = ۸۱۰/۷۶ \text{ (\$/ha)}$$

باتوجه به تابع هزینه‌های تولید:

$$c(W) = a_2 + b_2W$$

بامحاسبات فوق و براساس داده‌های جدول ۳۰۲ کل هزینه‌های تولید به قرار زیر بدست می‌آید:

$$c(W) = ۸۱۰/۷۶ \text{ کل هزینه‌های تولید}$$

$$a_2 = ۴۸۲/۳۰$$

و با قراردادن در رابطه فوق:

$$۸۱۰/۷۶ = ۴۸۲/۳۰ + b_2 (۴۲/۲)$$

و بدین ترتیب ضریب زاویه خط هزینه ( $b_2$ ) بدست می‌آید:

$$b_2 = ۷/۷۹$$

و در نتیجه تابع هزینه‌های تولید بصورت زیرنوشته می‌شود:

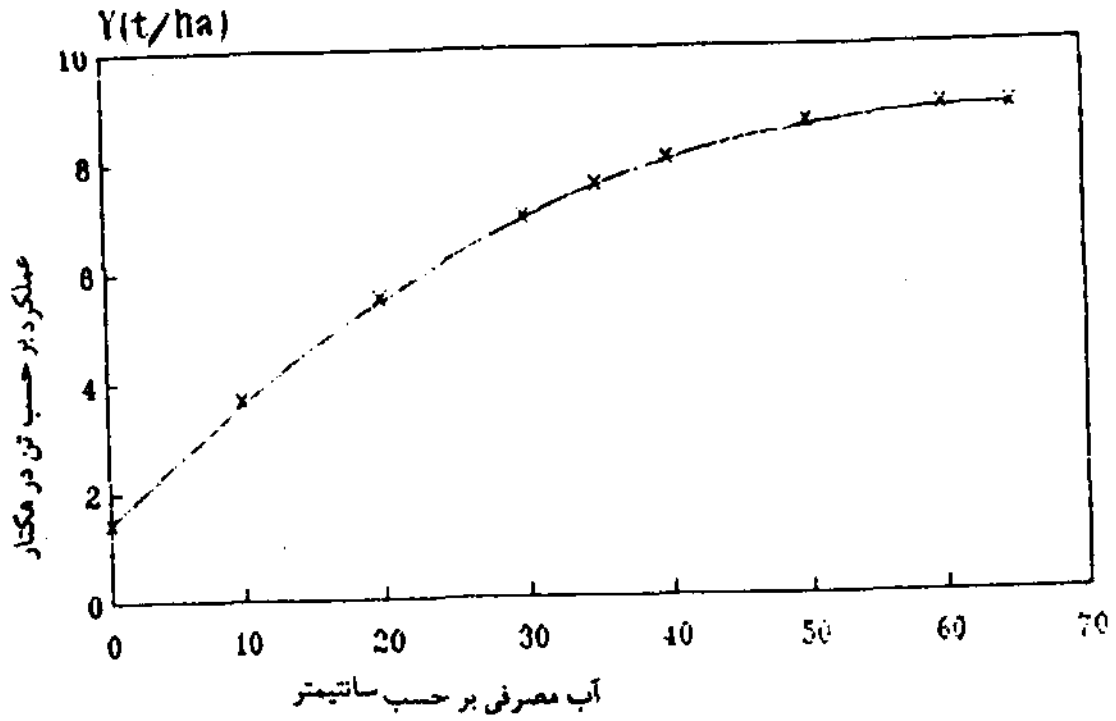
$$c(W) = ۴۸۲/۳ + ۷/۷۹ W$$

ماکزیمم عمق آب مصرفی برای دستیابی به عملکرد ماکزیمم ( $W_m$ ):

