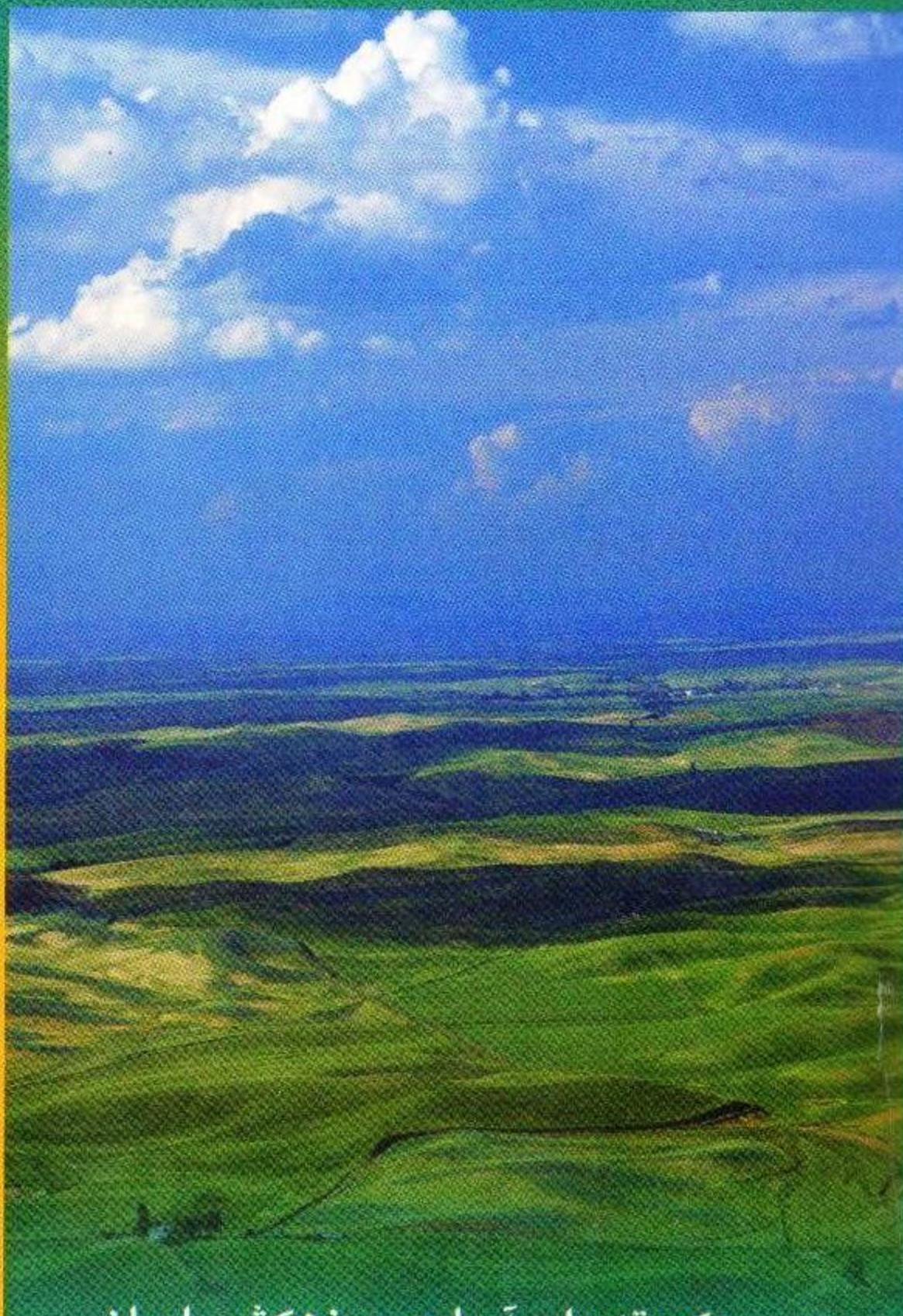




اصول و کاربرد کم آبیاری



کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

شماره انتشار: ۱۰۰

۱۳۸۵



کتابخانه
کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

شماره پست ۶۰۶۰

بسم الله الرحمن الرحيم
الحمد لله رب العالمين
والصلاة والسلام
على سيدنا محمد
والآله الطيبين
الطاهرين
السلامين
البراهين
الغياثين
المرسلين
الامينين
البراهين
الغياثين
المرسلين
الامينين



اصول و کاربرد کم آبیاری

کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

مؤلفین:

علیرضا سپاسخواه علیرضا توکلی

سید فرهاد موسوی

منشور راهبردها

کمبود آب تنها تهدید اساسی برای بقای بشر، اکوسیستم طبیعی و تکوین تمدن‌ها است. امنیت غذایی، بهداشت و اقتصاد کلان تحت تأثیر کمبود آب به شدت صدمه می‌بیند. سرانه آب در ایران که در سال‌های ۲۷-۱۳۳۵ حدود ۵۰۰۰-۴۰۰۰ متر مکعب در سال بوده در حال حاضر به کمتر از ۲۰۰۰ متر مکعب در سال رسیده است و پیش‌بینی می‌شود در سال ۱۴۰۰ به کمتر از ۱۰۰۰ متر مکعب در سال برسد. از سوی دیگر، بخش کشاورزی به عنوان مصرف‌کننده عمده آب (۹۵-۶۰ درصد کل منابع قابل دسترس) بایستی ضمن رقابت سرسختانه و مستمر با سایر بخش‌ها از جمله صنعت، شرب و خانگی به ارزش اقتصادی آب بیشتر توجه نماید که تنها در سایه «تولید بیشتر به ازای واحد آب مصرفی» این تداوم مصرف امکان‌پذیر است. دستیابی به این منشور بقا با اعمال مدیریت‌های آگاه و به کارگیری فناوری نوین مهندسی آبیاری میسر است که به طور خلاصه شامل موارد زیر می‌شود:

- ۱- اعمال مدیریت کم‌آبیاری (Efficient irrigation) در زراعت آبی همراه با بارش فصل رشد و برهمکنش کود نیتروژن با توجه به مزیت‌های نسبی آن که منجر به تدوین سند ملی عمق بهینه آب مصرفی می‌گردد.
- ۲- اعمال مدیریت آبیاری تکمیلی (Supplementary irrigation) و تک‌آبیاری (Single irrigation) در زراعت دیم و زراعت نیمه آبی که منجر به تثبیت، افزایش و بهبود عملکرد در گستره زراعت دیم می‌گردد.
- ۳- با توجه به هجوم بخش‌های دیگر به سهم آب بخش کشاورزی و تصاحب مصرف و آلوده‌سازی آن، بخش کشاورزی برای بقا و استمرار حیات بشری، بایستی نگاهی نو و محققانه به سوی کشف منابع مفقوده آب داشته باشد. استحصال و جمع‌آوری آب باران (Water harvesting) از ارزان‌ترین، ساده‌ترین و زیباترین شیوه‌های تأمین آب است که آیه شریفه «و جعلنا من الماء کل شیء حی» را متجلی خواهد ساخت.

در پایان لازم می‌دانم از آقای مهندس علیرضا توکلی که قدم‌های اولیه را برای تالیف این کتاب برداشتند و از آقای دکتر علیرضا سپاسخواه که در غنای علمی کتاب تلاش وافر داشتند و از آقای دکتر سید فرهاد موسوی که با ایجاد رابطه منطقی از منابع آب و کم‌آبیاری لزوم توجه به کم‌آبیاری را تأکید کردند و همچنین از دبیر کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران آقای مهندس سیداسدالله اسدالهی و همکاران ایشان تشکر و قدردانی می‌گردد.

رسول زرگر

معاون وزیر نیرو در امور آب

و رئیس شورای عالی کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

۴- بایستی در مدیریت‌هایی چون بازچرخانی (Recycling) آب، استفاده از آب‌های نامتعارف، استفاده از پساب‌های تصفیه شده و بهبود مدیریت‌های زراعی تجدید نظرهای فنی و کلی به عمل آورد.

۵- برقراری نظام ملی تخصیص آب با تکیه بر اصول توسعه پایدار همه سویه.

۶- برقراری نظام حسابداری ملی آب و امکان سنجش واقعی میزان آب تحویل شده.

۷- برقراری نظام مشارکت مردمی به ویژه در بخش نگهداری و بهره‌برداری از آب.

۸- به‌سازی و به‌گزینی سیستم‌ها و روش‌های آبیاری و اعمال مدیریت تلفیقی بهره‌برداری از آب.

۹- به‌سازی و ارتقای دانش و بینش کارگزاران و بهره‌برداران و ایجاد بخش ارتباطی زبده، آگاه و فرانگر.

۱۰- فرانگری در طراحی، اجرا و بهره‌برداری شبکه‌ها و سیستم‌های آبیاری با ملحوظ داشتن تخصص‌های علوم زراعی، خاک، اقتصاد، زیست محیطی و مسائل اجتماعی.

۱۱- ایجاد مرکز ساماندهی فنی طراحی و اجرای سیستم‌های آبیاری و تخصصی شدن آن، ایجاد پایگاه اطلاعاتی از شبکه‌ها و سیستم‌های موجود به عنوان یک اثر علمی و نظارت و ارزیابی آنها، که مجموعاً در حیطه وظایف نظام مهندسی آبیاری و زهکشی قرار خواهد گرفت.

۱۲- تحقیقات، اکسیر نوآوری در نوسازی، طراوت و تولید دانش و بینش است. لذا توجه به تحقیقات مرتبط با مسائل آب و مشارکت کلیه دستگاه‌ها ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است.

۱۳- توسعه سامانه‌های اطلاع رسانی و ترویجی.

۱۴- عزم ملی شجاعانه ولی دشوار، به ویژه در بخش فرهنگ‌سازی.

بهره‌وری بیشتر و بهینه‌سازی از جمله موضوعاتی است که در کلیه رشته‌هایی که دارای مبانی اقتصادی هستند، نمود و جایگاه ویژه‌ای دارد. شاید در گذشته، به دلیل وفور و عدم محدودیت برخی منابع و نهاده‌ها، تأمین آنها هزینه چندانی در برنداشت، از جمله تهیه و استحصال آب آسان و ارزان بود، تأمین نیروی کارگری مشکلی نداشت و نظایر اینها. اما امروزه به خاطر رشد بی‌رویه جمعیت، توجه به

فرهنگ زیست محیطی، امنیت غذایی و تلاش برای بهبود وضع بهداشت و درمان و زیاده‌خواهی رفاهی از یکسو و محدودیت منابع حیاتی و سایه انداختن ترفندهای سیاسی بر روابط انسانی از سوی دیگر سبب شده است که بسیاری از معادلات متوازن به نامعادلات جدی تبدیل شوند و یکی از این متغیرها در این نامعادلات، مسئله آب مصرفی در کشاورزی است. لذا جدای از همه مسائل و موضوعات، در این مجموعه فقط به نقش و اهمیت روش‌های بهینه‌سازی آب مصرفی در کشاورزی پرداخته می‌شود و امید می‌رود بتواند در تبیین جایگاه مصرف آب مؤثر واقع شود.

امروزه، کم‌آبیاری به عنوان روشی که می‌تواند حداکثر تولید و سود خالص را به همراه بیاورد، به عنوان یک فناوری مهم، هدفمند، هوشمند و اقتصادی در مهندسی آبیاری مطرح است و در این نوشته، به ابعاد کاربردی آن، نمونه‌های عینی و شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی توجه شده است. این مجموعه می‌تواند مانند راهنما و دستورالعملی مفید در اختیار پژوهشگران، دانشجویان و طراحان پروژه‌های آبیاری قرار گیرد.

لازم است اذعان نماییم که درک مفاهیم و روابط ریاضی بیان شده، بدون ارائه نمونه‌های عینی ملموس، نتایجی درخور نخواهد داشت. لذا در این مجموعه، غیر از منابع معتبر و نتایج تحقیقات و پژوهش‌های نگارندگان، از مقالات و گزارش‌های دیگران نیز استفاده شده است که تشریح کننده نحوه استفاده از روابط ریاضی کم‌آبیاری است.

بدیهی است این مجموعه عاری از نقص نیست. اما امیدواریم که خوانندگان و صاحب‌نظران عزیز با ارائه راهنمایی‌های ارزنده خود بر ما منت گذارند.

علیرضا توکلی

علیرضا سپاس‌خواه

عضو هیئت علمی مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم

عضو هیئت علمی دانشگاه شیراز

art.tavakoli@gmail.com

sepas@hafez.shirazu.ac.ir

سید فرهاد موسوی

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان

mousavi@cc.iut.ac.ir

فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
	فصل ۱
۱	شناسایی و اهمیت کم آبیاری
۱	۱-۱ مقدمه
۲	۱-۲ اهمیت و جایگاه کم آبیاری
	فصل ۲
۱۱	منابع آب، کمبود آب و کم آبیاری
۱۱	۱-۲ نگاهی کلی به منابع آب کره زمین
۱۸	۲-۲ برنامه ریزی آبیاری تحت شرایط محدودیت منابع آب
۱۹	۱-۲-۲ توابع تولید
۲۱	۲-۲-۲ مدیریت کم آبیاری
	فصل ۳
۲۷	توابع تولید
۲۷	۱-۳ تعریف تابع تولید
۳۰	۲-۳ مدل ها و روابط بهینه سازی کم آبیاری
۳۲	۱-۲-۳ فرمول استوارت و همکاران (۱۹۷۷)
۳۲	۲-۲-۳ فرمول دورنبوس و کاسام (۱۹۷۹)
۳۳	۳-۲-۳ رابطه مین هاس و همکاران (۱۹۷۴)
۳۴	۴-۲-۳ رابطه هنکس و راسموسن (۱۹۸۲)
۳۴	۵-۲-۳ رابطه جنسن (۱۹۶۸)
۳۵	۶-۲-۳ رابطه دویت (۱۹۵۸)

صفحه	عنوان
	فصل ۶
۷۵	سومین شکل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی
۷۵	۶-۱ کلیات
۷۹	۶-۲ بهینه‌سازی آب مصرفی چغندر قند (کرج)
۸۴	۶-۳ بهینه‌سازی آب مصرفی چغندر قند (اصفهان)
	فصل ۷
۸۷	شاخص‌های بهره‌وری آب در کم آبیاری
۸۷	۷-۱ مقدمه
۹۲	۷-۲ شاخص‌های بهره‌وری آب (WP)
۹۸	۷-۳ نتیجه‌گیری
	فصل ۸
۹۹	ارزیابی اقتصادی کم آبیاری و نیتروژن
۹۹	۸-۱ تخمین تابع تولید گندم
۱۰۳	۸-۲ تخمین ضرایب تابع تولید
۱۰۵	۸-۳ تابع درآمد خالص
۱۱۰	۸-۴ نتیجه‌گیری
	فصل ۹
۱۱۱	بهینه‌سازی کم آبیاری و نیتروژن کاربردی
۱۱۱	۹-۱ مقدمه
۱۱۲	۹-۲ اصول نظری و کاربرد آن
۱۱۵	۹-۳ داده‌های تحلیل

صفحه	عنوان
۳۶	۲-۲-۷ رابطه هنکس (۱۹۷۴)
۳۶	۲-۲-۸ رابطه آرکلی (۱۹۶۳)
۳۷	۲-۲-۹ رابطه خطی تبخیر - تعرق با عملکرد
۳۷	۲-۲-۱۰ روابط مس (۱۹۸۶) و مس- هافمن (۱۹۷۷)
۳۸	۳-۳ کارآیی مصرف آب
۳۹	۳-۴ شاخص برداشت
۴۰	۳-۵ بهینه‌سازی عمق آب مصرفی و سود خالص
	فصل ۴
۴۵	اولین شکل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی
۴۵	۴-۱ کلیات
۴۸	۴-۲ مثال‌هایی از بهینه‌سازی عمق آب مصرفی
۴۹	۴-۲-۱ گیاه گندم (دور آبیاری ۷ روز، منطقه کرج)
۵۳	۴-۲-۲ گیاه جو (دور آبیاری ۷ روز، منطقه کرج)
۵۷	۴-۲-۳ پنبه (گرگان)
۵۹	۴-۲-۴ بهینه‌سازی مصرف آب در زراعت گندم، حوزه کلمبیا
۶۵	۴-۲-۵ بهینه‌سازی مصرف آب در زراعت پنبه، کالیفرنیا
۶۸	۴-۲-۶ تابع هزینه ذرت، زیمبابوه
	فصل ۵
۷۱	دومین شکل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی
۷۱	۵-۱ کلیات
۷۱	۵-۲ محاسبه شاخص‌ها

عنوان

صفحه

۴-۹ تجزیه و تحلیل نتایج	۱۱۷
۱-۴-۹ تابع تولید محصول	۱۱۸
۲-۴-۹ تابع هزینه تولید	۱۱۹
۳-۴-۹ مقادیر بهینه آب و نیتروژن	۱۲۰
۴-۴-۹ شرایط محدودیت زمین	۱۲۰
۵-۴-۹ شرایط محدودیت آب	۱۲۱
۵-۹ تحلیل اقتصادی	۱۲۴
۶-۹ نتیجه گیری	۱۲۶
فصل ۱۰	
کم آبیاری با وجود بارندگی در فصل رشد	۱۲۹
۱-۱۰ مقدمه	۱۲۹
۲-۱۰ اصول نظری و کاربرد آن	۱۳۰
۳-۱۰ مطالعه پنبه	۱۳۱
۴-۱۰ مطالعه گندم	۱۳۲
۵-۱۰ نتایج تحلیل	۱۳۴
۱-۵-۱۰ تابع تولید محصول پنبه	۱۳۴
۲-۵-۱۰ تابع هزینه تولید پنبه	۱۳۶
۳-۵-۱۰ تحلیل کم آبیاری پنبه	۱۳۷
۴-۵-۱۰ تابع تولید محصول گندم	۱۴۱
۵-۵-۱۰ تابع هزینه تولید گندم	۱۴۴
۶-۱۰ تحلیل کم آبیاری گندم	۱۴۵
۷-۱۰ نتیجه گیری	۱۴۷

عنوان

صفحه

فصل ۱۱	
بهینه سازی کم آبیاری و نیتروژن کاربردی همراه با بارش فصل	۱۴۹
۱-۱۱ مقدمه	۱۴۹
۲-۱۱ اصول نظری و کاربرد آن	۱۵۰
۳-۱۱ داده های تحلیل	۱۵۶
۴-۱۱ تجزیه و تحلیل نتایج	۱۵۸
۱-۴-۱۱ تابع تولید محصول	۱۵۸
۲-۴-۱۱ تابع هزینه تولید	۱۵۹
۵-۱۱ تحلیل اقتصادی	۱۶۱
۱-۵-۱۱ شرایط محدودیت زمین	۱۶۱
۲-۵-۱۱ شرایط محدودیت آب	۱۶۲
۳-۵-۱۱ برنامه ریزی کم آبیاری گندم همراه با بارش فصل رشد	۱۶۸
۶-۱۱ نتیجه گیری	۱۷۱
فصل ۱۲	
بهینه سازی اقتصادی آب آبیاری و کود نیتروژن با روش ایزوکوانت در مقادیر مختلف بارندگی	۱۷۳
۱-۱۲ مقدمه	۱۷۳
۲-۱۲ اصول نظری و کاربرد آن	۱۷۶
۳-۱۲ اطلاعات پژوهش	۱۷۷
۴-۱۲ نتایج و بحث	۱۸۰
۵-۱۲ نتیجه گیری	۱۹۰

عنوان	صفحه
-------	------

فصل ۱۳

برنامه ریزی کم آبیاری با تکیه بر سوابق تحقیقاتی

۱۹۳

۱-۱۳ مقدمه

۱۹۳

۲-۱۳ جهت گیری های کم آبیاری

۱۹۴

۳-۱۳ سوابق تحقیقاتی

۱۹۸

۴-۱۳ جمع بندی نتایج

۲۱۰

۱-۴-۱۳ اثرات و نتایج کم آبیاری

۲۱۱

۲-۴-۱۳ انتخاب گیاه

۲۱۲

۳-۴-۱۳ انتخاب خاک

۲۱۳

۴-۴-۱۳ عملیات زراعی

۲۱۴

۵-۴-۱۳ برنامه ریزی آبیاری

۲۱۴

۶-۴-۱۳ حد بهینه کم آبیاری

۲۱۷

۷-۴-۱۳ توجه جدی

۲۱۸

فصل ۱۴

مسائل تحقیقاتی کم آبیاری

۲۱۹

۱-۱۴ مقدمه

۲۱۹

۲-۱۴ اجزا و ابعاد ساختار پژوهشی

۲۲۰

۳-۱۴ تئوری صفر پژوهش

۲۲۲

۴-۱۴ اهمیت پژوهش های آب

۲۲۳

۵-۱۴ اهداف

۲۲۵

۶-۱۴ اهمیت و ضرورت اجرای پروژه های کم آبیاری

۲۲۶

۷-۱۴ سابقه تحقیق

۲۲۷

۸-۱۴ اجزا و ابعاد مسئله

۲۲۷

عنوان	صفحه
-------	------

۹-۱۴ برنامه های پژوهشی مدیریت کم آبیاری

۲۳۰

۱-۹-۱۴ شرایط شبکه (مدرن)

۲۳۰

۲-۹-۱۴ شرایط حقابه (سنتی)

۲۳۱

۱۰-۱۴ مقادیر مختلف نیتروژن

۲۳۲

۱۱-۱۴ محصولات تحت مدیریت کم آبیاری

۲۳۲

۱۲-۱۴ تحلیل آماری

۲۳۳

۱۳-۱۴ تحلیل اجتماعی و اقتصادی

۲۳۳

۱۴-۱۴ برگزاری دوره های آموزشی

۲۳۳

۱۵-۱۴ سیستم آبیاری پیشنهادی

۲۳۳

۱۶-۱۴ بررسی مراحل بحرانی و حساس رشد

۲۳۴

۱-۱۶-۱۴ در نظر گرفتن مراحل بحرانی و حساس

۲۳۵

رشد در مدیریت کم آبیاری

رشد در مدیریت کم آبیاری

۲-۱۶-۱۴ اعمال کم آبیاری به شیوه کاهش میزان مصرف

۲۳۵

آب از ابتدا تا انتهای فصل رشد

آب از ابتدا تا انتهای فصل رشد

۱۷-۱۴ بحث و نتیجه گیری

۲۴۲

فصل ۱۵

کم آبیاری و هیدرومدول آبیاری

۲۴۵

۱-۱۵ کم آبیاری و مدیریت تأمین و استحصال آب

۲۴۵

۱-۱-۱۵ منظر کنترل از پایین

۲۴۶

۲-۱-۱۵ منظر کنترل از بالا

۲۴۸

۲-۱۵ هیدرومدول آبیاری

۲۴۸

۳-۱۵ کم آبیاری و هیدرومدول آبیاری

۲۵۰

۴-۱۵ نتیجه گیری

۲۵۸

فصل ۱

شناسایی و اهمیت کم آبیاری

۱-۱- مقدمه

کم آبیاری یک راهکار (Strategy) بهینه برای به عمل آوردن محصولات تحت شرایط کمبود آب است که همراه با کاهش محصول در واحد سطح و افزایش آن با گسترش سطح می باشد. گرچه، راهکار بهینه از نقطه نظر زارع، کاربرد حجمی از آب آبیاری است که درآمد خالص او را به حداکثر می رساند و نه مقدار آبی که بیشترین محصول را تولید می کند. کم آبیاری راهکار بهینه سازی است که در آن آگاهانه به گیاهان اجازه داده می شود با دریافت آب کمتر از نیاز، محصول خود را کاهش دهند (English et al., 1990). هدف اصلی از اجرای کم آبیاری، همانا افزایش راندمان (بازده) کاربرد آب، چه از طریق کاهش میزان آب آبیاری در هر نوبت و یا حذف آبیاری هایی است که کمترین بازدهی را دارند. هرگاه منابع آب محدود بوده و یا هزینه های آب و آبیاری زیاد باشد، کارایی مصرف آب برای تولید بیشترین محصول زیاد نخواهد بود. هنگامی که مشکلاتی از نظر تأمین سرمایه، انرژی، نیروی کارگر و یا سایر منابع اساسی وجود داشته باشد، یا هنگامی که هزینه های این گونه منابع زیاد باشد، اعمال کم آبیاری می تواند در افزایش عملکرد و سود مفید واقع شود (English et al., 1990). کم آبیاری می تواند برای گسترش سطح زیر کشت و به حداکثر رسانیدن و یا بهبود و تثبیت تولید محصولات یک منطقه نیز استفاده شود.

قبل از پرداختن به تحلیل های ریاضی و نمونه های عینی کم آبیاری، شرح مختصری از اهمیت، ضرورت و جایگاه کم آبیاری در کشاورزی بیان می شود. امید است که خوانندگان محترم با عنایت به این بحث کوتاه، به اهداف و روند بهینه سازی کم آبیاری در بخش های بعدی پی ببرند.

مرسوم است که پیشینه تحقیقاتی هر موضوعی پس از مقدمه و قبل از بحث روش‌ها آورده می‌شود. اما در این کتاب، این مهم به فصل هفتم موکول شده است. در نتیجه، خوانندگان در ابتدا با روش‌های کم آبیاری و توابع تولید دخیل در این امر آشنا می‌شوند و سپس نتایج نمونه‌های عینی و اجرا شده از کم آبیاری را در ایران و خارج از کشور ملاحظه خواهند فرمود.

۱-۲ اهمیت و جایگاه کم آبیاری

در مناطقی که کشاورزان آب کمی در اختیار دارند تا با آن گیاهان را آبیاری کنند، می‌توانند یکی از راه‌های زیر را انتخاب کنند: (۱) سطح زیر کشت را کاهش دهند و آب را تا حد کافی و نیاز در اختیار گیاهان باقی‌مانده قرار دهند و یا (۲) تمام سطح را زیر کشت ببرند ولی بخشی از نیاز آبی گیاهان را برآورده کنند. راهکار دوم مرتبط با کم آبیاری است. گرچه کم آبیاری قرن‌هاست که در کشور ایران به صورت سنتی توسط کشاورزان عمل می‌گردد و شاید در سایر کشورهای خشک و نیمه خشک نیز با آن به نحوی آشنا هستند، اما این روش چنان تحولی را در اقتصاد آب در بخش کشاورزی به همراه داشته و خواهد داشت که نیازمند تبیین مفاهیم و تحقیق پیرامون جنبه‌های علمی، عملی و کاربردی آن است. ضرورت اعمال کم آبیاری به نحوی احساس شده است که پیشنهاد طراحی آبیاری بر مبنای اطمینان ۵۰ درصد آب موجود مورد تأیید و تصدیق قرار می‌گیرد. برخی از سیستم‌های (سامانه‌های) نوین آبیاری که نیازمند تخصیص هزینه‌های کلان هستند با اعمال کم آبیاری سودآور اقتصادی و به صرفه خواهند شد (English et al., 1990).

نگاهی به مراجع و منابع گذشته و حال طراحی سیستم‌های آبیاری توسط مهندسین مشاور و دفاتر فنی نشان می‌دهد که در اکثر موارد آبیاری کامل توصیه شده است و برخی از این منابع صریحاً قید می‌کنند که سیستم بایستی آب کافی را با توجه به کل نیاز آبی گیاه تأمین نماید. در برخی از منابع نیز طراحی بر پایه حداکثر تخلیه مجاز رطوبت تا عمق ریشه گیاه بنا نهاده شده است. حداکثر سطح تخلیه توسط

طراح انتخاب می‌شود اما تخلیه پیشنهادی و تجدید آبیاری، در کتاب‌های مرجع اشاره به آبیاری کامل دارند (English and Raju, 1996).

انگلیش و راجا (English and Raju, 1996) از «آبیاری ناقص» (Partial irrigation) به جای کم آبیاری نام می‌برند و اظهار می‌دارند که تحت برخی شرایط، طراح ممکن است تخلیه آب بیشتر را جایز بداند، اگر چه منجر به کاهش عملکرد می‌شود (البته به عنوان «یک بهره اقتصادی در مقابل هزینه‌های زیاد آب»). سپس در ادامه به وجود ریسک اشاره کرده و چنین هشدار می‌دهند که «کاهش جدی عملکرد در صورت نقص غیر مترقبه تجهیزات و یا به وجود آمدن ناگهانی شرایط بد و خشک جوی» اتفاق خواهد افتاد. در یک آزمایش سه ساله روی چهار رقم سیب زمینی، اثرات کم آبیاری بررسی شد. نتایج نشان داد که عملکرد محصول تا ۱۴ درصد کاهش یافت و در مصرف آب تا ۴۰ درصد صرفه‌جویی شد. اما نتیجه‌گیری شد که کم آبیاری سیب زمینی در اقلیم نیمه خشک شرق اورگان آمریکا نمی‌تواند مدیریتی پایدار باشد زیرا افزایش مختصر درآمدها نمی‌تواند ریسک کاهش محصول را جبران کند (به نقل از English and Raju, 1996).

عدم تمایل به فهم و کاربرد مفاهیم کم آبیاری در روش‌های مرسوم آبیاری، مربوط به شانه خالی‌کردن از ریسک و خطرپذیری اعمال کم آبیاری است و به خاطر وجود این خطر، از درآمد بالقوه این روش فنی - اقتصادی صرف نظر می‌شود. اما با توجه به آنچه که در این نوشتار آمده، در حد امکان کم آبیاری تشریح شده و خواننده خواهد دید که به خاطر وجود منافع حاصل، وجود ریسک نمی‌تواند مانع اجرای این روش گردد.

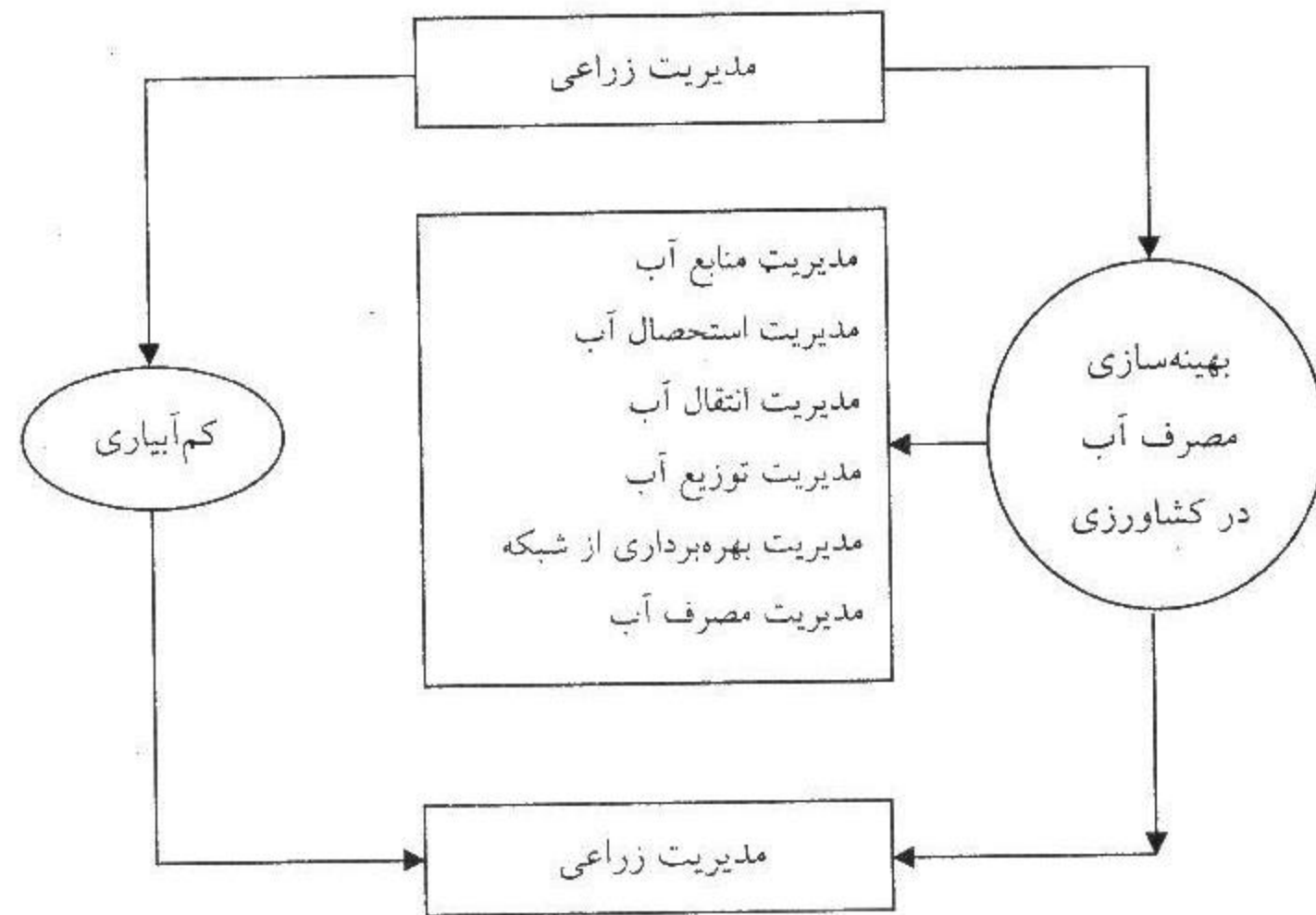
افزایش درآمد و سود خالص با کم آبیاری از سه عامل نشأت می‌گیرد: افزایش راندمان آبیاری، کاهش هزینه‌های آبیاری و کاهش هزینه‌های آب با صرفه‌جویی در آن. این کاهش هزینه‌ها شامل کاهش مصرف آب در واحد سطح، کاهش زمان کار موتور پمپ، کاهش نیروی کارگری، افزایش سرعت تکمیل آبیاری در واحد سطح و بهینه‌سازی هیدرومدول آبیاری می‌باشد.

البته، اگر چه کاهش آب مصرفی همراه با کاهش عملکرد است، اما همراه با کاهش هزینه‌های آبیاری، هزینه‌های بذر، کود و برداشت محصول نیز کم می‌شود. همچنین در کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری برای انتقال آب (با بهینه‌سازی هیدرومُدول آبیاری) و سیستم‌های کاربرد آب نقش دارد.

انگلیش و راجا (English and Raji, 1996) سه مورد مطالعه کم آبیاری را بیان می‌کنند که در آنها کاهش هزینه‌های آبیاری بیش از کاهش درآمد (به خاطر کاهش محصول) بوده است. به عنوان نمونه، انگلیش و ناس (English and Nuss, 1982) در یک بررسی نشان داده‌اند که صرفه‌جویی‌هایی که می‌توان با طراحی یک سیستم آبیاری بر اساس مفاهیم کم آبیاری در یک مزرعه گندم زمستانه در ایالت اورگان (Oregon) داشت عبارتند از: ۱) کاهش هزینه‌های آبیاری (انرژی، نیروی کارگری، تعمیرات و نگهداری) برابر ۳۷ درصد کل صرفه‌جویی، ۲) کاهش هزینه‌های ثابت (سرمایه‌گذاری اولیه) برابر ۳۶ درصد کل صرفه‌جویی و ۳) کاهش سایر هزینه‌های تولید (عملیات زراعی، کاربرد کود و مواد شیمیایی، برداشت و غیره) برابر با ۲۷ درصد کل صرفه‌جویی.

اصولاً، کم آبیاری یک روش اضطراری آبیاری در شرایط کم آبی نیست، بلکه یک نوع مدیریت کارآ و پویای بهره‌برداری به شمار می‌رود و اثرات ویژه‌ای در مدیریت استحصال، انتقال و مصرف آب و نهایتاً در مدیریت اقتصادی دارد (شکل ۱-۱). توصیه میزان آب براساس نوع سیستم آبیاری، روش آبیاری، الگوی کشت، تنوع خاک، پارامترهای اقلیمی و اهداف اقتصادی صورت می‌پذیرد.

یکی از مسائلی که به طور عام اهمیت و جایگاه کم آبیاری را مشخص می‌کند، بیان منابع آب در جهان و ایران است. جدول (۱-۱) سهم آب مصرفی در بخش‌های کشاورزی، خانگی (شرب) و صنعت را به تفکیک قاره‌ها بر اساس گزارش کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی (ICID) در سال ۱۹۹۷ نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، از ۲۲۴۵ میلیارد متر مکعب آب مصرفی در سال، ۶۹ درصد آن به بخش کشاورزی، ۲۳ درصد آن به بخش صنعت و تنها ۸ درصد به مصارف خانگی اختصاص دارد.



شکل ۱-۱ روند بهینه‌سازی مصرف آب

بیان منابع آب در ایران نشان می‌دهد که از مجموع حدود ۴۱۳ میلیارد متر مکعب آب ناشی از متوسط بارش سالیانه ۲۵۲ میلی‌متر، ۲۹۶ میلیارد متر مکعب آن (حدود ۷۱/۷ درصد) از طریق تبخیر و تعرق به اتمسفر بر می‌گردد. از ۱۱۷ میلیارد متر مکعب باقی‌مانده، ۲۵ میلیارد متر مکعب آن به صورت تغذیه منابع زیرزمینی به اعماق زمین راه پیدا می‌کند و ۹۲ میلیارد متر مکعب را جریان‌های سطحی تشکیل می‌دهد. سالانه حدود ۱۳ میلیارد متر مکعب آب از طریق رودخانه‌های مرزی وارد کشور می‌شود. بنابراین، کل پتانسیل منابع آب ایران (منابع تجدید شونده) به حدود ۱۳۰ میلیارد متر مکعب می‌رسد. از این مقدار، در حال حاضر حدود ۸۸/۵ میلیارد متر مکعب به مصرف می‌رسد که ۸۲/۵ میلیارد متر مکعب (۹۳/۲ درصد) آن به بخش کشاورزی، ۴/۵ میلیارد متر مکعب (۵/۱ درصد) به شرب و ۱/۵ میلیارد متر مکعب

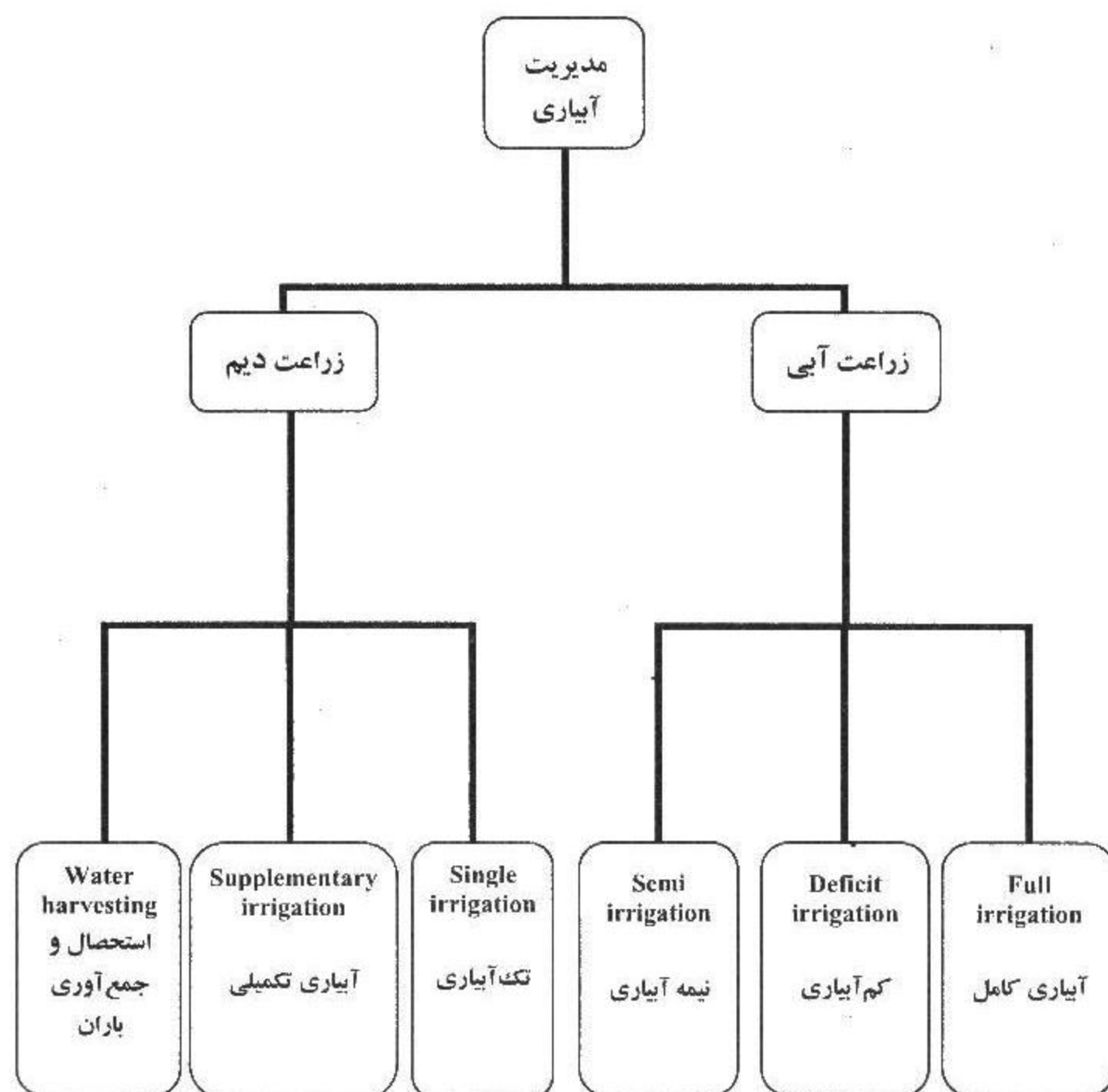
(۱/۷ درصد) به صنعت و معدن و مصارف متفرقه اختصاص یافته است. در حالی که جهان تنها از ۴۵ درصد منابع آب مطلوب خود استفاده کرده، ایران حدود ۶۶ درصد آن را مصرف کرده است.

جدول ۱-۱ سهم آب مصرفی بخش‌های مختلف کشاورزی، خانگی و صنعت

کشاورزی (%)	خانگی (%)	صنعت (%)	کل (کیلومتر مکعب در سال)	
۸۸	۷	۵	۱۴۴	آفریقا
۸۶	۶	۸	۱۵۳۱	آسیا
۶۵	۷	۲۸	۳۵۸	شوروی (سابق)
۳۳	۱۳	۵۴	۳۵۹	اروپا
۴۹	۹	۴۲	۶۹۷	آمریکای مرکزی و شمالی
۳۴	۶۴	۲	۲۳	اقیانوسیه (استرالیا)
۵۹	۱۹	۲۳	۱۳۳	آمریکای جنوبی
۶۹	۸	۲۳	۳۲۴۵	جهان

با توجه به تبیین منابع آب ایران، تحلیل جایگاه مدیریت کم آبیاری نیز شایان توجه است. شکل (۲-۱) گویای تقسیم‌بندی و جایگاه کم آبیاری است. تعیین روابط عوامل مؤثر، ابعاد زراعی و اقتصادی گزینه‌ها و تحلیل مسئله در مقیاس الگوی کشت تنها در قالب تحقیقات منسجم، هدفمند، جامع و گسترده میسر است.

شناسایی عوامل مؤثر و متأثر از کم آبیاری بسیار حائز اهمیت است. شکل (۳-۱) بیانگر این عوامل است. در این بخش، به مدیریت زراعی با سه عامل الگوی کشت، خاک و آب و عوامل مؤثر در آنها و به مدیریت اقتصادی شامل تحلیل ریاضی و تحلیل اقتصادی و هم چنین به موضوع مشترک این دو مدیریت، یعنی تحلیل آماری اشاره شده است. این شکل گویای بیشتر مسائل مرتبط با کم آبیاری است و توضیحات بیشتر عوامل مذکور در بخش‌های بعدی خواهد آمد.

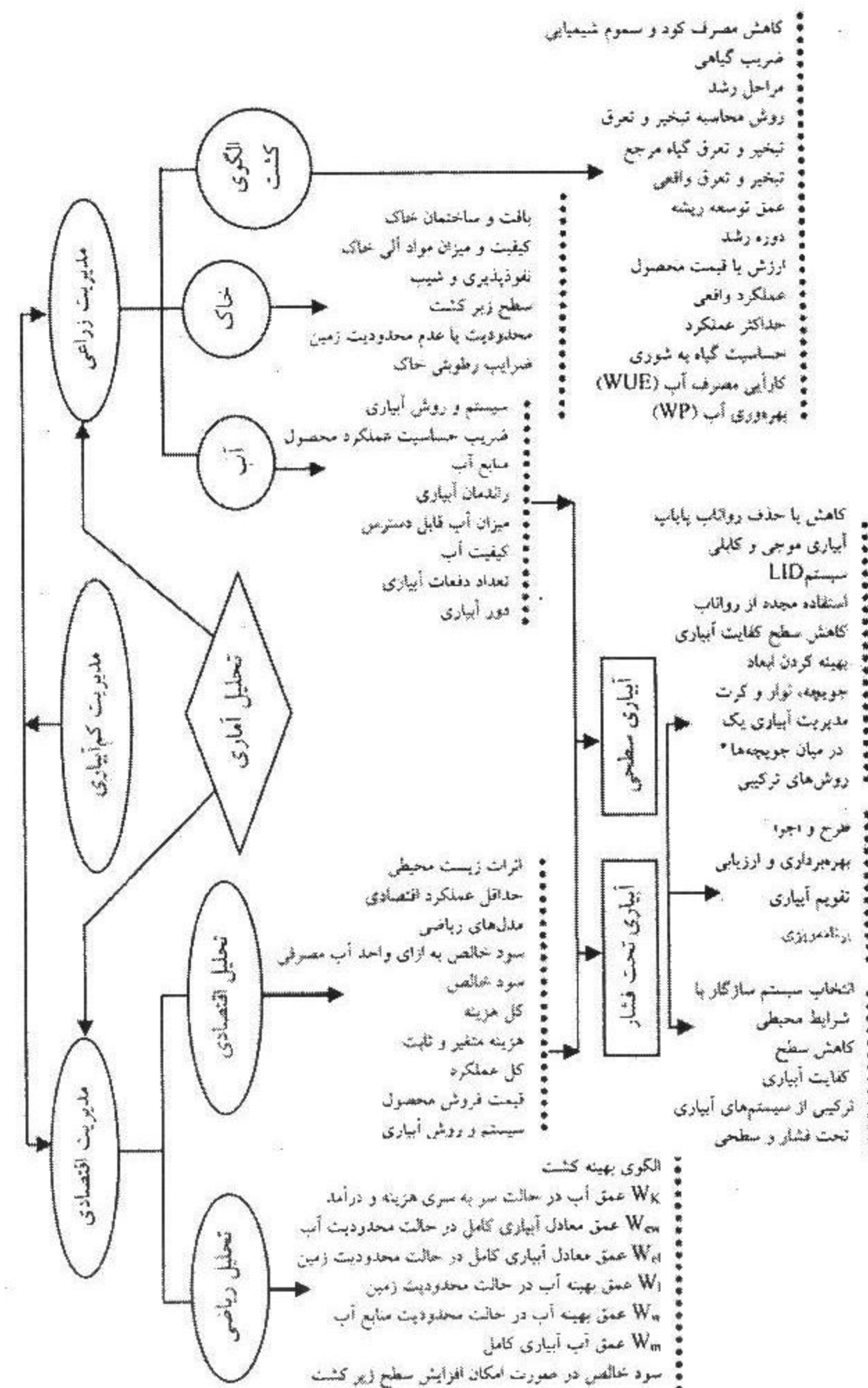


شکل ۲-۱ تقسیم‌بندی مدیریت آبیاری در زراعت آبی و دیم

یکی از نتایج و فواید اعمال مدیریت کم آبیاری، تدوین الگوی کشت به همراه تعیین و تبیین عمق بهینه آب مصرفی می باشد. با توجه به اینکه کسب حداکثر سود خالص (Net benefit) یکی از نگرش‌ها در مدیریت کم آبیاری است، روند حصول سود خالص و الگوی کشت بهینه در شکل (۴-۱) و جدول (۲-۱) ارائه شده است.