$$W_m = -\frac{b_1}{2c_1} = -\frac{۲۴۲/۱۳}{۲(-۱/۹۶۹۵۴)} = ۶۱/۵ \text{ cm}$$

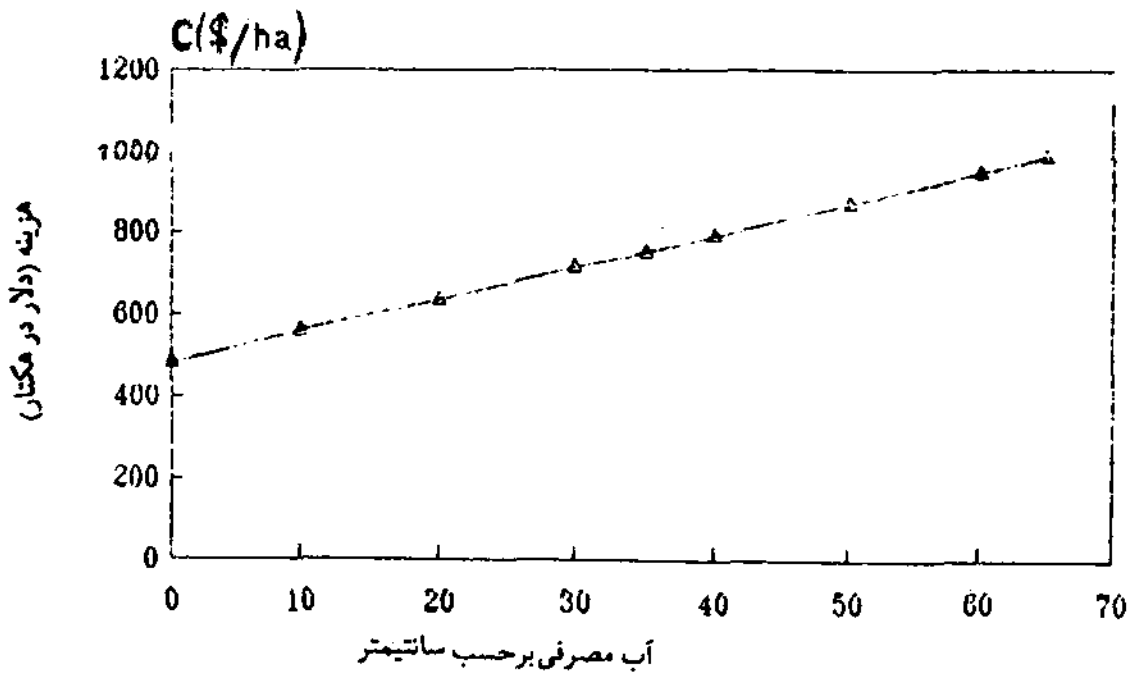
عمق آب مصرفی در شرایط محدودیت زمین ( $W_l$ ) به قرار زیر بدست می‌آید:

$$y(W) = a_1 + b_1W + c_1W^2$$



شکل ۳ - رابطه بین عمق آب مصرفی با عملکرد (درآمد ناخالص)