جدول ۲-۱ نمونه الگوی کشت در حداکثرسازی سود خالص از یک سطح ثابت کشت

سود خالص NB_i (ریال)	هزینه واحد آب مصرفی (ریال بر متر مکعب)	عملکرد محصول Y_{ai} (kg/ha)	عمق آب مصرفی W_i (mm)	تبخیر و تعرق واقعی ETa (mm)	سطح زیر کشت A_i (ha)	الگوی کشت
						گندم کشت اول
						یونجه گوجه- فرنگی ذرت
$\sum NB_i$						مجموع
						الگوی کشت
						گندم چغندر- قند سویا
$\sum NB_i$						مجموع



شکل ۲-۱ روند تعیین عمق بهینه آب مصرفی برای حصول حداکثر سود

فصل ۲

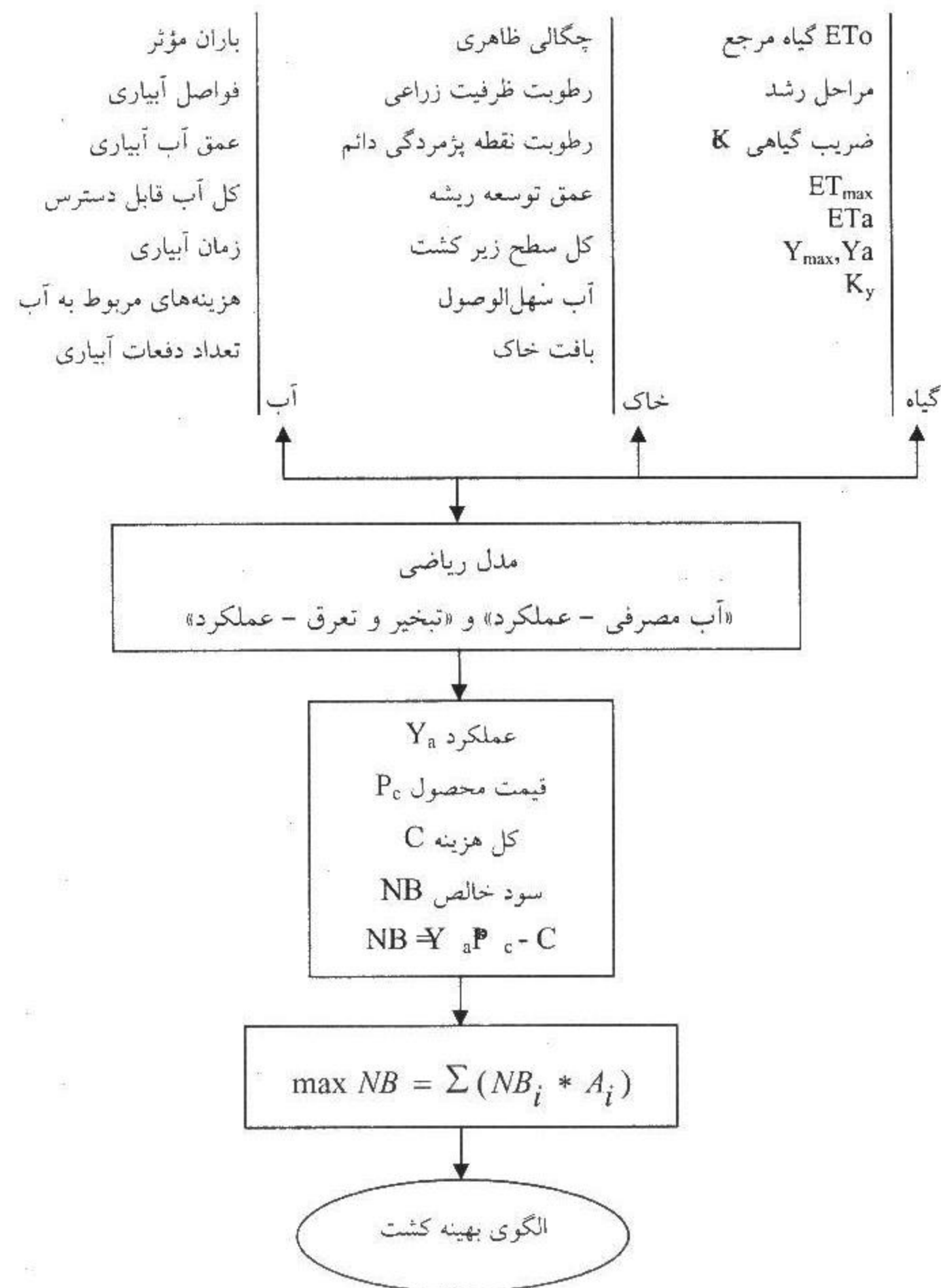
منابع آب، کمبود آب و کم آبیاری

در این فصل، در ابتدا نگاهی کلی خواهیم داشت به منابع آب کره زمین شامل بارش، تبخیر، روانابها، آبهای زیرزمینی و سدها. سپس مسئله کمبود آب به اختصار بحث خواهد شد و برنامه‌ریزی آبیاری در صورت کمبود منابع آب تشریح می‌گردد.

۲-۱ نگاهی کلی به منابع آب کره زمین

مقدار بارش روی کره زمین (با سطح $10^{15} \times 0.51$ متر مربع) برابر ۱۱۰۰۰۰ کیلومتر مکعب در سال است که دو سوم آن تبخیر می‌شود و به اتمسفر بر می‌گردد و ۴۰۰۰ کیلومتر مکعب آن از طریق رودخانه‌ها و آبهای زیرزمینی به دریاها و اقیانوس‌ها جریان پیدا می‌کند (Sundquist, 2003). سه چهارم روانابها به صورت سیل است. میزان آب تجدیدپذیر سالیانه ۱۴۶۰۰ کیلومتر مکعب است. از این مقدار، ۱۲۵۰۰ کیلومتر مکعب قابل دسترس برای آبیاری، صنایع و مصرف شهری است. حدود ۷۰۰۰۰ کیلومتر مکعب در سال تبخیر از سطح زمین اتفاق می‌افتد. تقریباً ۹۶/۵٪ آب در اقیانوس‌ها و دریاها، ۲/۵۳٪ آب شیرین و ۰/۹۷٪ آب شور است.

در کشورهای در حال توسعه، ۹۵-۹۰ درصد فاضلابهای شهری و ۷۰٪ فاضلابهای صنعتی بدون تصفیه مناسب به رودخانه‌ها ریخته می‌شود که باعث آلودگی این منابع می‌گردد. از کل منابع آب شیرین، ۶۹/۶٪ به صورت یخچال‌ها و برفهای دائمی، ۳۰/۱٪ آبهای زیرزمینی، ۲۹٪ دریاچه‌ها و باتلاق‌ها، ۰/۵٪ رطوبت خاکها، ۰/۰۴٪ در اتمسفر، ۰/۰۰۶٪ در رودخانه‌ها و ۰/۰۰۳٪ در موجودات زنده است.



شکل ۴-۱ روند تدوین الگوی بهینه کشت

در حال حاضر، ۲/۳ میلیارد نفر از مردم (حدود ۳۸٪ جمعیت جهان) در حوضه‌های آبخیزی زندگی می‌کنند که با تنش آبی مواجه‌اند و ۱/۷ میلیارد نفر در حوضه‌های با کمبود آب به سر می‌برند. در سال ۲۰۲۵ میلادی (۱۴۰۴ شمسی) این ارقام به ترتیب ۲/۵ و ۲/۴ میلیارد نفر خواهند بود. فقط ۲/۵٪ کل آب‌های روی کره زمین شیرین است. از این مقدار فقط ۰/۵ درصد به صورت آب‌های سطحی و زیرزمینی در اختیار مردم است.

پیش‌بینی می‌شود میزان سطوح فاریاب ۹۳ کشور بزرگ دنیا از ۲۵۷ میلیون هکتار در سال ۱۹۹۹ به ۳۴۱ میلیون هکتار در سال ۲۰۳۰ (۱۴۰۹ شمسی) برسد، در حالی که بایستی میزان استحصال آب آبیاری از ۲۱۲۸ به ۲۴۲۰ کیلومتر مکعب برسد. البته افزایش زمین‌های فاریاب به عوامل متعددی بستگی دارد و تحقق چنین هدفی ممکن است امکان‌پذیر نباشد. به نظر می‌رسد که در کشورهای در حال توسعه، افزایش تولید کشاورزی در آینده به صورت عملکرد بیشتر در واحد سطح، افزایش چند کشتی^۱ و کاهش دوره‌های آیش باشد. جدول (۱-۲) منابع آب تجدیدپذیر^۲ سالانه و نیاز آبیاری را در مناطق مختلف نشان می‌دهد.

چین، هند، عربستان سعودی، شمال آفریقا و آمریکا در حدود ۱۶۰ میلیارد متر مکعب اضافه برداشت از آب‌های زیرزمینی دارند و چون به طور متوسط حدود ۱۰۰۰ متر مکعب آب برای تولید یک تن غله استفاده می‌شود، این مقدار اضافه برداشت معادل ۱۶۰ میلیون تن غله است، که نصف غله تولیدی ایالات متحده آمریکا است. حدود ۴۸۰ میلیون نفر از ۶ میلیارد نفر جمعیت جهان با غله‌ای تغذیه می‌شوند که با منابع آب غیرپایدار تولید می‌شود.

در سطح جهانی، ۷۰٪ آب برای آبیاری، ۲۰٪ برای صنعت و ۱۰٪ برای موارد شهری مصرف می‌شود. فشارهای جمعیتی^۳ زیر ۶۰۰ نفر برای هر یک میلیون متر

- 1- Multi-cropping
- 2- Renewable
- 3 - Population pressures

مکعب آب مسئله مهمی نیست، اگر چه ممکن است مسائل کیفی آب و خشکسالی‌ها اتفاق افتد؛ بین ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ مرحله تنش آبی^۱ است، محدوده ۲۰۰۰ - ۱۰۰۰ مرحله کمبود آب^۲ است (که توسعه اقتصادی و اجتماعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد) و ۲۰۰۰ حداکثر فشار جمعیتی است که می‌توان با فناوری و مدیریت‌های فعلی تحمل کرد (این مرحله را «مانع آبی»^۳ گویند).

جدول ۱-۲ آب مصرفی در آبیاری و میزان منابع آب تجدید شونده چند منطقه دنیا

۱	۲	۳	۴	۵	۶
۸۸۰	۱۵۳۴	۱۸۱	۱۰۹۳	۱۲۵۲	۱۰۴۳
۳۴۵۰	۱۳۴۰۹	۵۴۱	۲۴۶۹	۸۶۰۹	۲۸۴۷۷
۳۳	۲۵	۴۰	۴۴	۳۳	۳۸
۸۰	۱۸۲	۲۸۷	۸۹۵	۶۸۴	۲۱۲۸
۲	۱	۵۳	۳۶	۸	۷
۳۷	۲۵	۵۳	۴۹	۳۴	۴۲
۱۱۵	۲۴۱	۳۱۵	۱۰۲۱	۷۲۸	۲۴۲۰
۳	۲	۵۸	۴۱	۸	۸

بارندگی (میلی‌متر)

منابع آب تجدیدپذیر (km³)

بازده آبیاری (درصد) در سال ۱۹۹۸

آب مصرفی در آبیاری (km³) در سال ۱۹۹۸

آب آبیاری به صورت درصدی از آب تجدیدپذیر

بازده آبیاری (درصد) در سال ۲۰۳۰

آب مصرفی در آبیاری (km³) در سال ۲۰۳۰

آب آبیاری به صورت درصدی از آب تجدیدپذیر

ستون‌های ۱ تا ۶ به ترتیب مربوط به (۱) کشورهای آفریقایی جنوب صحرا، (۲) آمریکای لاتین - جزایر کارائیب، (۳) خاور نزدیک و شمال آفریقا، (۴) جنوب آسیا، (۵) آسیای شرقی و (۶) تمام کشورهای در حال توسعه است.

سرانه منابع آب شیرین تجدید شونده بعضی از کشورها در سال ۱۹۹۸ به صورت زیر است: کانادا ۹۳۶۸۷، برزیل ۳۱۱۵۳، روسیه ۲۸۸۶۲، اندونزی ۱۲۱۴۰، آمریکا ۸۹۳۴ و چین ۲۲۱۴ متر مکعب در سال (Sundquist, 2003). برای ایران این رقم ۱۹۱۱ و برای کشوری مانند تونس در شمال آفریقا ۴۵۰ متر مکعب است. کانادا

- 1- Water stress
- 2 - Water scarcity
- 3 - Water barrier

۲۰٪ منابع آب شیرین دنیا را در اختیار دارد. اگر میزان رشد تأمین و مصرف آب و تولید و مصرف غذا به همین منوال فعلی باشد، در سال ۲۰۲۵ اتفاقات زیر پیش‌بینی می‌شود:

✓ کمبود آب سبب از دست رفتن ۳۵۰ میلیون تن مواد غذایی خواهد شد. کمبود آب به معنای سرانه کمتر از ۱۰۰۰ متر مکعب در سال است و تنش آبی عبارت است از میزان سرانه کمتر از ۱۷۰۰ متر مکعب در سال.

✓ مصرف تمام موارد غیر از آبیاری ۶۲٪ افزایش خواهد یافت.

✓ مصرف شرب ۷۱٪ افزایش می‌یابد که ۹۰٪ آن در کشورهای در حال توسعه است.

✓ تقاضای آب صنایع در کشورهای در حال توسعه از کشورهای توسعه یافته فزونی خواهد یافت.

✓ کمبود آب سبب تغییر محل تولید غذا در سطح جهانی خواهد شد. کشورهای در حال توسعه شدیداً متکی به واردات مواد غذایی می‌شوند. در کشورهای آفریقایی، واردات مواد غذایی به سه برابر خواهد رسید. کشورهای فقیر که نمی‌توانند مواد غذایی بخرند با قحطی، سوء تغذیه و مهاجرت مواجه خواهند شد.

طیف رواناب در سطح جهان ۴۷۰۰۰-۳۳۵۰۰ (با میانگین ۴۰۷۰۰) کیلومتر مکعب در سال است. بیشتر این رواناب‌ها به صورت سیل جاری می‌شوند و یا قابل دسترس برای انسان‌ها نیست. فقط ۹۰۰۰ کیلومتر مکعب به آسانی قابل دسترس است و ۶۶۰۰ کیلومتر مکعب نیز در مخازن و سدها ذخیره شده است. مناطق خشک و نیمه خشک دنیا فقط ۲٪ رواناب جهانی را دریافت می‌کنند، گرچه ۴۰٪ سطح خشکی‌ها را شامل شده‌اند.

از اواسط دهه ۱۹۵۰ تا اواسط دهه ۱۹۷۰ هر ساله حدود ۱۰۰۰ سد بزرگ (بلندتر از ۱۵ متر) ساخته شده است. ولی در اوایل دهه ۱۹۹۰ این رقم به ۲۶۰ عدد در سال رسید. در حال حاضر، از ۴۵۰۰۰ سد بلند دنیا، ۲۲۱۰۴ عدد در چین، ۶۳۹۰ سد در آمریکا و ۴۰۰۰ عدد در هند است. ظرفیت ذخیره این سدهای بلند ۵۵۰۰ کیلومتر مکعب است. تخمین زده می‌شود که سالیانه حدود ۱٪ از ظرفیت ذخیره سدها کم می‌شود.

هزینه سالانه رسوب‌زدایی این سدها (در صورت امکان‌پذیر بودن) ۲۰۰-۱۳۰ میلیارد دلار است.

مصرف آب در سطح جهانی در سال‌های ۱۹۹۵-۱۹۰۰ شش برابر شد (دو برابر رشد جمعیت در همین مدت). از لحاظ کفایت یا کمبود آب در سال‌های ۱۹۹۵-۲۰۵۰ وضعیت به صورت جدول (۲-۲) است.

جدول ۲-۲ وضعیت کفایت یا کمبود آب در سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۵۰

پارامتر	سال ۱۹۹۵	سال ۲۰۵۰
جمعیت (میلیارد نفر)	۵/۷	۹/۴
کفایت آب	٪۹۲	٪۵۸
تنش آبی	٪۵	٪۲۴
کمبود آب	٪۳	٪۱۸

حدود ۷۰٪ (۲۸۰۰ از ۴۰۰۰ کیلومتر مکعب) آبی که انسان‌ها سالانه از منابع شیرین آب برداشت می‌کنند صرف آبیاری می‌شود. در سطح جهانی، گیاهان ۷۰٪ نیاز آبی خود را مستقیماً از بارندگی و ۳۰٪ را از آبیاری تأمین می‌کنند. حدود یک ششم (۱۷٪) سطح زیر کشت محصولات مختلف در دنیا آبیاری می‌شود. در سال ۲۰۲۵، ممکن است برای تولید محصولات، ۲۰۰۰ کیلومتر مکعب آب بیشتری نیاز باشد. متوسط کاربرد آب در هکتار ۱۲۰۰۰ متر مکعب است. نسبت مصرف آب به برداشت آب ۵۰-۸۰ درصد است. وضعیت سطوح آبیاری، مصرف آب و استفاده مجدد از آب در بعضی قاره‌ها به صورت جدول (۲-۳) است.

تفاوت تغذیه آب‌های زیرزمینی و برداشت از آبخوان‌های زیرزمینی ۲۰۰ کیلومتر مکعب در سال است. حدود ۱/۵ میلیارد نفر متکی به منابع آب زیرزمینی هستند و ۶۰۰-۷۰۰ کیلومتر مکعب در سال آب برداشت می‌کنند (حدود ۲۰٪ برداشت آب در سطح جهانی). در آفریقا، آسیا و آمریکا سطح آب‌های زیرزمینی تا ۳ متر در سال افت می‌کند که دلیل عمده آن برداشت آب برای آبیاری است. در خاور نزدیک و شمال

آفریقا، آب‌های زیرزمینی فسیلی برای آبیاری استفاده می‌شود. در این مناطق، هیچ‌گونه تغذیه آبخوان‌های عمیق صورت نمی‌گیرد. در ایران حدود ۳۳٪ سطح زیر کشت به آب‌های زیرزمینی بیش از حد برداشت شده متکی است. سطح آب زیرزمینی در اکثر نقاط خشک ایران هر ساله، و یا در خشکسالی‌ها، افت می‌کند.

جدول ۲-۳ برداشت آب برای آبیاری در قاره‌ها

منطقه	(میلیون کیلومتر مربع)	سطح تحت آبیاری	(کیلومتر مکعب در سال)	برداشت	(کیلومتر مکعب)	مصرف سالانه	(کیلومتر مکعب در سال)	استفاده مجدد	(کیلومتر مکعب در سال)	رواناب رودخانه‌ها	(کیلومتر مکعب در سال)	برداشت از آب‌های زیرزمینی	(کیلومتر مکعب در سال)	رواناب سطحی
اروپا	۰/۱۷	۱۱۰	۹۵	۱۵	۲۳۲۱	۸۴۵	۱۴۷۶							
آسیا	۱/۴	۱۳۰۰	۹۸۰	۳۲۰	۱۰۴۸۵	۲۸۷۹	۷۶۰۶							
آفریقا	۰/۱۱	۱۲۰	۸۵	۳۵	۳۸۰۸	۱۴۶۴	۲۷۲۰							
آمریکای شمالی	۰/۲۹	۳۳۰	۲۱۵	۱۱۵	۶۹۴۵	۲۲۲۲	۴۷۲۳							
آمریکای جنوبی	۰/۰۸۵	۷۰	۵۵	۱۵	۱۰۳۷۷	۳۷۳۶	۶۶۴۱							
استرالیا و اقیانوسیه	۰/۰۲۰	۱۶	۱۳	۳	۲۰۱۱	۴۸۳	۱۵۲۸							

در سطح جهانی، متوسط بازده آبیاری (کسری از آب آبیاری که به مصرف گیاه رسیده) در سال ۱۹۹۰ حدود ۴۳٪ بود. در مناطق خشک، این بازده رقمی حدود ۵۸٪ و در مناطق با آب فراوان حدود ۳۱٪ بود. بازده آبیاری در چین ۳۹٪ و در هند ۴۰٪ است. در مناطق خشک می‌توان با کم‌آبیاری، بهره‌وری آب کمیاب آبیاری را برای تولید محصول ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش داد.

همان‌طور که گفته شد، در سطح جهانی حدود ۷۰٪ منابع آب (آب رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی) برای آبیاری محصولات کشاورزی، ۲۰٪ برای صنعت و ۱۰٪ برای مصارف شهری استفاده می‌شود. از لحاظ اقتصادی و رقابت موجود بین این سه بخش، اختصاص این همه آب برای کشاورزی با صرفه نیست. مثلاً در چین ۱۰۰۰ تن

آب برای تولید یک تن گندم به کار می‌رود که شاید حدود ۲۰۰ دلار ارزش داشته باشد. در حالی‌که با همین مقدار آب می‌توان ۱۴۰۰۰ دلار محصولات صنعتی تولید کرد، یعنی ۷۰ برابر بیشتر از گندم (Brown, 2001). در مملکتی که شدیداً در پی رشد اقتصادی و ایجاد شغل برای مردم است، تغییر مصرف آب از کشاورزی به صنعت کاملاً واضح است. در غرب آمریکا نیز بعضی از کشاورزان تمایل دارند حقابه‌های خود را به شهرها بفروشند.

تغییر مصرف مواد غذایی مردم از غلات به مواد گوشتی و لبنی نیز مصرف آب را چندین برابر افزایش می‌دهد. گرچه کمبود آب زمانی یک مسئله محلی یا منطقه‌ای به حساب می‌آمد، اما امروزه یک مسئله جهانی است. بازار واردات غلات در کشورهای شمال آفریقا و خاورمیانه به سرعت در حال گسترش است. بنابراین، کشورهایی که با کمبود آب مواجه‌اند، بهترین راه را واردات مواد غذایی می‌دانند. آب لازم برای تولید غلات و سایر اقلام غذایی که در سال ۲۰۰۰ وارد کشورهای شمال آفریقا و خاورمیانه شده، به اندازه حجم سالانه رودخانه نیل است. به همین خاطر است که گفته می‌شود جنگ آینده در این منطقه بر سر آب است و نه نفت، و کشوری برنده می‌شود که از نظر مالی قوی‌تر باشد نه نظامی.

افزایش کمبود آب در دنیا، که از پمپاژ بیش از اندازه آبخوان‌ها و پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی نیز مشخص است، هر ساله رو به فزونی است و مدیریت آن سخت‌تر می‌شود. اگر کشورهایی که مشکل کمبود آب دارند نسبت به تثبیت جمعیت و افزایش بهره‌وری آب سریعاً عمل نکنند کمبود آب آنها تبدیل به کمبود مواد غذایی خواهد شد. فزونی واردات این کشورها بر پتانسیل صادرات کشورهایمانند آمریکا، کانادا، استرالیا و فرانسه، باعث عدم پایداری بازار غله جهانی خواهد شد. کشورهای چین و هند با جمعیت میلیاردي، رشد اقتصادی زیاد دارند و با بالا رفتن سطح زندگی در آنها، نیاز به آب فراوان و در نتیجه غله فراوان دارند. لذا، در سال‌های آتی یکی از واردکنندگان اصلی غلات خواهند بود.

در ایران، متوسط ۳۰ ساله ریزش‌های جوی تا سال ۲۰۰۱ میلادی (۱۳۸۰ شمسی) ۲۵۲ میلی‌متر (حجم ۴۱۳ میلیارد متر مکعب) است که ۳۰٪ آن را برف و ۷۰٪ بقیه را

باران و سایر فرم‌های بارش تشکیل می‌دهد. از لحاظ مقایسه، متوسط دراز مدت ریزش‌ها در آسیا ۷۳۲ میلی‌متر و در دنیا ۸۳۱ میلی‌متر است. از ۴۱۳ میلیارد متر مکعب بارش، ۲۵ میلیارد متر مکعب به صورت نفوذ در دشت‌ها و کوهستان‌ها و ۹۲ میلیارد متر مکعب به صورت جریان‌های سطحی در می‌آید که با ورود ۱۳ میلیارد متر مکعب آب از رودخانه‌های مرزی به مملکت، جمع منابع آب تجدید شونده ۱۳۰ میلیارد متر مکعب می‌شود.

۲-۲ برنامه‌ریزی آبیاری تحت شرایط محدودیت منابع آب

در بخش قبلی ملاحظه گردید که منابع آب شیرین و تجدیدپذیر که مناسب آبیاری محصولات کشاورزی باشد در اکثر نقاط خشک و نیمه خشک جهان محدود است و این محدودیت با گذشت زمان و افزایش جمعیت رو به فزونی نهاده است. با وجود این، افزایش احتیاج به غذا و پوشاک در بسیاری از نقاط جهان باعث شده که علی‌رغم کافی نبودن منابع آب، سطح مناطق فاریاب و یا کشت شده افزایش یابد.

مدیریت و برنامه‌ریزی سیستم‌های آبیاری برای به حداکثر رسانیدن بهره‌وری در شرایط کمبود آب و عدم اطمینان^۱ از وجود آب، چالش اساسی و مهم در کشاورزی فاریاب است. این مسئله در بسیاری از کشورها خودنمایی می‌کند. کمبود آب ممکن است فصلی، سالانه یا چند ساله باشد و افزایش مصارف متعدد غیر کشاورزی (نظیر صنعت، شرب و زیست محیطی) نیز بر تشدید بحران آب دامن می‌زند. مسائل کمبود آب در صورت عدم اطمینان از داشتن آن، شدیدتر می‌شود. اثرات کمبود آب را می‌توان با برنامه‌ریزی مدیریت کرد، مثلاً سطح زیر کشت را کاهش داد و یا آبیاری‌های غیر لازم را حذف کرد (Perry and Narayanamurthy, 1998). اما در صورت عدم اطمینان از تأمین آب لازم، چنین مدیریتی کارساز نخواهد بود. طبعاً ساختن و یا توسعه تأسیسات ذخیره آب باعث کاهش ریسک عدم اطمینان و افزایش میزان آب در دسترس خواهد شد.

آب عامل اساسی در توسعه پروژه‌های آبیاری است، گرچه ممکن است در نقاطی مسئله محدودیت زمین، نیروی کار و یا سرمایه مطرح باشد. مدیریت صحیح آب، کارایی مصرف آب را به حداکثر می‌رساند. اگر آب با کیفیت خوب در دسترس نباشد، آب‌های با کیفیت بد و یا شور را نیز می‌توان برای کاشت گیاهان مقاوم استفاده کرد. برنامه‌ریزی در شرایط محدودیت آب و شوری (یا کیفیت بد آب) نیاز به راهکاری غیر از شرایط بدون محدودیت دارد. این محدودیت‌ها باعث می‌شوند مدیران و برنامه‌ریزان آبیاری چالش‌های متفاوتی داشته باشند. کم‌آبیاری با درجات مختلفی از موفقیت در مناطق متفاوت اعمال شده است. مثلاً گورانتیوار و اسمات (Gorantiwar and Smout, 2003) اظهار داشته‌اند که کم‌آبیاری سبب افزایش ۳۰-۴۵ درصدی در سطح زیر کشت و افزایش ۲۰-۴۰ درصدی تولید محصول شده است.

در صورتی که منابع آب کمیاب و یا محدود باشد، لازم است برای تخصیص بهینه آب به گیاهان به نوع گیاه، مرحله رشد و نوع خاک توجه شود.

برای کم‌آبیاری باید تخمین‌های قابل اعتمادی از میزان رطوبت خاک، تنش رطوبتی گیاه و تابع تولید محصول داشت.

۲-۲-۱ توابع تولید

واکنش گیاه به آب را می‌توان با تابع گیاه-آب- عملکرد (تولید) (CWYF)^۱ بیان کرد. تابع CWYF برای ارزیابی اقتصادی بودن مدیریت آبیاری به کار می‌رود (Ragab, 1996). محققین، تولید (عملکرد) را به صورت تابعی از تعرق (T)، تبخیر - تعرق (ET) و یا میزان آب آبیاری (IW) بیان کرده‌اند:

$$Y = \left(\frac{T}{T_{\max}} \right) Y_{\max} \quad (\text{Hanks, 1974}) \quad (1-2)$$

$$1 - \frac{Y}{Y_{\max}} = B \left(1 - \frac{ET}{ET_{\max}} \right) \quad (\text{Stewart et al., 1977}) \quad (2-2)$$

$$Y = F(IW) \quad (3-2)$$

که Y عملکرد ماده خشک، $Y_{\max}$ حداکثر عملکرد، T تعرق فصلی، $T_{\max}$ حداکثر تعرق فصلی، ET تبخیر - تعرق واقعی فصلی، $ET_{\max}$ حداکثر تبخیر - تعرق فصلی و B ضریب تجربی است.

رابطه معادلات (۱-۲) و (۲-۲) از نوع خطی و معادله (۳-۲) منحنی است. معادله $Y(IW)$ یا $F(IW)$ به معنای تولید به صورت تابعی از آب آبیاری تا نقطه‌ای در تطابق با $Y(ET)$ قرار دارد و سپس با افزایش میزان آب آبیاری از حالت خطی خارج می‌شود. این انحراف به‌خاطر کاهش یافتن بازده (راندمان) آبیاری (در اثر نفوذ عمقی، رواناب، زهکشی، تغییرات رطوبت خاک) است. $Y(ET)$ و $Y(IW)$ تا زمانی مساوی هستند که بازده آبیاری ۱۰۰٪ باشد. در معادله (۳-۲) هزینه آب آبیاری نیز منظور شده است.

مرحله رشد گیاه را نیز می‌توان در رابطه Y با ET یا T منظور کرد:

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{ET}{ET_{\max}} \right)^{b_i} \quad (\text{Jensen, 1968}) \quad (4-2)$$

$$Y = Y_{\max} - Y_{\max} \cdot \frac{b_1 ET_1 + b_2 ET_2 + \dots + b_n ET_n}{ET_{\max}} \quad (\text{Stewart et al., 1977}) \quad (5-2)$$

که $b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ نما هستند و حساسیت نسبی گیاه به تنش رطوبتی در مرحله رشد i را نشان می‌دهند. n تعداد مراحل رشد است.

شوری آب و خاک نیز بر CWYF مؤثر است (Mass and Hoffman, 1977):

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = 1 \quad \text{برای} \quad EC_e \leq A_s \quad (6-2)$$

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = 1 - B_s (EC_e - A_s) \quad \text{برای} \quad EC_e \geq A_s \quad (7-2)$$

که A_s آستانه شوری (dS/m)، B_s حساسیت گیاه به شوری بیشتر از آستانه ($dS^{-1}.m^{+1}$) و EC_e هدایت الکتریکی عصاره اشباع (dS/m) است.

اشکال کاربرد چنین فرمول‌هایی. این است که نیمرخ شوری خاک کاملاً دینامیک است و بستگی به شوری آب آبیاری، فرم جذب آب توسط گیاه و واکنش خاک با آب آبیاری دارد. تحمل گیاه به شوری نیز بستگی به مرحله رشد دارد. در مزرعه، توزیع مکانی املاح یکنواخت نیست و در عمق نیز ثابت نمی‌باشد.

مدل‌های غیرماندگار، میزان رطوبت و شوری خاک را به عنوان تابعی از زمان و عمق در نظر می‌گیرند. این مدل‌ها عبارت «جذب نمک توسط ریشه» را به معادله جریان اضافه می‌کنند که سطح شوری آب را با تولید محصول ربط می‌دهد.

مقادیر صحرایی T را برخلاف ET ، به سختی می‌توان تعیین کرد یا تخمین زد و در نتیجه ET قابل اعتمادتر است. از نقطه نظر اقتصادی، $Y(IW)$ مهم‌ترین تابع برای آبیاری یا تولید کننده است، اگر چه میزان واقعی آب مصرف شده توسط گیاه و یا ET را مشخص نمی‌کند. رابطه بین ET و IW نیز به درستی معلوم نیست (و نیاز به تحقیق دارد)، اما به طرح سیستم آبیاری و مدیریت آن بستگی دارد. هنوز هیچ رابطه جهانی بین ET و IW به دست نیامده است.

عوامل تولید از قبیل کود، اقلیم، کیفیت آب، تغییرات خاک، یکنواختی توزیع آب در مزرعه، آفات و بیماری‌ها و خصوصیات خاک در توابع تولید منظور شده‌اند. بنابراین تحقیقات وسیعی در مورد توسعه مدل‌های دینامیک که مجموعه این عوامل را در نظر بگیرند نیاز است.

۲-۲-۲ مدیریت کم آبیاری

در جایی که منابع اساسی تولید مانند آب، سرمایه، انرژی و نیروی کار محدود باشد می‌توان از کم آبیاری استفاده کرد. در کم آبیاری، عامداً به گیاهان اجازه داده می‌شود تولید کمتری داشته باشند. هدف آبیاری، افزایش کارایی مصرف آب (WUE) از طریق کاهش میزان آب در هر آبیاری و یا تعداد آبیاری‌ها است. آبیاری، کار مشکلی

را در پیش رو دارد. او باید تصمیم بگیرد چه میزان کم آبیاری کند، چه سطحی از آب در خاک ایجاد شده است، چه موقع نگذارد کمبود آب اتفاق افتد و چه موقع آبیاری کند تا با کمترین هزینه بیشترین WUE حاصل شود (English et al., 1990).

عدم اطمینان از این سیستم آبیاری از این حقیقت ناشی می شود که هزینه آب مصرفی و تابع تولید دقیقاً مشخص نیستند. چون اگر این موارد به دقت معلوم بودند، انتخاب سطح بهینه آبیاری کار بسیار ساده ای بود. تابع تولید از این جهت کاملاً معلوم نیست که تخمین میزان نفوذ عمقی، رواناب و تلفات تبخیر (مخصوصاً وقتی تغییرات اقلیم، خاک و توپوگرافی وجود دارد) مشکل است. تمام این عدم اطمینانها منتج به ریسک اقتصادی خواهند شد. استفاده از کم آبیاری نیاز به انتخاب گیاهان مقاوم به خشکی، سطوح شوری و قلیائیت کم، عملیات زراعی مناسب و خاکهای عمیق با ظرفیت نگهداری رطوبت زیاد دارد.

گیاهان مقاوم به خشکی از طریق محدود کردن تلفات تعرق سعی در تطابق با تنش آبی دارند. گیاهان با ریشه بلند اجازه می دهند که کم آبی در آنها به تدریج اتفاق افتد، که در نتیجه تنش آبی کوتاه مدت نیز در مورد آنها قابل اجراست. خاکهای عمیق با ظرفیت نگهداری رطوبت زیاد محیط بافری را ایجاد می کنند که در آن تنش خشکی به تدریج به وقوع می پیوندد.

کم آبیاری نیاز به تعدیل برخی عملیات زراعی دارد مانند: تراکم گیاهی کمتر، کاهش مصرف کود و مواد شیمیایی، تاریخهای کاشت انعطاف پذیر، انتخاب گیاهان با طول دوره رشد کوتاه تر و آیش زمین در صورت نیاز به ذخیره باران در خاک.

راهکارهای کم آبیاری شامل: اختصاص آب کمتر برای گیاه مقاوم به خشکی، آبیاری گیاهان فقط در مراحل رشد بحرانی، کشت گیاهان به گونه ای که دوره های نیاز بحرانی آنها هم پوشانی داشته باشد و برنامه ریزی برای یک سال متوسط اقلیمی یا کمی مرطوب تر می شود.

رابطه بین عملکرد و تنش رطوبتی گیاه در برنامه ریزی کم آبیاری بسیار مهم است (Misra, 1973). شاخصهای مناسب تنش رطوبتی گیاه را از طریق اندازه گیری میزان رطوبت یا پتانسیل آب خاک، میزان آب یا پتانسیل آب گیاه و دمای کنوپی

(سایه انداز) گیاه تعیین کرد. پتانسیل آب گیاه و دمای کنوپی مرتبط ترین شاخصهای تنش رطوبتی گیاه هستند، اما عملاً از میزان رطوبت یا پتانسیل آب خاک استفاده می شود. چون تغییرات رطوبتی در نقاط مختلف یک مزرعه یکسان نیست، استفاده از تانسیموتر و بلوک گچی برای این کار فایده ای ندارد.

درصد تخلیه رطوبت در ناحیه ریشه را می توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$AW = \frac{(SWC - SWC_I)z}{(SWC_{II} - SWC_I)z} \times 100 \quad (8-2)$$

که AW = درصد آب قابل استفاده موجود در ناحیه ریشه، SWC = میزان رطوبت خاک، SWC_I = میزان رطوبت در نقطه پژمردگی دائم، SWC_{II} = میزان رطوبت در ظرفیت (گنجایش) زراعی و Z = عمق ریشه. چون تغییرات خاک و رطوبت در مزرعه وجود دارد و ارتباط دادن آنها به عملکرد گیاه آسان نیست، لذا AW شاخص خوبی در کم آبیاری نیست. چون گیاهان تحت کم آبیاری آب را از اعماق پایین تر خاک جذب می کنند، لذا اندازه گیری رطوبت خاک باید تا اعماق پایین تر انجام گیرد و تانسیموتر اصلاً وسیله مناسبی در سیستم کم آبیاری نیست. می توان با گذاشتن بلوک گچی در دو عمق (یکی در وسط و دیگری در پایین ناحیه ریشه) برنامه آبیاری را تعیین کرد (Stenitzer, 1996).

تنش رطوبتی گیاه در طول روز متغیر است. این تنش در واکنش به باد، دما، تشعشع خورشیدی، پوشش ابر و رطوبت نسبی سریعاً تغییر می کند. همچنین، تنش رطوبتی با عوامل دیگری مانند شوری، امراض و آفات نیز عوض می شود. لذا پایش^۱ تنش رطوبتی گیاه بسیار پیچیده تر از پایش رطوبت خاک است. ارقام اندازه گیری شده تنش رطوبتی گیاه باید در شرایط یکسان و زمان خاصی از روز انجام گیرد و برای کلیه موارد فوق اصلاح شود.

دمای کنوپی یک گیاه معمولی چند درجه خنکتر از دمای هواست. یک گیاه تحت تنش رطوبتی که با میزان کمتری تعرق انجام می‌دهد گرم‌تر از هواست. تفاوت بین دمای هوا و دمای گیاه را می‌توان به عنوان شاخص تنش رطوبتی گیاه (CWSI) در نظر گرفت:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_l}{(T_c - T_a)_u - (T_c - T_a)_l} \quad (9-2)$$

که T_c دمای گیاه، T_a دمای هوا، l بیانگر تفاوت دما وقتی که گیاه خوب آبیاری شده باشد و u بیانگر تفاوت دما وقتی که تنش شدید است و تعرق به صفر نزدیک می‌شود، می‌باشد.

شاخص CWSI با تجزیه و تعرق نسبی ارتباط دارد (Jackson, 1982):

$$CWSI = 1 - \frac{ET}{ET_{max}} \quad (10-2)$$

علم سنجش از دور^۱ را می‌توان برای پایش شاخص سطح برگ (LAI)، تولید ماده خشک و تنش خشکی گیاهان مزرعه به کار برد. LAI را می‌توان در مدل‌های تبخیر - تعرق استفاده کرد و همراه با اطلاعات دیگر در برنامه‌ریزی‌های آبیاری به کار برد. جدیداً از رادار نیز برای تعیین مستقیم رطوبت خاک استفاده شده است.

روش‌های برنامه‌ریزی فوق‌الذکر که براساس اندازه‌گیری‌های خاک یا گیاه بنا شده‌اند ابزارهای مدیریت واکنشی^۲ هستند. بنابراین نیاز به این دارند که: (۱) مشاهدات انجام گیرند، (۲) مشاهدات باید با یک آستانه مقایسه شوند تا معلوم شود آیا آبیاری انجام گیرد یا خیر؟ و (۳) در مورد آبیاری تصمیم‌گیری نهایی صورت گیرد.

مدیریت کم‌آبیاری به راه‌های مختلف صورت می‌گیرد. اگر قرار است در آینده نزدیک باران بیارد، یا اگر آبیاری‌های اول فصل غیر کارآ هستند، آبیاری می‌تواند آب کمتری مصرف کند تا فضا برای ذخیره رطوبت در محیط ریشه باقی بماند. یا اینکه می‌تواند راندمان کاربرد را بیشتر بگیرد که بتواند نیاز ناخالص آبیاری را کاهش دهد، یا کفایت آبیاری را کمتر انتخاب کند که بتواند به طور متوسط نیاز کلیه گیاهان را

برطرف کند، نه اینکه نیاز گیاهان پر مصرف بر طرف شود. به طور کلی، تمام این راهکارها یک اصل را دنبال می‌کنند: افزایش بازده کاربرد با کم‌آبیاری کردن بخشی از خاک مزرعه. اگر قرار باشد تنش‌های شدیدتری اعمال شود، می‌توان تمام مزرعه را کم‌آبیاری کرد. در این صورت، بازده کاربرد مطرح نیست و زمان و تعداد آبیاری‌ها مهم می‌باشند.

در مورد کم‌آبیاری، تحقیقات زیادی مورد نیاز است. توزیع مقدار مشخص آب موجود در طول یک فصل و یا فصل‌های یکسال مسئله مهمی است. عدم یکنواختی در سیستم‌های آبیاری و مزارع، نیاز به پایش رطوبت در اعماق بیشتر، دمای کنوپی و اجزای بیلان آب خاک را افزایش می‌دهد. توزیع دقیق مقدار آب لازم برای هر قسمت مزرعه و نه یک عمق متوسط آب آبیاری برای کل مزرعه، نیاز به تحقیق دارد. انجام این تحقیقات می‌تواند مدیریت کم‌آبیاری در شرایط محدودیت منابع آب را بهبود بخشد.

فصل ۳

توابع تولید

۳-۱ تعریف تابع تولید

تولید محصولات کشاورزی از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در یک واحد خرده مالکی، هدف تأمین مواد غذایی یک یا چند خانوار با نهاده‌های در دسترس است و در این‌گونه مالکیت‌ها، هیچ‌گاه توجه اقتصادی تولید به صورت علمی مد نظر واقع نمی‌شود و در واقع سخن از چرخه‌ای کوچک و محدود است که تولید کننده و مصرف کننده عمده، کشاورز می‌باشند. معاملات آنها اغلب پایاپای بوده و همواره اندیشه جهش، فرار و گذار از این گذر، فراسوی امیدهای این افراد است و عموماً تنها طریق گذر از راه تحصیلات، کسب مدارک علمی و رسیدن به مدارج اداری است که برای آنها جاذبه بیشتری دارد. این دیدگاه، در بقیه بهره‌برداران واحدهای بزرگ کشاورزی با درجات مختلف صدق می‌کند که در این مقوله قصد پرداختن به آن وجود ندارد و تنها ابعاد علمی و تحقیقی اقتصاد تولید و تکیه بر مهم‌ترین پارامتر مؤثر یعنی آب، مد نظر است که زوایای مختلف آن بررسی می‌گردد.

تابع تولید یک مفهوم کلی و کاربردی است. رابطه‌ای است بین واکنش (کمی یا کیفی) گیاه به پارامترها و نهاده‌های مختلف تولید (آب، کود، خاک، انرژی و سایر شرایط و عوامل زراعی). در مجموع، تابع تولید رابطه‌ای است ریاضی بین میزان آب مصرفی و کل تولید ماده خشک (TDM)، یا رابطه‌ای است بین محصول قابل فروش در مقابل تبخیر - تعرق (ET) یا مقدار آب مصرفی در طی فصل آبیاری (IW).

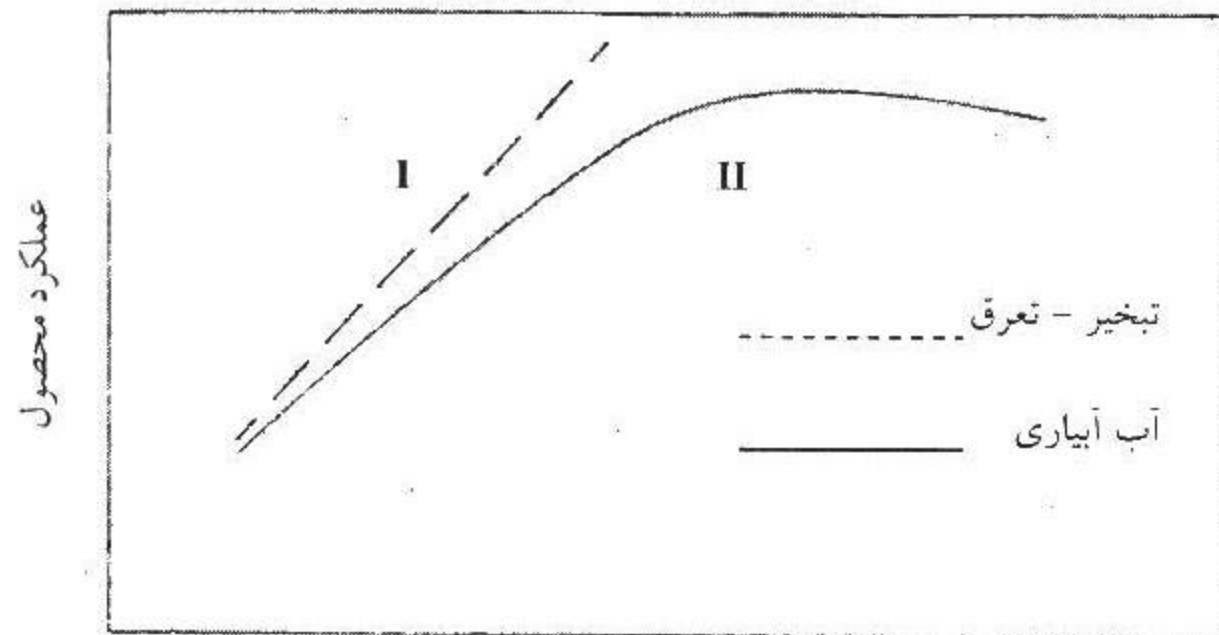
از سویی، به کارگیری هر روش بهینه‌سازی اقتصادی تابع تولید (برحسب آب مصرفی)، دانش و اقدامی است که به بررسی رابطه «آب مصرفی - عملکرد»

می‌پردازد. اساس فیزیولوژیک تابع تولید، مبتنی بر یافتن اثرات تنش آبی بر مراحل فیزیولوژیک گیاه مانند رفتار روزنه‌ها (استومات‌ها)، میزان و شدت فتوسنتز، انتقال و جذب می‌باشد (English et al., 1990).

اثرات کلی تنش آبی بر عملکرد همواره مورد توجه بوده و در مراحل مختلف رشد روی عملکرد محصول بررسی گردیده است. از روابط مشهور و معروف پیرامون رابطه «آب مصرفی - عملکرد»، مدل بهینه سازی سود خالص (آب مصرفی) یا مدل انگلیش (English, 1990) و فرمول استوارت و همکاران (Stewart et al., 1977) است.

نتایج تحقیقات مختلف بیانگر افت عملکرد پس از افزایش میزان معینی از آب مصرفی است و چون میزان تبخیر - تعرق در ارتباط با مراحل فیزیولوژیک گیاه است، بنابراین شاخص مناسب‌تری برای مصرف آب توسط گیاه به شمار می‌رود. طبق شکل (۱-۳) رابطه بین عملکرد محصول و تبخیر - تعرق فصلی تقریباً خطی است. تابع تولید ابتدا یک حالت تقریباً خطی دارد ولی به تدریج از حالت خطی به منحنی (درجه دوم) تبدیل می‌شود (شکل ۱-۳) (Doorenbos and Kassam, 1979; Hargreaves and Samani, 1984). علت این امر مربوط به تلفات آب به صورت نفوذ عمقی و رواناب می‌باشد که هر چه عمق آب آبیاری بیشتر شود، بر میزان تلفات نیز اضافه می‌گردد. علت تلفات نفوذ عمقی به خصوصیات خاک و شیوه نادرست برآورد آب قابل دسترس و زیاد در نظر گرفتن عمق توسعه ریشه برمی‌گردد.

با توجه به شکل (۱-۳) منحنی آب مصرفی دارای دو بخش می‌باشد. در بخش I که رابطه‌ای تقریباً خطی با عملکرد محصول دارد، با افزایش آب مصرفی میزان عملکرد نیز افزایش یافته است و این محدوده (قبل از رسیدن به حداکثر که مربوط به آبیاری کامل است) کم‌آبیاری است. در این بخش، روند افزایش آب مصرفی و تبخیر - تعرق موازی است.



تبخیر - تعرق و آب آبیاری

شکل ۱-۳ رابطه بین تبخیر - تعرق (ET) و میزان آب مصرفی در آبیاری (IW) با عملکرد محصول

در بخش II، اگر چه آب مصرفی افزایش می‌یابد، اما عملکرد کاهش یافته است. عواملی که برای این کاهش متصور است یک سری اثرات منفی است که آب مصرفی زیاد بر محدوده رشد ریشه از جنبه میزان تهویه، تبادلات گازی، انتقال مواد غذایی، دمای محیط ریشه و غیره می‌گذارد.

میزان تلفات نفوذ عمقی نیز در بخش II زیاد است. اگر خاک دارای کیفیت مناسبی نباشد، در صورت وجود زهکش مناسب، مصرف زیاد آب باعث شستشوی نمک‌ها (آبشویی) و خارج شدن آنها از محدوده رشد ریشه می‌گردد که در افزایش عملکرد مؤثر خواهد بود. اما اگر آب و خاک دارای کیفیت مناسب باشند، مصرف زیادی آب باعث شستشوی املاح مفید خاک، افزایش هزینه آب مصرفی و طولانی شدن دوره رشد گیاه می‌گردد. در مناطقی که دارای محدودیت منابع آب هستند، آب مصرفی اهمیت بیشتری می‌یابد. در گذشته که آب هنوز یک عامل محدود کننده جدی به شمار نمی‌رفت، هدف از برنامه‌ریزی آبیاری، تنها دستیابی به حداکثر پتانسیل تولید از واحد سطح بود که به عنوان حداکثر درآمد تلقی می‌شد. امروزه این تفکر و این‌گونه مدیریت آبیاری، به ویژه در شرایط کمبود آب، غیر قابل قبول است.