$$c(W) = a_2 + b_2W$$

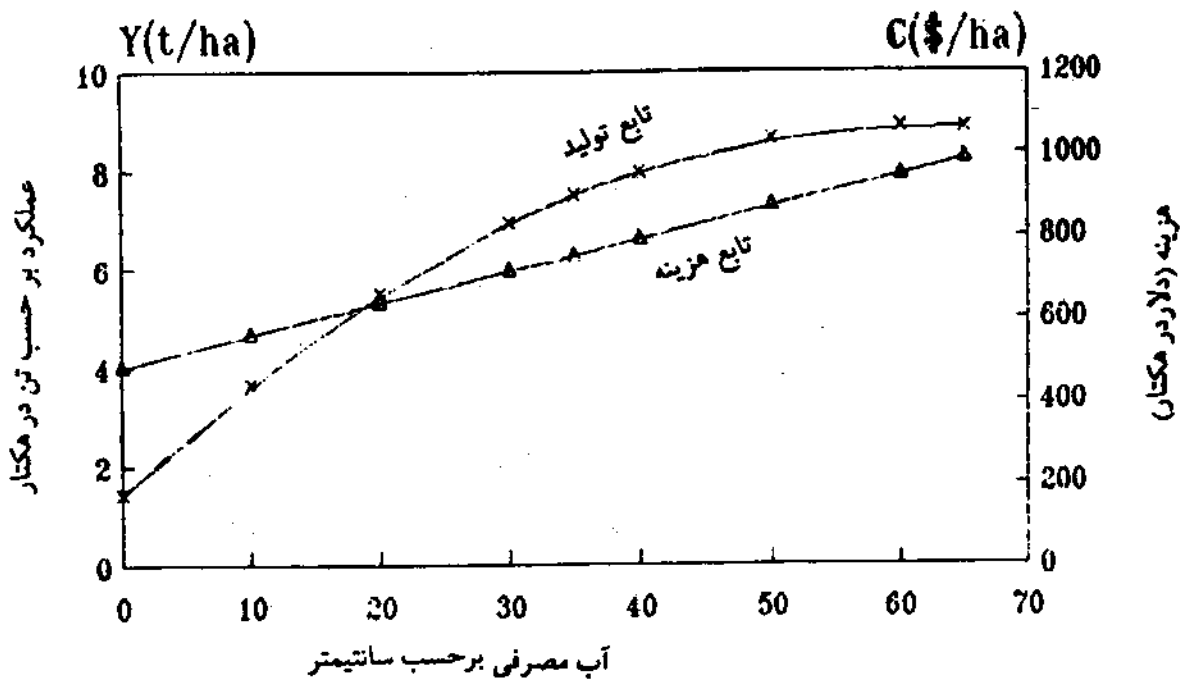


شکل ۴ - رابطه بین عمق آب مصرفی و هزینه‌ها

$$W_1 = \frac{b_2 - P_c b_1}{2P_c c_1} = \frac{7/79 - 0/15 \times 242/13}{2(0/15)(-1/96954)} = 48/2 \text{ cm}$$

عمق آب مصرفی در شرایط محدودیت آب ( $W_w$ ):

$$W_w = \left( \frac{P_c a_1 - a_2}{P_c c_1} \right)^{0.5} = \left[ \frac{0/15 \times 1445 - 242/3}{0/15 \times (-1/96954)} \right]^{0.5} = 3.0 \text{ cm}$$



شکل ۵- رابطه بین عمق آب مصرفی با هزینه و عملکرد-

برای بدست آوردن عمق معادل آبیاری کامل، ابتدا مقدار  $Z_1$  را محاسبه می‌نمائیم.

$$Z_1 = \left[ (P_c b_1 - b_2)^2 - 4P_c c_1 \left( \frac{P_c b_1^2}{4c_1} - \frac{b_1 b_2}{2c_1} \right) \right]^{0.5}$$

$$Z_1 = 7/79$$

عمق معادل آب مصرفی که سودناشی از آن برابر کاربرد ماکزیمم عمق آب مصرفی است، به قرار زیر محاسبه

می‌شود:

$$W_{e1} = \frac{b_2 - p_c b_1 + Z_1}{2p_c c_1} = \frac{7/79 - 0/15 \times 242/13 + 7/79}{2(0/15)(-1/96954)} = 34/6 \text{ cm}$$