عدول از شرایط آبیاری کامل، مستلزم صرف نظر کردن از یکنواختی عمق آب مورد نیاز نیست بلکه تلاش برای به کارگیری راهکار کم آبیاری است که هدف، استفاده بیشتر و بهتر از واحد آب (به جای واحد زمین) است. استفاده حداکثر از واحد آب (بهینه سازی کم آبیاری) در صورتی میسر خواهد بود که تابع تولید و تابع هزینه برای هر مدل در دست باشد. آنگاه با استفاده از روش‌ها و مدل‌های مختلف می‌توان آستانه‌ها را مشخص کرد. آستانه‌ها نشان می‌دهند که چه درجه‌ای از کم آبیاری موجب حصول عملکرد مطلوب و سود خالص حداکثر از واحد آب می‌گردد. حتی در صورت فراوانی آب و اعمال آبیاری کامل، توابع و مدل‌های مذکور نشان می‌دهند که چه درجه‌ای از کم آبیاری موجب تحصیل سود خالص حداکثر می‌گردد. با این توضیح مشخص می‌شود که در اکثر موارد و در آبیاری‌های کامل برای استفاده از واحد اراضی، حداکثر عملکرد با سود خالص حداکثر منطبق نیست.

۲-۳ مدل‌ها و روابط بهینه سازی کم آبیاری

روابطی که در این بخش شرح داده می‌شود، بر مبنای رابطه تبخیر و تبخیر - تعرق با عملکرد محصولات، استوار است. اگر مسئله به طور شماتیک شرح داده شود، روابط به قرار زیر بیان می‌شوند (Howell, 1990; Stewart and Nielsen, 1990):

$$ET = f(Q, \theta, C, W, M) \quad (1-3)$$

$$T = f(ET, C, W, M) \quad (2-3)$$

$$A = f(T, C, W, M) \quad (3-3)$$

$$P = f(A, C, M) \quad (4-3)$$

$$Y = f(P, C, M) \quad (5-3)$$

که در آنها:

ET = تبخیر - تعرق گیاه در فصل زراعی که متکی بر پارامترهای فیزیکی و اقلیمی است.

Q = عمق آب آبیاری (ناخالص) که با توجه به عمق آب مورد نیاز (نیاز خالص) و راندمان سیستم آبیاری تعیین می‌شود.

$$T = \text{تعرق گیاه}$$

$$A = \text{تثبیت و ماده سازی}$$

$$P = \text{تولید ماده خشک}$$

$$Y = \text{عملکرد اقتصادی}$$

$$\theta = \text{پارامترهای مرتبط با خاک، مثل گنجایش رطوبتی، میزان کود، شوری و ...}$$

$$C = \text{پارامترهای مرتبط با گیاه، مثل نوع و گونه، مقاومت انتشار (مقاومت در مقابل انتشار مواد گازی در گیاه)، نقطه موازنه CO}_2 \text{ و تخصیص (تقسیم مواد فتوسنتزی بین اندام‌های گیاهی).}$$

$$W = \text{پارامترهای هواشناسی شامل تشعشع خورشیدی، دمای هوا، کمبود فشار بخار، بارش و رطوبت نسبی}$$

$$M = \text{اثر دیگر پارامترها شامل آفات و بیماری‌ها، دوره بحرانی کمبود آب، فرهنگ و اطلاعات کشاورزی}$$

بهبود راندمان آب مصرفی (کارایی مصرف آب) از دیدگاه مهندسی مرتبط با حداکثر سازی تبخیر - تعرق است. بدین مفهوم که آب آبیاری حتی المقدور صرف تبخیر - تعرق گردد و از رواناب و تلفات نفوذ عمقی جلوگیری شود. بهبود راندمان آب مصرفی ($Y = ET^{-1}$) از دیدگاه کشاورزی، مرتبط با حداکثر سازی اجزای عملکرد (اجزای ساختاری عملکرد و شاخص برداشت)، میزان تثبیت و ماده سازی (A) و جزء تعرق از تبخیر - تعرق است (Howell, 1990; Stewart and Nielsen, 1990). افزایش سهم تعرق از تبخیر - تعرق (Cooper et al., 1987; Tanner and Sinclair, 1983; Viets, 1962) سبب کاهش تلفات تبخیر از سطح خاک و افزایش کارایی مصرف آب می‌شود.

صرف نظر از روابط کلی فوق، روابط پیشنهادی زیر برای برآورد عملکرد محصول در مباحث علمی و عملی استفاده می‌شود:

۳-۲-۱ فرمول استوارت و همکاران (Stewart et al., 1977)

مبنای این فرمول بر نسبت کمبود تبخیر - تعرق به حداکثر تبخیر - تعرق (پتانسیل تبخیر - تعرق) قرار گرفته است (Stewart et al., 1977). بر این اساس، نسبت افت عملکرد به حداکثر (پتانسیل) عملکرد محصول مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. فرمول استوارت و همکاران به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{Y_{\max} - Y}{Y_{\max}} = b \frac{\sum ET_{\max} - \sum ET}{\sum ET_{\max}} \quad (۶-۳)$$

که در آن Y و $Y_{\max}$ به ترتیب عملکرد واقعی و حداکثر عملکرد و ET و $ET_{\max}$ نیز به ترتیب تبخیر - تعرق واقعی و حداکثر تبخیر - تعرق می‌باشند. رابطه فوق به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$1 - \frac{Y}{Y_{\max}} = b \frac{\sum ET_d}{\sum ET_{\max}} \quad (۷-۳)$$

که در آن $\sum ET_d = \sum ET_{\max} - \sum ET$ بیانگر کمبود تبخیر - تعرق می‌باشد. b عبارت است از نسبت کاهش عملکرد به کمبود تبخیر - تعرق. البته b را با K_y نیز نشان می‌دهند. به بیان دیگر، به b شیب عملکرد نسبی در مقابل کمبود تبخیر - تعرق، یا فاکتور حساسیت عملکرد، می‌گویند.

۳-۲-۲ فرمول دورنباس و کاسام (Doorenbos and Kassam, 1979)

با توجه به رابطه استوارت و همکاران (رابطه ۶-۳)، رابطه بین عملکرد نسبی و تبخیر - تعرق نسبی توسط دورنباس و کاسام (Doorenbos and Kassam, 1979) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$1 - \frac{Y}{Y_{\max}} = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_{\max}}\right) \quad (۸-۳)$$

یا

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = (1 - K_y) + K_y \left(\frac{ET}{ET_{\max}}\right) \quad (۹-۳)$$

که در آن $Y_{\max}$ حداکثر عملکرد قابل حصول (بدون محدودیت آب یا وجود پتانسیل تبخیر - تعرق) می‌باشد. یکی از شیوه‌های ساده، فراگیر و کاربردی محاسبه تبخیر - تعرق پتانسیل استفاده از مدل کامپیوتری CropWat - FAO (CropWat 4, Windows Version 4.2) است (FAO, 1992). در این مدل، کم‌آبیاری نقش مهمی در افزایش کارایی مصرف آب بازی می‌کند (Smith and Kivumbi, 2002).

اگر رابطه (۹-۳) برای مراحل مختلف رشد یک محصول مورد توجه قرار گیرد به صورت زیر در می‌آید:

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = \prod_{n=1}^m \left[1 - K_{yn} \left(1 - \frac{ET}{ET_{\max}}\right)_n \right] \quad (۱۰-۳)$$

که n شماره مرحله رشد و m تعداد کل مراحل رشد گیاه است.

مقدار فاکتور حساسیت عملکرد محصول بسته به شرایط محلی، اقلیم، خاک، محصول، مدیریت زراعی و برنامه آبیاری متفاوت است. به طوری که مقدار آن را فائو بین ۰/۲ تا ۱/۱۵ (Doorenbos and Kassam, 1979) و آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (International Atomic Energy Agency = IAEA) بین ۰/۰۸ تا ۱/۷۵ (Kitamura, 1990) گزارش نموده است (به نقل از Moutonnet, 2002).

۳-۲-۳ رابطه مین‌هاس و همکاران (Minhas et al., 1974)

این رابطه هم ساختاری مشابه روابط فوق دارد و به صورت زیر نوشته می‌شود (Minhas et al., 1974):

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = \prod_{i=1}^n \left\{ \left[1 - \left(1 - \left(\frac{ET}{ET_{\max}}\right)_i^2\right) \right]^{b_i} \right\} \quad (۱۱-۳)$$

که در آن b_i فاکتور حساسیت نسبی گیاه به کمبود آب در مرحله رشد i ام (بی بعد) می‌باشد. بقیه پارامترهای رابطه (۱۱-۳) همگی قبلاً تعریف شده‌اند.

۳-۲-۴ رابطه هنکس و راسموسن (Hanks and Rasmussen, 1982)

بسیاری از روابط مشابه آنچه که در بالا گفته شد به شرح اثرات تنش آبی بر عملکرد محصولات در مراحل خاصی از رشد می‌پردازند. یکی از این روابط به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = \left\{ 1 - B \left[1 - \left(\frac{ET}{ET_{\max}} \right) \right] \right\} \quad (12-3)$$

که در آن B همان فاکتور حساسیت عملکرد است (بدون بعد). هنکس و راسموسن (Hanks and Rasmussen, 1982) برای محاسبه تبخیر از سطح خاک (E) و حداکثر تعرق ($T_{\max}$) از $ET_{\max}$ روابط زیر را پیشنهاد کردند:

$$E = ET_{\max} (1 - B^{-1}) \quad (13-3)$$

و

$$T_{\max} = ET_{\max} B^{-1} \quad (14-3)$$

واحد E و $T_{\max}$ بر حسب میلی‌متر است.

۳-۲-۵ رابطه جنسن (Jensen, 1968)

رابطه جنسن (Jensen, 1968) به صورت زیر است:

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{ET}{ET_{\max}} \right)^{\lambda_i} \quad (15-3)$$

λ_i فاکتور حساسیت نسبی گیاه به کمبود آب در مرحله رشد i ام (بی بعد) و n تعداد مراحل رشد گیاه است. جنسن مقدار λ را برای سورگوم دانه‌ای در سه مرحله رشد آن، چنین به دست آورد:

$\lambda = 0.5$	$\lambda = 1/5$	$\lambda = 0.5$	
جوانه‌زنی	گل‌دهی	مرحله شیری	برداشت

در این صورت فرمول (۱۵-۳) برای سورگوم دانه‌ای چنین نوشته خواهد شد:

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = \left(\frac{ET}{ET_{\max}} \right)^{0.5} \left(\frac{ET}{ET_{\max}} \right)^{1.0} \left(\frac{ET}{ET_{\max}} \right)^{0.5} \quad (16-3)$$

علاوه بر رابطه فوق، جنسن روابط زیر را نیز پیشنهاد کرد:

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i (ET)_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i (ET_{\max})_i \right)^{-1} \quad (17-3)$$

و

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = \prod_{i=1}^n \left(\frac{T}{T_{\max}} \right)^{\lambda_i} \quad (18-3)$$

که در آنها:

$T \cdot T_{\max}^{-1}$ = تعرق نسبی گیاه در طول دوره‌های مختلف رشد گیاه

λ_i = فاکتور حساسیت وزنی عملکرد برای مراحل مختلف رشد

T = تعرق واقعی گیاه تحت شرایط کم آبیاری، میلی‌متر

$T_{\max}$ = تعرق گیاه وقتی که آب باعث محدودیت عملکرد نباشد (شرایط تبخیر - تعرق پتانسیل)، میلی‌متر

۳-۲-۶ رابطه دویت (De Wit, 1958)

دویت رابطه عملکرد و تبخیر را به صورت زیر نوشته است (De Wit, 1958):

$$Y = m \left(\frac{T_a}{E} \right) \quad (19-3)$$

که در آن:

Y = کل عملکرد ماده خشک، کیلوگرم در هکتار

T_a = مقدار تعرق در فصل رشد، میلی‌متر

E_0 = شدت تبخیر از سطح آزاد آب، میلی‌متر در روز

m = ضریب تناسب که به عنوان مثال برای سورگوم، گندم و یونجه به ترتیب ۰.۲۵۲، ۱۳۹ و ۶۶/۲ کیلوگرم در هکتار به دست آمده است.

۳-۲-۷ رابطه هنکس (Hanks, 1974)

رابطه هنکس (Hanks, 1974) بر اساس میزان تعرق و عملکرد به دست آمده و به صورت زیر است:

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = \frac{T}{T_{\max}} \quad (20-3)$$

که:

Y = کل عملکرد واقعی ماده خشک، کیلوگرم در هکتار

$Y_{\max}$ = حداکثر تولید ماده خشک بدون محدودیت آب، کیلوگرم در هکتار

T = میزان تعرق برای دوره رشد، میلی متر

$T_{\max}$ = تعرق پتانسیل، وقتی که آب، عملکرد یا تعرق را محدود نمی کند، میلی متر

۳-۲-۸ رابطه آرکلی (Arkley, 1963)

این رابطه بر مبنای کمبود فشار بخار هوا و تعرق گیاه است و به صورت زیر نوشته می شود (Arkley, 1963):

$$Y = K_a T (100 - H)^{-1} \quad (21-3)$$

و

$$Y = K'_a T (e^* - e)^{-1} \quad (22-3)$$

که در آنها:

Y = عملکرد ماده خشک، کیلوگرم در هکتار

T = تعرق گیاه برای دوره رشد، کیلوگرم در هکتار

K_a = ضریب ویژه گیاه، درصد

H = میانگین روزانه رطوبت نسبی هوا در دوره رشد، درصد

K'_a = ضریب ویژه گیاه، کیلو پاسکال

$e^* - e$ = کمبود فشار بخار اشباع، کیلو پاسکال

مقادیر H و K'_a به صورت زیر به دست می آیند:

$$H = 100 - e(e^*)^{-1} \quad (23-3)$$

و

$$K'_a = 0.01 e^* K_a \quad (24-3)$$

که در آنها:

e = فشار بخار هوا، کیلو پاسکال

e^* = فشار بخار اشباع هوا، کیلو پاسکال

۳-۲-۹ رابطه خطی بین تبخیر - تعرق و عملکرد

رابطه خطی (رگرسیون) بین تبخیر - تعرق و عملکرد توسط کول و ماتیوس (Cole and Mathews, 1923) و ماتیوس و براون (Mathews and Brown, 1938) به صورت زیر تعریف شده است:

$$Y = bET - a \quad (25-3)$$

که در آن:

Y = عملکرد دانه، کیلوگرم در هکتار

ET = تبخیر - تعرق دوره رشد گیاه، میلی متر

a و b = ضرایب رگرسیونی هستند که به ترتیب بر حسب کیلوگرم در هکتار و کیلوگرم در هکتار بر میلی متر تعریف می شوند.

نتیجه تحقیق این محققین برای گندم زمستانه به صورت معادله زیر است:

$$Y = 5.19ET - 972, \quad r^2 = 0.591, \quad n = 81 \quad (26-3)$$

که n تعداد مشاهدات و r^2 ضریب تبیین (تعیین) است.

۳-۲-۱۰ روابط مس (Maas, 1986) و مس - هافمن (Maas and Hoffman, 1977)

در شرایطی که کیفیت آب از نظر شوری مطلوب نباشد، عملکرد نسبی از روابط زیر قابل محاسبه است (Maas, 1986; Maas and Hoffman, 1977):

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = 1 - B_s (EC_e - A_s), \quad EC_e \geq A_s \quad (27-3)$$

و

$$\frac{Y}{Y_{\max}} = 1, \quad EC_e \leq A_s \quad (28-3)$$

که در آنها:

A_s = آستانه شوری عصاره اشباع خاک، دسی زیمنس بر متر

B_s = حساسیت گیاه به شوری بالاتر از حد آستانه، درصد کاهش محصول به ازای

هر دسی زیمنس بر متر

EC_e = هدایت الکتریکی عصاره اشباع، دسی زیمنس بر متر

۳-۳ کارایی مصرف آب

در خصوص نحوه محاسبه کارایی مصرف آب (Water use efficiency) که عبارت است از نسبت عملکرد دانه به میزان آب مصرفی (تبخیر - تعرق) و واحد آن کیلوگرم بر متر مکعب یا کیلوگرم بر میلی متر است (Gregory, 1991; Howell, 1990; Jensen *et al.*, 1990; Jensen, 1968; Jensen, 1987; Musick and Porter, 1990)، دو رابطه زیر پیشنهاد شده است. رابطه اول که توسط جنسن (Jensen, 1987) بیان شده به صورت زیر است:

$$(29-3) \quad \text{میزان محصول قابل فروش بر حسب کیلوگرم} \\ \text{کارایی خالص مصرف آب} = \frac{\text{میزان تبخیر - تعرق بر حسب متر مکعب}}$$

تعیین کارایی مصرف آب گندم مورد توجه محققین زیادی قرار داشته است. بسیاری از آنها میزان کارایی مصرف آب را برای گندم بین ۱ تا ۱/۲ کیلوگرم بر متر مکعب (۱۰ تا ۱۲ کیلوگرم بر میلی متر) گزارش نموده اند (Aggarwal *et al.*, 1986; Bouman and Tuong, 2001; Cooper, 1980; Lal, 1985; Shimshi and Kafkafi, 1978; Singh and Dastane, 1971). برخی دیگر مقادیر بزرگتری را به دست آورده اند که عبارت است از: ۱/۵ تا ۱/۹ (Rao and Bhardwaj, 1981)، ۱/۴ تا ۱/۵ (Ehlig and LeMert, 1976) و ۱/۲ تا ۱/۶ (Fischer, 1970) کیلوگرم بر متر مکعب.

رابطه دوم که توسط کسل و ادواردز (Cassel and Edwards, 1985) بیان شده، به صورت زیر است:

$$(30-3) \quad AIWUE = \frac{Y_{irr} - Y_{dry}}{W_{irr}}$$

که در آن:

$AIWUE$ = کارایی ظاهری آب آبیاری یا بهره‌وری آب آبیاری

Y_{irr} = عملکرد دانه تحت تیمار آبیاری

Y_{dry} = عملکرد دانه تحت شرایط دیم

W_{irr} = مقدار آب آبیاری به کار برده شده، میلی متر

۳-۴ شاخص برداشت

یکی از پارامترهای مهم در تحلیل‌های زراعی، تعیین و مقایسه شاخص برداشت (Harvest index) است که به طور خلاصه روابط مربوط به آن بیان می‌شود. لازم به ذکر است که این روابط توسط دونالد و هامبلین (Donald and Hamblin, 1976) بیان گردیده‌اند.

$$(31-3) \quad H_i = Y(P_s + Y)^{-1}$$

که در آن:

H_i = شاخص برداشت، بدون بعد

Y = عملکرد اقتصادی (عملکرد دانه)، کیلوگرم در هکتار

P_s = عملکرد کاه و کلش، کیلوگرم در هکتار

علاوه بر رابطه فوق، روابطی به صورت زیر نیز ذکر می‌گردد:

$$(32-3) \quad Y = H_i P_a$$

و

$$(33-3) \quad Y = H_i (P_i - P_r)$$

که در آنها:

P_a = کل ماده خشک روی سطح زمین (دانه + کاه و کلش)، کیلوگرم در هکتار

P_t = کل ماده خشک تولیدی (بیوماس)، $P_t = P_s + Y + P_r$ ، کیلوگرم در هکتار
 P_r = وزن خشک ریشه، کیلوگرم در هکتار

۳-۵ بهینه سازی عمق آب مصرفی و سود خالص

آنچه که در این نوشتار به آن پرداخته شده شامل دو بخش است. بخش اول به شرح برخی روابط بین تبخیر - تعرق و عملکرد پرداخته است. اما آنچه که بیشتر مد نظر بوده، بیان مدلی برای بهینه سازی سود خالص و تعیین شاخص های آستانه ای عمق آب مصرفی است. یکی از بارزترین خصوصیات این مدل، وجود دو تابع (تولید و هزینه) و همچنین قیمت محصول است که به صورت تلفیقی به کار گرفته می شوند (English and Raja, 1996; English et al., 1990). از خصوصیات دیگر این مدل وجود منطق ریاضی، ضوابط اقتصادی و مبانی زراعی در آن است. با این توضیح مختصر به اصل مطلب اشاره می شود.

برای تعیین شاخص های آستانه ای عمق آب مصرفی، ابتدا پارامترهای به کار رفته تعریف می شوند:

A = کل سطح زیر کشت و تحت آبیاری، هکتار

WT = کل آب تأمین شده (قابل استحصال)، متر مکعب

W = مقدار (عمق) آب مصرفی برای واحد سطح مزرعه، متر مکعب در هکتار یا سانتی متر

$y(w)$ = عملکرد در واحد سطح (تابع تولید)، که تابعی از آب مصرفی است، کیلوگرم در هکتار

$c(w)$ = تابع هزینه (هزینه های تولید در واحد سطح) که تابعی از میزان آب مصرفی است، ریال در هکتار

P_c = قیمت (ارزش) واحد وزن محصول، ریال بر کیلوگرم

$i_l(w)$ = درآمد (سود) خالص در واحد سطح، ریال در هکتار

$I_f(w)$ = درآمد (سود) خالص مزرعه از کل اراضی آبیاری شده، ریال

میزان درآمد (سود) خالص مزرعه از رابطه زیر به دست می آید:

$$I_f(w) = A \cdot i_l(w) \quad (3-24)$$

درآمد (سود) خالص هر هکتار تابعی از قیمت واحد وزن محصول، عملکرد، هزینه ها و آب مصرفی است:

$$i_l(w) = P_c y(w) - c(w) \quad (3-25)$$

برای اینکه تفاوت سود یا درآمد خالص با درآمد ناخالص مشخص شود، ذکر این نکته ضروری است که فایده، سود یا درآمد خالص معادل Benefit یا Net income و درآمد یا درآمد ناخالص معادل Gross income، Income و Revenue به کار می رود و روابط زیر برقرار است:

$$P_c y(w) = \text{درآمد یا درآمد ناخالص}$$

$$P_c y(w) - c(w) = \text{سود یا درآمد خالص}$$

با این توضیح، به ادامه بحث بهینه سازی پرداخته می شود.

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

با توجه به کل حجم آب تأمین شده و عمق آب مصرفی در برنامه ریزی کم آبیاری، کل سطح آبیاری شده، بر حسب هکتار، از رابطه زیر به دست می آید:

$$A = \frac{WT}{w} \quad (3-26)$$

سطح A بسته به اینکه آبیاری به طور کامل، یا به صورت کم آبیاری، انجام گیرد متفاوت خواهد بود و به حد بهینه کم آبیاری بستگی خواهد داشت.

مقدار آب مصرفی که حداکثر عملکرد را به همراه دارد (W_m)، با مشتق گیری از تابع تولید و مساوی صفر قرار دادن آن، تخمین زده می شود:

$$\frac{\partial y(w)}{\partial w} = 0 \quad (3-27)$$

برای تعیین مقدار آب مصرفی که سود خالص را در شرایط محدودیت زمین به حداکثر می‌رساند، از معادله (۳۴-۳) بر حسب w مشتق جزئی گرفته می‌شود:

$$\frac{\partial I_f(w)}{\partial w} = A \frac{\partial i_l(w)}{\partial w} + i_l(w) \frac{\partial A}{\partial w} \quad (38-3)$$

وقتی که زمین عامل محدود کننده باشد، A ثابت فرض می‌شود و با مساوی صفر قرار دادن مشتق آن و حذف A ، مقدار بهینه آب مصرفی در حالت محدودیت زمین (W_1)، با معادله زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial i_l(w)}{\partial w} = 0 \quad (39-3)$$

این معادله، در واقع مشتق معادله (۳۵-۳) است که مساوی صفر قرار داده شده است و به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial i_l(w)}{\partial w} = P_c \frac{\partial y(w)}{\partial w} - \frac{\partial c(w)}{\partial w} = 0 \quad (40-3)$$

بنابراین، برای عمق بهینه آب مصرفی، وقتی که زمین محدود کننده باشد (W_1)، معادله زیر نوشته می‌شود:

$$P_c \frac{\partial y(w)}{\partial w} = \frac{\partial c(w)}{\partial w} \quad (41-3)$$

اما وقتی که آب عامل محدود کننده است، A تابعی از w است و حد بهینه آب در این حالت از معادله (۳۸-۳) تعیین می‌شود:

$$\frac{\partial I_f(w)}{\partial w} = 0 \quad (42-3)$$

و بنابراین:

$$A \frac{\partial i_l(w)}{\partial w} + i_l(w) \frac{\partial A}{\partial w} = 0 \quad (43-3)$$

وقتی که سطح زیر کشت تابعی از آب مصرفی است (معادله ۳۶-۳):

$$\frac{\partial A}{\partial w} = -\frac{WT}{w^2} \quad (44-3)$$

که با جایگزینی در معادله (۴۳-۳) چنین به دست می‌آید:

$$\frac{WT}{w} \left[P_c \frac{\partial y(w)}{\partial w} - \frac{\partial c(w)}{\partial w} \right] + [P_c y(w) - c(w)] \left[-\frac{WT}{w^2} \right] = 0 \quad (45-3)$$

و با ساده کردن معادله فوق:

$$w \left[P_c \frac{\partial y(w)}{\partial w} - \frac{\partial c(w)}{\partial w} \right] = P_c y(w) - c(w) \quad (46-3)$$

با حل معادلات (۴۱-۳) و (۴۶-۳) نسبت به w ، مقدار بهینه عمق آب مصرفی در حالت محدودیت زمین و آب (به ترتیب W_1 و W_w) به دست می‌آید.

برای به دست آوردن درآمد خالص از هر هکتار، عمق آب مصرفی در معادله (۳۵-۳) قرار داده می‌شود. برای مثال با جایگذاری W_m در این معادله، درآمد خالص از یک هکتار سطح تحت آبیاری کامل (که حداکثر عملکرد در واحد سطح را به دنبال داشته است) به دست می‌آید:

$$i_l(W_m) = P_c y(W_m) - c(W_m) \quad (47-3)$$

و درآمد خالص در کل سطح تحت آبیاری نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_f(W_m) = \frac{WT}{W_m} i_l(W_m) \quad (48-3)$$

نحوه تعیین و محاسبه عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب و زمین و نیز عمق آب مصرفی در حالت سر به سری (به ترتیب W_{cw} ، W_{cl} و W_k) در بخش‌های بعد بیان می‌شود.

اگر چه در خصوص نحوه تعیین فرم ریاضی تابع تولید و ضرایب مربوط به آن (a_1 ، b_1 ، c_1)، نرم‌افزارهایی وجود دارد (مانند نرم‌افزارهای Curve، Grapher و Statistica) اما به طریقه زیر نیز می‌توان با حل یک دستگاه سه معادله سه مجهول، ضرایب مجهول را به دست آورد.

شکل عمومی تابع تولید بر اساس نتایج مزرعه‌ای "آب مصرفی - عملکرد" از طریق بهترین برازش داده‌ها به صورت معادله درجه دوم (منحنی) به دست می‌آید:

$$y(w) = a_1 + b_1 w + c_1 w^2 \quad (49-3)$$

برای به دست آوردن ضرایب تابع تولید (یعنی a_1 ، b_1 و c_1) از روش "حداقل مجموع تفاضل مربعات" استفاده می‌شود که برای نقاط مشاهده‌ای (w_i ، Y_0) و نقاط محاسبه شده (w_i ، $Y_c = a_1 + b_1 w + c_1 w^2$) برای آنکه معادله درجه دو دارای بهترین برازش باشد، بایستی مقدار d حداقل باشد:

فصل ۴

اولین شکل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی

۴-۱ کلیات

اولین شکل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی و در نتیجه سود خالص، برای حالتی است که تابع تولید به صورت منحنی درجه دو، تابع هزینه به صورت خطی و قیمت محصول نیز ثابت (بر اساس نرخ تضمینی یا نرخ بازار) باشد. شکل عمومی این روابط به صورت زیر است:

$$y(w) = a_1 + b_1 w + c_1 w^2 \quad (۱-۴)$$

$$c(w) = a_2 + b_2 w \quad (۲-۴)$$

$$P_C = \text{ثابت} \quad (۳-۴)$$

که $y(w)$ عملکرد، $c(w)$ هزینه، w عمق آب مصرفی و P_C قیمت محصول است. شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی بر اساس تابع تولید، تابع هزینه و قیمت فروش محصول به دست می‌آید. لازم به ذکر است که شکل تابع هزینه، ممکن است بسته به شرایط و محصول متفاوت باشد. در منطقه‌ای برای محصولی ممکن است به صورت خطی و در منطقه‌ای دیگر درجه دو باشد. لذا توجه به تابع هزینه منطقه‌ای محصولات ضروری است. شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی بر اساس روند زیر تعیین می‌شوند.

۱- عمق آبیاری کامل (W_m)، که با مشتق‌گیری از تابع تولید بر حسب عمق آب مصرفی (w) و مساوی صفر قرار دادن آن، به دست می‌آید:

$$\frac{\partial y(w)}{\partial w} = 0 \quad \longrightarrow \quad b_1 + 2c_1 w = 0 \quad (۴-۴)$$

$$W_m = -\frac{b_1}{2c_1} \quad (۵-۴)$$

$$d = \sum_{i=1}^n (Y_i - Y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (a_1 + b_1 w_i + c_1 w_i^2 - Y_i)^2 \quad (۵۰-۳)$$

و برای حداقل نمودن d بایستی مشتقات d نسبت به ضرایب a_1 ، b_1 و c_1 برابر صفر گردد:

$$\frac{\partial d}{\partial a_1} = \frac{\partial d}{\partial b_1} = \frac{\partial d}{\partial c_1} = 0 \quad (۵۱-۳)$$

پس از مشتق‌گیری از عبارت d و ساده و مرتب کردن، سه معادله زیر نتیجه می‌شود که تشکیل یک دستگاه می‌دهند و با حل آنها، ضرایب تابع تولید معین می‌شود:

$$na_1 + b_1 \sum w_i + c_1 \sum w_i^2 = \sum Y_i \quad (۵۲-۳)$$

$$a_1 \sum w_i + b_1 \sum w_i^2 + c_1 \sum w_i^3 = \sum w_i Y_i \quad (۵۳-۳)$$

$$a_1 \sum w_i^2 + b_1 \sum w_i^3 + c_1 \sum w_i^4 = \sum w_i^2 Y_i \quad (۵۴-۳)$$

که n تعداد مشاهدات تیمارهای آبیاری در تحقیق مزرعه‌ای است و w_i و Y_i نیز به ترتیب عمق آب مصرفی و عملکرد در هر کدام از تیمارهای آبیاری می‌باشند.

۲- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت زمین (W_l)، که با مشتق‌گیری از تابع سود خالص (معادله ۳-۳۵) به دست می‌آید:

$$i_l(w) = P_c y(w) - c(w) \quad (۴-۶)$$

و

$$P_c \frac{\partial y(w)}{\partial w} = \frac{\partial c(w)}{\partial w} \quad (۴-۷)$$

و در نتیجه:

$$W_l = \frac{b_1 - b_1 P_c}{2c_1 P_c} \quad (۴-۸)$$

۳- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت آب (W_w)

$$w \left[P_c \frac{\partial y(w)}{\partial w} - \frac{\partial c(w)}{\partial w} \right] = P_c y(w) - c(w) \quad (۴-۹)$$

و

$$W_w = \left[\frac{a_1 P_c - a_1}{c_1 P_c} \right]^{1/2} \quad (۴-۱۰)$$

۴- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت زمین (W_{el})

$$P_c y(W_{el}) - c(W_{el}) = P_c y(W_m) - c(W_m) \quad (۴-۱۱)$$

و

$$P_c \left[a_1 + b_1 W_{el} + c_1 W_{el}^2 \right] - \left[a_1 + b_1 W_{el} \right] = P_c \left[a_1 + b_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) + c_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)^2 \right] - \left[a_1 + b_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) \right] \quad (۴-۱۲)$$

پس از ساده کردن:

$$c_1 P_c W_{el}^2 + (b_1 P_c - b_1) W_{el} + \left[\frac{b_1^2 P_c}{4c_1} - \frac{b_1 b_1}{2c_1} \right] = 0 \quad (۴-۱۳)$$

که یک معادله درجه دو بوده و به سادگی قابل حل می‌باشد:

$$W_{el} = \frac{(b_2 - b_1 P_c) \pm Z_1}{2c_1 P_c} \quad (۴-۱۴)$$

که در آن:

$$Z_1 = \left[(b_1 P_c - b_1)^2 - 4c_1 P_c \left(\frac{b_1^2 P_c}{4c_1} - \frac{b_1 b_1}{2c_1} \right) \right]^{1/2} = b_1 \quad (۴-۱۵)$$

یکی از نکات اساسی این است که در بهینه‌سازی مصرف آب باید مقادیر W_{el} , W_w , W_m و W_k (عمق آبیاری کامل) و W_k (عمقی از آب آبیاری که در آن سود خالص صفر است) قرار داشته باشند و در شرایطی که معادلات ایجاد شده منتج به دو یا سه جواب می‌شود (جواب‌های موهومی یا حقیقی)، تنها آن جوابی (یک جواب) که مقدار آن بین W_m و W_k قرار دارد قابل قبول و بقیه غیر قابل قبول هستند.

۵- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب (W_{ew})

در واقع، در این عمق آب، سود خالص به ازای واحد این عمق آب مصرفی (W_{ew}) برابر با سود خالص به ازای واحد عمق آب مصرفی آبیاری کامل (W_m) است، یعنی:

$$\frac{\text{سود خالص با عمق } W_{ew}}{W_{ew}} = \frac{\text{سود خالص با عمق } W_m}{W_m} \quad (۴-۱۶)$$

و

$$\frac{P_c y(W_{ew}) - c(W_{ew})}{W_{ew}} = \frac{P_c y(W_m) - c(W_m)}{W_m} \quad (۴-۱۷)$$

با توجه به بند ۴:

$$\frac{P_c \left[a_1 + b_1 W_{ew} + c_1 W_{ew}^2 \right] - \left[a_1 + b_1 W_{ew} \right]}{W_{ew}} = \frac{P_c \left[a_1 + b_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) + c_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)^2 \right] - \left[a_1 + b_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) \right]}{\left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)} \quad (۴-۱۸)$$

و با ساده کردن و مرتب کردن معادله (۴-۱۸) بر حسب W_{ew} :

$$c_1 P_C W_{ew} + \left[\frac{b_1 P_C}{2} + \frac{2a_1 c_1 P_C}{b_1} - \frac{2a_2 c_1}{b_1} \right] W_{ew} + (a_1 P_C - a_2) = 0 \quad (19-4)$$

با فرض:

$$\left[\frac{b_1 P_C}{2} + \frac{2a_1 c_1 P_C}{b_1} - \frac{2a_2 c_1}{b_1} \right] = Z_2 \quad (20-4)$$

یا:

$$Z_2 = \frac{b_1^2 P_C + 4a_1 c_1 P_C - 4a_2 c_1}{2b_1} \quad (21-4)$$

$$W_{ew} = \frac{-Z_2 \pm [Z_2^2 - 4c_1 P_C (a_1 P_C - a_2)]^{0.5}}{2c_1 P_C} \quad (22-4)$$

همان‌طور که در بالا گفته شد، از دو جوابی که از معادله (۲۲-۴) به دست می‌آید، تنها یکی از آنها که در محدوده W_m و W_k قرار دارد قابل قبول است.

۶- عمق آب مصرفی در حالت سر به سر (W_k) ، در این حالت سود خالص برابر صفر است:

$$P_C y(W_k) - c(W_k) = 0 \quad (23-4)$$

$$P_C (a_1 + b_1 W_k + c_1 W_k) - (a_2 + b_2 W_k) = 0 \quad (24-4)$$

$$c_1 P_C W_k + (b_1 P_C - b_2) W_k + (a_1 P_C - a_2) = 0 \quad (25-4)$$

$$W_k = \frac{(b_2 - b_1 P_C) \pm Z_3}{2c_1 P_C} \quad (26-4)$$

که در آن:

$$Z_3 = [(b_1 P_C - b_2)^2 - 4c_1 P_C (a_1 P_C - a_2)]^{0.5} \quad (27-4)$$

۲-۴ مثال‌هایی از بهینه‌سازی عمق آب مصرفی

برای درک مفاهیم کاربردی معادلات فوق در اولین شکل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی (و سود خالص ناشی از آن)، مثال‌هایی عینی از این وضعیت بیان می‌شود

که شامل بهینه‌سازی آب مصرفی گندم در کرج (با دو دور آبیاری ۷ و ۱۴ روز)، جو در کرج (با دو دور آبیاری ۷ و ۱۴ روز)، پنبه در گرگان، گندم در حوزه کلمبیا، پنبه در حوزه کالیفرنیا و نهایتاً ذرت در زیمبابوه می‌باشد.

باید توجه داشت که هیچ‌گاه نمی‌توان به طور مستقیم از این نتایج در شرایط دیگر استفاده کرد. بلکه این نتایج و نمونه‌ها، راهنمایی است برای پژوهش و برنامه‌ریزی. البته با گسترش تحقیقات اثر عوامل دیگر مانند میزان بارش فصل رشد و کود نیتروژن در تعیین شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی و عمق بهینه آب مصرفی برای محصولات مختلف در نقاط مختلف بررسی شده است.

در فصل اول، علاوه بر آبیاری کامل و کم آبیاری، شق سومی نیز تعریف شد به نام آبیاری تکمیلی، که مبنای تشکیل زراعت نیمه‌آبی است و برای تثبیت عملکرد محصولات دیم بسیار اهمیت دارد. آنچه که در آبیاری تکمیلی و تک آبیاری در زراعت دیم بیشتر به چشم می‌خورد، مدیریت حفظ رطوبت و افزایش بهره‌وری از بارش و حداقل آب آبیاری است. لذا در تحلیل کم آبیاری، ضرورت دارد به صورت توأماً به قضیه نگریسته شود و پذیرفت که می‌توان در بسیاری موارد، بین کم آبیاری زراعت آبی و مدیریت بهینه آبیاری تکمیلی زراعت دیم ارتباط برقرار کرد. در این قسمت، به نمونه‌های عینی موارد فوق‌الذکر به طور مشروح پرداخته می‌شود.

۲-۴-۱ گیاه گندم (دور آبیاری ۷ روز، منطقه کرج)

پس از جمع‌آوری و تحلیل داده‌های «آب مصرفی - عملکرد» و نیز هزینه‌های تولید (ثابت و متغیر)، مواردی چون توابع تولید، هزینه و قیمت محصول به صورت زیر تعیین شد (جانبا، ۱۳۷۵):

$$y(w) = 70.2/46 + 275/73w - 2/9775w^2 \quad (28-4)$$

$$c(w) = 70.9844 + 5000w \quad (29-4)$$

$$P_C = 270 \text{ ریال هر کیلوگرم، قیمت سال } 1375 \quad (30-4)$$

به همان طریقی که در فصل سوم گفته شد، از معادلات مربوطه، شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی به صورت زیر به دست می‌آید:

۱- عمق آبیاری کامل (W_m)

$$W_m = \left[\frac{275/73}{2(-2/9775)} \right] = 46/3 \text{ cm}$$

۲- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت زمین (W_l)

$$W_l = \left[\frac{5000 - 27 \cdot (275/73)}{2(270)(-2/9775)} \right] = 43/2 \text{ cm}$$

۳- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت آب (W_w)

$$W_w = \left[\frac{27 \cdot (702/64) - 709844}{270(-2/9775)} \right]^{0.5} = 25/44 \text{ cm}$$

۴- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت زمین (W_{el})

$$Z_1 = b_2 = 5000$$

$$W_{el} = \left[\frac{69447/1 + 5000}{2(270)(-2/9775)} \right] = 40/1 \text{ cm}$$

۵- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب (W_{ew})

$$Z_2 = 48457/98$$

$$W_{ew} = 13/97 \text{ cm} \approx 14 \text{ cm}$$

۶- عمق آب مصرفی در حالت سر به سری (W_k)

$$Z_3 = 56126/3$$

$$W_k = 8/3 \text{ cm}$$

با توجه به شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی محاسبه شده، جداول (۱-۴) و (۲-۴) تشکیل می‌شود که روند بهینه‌سازی در آنها نشان داده شده است.

همان‌طور که در ابتدای این مثال بیان شد، برای گندم دو دور آبیاری ۷ و ۱۴ روز (جانباز، ۱۳۷۵) مورد مطالعه قرار گرفت. جداول (۳-۴) و (۴-۴) بیانگر نتایج

بهینه‌سازی مصرف آب هستند. از شرح معادلات و نحوه محاسبه شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی برای دور آبیاری ۱۴ روز صرف‌نظر شده است.

جدول ۱-۴ تحلیل شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی گندم (۷ روز، کرچ)

۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
ریال در هکتار	ha	NB (ریال در هکتار)	cm	B/C	y (kg/ha)	w (cm)	
W_k	-	-	-	۱/۰۰۰	۲۷۷۹	۸/۳	
W_{ew}	۹۷۰۸۳۹	۲/۳۰۷	۲۹۳۵۷۱	۳۲/۳۰	۱/۳۸۰	۳۹۷۵	۱۴/۰
W_w	۱۳۲۱۷۶۳	۰/۸۲۰	۷۲۶۲۵۶	۲۰/۸۶	۱/۸۶۷	۵۷۹۰	۲۵/۴
W_{el}	۱۱۲۲۰۸۳	۰/۱۵۵	۹۷۱۸۲۶	۶/۲۰	۲/۰۶۷	۶۹۷۱	۴۰/۱
W_l	۱۰۵۰۱۳۴	۰/۰۷۲	۹۷۹۵۹۶	۳/۱۱	۲/۰۵۷	۷۰۵۷	۴۳/۲
W_m	۹۷۱۸۷۶	-	۹۷۱۸۷۶	-	۲/۰۳۰	۷۰۸۶	۴۶/۳

ستون‌های جدول عبارتند از: ۱- عمق آب مصرفی، ۲- عملکرد دانه، ۳- نسبت درآمد ناخالص به هزینه تولید، ۴- میزان آب صرفه‌جویی شده نسبت به آبیاری کامل، ۵- سود خالص در واحد سطح، ۶- میزان امکان افزایش سطح زیر کشت با آب صرفه‌جویی شده، ۷- کل درآمد خالص با امکان افزایش سطح زیر کشت در مقایسه با آبیاری کامل و ۸- شاخص‌ها.

نتیجه:

۱- با توجه به جداول (۱-۴) تا (۴-۴) برتری دور آبیاری ۷ روز بر ۱۴ روز به روشنی معلوم است.

۲- در دور آبیاری ۷ روز، ۴۵ درصد کاهش آب مصرفی گندم نسبت به آبیاری کامل، اگر چه ۱۸/۳ درصد کاهش عملکرد را به دنبال دارد اما ۳۶ درصد سود خالص بیشتری به ازای واحد آب مصرفی را دارا بوده و در حالت امکان افزایش سطح زیر کشت با آب صرفه‌جویی شده در مقایسه با آبیاری کامل، حداکثر سود خالص را به دنبال خواهد داشت.

۳- در دور آبیاری ۷ روز، کاهش ۶/۷ درصد آب مصرفی گندم نسبت به آبیاری کامل، فقط ۰/۵ درصد کاهش عملکرد را به دنبال دارد و همچنین حداکثر سود خالص در واحد سطح را نیز دارا می باشد.

جدول ۲-۴ بهینه سازی شاخص های آستانه ای عمق آب مصرفی گندم (۷ روز، کرج)

درآمد (سود) خالص نسبت به: افزایش درآمد با بهینه سازی در حالت:							
شاخص های آستانه ای	آب مصرفی (cm)	میزان کاهش (%)	واحد سطح *	واحد آب مصرفی **	محدودیت زمین (%)	محدودیت آب (%)	
W_m	۴۶/۳	۰/۰	۹۷۱۸۷۶	۲۰۹۹۱			
W_l	۴۳/۳	۶/۷	۹۷۹۵۹۶	۲۲۶۷۵	۰/۸		
W_{el}	۴۰/۱	۱۳/۴	۹۷۱۸۲۶	۲۴۲۳۵			
W_w	۲۵/۴	۴۵/۰	۷۲۶۲۵۶	۲۸۵۴۸		۳۶	
W_{cw}	۱۴/۰	۶۹/۷	۲۹۳۵۷۱	۲۰۹۹۹			
W_k	۸/۳	۸۲/۰	۰	۰			

*: بر حسب ریال در هکتار **: بر حسب ریال بر متر مکعب در هکتار

جدول ۳-۴ تحلیل شاخص های آستانه ای عمق آب مصرفی گندم (۱۴ روز، کرج)

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
w (cm)	y (kg/ha)	B/C	cm	NB (ریال در هکتار)	ha	ریال در هکتار	
۸/۹	۲۷۹۵	۱/۰۰۰	-	۰	-	-	W_k
۱۴/۷	۳۷۸۴	۱/۳۰۰	۳۲/۳۰	۲۳۸۲۲۷	۲/۱۹۰	۷۵۹۹۴۴	W_{cw}
۲۶/۳	۵۲۷۳	۱/۶۹۲	۲۰/۶۳	۵۸۲۵۵۹	۰/۷۸۶	۱۰۳۹۷۵۱	W_w
۳۹/۳	۶۱۷۰	۱/۸۳۸	۷/۵۹	۷۵۹۵۵۶	۰/۱۹۳	۹۰۶۲۴۹	W_{el}
۴۳/۱	۶۲۷۶	۱/۸۳۱	۳/۷۹	۷۶۹۱۷۶	۰/۰۸۸	۸۳۶۸۱۴	W_l
۴۶/۹	۶۳۱۱	۱/۸۰۴	-	۷۵۹۵۵۸	-	۷۵۹۵۵۸	W_m

توضیحات: ستون های این جدول شبیه جدول (۱-۴) است.

جدول ۴-۴ بهینه سازی شاخص های آستانه ای عمق آب مصرفی گندم (۱۴ روز، کرج)

درآمد (سود) خالص نسبت به: افزایش درآمد با بهینه سازی در حالت:							
شاخص های آستانه ای	آب مصرفی (cm)	میزان کاهش (%)	واحد سطح *	واحد آب مصرفی **	محدودیت زمین (%)	محدودیت آب (%)	
W_m	۴۶/۹	۰	۷۵۹۵۵۸	۱۶۲۰۱			
W_l	۴۳/۱	۸/۱	۷۶۹۱۷۶	۱۷۸۴۶	۱/۳		
W_{el}	۳۹/۳	۱۶/۲	۷۵۹۵۵۶	۱۹۳۲۷			
W_w	۲۶/۳	۴۴/۰	۵۸۲۵۵۹	۲۲۱۷۵		۳۷	
W_{cw}	۱۴/۷	۶۸/۶	۲۳۸۲۲۷	۱۶۱۹۵			
W_k	۸/۹	۸۱/۰	۰	۰			

*: بر حسب ریال در هکتار **: بر حسب ریال بر متر مکعب در هکتار

۲-۲-۴ گیاه جو (دور آبیاری ۷ روز، منطقه کرج)

پس از جمع آوری و تحلیل داده های «آب مصرفی - عملکرد» و نیز هزینه های تولید (ثابت و متغیر)، مواردی چون توابع تولید، هزینه و قیمت محصول به صورت زیر تعیین شد (شیخ حسینی، ۱۳۷۵):

$$y(w) = 669/76 + 359/067w - 5/025w^2 \quad (31-4)$$

$$c(w) = 709844 + 5000w \quad (32-4)$$

$$P_c = 225 \text{ ریال هر کیلوگرم، قیمت سال } 1375 \quad (33-4)$$

به همان طریقی که در فصل دوم گفته شد، از معادلات مربوطه، شاخص های آستانه ای عمق آب مصرفی به صورت زیر به دست می آید:

۱- عمق آبیاری کامل (W_m)

$$W_m = \left[\frac{-359/067}{2(-5/025)} \right] = 35/73 \text{ cm}$$

جدول ۴-۵ تحلیل شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی جو (۷ روز، کرج)

۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
ریال در هکتار	ha	NB (ریال در هکتار)	cm	B/C	y (kg/ha)	w (cm)	
W_k	-	-	۰	-	۱	۳۳۴۲	۸/۴
W_{ew}	۷۰۷۵۸۳	۱/۵۹۰	۲۷۳۱۹۸	۲۱/۹۰	۱/۳۵	۴۶۷۷	۱۳/۸
W_w	۹۱۱۲۵۳	۰/۶۰۶	۵۶۷۲۰۶	۱۳/۴۴	۱/۶۹	۶۱۷۰	۲۲/۲
W_{el}	۸۰۵۱۰۲	۰/۱۴۲	۷۰۵۳۷۰	۶/۴۳	۱/۸۱	۶۹۸۵	۳۱/۳
W_l	۷۵۷۶۹۷	۰/۰۶۶	۷۱۰۸۳۱	۲/۲۱	۱/۸۱	۷۰۵۹	۳۳/۵
W_m	۷۰۵۴۰۶	-	۷۰۵۳۸۲	-	۱/۷۹۴	۷۰۸۴	۳۵/۷

توضیحات ستون‌های این جدول شبیه جدول (۴-۱) است.