$$W_{e1} \approx 35 \text{ cm}$$

جدول ۲ رابطه بین عملکرد، هزینه و سود خالص با آب مصرفی

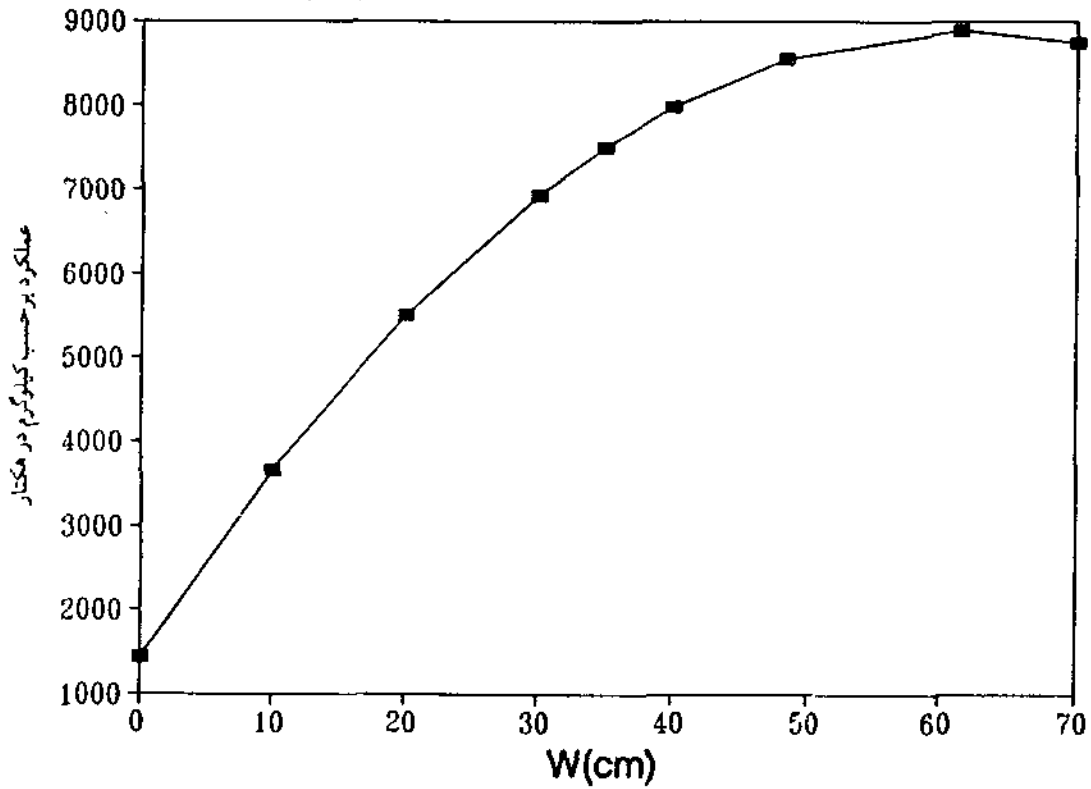
ردیف	عمق آب مصرفی $W$ (cm)	عملکرد $y(W)$ (Kg/ha)	هزینه $c(W)$ (\$/ha)	$il(W) = P_c y(W) - c(W)$ سود خالص (\$/ha)
۱	۰	۱۴۴۵	۴۸۲/۳	-۲۶۵/۵۵
۲	۱۰	۳۶۶۹	۵۶۰	-۹/۶
۳	۲۰	۵۴۹۹	۶۳۸	۱۸۷
۴	۳۰	۶۹۳۶	۷۱۶	۳۲۴
۵	۳۵	۷۰۰۶	۷۵۵	۳۷۱
۶	۴۰	۷۹۷۹	۷۹۴	۴۰۳
۷	۴۸/۲	۸۵۴۰	۸۵۸	۴۲۳
۸	۶۱/۵	۸۸۸۶	۹۶۱	۳۷۱
۹	۷۰	۸۷۴۳	۱۰۲۷	۲۸۴

تعبیر و تفسیر جدول فوق :

- (۱) با افزایش عمق آب مصرفی، میزان عملکرد تا حد مشخصی صعودی و سپس نزولی می شود.
- (۲) با افزایش عمق آب مصرفی، میزان هزینه ها یک روند صعودی را طی می کند.
- (۳) میزان سود خالص با افزایش عمق آب مصرفی در ابتدا، روند صعودی داشته و پس به صورت نزولی در می آید.
- (۴) در حالت محدودیت منابع آب، با بکارگیری ۵۰ درصد ماکزیم عمق آب مصرفی (۵۰٪ آبیاری کامل) سود خالص فقط ۱۳٪ کاهش می یابد.
- (۵) در ردیفهای ۱ و ۲ که سود خالص منفی گردیده است بدان معنی است که از ظرفیت سیستم و تجهیزات بطور کامل استفاده نشده است. در صورتیکه هزینه های مربوطه، تعدل گردیده است.
- (۶) در این مثال شاخص مقایسه "عملکرد در واحد سطح" معیار مقایسه مناسبی نمی باشد، زیرا با توجه به جدول فوق، در حالت  $W_1 = 48/2$  سانتیمتر، میزان عملکرد ۸۵۴۰ کیلوگرم در هکتار و در حالت  $W_m = 61/5$  سانتیمتر، میزان عملکرد ۸۸۸۶ کیلوگرم در هکتار است اما سود خالص در حالت اول بیشتر است.