همان‌طور که در ابتدای این مثال بیان شد، برای جو دو دور آبیاری ۷ و ۱۴ روزه مورد مطالعه قرار گرفت (شیخ‌حسینی، ۱۳۷۵). جداول (۷-۴) و (۸-۴) بیانگر نتایج بهینه‌سازی مصرف آب هستند. با توجه به برتری دور آبیاری ۷ روزه بر ۱۴ روزه، از شرح معادلات و نحوه محاسبه شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی برای دور آبیاری ۱۴ روزه صرف‌نظر شده است.

جدول ۴-۶ بهینه‌سازی شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی جو (۷ روز، کرج)

درآمد (سود) خالص نسبت به:		افزایش درآمد با بهینه‌سازی در حالت:		شاخص‌های آستانه‌ای		میزان	
واحد	واحد آب مصرفی	محدودیت زمین	محدودیت آب	کاهش (%)	آب مصرفی (cm)	کاهش (%)	سطح
مصرفی	مصرفی	(%)	(%)				
۱۹۷۴۲	۷۰۵۳۸۲	۰	۳۵/۷	۰	۳۵/۷	۳۵/۷	W_m
۲۱۲۰۶	۷۱۰۸۳۱	۶/۲	۳۳/۵	۶/۲	۳۳/۵	۳۳/۵	W_l
۲۲۵۳۶	۷۰۵۳۷۰	۱۲/۴	۳۱/۳	۱۲/۴	۳۱/۳	۳۱/۳	W_{el}
۲۵۵۰۴	۵۶۷۲۰۶	۳۸/۰	۲۲/۲	۳۸/۰	۲۲/۲	۲۲/۲	W_w
۱۹۷۳۹	۲۷۳۱۹۸	۶۱/۰	۱۳/۸	۶۱/۰	۱۳/۸	۱۳/۸	W_{ew}
۰	۰	۷۶/۰	۸/۴	۷۶/۰	۸/۴	۸/۴	W_k

*: بر حسب ریال در هکتار

*: بر حسب ریال در هکتار

نتیجه:

۱- با توجه به جداول (۵-۴) تا (۷-۴) برتری دور آبیاری ۷ روزه بر ۱۴ روزه به روشنی معلوم است.

۲- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت زمین (W_l)

$$W_l = \left[\frac{5000 - 225359 / 0.67}{2(225)(-0.25)} \right] = 33/52 \text{ cm}$$

۳- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت آب (W_w)

$$W_w = \left[\frac{225(669/4) - 70988}{(225)(-0.25)} \right]^{1/5} = 22/24 \text{ cm}$$

۴- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت زمین (W_{el})

$$Z_1 = b_2 = 5000$$

$$W_{el} = \left[\frac{5000 - 225359 / 0.67 + 5000}{2(225)(-0.25)} \right] = 31/3 \text{ cm}$$

۵- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب (W_{ew})

$$Z_2 = 56045/15$$

$$W_{ew} = 13/84 \text{ cm}$$

۶- عمق آب مصرفی در حالت سر به سر (W_k)

$$Z_3 = 56704/397$$

$$W_k = 8/44 \text{ cm}$$

با توجه به شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی محاسبه شده، جداول (۵-۴) و (۶-۴) تشکیل می‌شود که روند بهینه‌سازی در آنها نشان داده شده است.

۲- در دور آبیاری ۷ روز، ۲۸ درصد کاهش آب مصرفی جو نسبت به آبیاری کامل، اگر چه ۱۲/۹ درصد کاهش عملکرد را به دنبال دارد اما ۲۹/۲ درصد سود خالص بیشتری به ازای واحد آب مصرفی را دارا بوده و در حالت امکان افزایش سطح زیر کشت با آب صرفه جویی شده در مقایسه با آبیاری کامل، حداکثر سود خالص را به دنبال خواهد داشت.

۳- در دور آبیاری ۷ روز، کاهش ۶/۲ درصد آب مصرفی جو نسبت به آبیاری کامل، فقط ۰/۳ درصد کاهش عملکرد را به دنبال دارد و همچنین حداکثر سود خالص در واحد سطح را نیز دارد.

جدول ۷-۴ تحلیل شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی جو (۱۴ روز، کرج)

۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
	ریال در هکتار	ha	NB (ریال در هکتار)	cm	B/C	y (kg/ha)	w (cm)
W_k	-	-	۰	-	۱	۳۳۲۱	۷/۵
W_{cw}	۴۹۰۰۱۴	۱/۱۷	۲۲۵۸۱۳	۱۴	۱/۲۹	۴۴۲۳	۱۱/۹
W_w	۶۰۸۰۴۹	۰/۴۷۳	۴۱۲۸۰۶	۸/۳۱	۱/۵۲*	۵۳۸۰	۱۷/۶
W_{cl}	۵۵۱۸۰۲	۰/۱۲۷	۴۸۹۷۳۴	۲/۹۱	۱/۵۹	۵۸۴۲	۲۳
W_l	۵۲۲۷۷۱	۰/۰۵۹	۴۹۳۴۸۱	۱/۴۵	۱/۵۹	۵۸۹۱	۲۴/۴
W_m	۴۸۹۸۳۱	-	۴۸۹۷۱۵	-	۱/۵۸	۵۹۰۷	۲۵/۹

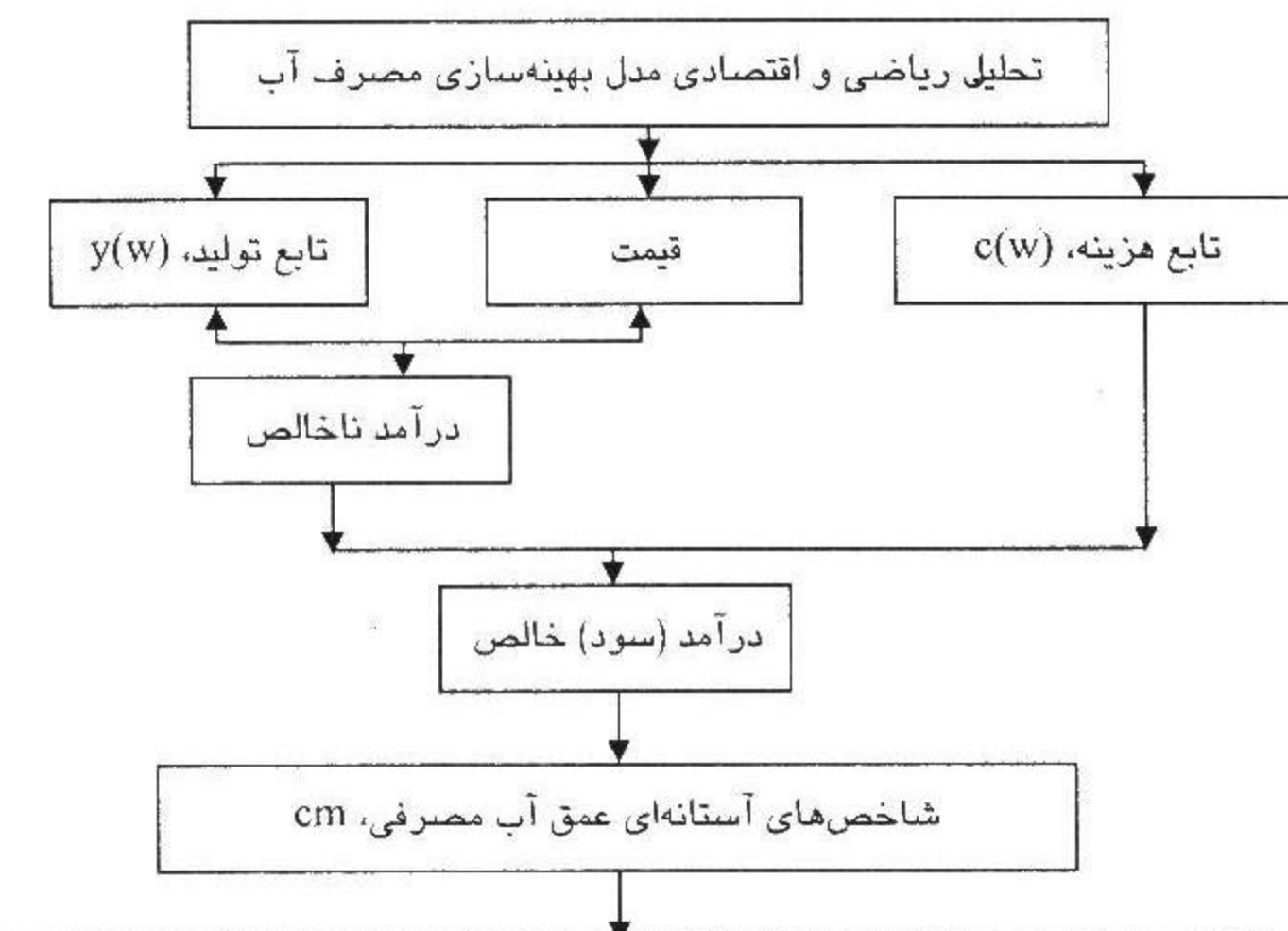
توضیحات: ستون‌های این جدول شبیه جدول (۱-۴) است.

جدول ۸-۴ بهینه‌سازی شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی جو (۱۴ روز، کرج)

درآمد (سود) خالص نسبت به: افزایش درآمد با بهینه‌سازی در حالت:						
شاخص‌های آستانه‌ای	آب مصرفی (cm)	میزان کاهش (%)	واحد سطح *	واحد آب مصرفی **	محدودیت زمین (%)	محدودیت آب (%)
W_m	۲۵/۹	۰	۴۸۹۷۱۵	۱۸۹۲۷		
W_l	۲۲/۴	۵/۶	۴۹۳۴۸۱	۲۰۱۹۹	۰/۷۷	
W_{cl}	۲۳	۱۱	۴۸۹۷۳۴	۲۱۳۲۳		
W_w	۱۷/۶	۳۲	۴۱۲۸۰۶	۲۳۴۹۵		۲۴
W_{cw}	۱۱/۹	۵۴	۲۲۵۸۱۳	۱۸۹۲۸		
W_k	۷/۵	۷۱	۰	۰		

*: بر حسب ریال در هکتار **: بر حسب ریال بر متر مکعب در هکتار

به طور خلاصه، نتیجه بهینه‌سازی عمق آب مصرفی گندم و جو (با دور آبیاری ۷ روز) در شکل (۱-۴) نشان داده شده است.



شاخص	گندم	جو
W_m عمق آب آبیاری کامل	۴۶/۳	۳۵/۷۳
W_l عمق بهینه آب مصرفی در حالت محدودیت زمین	۴۳/۲	۳۳/۵۲
W_w عمق بهینه آب مصرفی در حالت محدودیت آب	۲۵/۴	۲۲/۲۴
W_{cl} عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت زمین	۴۰/۱	۳۱/۱۰
W_{cw} عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب	۱۴/۱	۱۳/۸۴
W_k عمق آب مصرفی در حالت سر به سری	۸/۳	۸/۴۵

شکل ۱-۴ عمق‌های بهینه آب مصرفی (بر حسب سانتی‌متر) برای گندم و جو

۴-۲-۳ پنبه (گرگان)

طی تحقیقی که در مؤسسه تحقیقات پنبه کشور در گرگان صورت گرفته (سهرابی مشک‌آبادی، ۱۳۷۸)، عکس‌العمل پنبه نسبت به سطوح مختلف آب مصرفی بررسی

گردید. پس از مطالعه نتایج به دست آمده و تحلیل هزینه‌ها، پارامترهای اصلی به صورت زیر به دست آمد:

$$y(w) = 861/315 - 133/329w - 1/87896w^2 \quad (24-4)$$

$$c(w) = 2083800 + 30638/3w \quad (25-4)$$

$$P_C = 1378 \text{ ریال هر کیلوگرم، قیمت سال } 1378 \quad (26-4)$$

با توجه به نحوه تحلیل شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی (بخش ۴-۲-۱)، نتایج تحلیل در مورد گیاه پنبه در جداول (۴-۹) و (۴-۱۰) آمده است.

جدول ۴-۹ تحلیل شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی پنبه (گرگان)

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
w	y	B	C	NB	B/C	ریال در هکتار	ریال در هکتار بر متر مکعب
۶/۸	۱۶۸۱	۳۶۹۸۳۵۲	۲۲۹۲۱۴۰	۱۴۰۶۲۱۲	۱/۶۱۳	۲۰۶۷۹۶	W _w
۲۸/۱	۳۱۲۴	۶۸۷۲۸۰۰	۲۹۴۴۷۳۶	۳۹۲۸۰۶۴	۲/۳۳۴	۱۳۹۷۸۸	W _{el}
۳۱/۸	۳۲۰۱	۷۰۴۲۴۱۵	۳۰۵۸۰۹۸	۳۹۸۴۳۱۷	۲/۳۰۳	۱۲۵۲۹۲	W _l
۳۵/۴۸	۳۲۲۷	۷۰۹۹۴۰۰	۳۱۷۰۸۴۷	۳۹۲۸۵۵۳	۲/۲۳۹	۱۱۰۷۲۶	W _m
۶۲/۸	۱۸۲۴	۴۰۱۲۹۲۹	۴۰۰۷۸۸۵	۰	۱/۰۰۰	-	W _k

ستون‌های جدول عبارتند از: ۱- عمق آب مصرفی، ۲- عملکرد پنبه، ۳- درآمد ناخالص، ۴- هزینه تولید، ۵- سود خالص در واحد سطح، ۶- نسبت درآمد ناخالص به هزینه تولید، ۷- سود خالص به ازای واحد آب مصرفی و ۸- شاخص‌ها. ضمناً به دلیل عدم محدودیت آب، شاخص W_{ew} محاسبه نشده است.

جدول ۴-۸ بهینه‌سازی شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی پنبه (گرگان)

شاخص‌های آب مصرفی آستانه‌ای	میزان	درآمد (سود) خالص نسبت به:	واحد سطح *	واحد آب مصرفی **	محدودیت زمین	محدودیت آب
(cm)	کاهش (%)	افزایش درآمد با بهینه‌سازی در حالت:			(%)	(%)
W _m	۳۵/۴۸	-	۳۹۲۸۵۵۳	۱۱۰۷۲۶		
W _l	۳۱/۸۰	۱۰/۴	۳۹۸۴۳۱۷	۱۲۵۲۹۲	۱/۴	۱۳/۲
W _{el}	۲۸/۱۰	۲۰/۸	۳۹۲۸۰۶۴	۱۳۹۷۸۸		۲۶/۲
W _w	۶/۸۰	۸۰/۸	۱۴۰۶۲۱۲	۲۰۶۷۹۶		۸۷/۰

*: بر حسب ریال در هکتار **: بر حسب ریال بر متر مکعب در هکتار

نتیجه:

۱- به دلیل عدم محدودیت آب و فراوانی نسبی زمین، به کارگیری عمق آب مصرفی ۶/۸ سانتی‌متر و کمتر توصیه نمی‌شود.

۲- اگر هدف کسب حداکثر سود خالص به ازای واحد آب مصرفی است، به کارگیری عمق آب مصرفی ۲۸/۱ سانتی‌متر (کاهشی برابر با ۲۰/۸ درصد نسبت به آبیاری کامل ۳۵/۴۸ سانتی‌متر) توصیه می‌گردد، که در نتیجه ۲/۲ درصد کاهش عملکرد را به دنبال دارد.

۳- اگر هدف کسب حداکثر سود خالص باشد، عمق ۳۱/۸ سانتی‌متر توصیه می‌گردد، که با کاهش ۱۰/۴ درصد عمق آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل، فقط ۰/۸ درصد کاهش عملکرد پیدا کرده است.

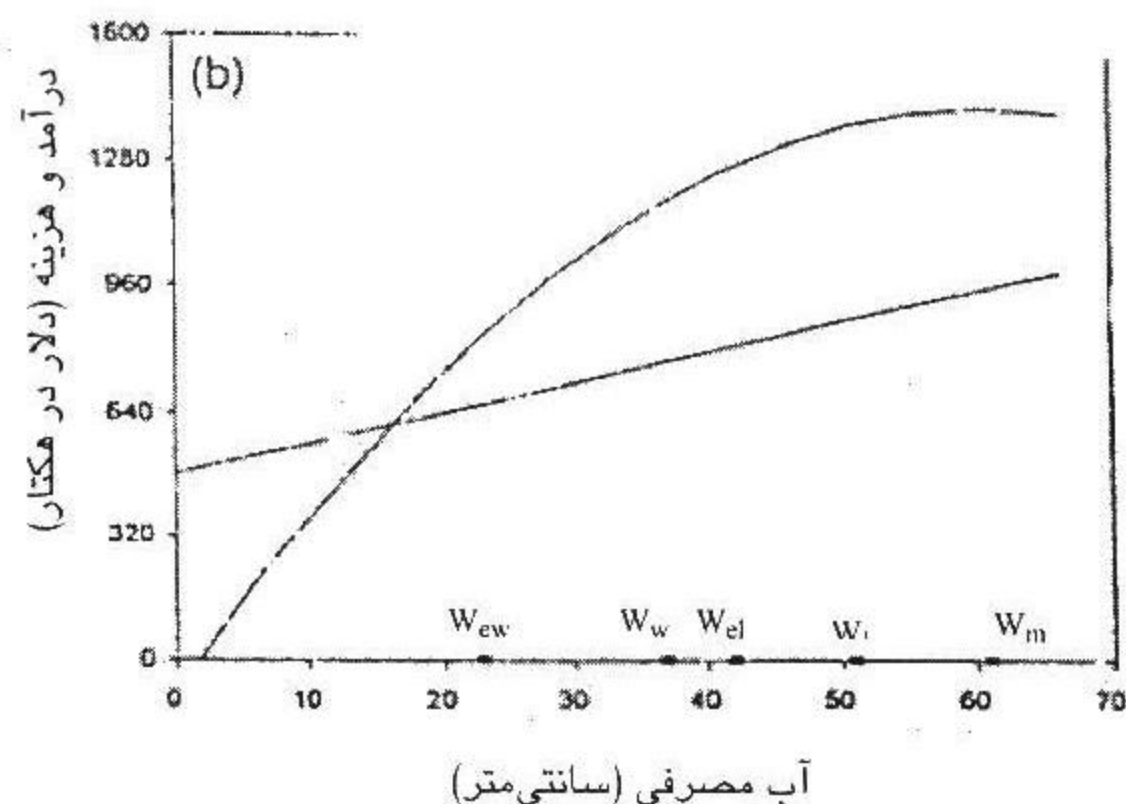
۴- در مجموع، کاربرد حدود ۳۰ سانتی‌متر (۳۰۰۰ متر مکعب در هکتار) توصیه مطلوب و بهینه‌ای به شمار می‌رود.

۴-۲-۴ بهینه‌سازی مصرف آب در زراعت گندم، حوزه کلمبیا

(English and Raja, 1996)

این مطالعه شامل آبیاری گندم زمستانه در یک سطح وسیع و مجموعه‌ای از مزارع در حوزه کلمبیا و مناطقی خشک در غرب اورگان (Oregon) در ایالات متحده آمریکا است. این مناطق با محدودیت منابع آب و فراوانی نسبی زمین مواجه هستند و زارعین می‌خواهند بدانند که با آب قابل دسترس و محدود و با صرفه‌جویی در مصرف آن (کم‌آبیاری)، چه میزان امکان افزایش سطح تحت آبیاری وجود دارد؟

برای به دست آوردن تابع تولید گندم، از نتایج آزمایش‌های صحرایی منطقه استفاده گردید. راهکارهای مختلف کم‌آبیاری صورت گرفت که عبارتند از: آبیاری با محدوده زمانی ۲ روز تا ۴ هفته و آبیاری با سطوح مختلف آب کاربردی در فاصله زمانی ۲ تا ۷ روز. نتایج این تحقیق در شکل‌های (۴-۲) و (۴-۳) نشان داده شده است. تابع تولید از نوع درجه دو بوده و بر اساس همین داده‌ها و رگرسیون خطی به دست آمد:



شکل ۳-۴ رابطه بین آب مصرفی با درآمدها و هزینه‌ها در حوزه کلمبیا (اورگان، آمریکا)

شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی به طریق زیر محاسبه و بهینه می‌گردد:

۱- عمق آبیاری کامل (W_m)

$$W_m = \left[\frac{-0.3326}{2(-0.00273)} \right] = 61 \text{ cm}$$

۲- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت زمین (W_l)

$$W_l = \left[\frac{7/79 - 147(-0.3326)}{2(147)(-0.00273)} \right] = 51 \text{ cm}$$

۳- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت آب (W_w)

$$W_w = \left[\frac{147(-0.5348) - 482/3}{147(-0.00273)} \right]^{1/2} = 37.4 \text{ cm}$$

۴- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت زمین (W_{el}):

$$Z_1 = b_2 = 7/79$$

$$y(w) = -0.5348 + 0.3326w - 0.00273w^2 \quad (37-4)$$

که در آن:

w = عمق آب مصرفی، سانتی‌متر $y(w)$ = تابع تولید، تن در هکتار

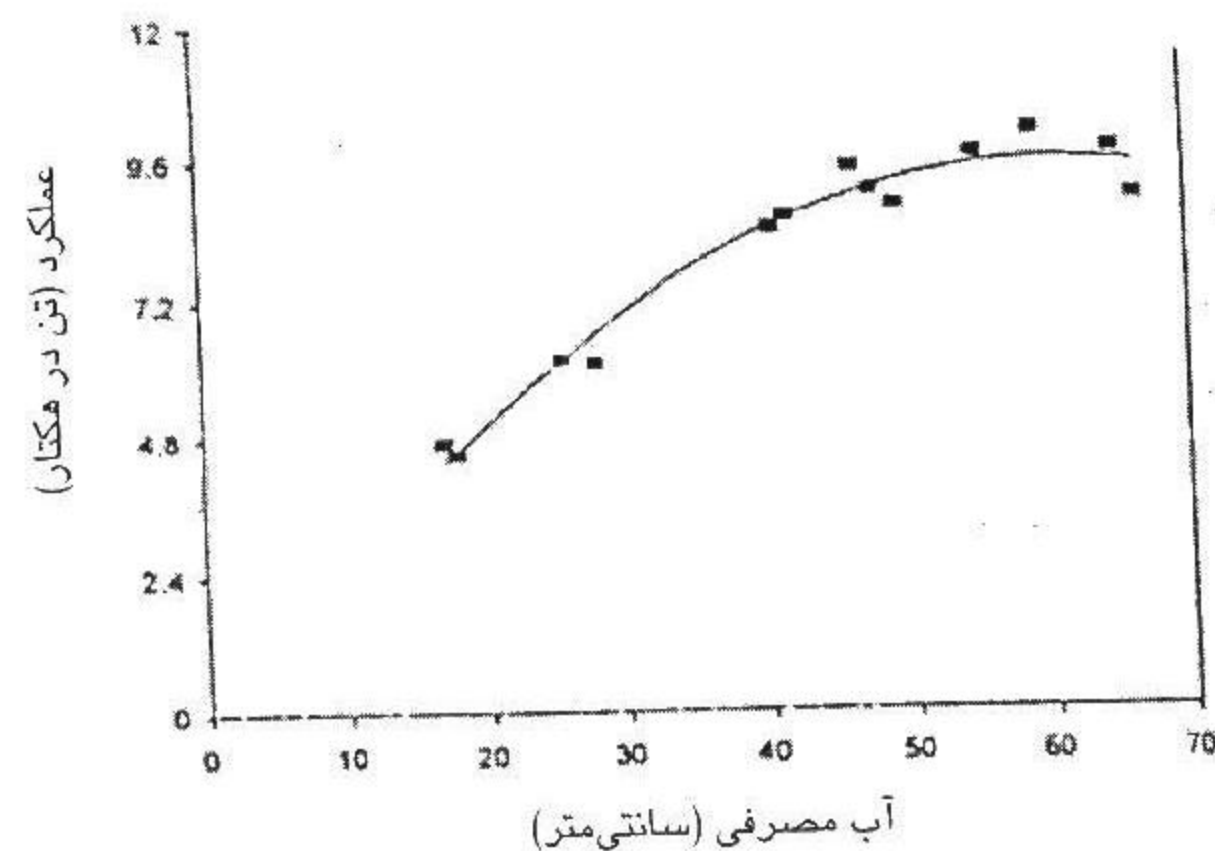
تابع هزینه نیز بر اساس تحلیل هزینه‌های آبیاری مزارع به دست آمد. روش محاسبه تابع هزینه در جدول (۱۱-۴) نشان داده شده است. فرم خطی تابع هزینه چنین است:

$$c(w) = 482/3 + 7/79w \quad (38-4)$$

که در آن:

w = عمق آب مصرفی، سانتی‌متر $c(w)$ = تابع هزینه، دلار در هکتار

قیمت گندم نیز ۱۴۷ دلار برای هر تن بوده است (\$۰/۱۴۷/kg).