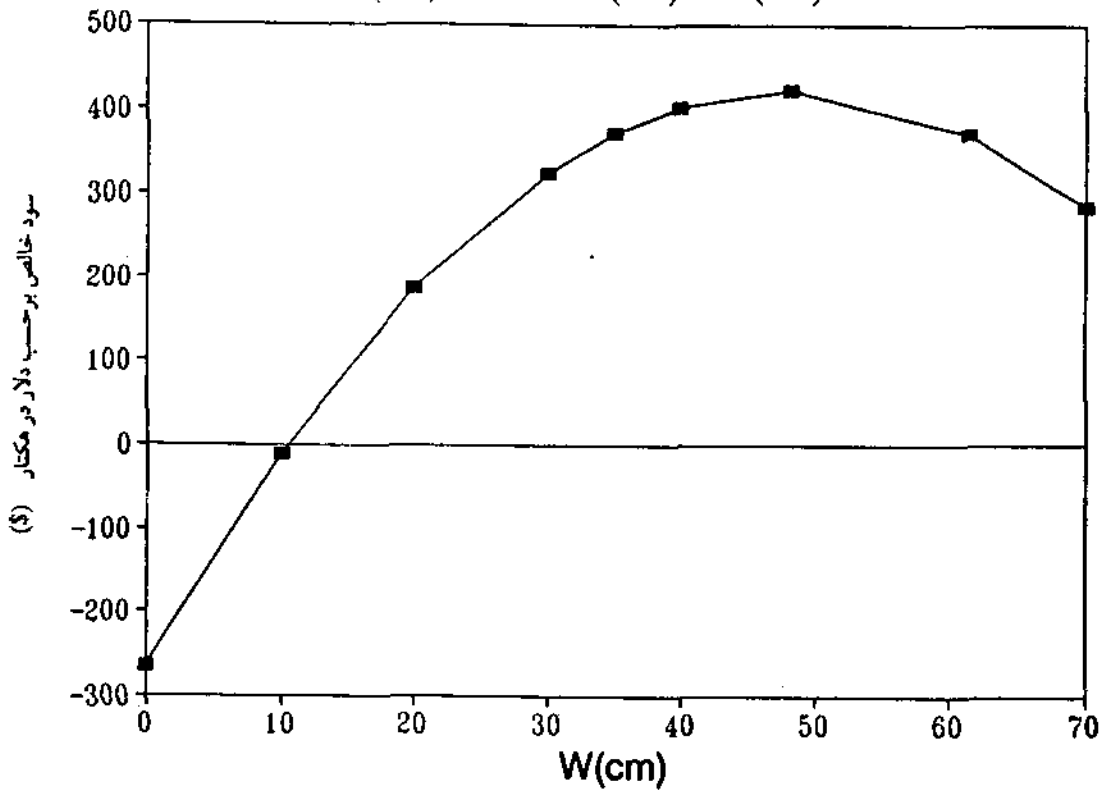


$$Y(W) = a_1 + b_1 * W + c_1 * W^2$$



آب مصرفی بر حسب سانتیمتر

$$il(W) = Pc * Y(W) - c(W)$$



آب مصرفی بر حسب سانتیمتر

۷) با بکارگیری عمق آب مصرفی معادل  $W_{el}=35$  سانتیمتر و  $W_{m}=61/5$  سانتیمتر سودخالص در هر دو حالت برابر است پس با توجه به شرایط این مثال منطقی است که عمق آب مصرفی ۳۵ سانتیمتر بکار رود. که این عمق، "در رابطه با حداکثر سود" عمق معادل آبیاری کامل" نامیده می‌شود.

۸) به هر شیوه‌ای که بتوان راندمان مصرف آب را بهبود بخشیده و سود خالص بیشتری را عاید کرد، و یا عملکرد را افزایش داد، هر یک در شرایط خود می‌تواند به عنوان یک تکنیک مدیریتی، کاربرد داشته باشد.

#### نتیجه:

امروزه بحران آب، و انفجار جمعیت در دنیا و ایران و هشدارهای جدی کارشناسان خودی و بیگانه درمقیاس وسیعتر، مسئولان اجرائی را بیش از پیش به تفکر واداشته است، بطوریکه در سخنان بزرگان صنعت آب کشور، اخیراً و اندک و اندک، زمزمه‌های خوش آوایی در مورد استفاده حداکثر از واحد حجم آب بگوش می‌رسد که بهجت اثر است ولی هنوز این اعتقاد به حدو درجه ایمان نرسیده است لذا مخاطب این مقاله علاوه بر کارشناسان و طراحان (بویژه طراحان در مهندسان مشاور) این بزرگواران نیز هستند لذا بر صاحب نظران است که این سخن را مکرر بگویند، و ترجیح بندکم آبیاری تنظیم شده را تکرار نمایند.

امروزه طراحی، اجرا و مدیریت پروژه‌های آبیاری از سطح بهره‌وران کشاورز تا سطوح بالا، مهندسان مشاور، سازمانهای دولتی بر اساس معیارهایی کم آبیاری، که محتوای اصلی آن «استفاده حداکثر از واحد آبست»، امر ضروری است، ضرورتی که طی نیم قرن اخیر به بوته نسیان سپرده شده است. اینک پس از اینهمه تعلل و تاخیر زمان اقتدا به «کم آبیاری» و کاربرد بدون وقفه و وسیع آن فرا رسیده است. در این رابطه موارد زیر را توصیه می‌نماید:

۱- کاهش آب مورد نیاز محصولات (بر مبنای آبیاری کامل)، به میزان حدود ۲۰٪ بعنوان فتوای کارشناسی، نظری است که می‌توان آنرا از هم اکنون در طراحی‌ها اعمال نمود.

۲- در ایران «اعمال کم آبیاری» باید بطور عمده، و ترجیحاً، مبتنی بر گسترش سطح کشت باشد و نه ذخیره سازی آب.

۳- در سطح بهره‌وران کشاورز، در ایران، آنان با توجه به خودکار بودن و قابلیت انعطاف سیستم‌های آبیاری تحت فشار، و با شم و تجربه‌ای که دارند، و متناسب با شرایط واحد بهره‌برداری خود، دست به کم آبیاری می‌زنند که بشارت میمونی است و بسیار حائز اهمیت است، این شیوه آبیاری که جزو آبیاریهای نیمه کلاسیک طبقه بندی شده است (مقاله تحت عنوان «تبیین و تعریف واژه شناختی آبیاریهای کلاسیک، غیرکلاسیک و نیمه کلاسیک» نشریه سالانه کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ج - خیرابی - الف - اسدالهی ۱۳۷۴) که لازم است توجه ویژه‌ای بدان معطوف شود، و این روش حسنه تبلیغ و ترغیب گردد.

۴- لازم است پروژه‌های آبیاری در دفاتر فنی، و در شرکت‌های مهندسان مشاور بر اساس «کم آبیاری تنظیم شده» طراحی شود (که در مقاله فوق‌الذکر جزو آبیاریهای کلاسیک طبقه بندی گردیده است).

شرایط فنی و ضوابط مهندسی اعمال «کم آبیاری تنظیم شده» در نشریه شماره یک و دو گروه آب مورد نیاز گیاهان و مدیریت محصولات زراعی کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، و در مقاله ای تحت عنوان «تحلیلی بر کم آبیاری، تعریف و تبیین انواع آن (ماهنامه آب، خاک و ماشین شماره ۱۳ - دیماه ۱۳۷۴ ج - خیرابی) آمده است، و خوانندگان محترم را به آن ارجاع می دهد.

۵- برای طراحی پروژه های آبیاری بر اساس «کم آبیاری تنظیم شده» و «بهینه سازی» (از نظر عملکرد ماگزیمم و یا سودخالص ماگزیمم، چه برای شرایط روز و چه برای شرایط آبی، علاوه بر معیارهای علمی، فنی و مهندسی متداول، که در طراحی «آبیاری کامل» نیز از آنها استفاده می شود، لازم است افت عملکرد محصول به ازای درجات مختلف «کم آبیاری» بر اساس تحقیقات محلی معلوم گردد. سپس لازم است مشخص گردد که با آب صرفه جوئی شده چه مقدار اراضی را می توان تحت کشت قرار داد؟ و سپس حساب دخل و خرج آنها، هزینه ها و درآمدها و محاسبات اقتصادی و «بهینه سازی» پروژه را چه از نظر میزان عملکرد، چه از نظر سوددهی، و چه از نظر اقتصاد ملی و گسترش سطح کشت و یا ذخیره سازی آب، انجام داد و بر اساس مدل های و توابع مربوطه سطح بهینه را مشخص کرد.

۶- اطمینان دارد در صورتیکه بهینه سازی بر اساس دستورالعمل های «کم آبیاری تنظیم شده»، و بر اساس داده های تحقیقات محلی، و برپائی و تجزیه تحلیل توابع و منحنی های «مصرف آب - عملکرد» - «و مصرف آب - سود خالص» انجام پذیرد، در بسیاری موارد سطوح بهینه مصرف آب از «آبیاری کامل» بسیار فاصله خواهد گرفت و چه بسا حول و حوش ۳۰ تا ۵۰٪ میزان «آبیاری کامل» مستقر خواهد شد، و راندمان کارآئی آب بالا خواهد رفت و از واحد حجم آب حداکثر استفاده بعمل خواهد آمد.

## فهرست منابع

- ۱- خیرابی جمشید - اسدالهی سیداسدا... «تعریف علمی و مهندسی آبیاری». ماهنامه آب، خاک و ماشین شماره ۲- بهمن ۱۳۷۳.
- ۲- خیرابی جمشید - «تحلیلی بر کم آبیاری، تعریف و تبیین انواع آن». ماهنامه آب، خاک و ماشین شماره ۱۳- دیماه ۱۳۷۴.
- ۳- خیرابی جمشید - اسدالهی سید اسدا... «تعریف و تبیین واژه شناختی آبیاریهای کلاسیک - غیر کلاسیک و نیمه کلاسیک». سالنامه کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران ۱۳۷۳.
- ۴- خیرابی جمشید - انتصاری محمدرضا - توکلی علیرضا - سلامت علیرضا - «خلاصه مقالات کم آبیاری» - نشریه شماره یک گروه کار آب مورد نیاز گیاهان و مدیریت محصولات زراعی - کمیته ملی آبیاری و زهکشی - گردآوری، ترجمه و تدوین، ۱۳۷۴.
- ۵- خیرابی جمشید - نداف حسن - «نظری به تاریخچه آبیاری ایران» ماهنامه آب، خاک و ماشین شماره ۱۸ خرداد ۷۵.
- ۶- خیرابی جمشید و همکاران به ترتیب الفبا: انتصاری محمدرضا - توکلی علیرضا - سلامت علیرضا - نشریه شماره ۲ گروه آب مورد نیاز گیاهان و مدیریت محصولات زراعی - کمیته ملی آبیاری و زهکشی دستورالعملهای کم آبیاری، گردآوری، ترجمه و تدوین - ۱۳۷۵.
- ۷- فرزانه روح... علوم آبیاری متون درسی گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

- Economic Consideration , by George h.Hargreaves, F.Asce & Zohrab A.Samani  
Journal of Irrigation and Drainage Engineering , vol.11o, NO.4, December, 1984  
- English . M.J. 1990a , Deficit Irrigation: Analytical Framework j, ASCE, 116 (3) ,  
399 - 412