شکل ۲-۴ رابطه بین آب مصرفی و عملکرد گندم در حوزه کلمبیا (اورگان، آمریکا)

$$W_{el} = \left[\frac{7/79 - 1470/3326 + 7/79}{2(147)(-100273)} \right] = 41/5 \text{ cm}$$

۵- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب (W_{ew})

$$Z_2 = 33/65$$

$$W_{ew} = 23 \text{ cm}$$

۶- عمق آب مصرفی در حالت سر به سری (W_k)

$$Z_3 = 28/1$$

$$W_k = \left[\frac{7/79 - 1470/3326 + 28/1}{2(147)(-100273)} \right] = 16/2 \text{ cm}$$

برای محاسبه تابع هزینه گندم زمستانه به روش زیر عمل می‌شود. اگر تابع هزینه به صورت $c(w)$ نوشته شود:

$$c(w) = a_1 + b_1 w \quad (39-4)$$

با توجه به لیست هزینه‌ها که در جدول (۱۱-۴) آمده، ضرایب a_2 و b_2 محاسبه می‌شود. کل هزینه‌های تولید برای هر هکتار، از مجموع هزینه‌های ثابت و متغیر به دست می‌آید.

در شرایط بدون آبیاری:

$$\text{دولار در هکتار} = 383/32 + 98/98 = 482/30 = \text{کل هزینه‌های تولید}$$

در شرایط آبیاری:

$$\text{دولار در هکتار} = 383/32 + 427/44 = 810/76 = \text{کل هزینه‌های تولید}$$

با توجه به تابع هزینه (معادله ۳۹-۴):

$$\text{دولار در هکتار} = 810/76 = c(w) = \text{کل هزینه‌های تولید در شرایط آبیاری}$$

$$\text{دولار در هکتار} = 482/30 = c(w) = \text{کل هزینه‌های تولید در شرایط بدون آبیاری}$$

$$\longrightarrow a_2 = 482/30$$

با قرار دادن مقدار a_2 در رابطه (۳۹-۴) و با در نظر گرفتن اینکه $w = 42/2$ سانتی‌متر می‌باشد:

$$810/76 = 482/30 + b_2(42/2) \quad (40-4)$$

بدین ترتیب ضریب زاویه خط هزینه (b_2) به دست می‌آید:

$$b_2 = 7/79$$

بر این اساس، تابع هزینه به صورت رابطه (۴۱-۴) نوشته می‌شود:

$$c(w) = 482/30 + 7/79 w \quad (41-4)$$

با مشخص شدن توابع تولید و هزینه و نیز قیمت فروش محصول، روند بهینه‌سازی عمق آب مصرفی در جداول (۱۲-۴) و (۱۳-۴) نشان داده شده است.

جدول ۱۱-۴ تحلیل هزینه‌های تولید گندم در شرایط آبیاری و دیم (اورگان، آمریکا)

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

جدول ۴-۱۲ تحلیل شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی گندم (اورگان، آمریکا)

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
w (cm)	y (ton/ha)	B/C	cm	NB (دلار در هکتار)	ha	دلار در هکتار	
۱۶/۲	۴/۱۰	۱/۰۰۰	-	۰	-	-	W_k
۲۳	۵/۶۶	۱/۵۹۰	۳۸/۰	۱۷۱/۰	۱/۶۵	۴۵۳/۲	W_{ew}
۴۱/۵	۸/۶۰	۱/۵۶۸	۱۹/۵	۴۵۸/۰	۰/۴۷	۶۷۳/۳	W_{cl}
۳۷/۴	۸/۱۰	۱/۵۸۳	۲۱/۶	۴۱۷/۰	۰/۶۳	۶۷۹/۷	W_w
۵۱/۲	۹/۳۴	۱/۵۵۸	۹/۸	۴۹۱/۸	۰/۱۹	۵۸۵/۲	W_l
۶۱	۹/۶۰	۱/۴۷۴	-	۴۵۳/۷	-	۴۵۳/۷	W_m

توضیحات ستون‌های این جدول شبیه جدول (۴-۱) است.

جدول ۴-۱۳ بهینه‌سازی شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی گندم (اورگان، آمریکا)

شاخص‌های آستانه‌ای	آب مصرفی (cm)	میزان کاهش (%)	واحد سطح *	واحد آب مصرفی **	محدودیت زمین (%)	محدودیت آب (%)	درآمد (سود) خالص نسبت به: افزایش درآمد با بهینه‌سازی در حالت:
W_m	۶۱/۰	-	۴۵۳/۷۰	۰/۰۷۴۵			
W_l	۵۱/۲	۱۶	۴۹۱/۵۱	۰/۰۹۶۴	۸/۳		
W_w	۳۷/۴	۳۹	۴۱۴/۸۱	۰/۱۱۱۰		۴۹	
W_{cl}	۴۱/۵	۳۱	۴۵۳/۷۰	۰/۱۰۸۰			
W_{ew}	۲۳/۰	۶۲	۱۷۰/۹۰	۰/۰۷۴۵			
W_k	۱۶/۲	۷۳	۰	۰			

*: بر حسب ریال در هکتار **: بر حسب ریال بر متر مکعب در هکتار

اگر چه آب در این حالت عامل محدود کننده است اما تحلیل برای هر دو حالت محدودیت آب و محدودیت زمین صورت پذیرفته است. برای حالت محدودیت منابع آب، حداکثر درآمد خالص مزرعه نسبت به واحد آب مصرفی با کاهش آب مصرفی از W_m به W_w به دست می‌آید، یعنی با کاربرد ۲۷ سانتی‌متر عمق آب مصرفی و یا در

واقع ۳۹ درصد کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل. از نقطه نظر دیگر، سود خالص به ازای واحد آب مصرفی از ۰/۰۷۴۵ دلار بر متر مکعب (آبیاری کامل) به ۰/۱۱۱ دلار بر متر مکعب افزایش می‌یابد، که افزایشی معادل ۴۹ درصد را نشان می‌دهد. همچنین این عمق آب مصرفی، حداکثر سود خالص در واحد سطح با امکان افزایش سطح زیر کشت را نیز به همراه دارد. پایین‌ترین حد سودمندی کم آبیاری در حالت کاهش ۶۲ درصد آب مصرفی است و در حالت ۷۳ درصد کاهش آب مصرفی، میزان درآمدها با هزینه‌ها برابر می‌شود.

۴-۲-۵ بهینه‌سازی مصرف آب در زراعت پنبه، کالیفرنیا (English and Raja, 1996)
این تحقیق در مزارع یکپارچه‌ای در دره سن‌یواکین (San Joaquin) که از دره‌های مرکزی خشک کالیفرنیا است، صورت گرفت. در این منطقه آب موجود محدود است و امکان اضافه کردن سطوح کشت در صورت وجود آب بیشتر نیز وجود ندارد. این حالت بیانگر محدودیت زمین است. هدف این است که با کاهش هزینه‌های مربوط به وضعیت آبیاری، عمق بهینه آب مصرفی تعیین گردد. تابع درجه دوم تولید با استفاده از داده‌های آزمایشی یک ایستگاه تحقیقاتی وابسته به دانشگاه کالیفرنیا به دست آمد:

$$y(w) = -871/1 + 29/85 w - 0/091 w^2 \quad (42-4)$$

که در آن آب مصرفی (w) بر حسب سانتی‌متر و تابع تولید y(w) بر حسب کیلوگرم در هکتار است. تابع هزینه توسط یک شرکت اقتصادی و با ملحوظ داشتن سه گونه از هزینه‌ها به دست آمد. این سه بخش هزینه شامل (۱) هزینه‌های ثابت که مستقل از میزان تولید است، (۲) هزینه‌های متغیر جزئی که مربوط به بخشی از تولید می‌شود و (۳) هزینه‌های آب و آبیاری است.

با توجه به روند فوق، تابع هزینه چنین به دست می‌آید:

$$c(w) = 770 + 7/3 w \quad (43-4)$$

که در آن آب مصرفی (w) بر حسب سانتی‌متر و تابع هزینه c(w) بر حسب دلار در هکتار است. ضمناً قیمت محصول پنبه، ۱/۵۹ دلار برای هر کیلوگرم بوده است.

شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی به طریق زیر محاسبه و بهینه می‌گردد:

۱- عمق آبیاری کامل (W_m)

$$W_m = \left[\frac{-29/85}{2(-0.91)} \right] = 164 \text{ cm}$$

۲- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت زمین (W_l)

$$W_l = \left[\frac{7/3 - 1/59(29/85)}{2(1/59)(-0.91)} \right] = 139 \text{ cm}$$

۳- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت آب (W_w)

$$W_w = \left[\frac{1/59(-7811) - 77.0}{(1/59)(-0.91)} \right]^{0.5} = 118 \text{ cm}$$

۴- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت زمین (W_{cl})

$$Z_1 = b_2 = 7/3$$

$$W_{cl} = \left[\frac{7/3 - 1/59(29/85) + 7/3}{2(1/59)(-0.91)} \right] = 114 \text{ cm}$$

۵- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب (W_{ew})

$$Z_2 = 36$$

$$W_{ew} = 85 \text{ cm}$$

۶- عمق آب مصرفی در حالت سر به سری (W_k)

$$Z_3 = 21/18$$

$$W_k = \left[\frac{7/3 - 1/59(29/85) + 21/18}{2(1/59)(-0.91)} \right] = 66 \text{ cm}$$

روند تحلیل هزینه‌ها، شاخص‌های آستانه‌ای و بهینه‌سازی عمق آب مصرفی در جداول (۱۴-۴) تا (۱۶-۴) نشان داده شده است که از جنبه‌های مختلف قابل ارزیابی است.

جدول ۴-۱۴ تحلیل هزینه‌های تولید پنبه (کالیفرنیا)

هزینه‌ها	دلار در هکتار
۱- هزینه‌های ثابت شامل تهیه و تدارک زمین، شخم، کاشت و غیره	۵۲۹/۴۲
۲- هزینه‌های متغیر	
(فرض شده است که ۵۰ درصد هزینه‌های زیر قابل تغییر است)	
- کود	۸۶/۴۸
- هزینه‌های برگ چینی	۴۲/۰
- برداشت	۲۵۴/۵۱
- جدا کردن غوزه‌ها بعد از برداشت	۲۴/۷۱
- آبیاری (۱۰۰ سانتی‌متر)	۷۴/۱۳
۳- هزینه‌های آب (۱۰۰ سانتی‌متر)	۴۸۹/۳۴
۴- کل هزینه‌های ثابت	^a ۷۷۰/۳۴
۵- کل هزینه‌های متغیر (با کاربرد ۱۰۰ سانتی‌متر آب)	^b ۷۳۰/۲۶
$C(W) = 770 + 7/3 W$ تابع هزینه	
$C(W)$: تابع هزینه، دلار در هکتار W : عمق آب مصرفی، سانتی‌متر	
a:	$(86/48 + 42 + 254/51 + 24/71 + 74/13)(50/100) + 529/42 = 770/34$
b:	$(86/48 + 42 + 254/51 + 24/71 + 74/13)(50/100) + 489/34 = 730/26$

جدول ۴-۱۵ تحلیل شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی پنبه (کالیفرنیا)

	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
	w	y	B/C	cm	NB	ha	دلار در هکتار	
	(cm)	(kg/ha)			(دلار در هکتار)			
W_k	۶۶	۷۸۵/۴	۱/۰۰۰	-	۰	-	-	
W_{ew}	۸۵	۱۰۹۵/۱	۱/۲۵۳	۷۹	۳۵۲/۴۷	۰/۹۲۹	۶۷۹/۹	
W_{cl}	۱۱۴	۱۴۳۵/۰	۱/۴۲۷	۵۰	۶۸۲/۸۱	۰/۴۳۹	۹۸۲/۶	
W_w	۱۱۸	۱۴۷۳/۳	۱/۴۳۶	۴۶	۷۱۱/۸۴	۰/۳۹۰	۹۸۹/۵	
W_l	۱۳۹	۱۶۰۸/۹	۱/۴۳۵	۲۵	۷۷۴/۹۵	۰/۱۸۰	۹۱۴/۴	
W_m	۱۶۴	۱۶۶۶/۸	۱/۳۴۷	-	۶۸۲/۸۰	-	۶۸۲/۸	

توضیحات ستون‌های این جدول شبیه جدول (۴-۱) است.

جدول ۴-۱۶ بهینه سازی شاخص های آستانه ای عمق آب مصرفی پنبه (کالیفرنیا)

شاخص های آستانه ای	آب مصرفی (cm)	میزان کاهش (%)	درآمد (سود) خالص نسبت به: افزایش درآمد با بهینه سازی در حالت:		محدودیت زمین (%)	محدودیت آب (%)
			واحد سطح *	واحد آب مصرفی **		
W_m	۱۶۴	-	۶۸۲/۸۷	۰/۰۴۱۶	۱۳/۵	۴۴/۱
W_l	۱۳۹	۱۵	۷۷۴/۹۶	۰/۰۵۵۸		
W_{cl}	۱۱۴	۳۰	۶۸۲/۸۷	۰/۰۵۹۹		
W_w	۱۱۸	۲۸	۷۱۱/۹۷	۰/۰۶۰۳		
W_{ew}	۸۵	۴۸	۳۵۳	۰/۰۴۱۵		
W_k	۶۶	۶۰	۰	۰		

*: بر حسب ریال در هکتار **: بر حسب ریال بر متر مکعب در هکتار

حداکثر عملکرد با عمق آب مصرفی آبیاری کامل (W_m) یعنی ۱۶۴ سانتی متر اتفاق می افتد. میزان بهینه آب مصرفی در حالت درآمد خالص نسبت به واحد سطح، برای حالت محدودیت زمین (W_l)، برابر با مصرف ۱۳۹ سانتی متر آب یا کاهشی برابر با ۱۵ درصد نسبت به آبیاری کامل است. میزان کاهش آب مصرفی که سودی معادل با آبیاری کامل می دهد (W_{cl}) برابر ۱۱۴ سانتی متر (یا ۳۰ درصد کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل) می باشد.

۴-۲-۶ تابع هزینه ذرت، زیمبابوه (English, and Raja, 1996)

طی تحقیقی که در زیمبابوه روی محصول ذرت صورت گرفت، به بهینه سازی مصرف آب پرداخته شد. برای محاسبه تابع هزینه، هزینه ها به دو بخش هزینه های بدون آبیاری (عملکرد ۲/۸ تن در هکتار) و نیز هزینه های تولید در حالت آبیاری (عملکرد ۵/۸ تن در هکتار) تقسیم شده و طی روند جدول (۴-۱۷) تابع هزینه به صورت زیر به دست آمد:

$$c(w) = 730 + 1/58 w \quad (4-4)$$

اگر چه برای این تحقیق، روند بهینه سازی نشان داده نشده است، اما جدول (۴-۱۸) بیانگر خلاصه نتایج به دست آمده می باشد. در این شرایط، در حالت آبیاری کامل با مصرف ۵۲۵۰ متر مکعب (۵۲/۵ سانتی متر عمق آب مصرفی)، عملکرد برابر ۶

تن در هکتار قابل حصول است. اما با اعمال کم آبیاری به میزان ۵۹ درصد، اگر چه عملکرد در واحد سطح به میزان ۳۱ درصد کاهش می یابد (۴/۱۳ تن در هکتار)، اما با آب صرفه جویی شده می توان سطح زیر کشت را از ۱ هکتار به ۲/۴۴ هکتار افزایش داد. در نتیجه، تولید از ۶ تن به ۱۰/۱ تن (افزایشی برابر ۶۸ درصد) می رسد. همان طور که ملاحظه می شود، این روند آبیاری بیشتر به مفهوم آبیاری تکمیلی نزدیکتر است که می تواند بسیار مفید و مؤثر واقع شود.

جدول ۴-۱۷ تعیین هزینه های تولید ذرت (زیمبابوه)

هزینه ها	دلار در هکتار
۱- هزینه های متغیر: بدون آبیاری (۲/۸ تن در هکتار)	
- تهیه و تدارک زمین، کاشت	۵۵
- کود	۲۴۵
- آفت کش	۲
- کارگر	۳۳۰
- حمل و نقل	۵۲
کل هزینه های متغیر در حالت بدون آبیاری	۶۸۴
- سرمایه، برابر ۱۳ درصد کل هزینه های متغیر بجز نیروی کارگر	۴۶
جمع	۷۳۰
۲- هزینه های متغیر: با آبیاری (۵/۸ تن در هکتار)	
- تهیه و تدارک زمین، کاشت	۱۶۵
- کود	۶۱۰
- آفت کش	۱۲۰
- کارگر	۵۰۰
- حمل و نقل	۱۲۰
- آبیاری (به میزان ۶۰۰ میلی متر)	۳۰
کل هزینه های متغیر در حالت بدون آبیاری	۱۵۴۵
- سرمایه، برابر ۱۳ درصد کل هزینه های متغیر بجز نیروی کارگر	۱۳۵
جمع	۱۶۸۰
$c(w) = 730 + 1/58 w$ تابع هزینه	
$c(w)$: تابع هزینه، دلار در هکتار	w : عمق آب مصرفی، میلی متر
a:	$(648 - 330) (13/100) = 46$
b:	$(1545 - 500) (13/100) = 135$

فصل ۵

دومین شکل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی

۵-۱ کلیات

دومین شکل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی برای حالتی است که توابع تولید و هزینه به صورت منحنی درجه دو و قیمت محصول ثابت (بر اساس نرخ تضمینی یا نرخ بازار) باشد. شکل عمومی این روابط به صورت زیر است:

$$y(w) = a_1 + b_1 w + c_1 w^2 \quad (۱-۵)$$

$$c(w) = a_2 + b_2 w + c_2 w^2 \quad (۲-۵)$$

$$P_C = \text{قیمت محصول (ثابت)} \quad (۳-۵)$$

۵-۲ محاسبه شاخص‌ها

براساس توابع تولید و هزینه و قیمت فروش محصول، شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی به دست می‌آید. نحوه محاسبه آنها و روابط مربوطه به صورت زیر است:

۱- عمق آبیاری کامل (W_m)، که با مشتق‌گیری از تابع تولید بر حسب عمق آب مصرفی (w) و مساوی صفر قرار دادن آن، به دست می‌آید. عمق آب آبیاری کامل مستقل از قیمت محصول و ضرایب تابع هزینه می‌باشد:

$$\frac{\partial y(w)}{\partial w} = 0 \longrightarrow b_1 + 2c_1 w = 0 \longrightarrow W_m = -\frac{b_1}{2c_1} \quad (۴-۵)$$

۲- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت زمین (W_l)

$$P_C \frac{\partial y(w)}{\partial w} = \frac{\partial c(w)}{\partial w} \quad (۵-۵)$$

و

جدول ۴-۱۸ سطوح بهینه آب مصرفی ذرت (زیمبابوه)

راهکار آبیاری	آب مصرفی (cm)	عملکرد (تن در هکتار)	سطح تحت آبیاری (ha)	کل عملکرد (تولید) (تن)
W_m	۵۲/۵	۶/۰۰	۱/۰۰	۶/۰
W_w	۲۱/۵	۴/۱۳	۲/۴۴	۱۰/۱
(۵۹ درصد کاهش) (۳۱ درصد کاهش) (۶۸ درصد افزایش)				

$$P_C(b_1 + 2c_1 w) = b_1 + 2c_1 w \quad (6-5)$$

پس از ساده و مرتب کردن معادله:

$$W_1 = \frac{b_2 - b_1 P_C}{2(c_1 P_C - c_2)} \quad (7-5)$$

۳- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت آب (W_w)

$$w \left[P_C \frac{\partial y(w)}{\partial w} - \frac{\partial c(w)}{\partial w} \right] = P_C y(w) - c(w) \quad (8-5)$$

و

$$w[b_1 P_C + 2c_1 P_C w - b_2 - 2c_2 w] = P_C(a_1 + b_1 w + c_1 w^2) - (a_2 + b_2 w + c_2 w^2) \quad (9-5)$$

پس از ساده کردن:

$$c_1 P_C w^2 - c_2 w^2 = a_1 P_C - a_2 \quad (10-5)$$

و در نتیجه:

$$W_w = \left[\frac{a_1 P_C - a_2}{c_1 P_C - c_2} \right]^{0.5} \quad (11-5)$$

۴- عمق معادل آبیارى کامل در حالت محدودیت زمین (W_{el})

$$P_C y(W_{el}) - c(W_{el}) = P_C y(W_m) - c(W_m) \quad (12-5)$$

$$P_C \left[a_1 + b_1 W_{el} + c_1 W_{el}^2 \right] - [a_2 + b_2 W_{el} + c_2 W_{el}^2] =$$

$$P_C \left[a_1 + b_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) + c_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)^2 \right] - \left[a_2 + b_2 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) + c_2 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)^2 \right] \quad (13-5)$$

پس از ساده کردن:

(۱۴-۵)

$$(c_1 P_C - c_2) W_{el}^2 + (b_1 P_C - b_2) W_{el} + \left[\frac{b_1^2 P_C}{4c_1} + \frac{c_2 b_1^2}{4c_1^2} - \frac{b_1 b_2}{2c_1} \right] = 0$$

که یک معادله درجه دو بوده و به سادگی حل می‌شود:

$$W_{el} = \frac{(b_2 - b_1 P_C) \pm Z_1}{2(c_1 P_C - c_2)} \quad (15-5)$$

که در آن:

$$Z_1 = \left[(b_1 P_C - b_2)^2 - 4(c_1 P_C - c_2) \left(\frac{b_1^2 P_C}{4c_1} + \frac{c_2 b_1^2}{4c_1^2} - \frac{b_1 b_2}{2c_1} \right) \right]^{0.5} \quad (16-5)$$

همان‌طور که قبلاً متذکر گردید، باید توجه داشت که مقادیر W_1 , W_w , W_{el} و W_{ew} بین دو مقدار W_m (عمق آبیارى کامل) و W_k (عمق از آب آبیارى که در آن سود خالص صفر است) قرار داشته باشند و در صورتی که معادلات به دست آمده منتج به دو یا سه جواب شوند، تنها آن جوابی (یک جواب) که مقدار آن بین W_m و W_k قرار دارد قابل قبول و بقیه غیر قابل قبول هستند.

۵- عمق معادل آبیارى کامل در حالت محدودیت آب (W_{ew})

$$\frac{P_C y(W_{ew}) - c(W_{ew})}{W_{ew}} = \frac{P_C y(W_m) - c(W_m)}{W_m} \quad (17-5)$$

$$\frac{P_C [a_1 + b_1 W_{ew} + c_1 W_{ew}^2] - [a_2 + b_2 W_{ew} + c_2 W_{ew}^2]}{W_{ew}} = \quad (18-5)$$

$$\frac{P_C \left[a_1 + b_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) + c_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)^2 \right] - \left[a_2 + b_2 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) + c_2 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)^2 \right]}{\left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)} =$$

$$P_C a_1 + b_1 P_C W_{ew} + c_1 P_C W_{ew}^2 - a_2 - b_2 W_{ew} - c_2 W_{ew}^2 = \quad (19-5)$$

$$\left[-\frac{2a_1 c_1 P_C}{b_1} + \frac{b_1 P_C}{2} + \frac{2a_2 c_1}{b_1} - b_2 + \frac{c_2 b_1}{2c_1} \right] W_{ew}$$

فصل ۶

سومین شکل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی

۱-۶ کلیات

سومین شکل بهینه‌سازی شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی، برای حالتی است که توابع تولید و هزینه به صورت منحنی (درجه دو) و قیمت محصول نیز تابعی از کیفیت (یا هر شاخص کیفی دیگر) باشد. شکل عمومی این روابط به صورت زیر است:

$$y(w) = a_1 + b_1 w + c_1 w^2 \quad (۱-۶)$$

$$c(w) = a_2 + b_2 w + c_2 w^2 \quad (۲-۶)$$

با توجه به اینکه قیمت برخی محصولات، از جمله چغندر قند، بر اساس کیفیت آنها (مثلاً عیار قند) تعیین می‌شود که دارای قیمت عیار پایه (۱۶ درصد) هستند، لذا قیمت چغندر قند به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$P_C = P_{C16} \left(\frac{Pol - 3}{13} \right) \quad (۳-۶)$$

که در آن Pol عیار قند بر حسب درصد، ۳ و ۱۳ به ترتیب میانگین درصد ضایعات و میانگین عیار قند در سنوات گذشته و P_{C16} قیمت واحد چغندر قند با عیار پایه ۱۶ درصد (قیمت تضمینی ثابت) می‌باشند. با توجه به اینکه عیار قند با میزان آب مصرفی رابطه معکوس دارد (با کاهش آب مصرفی، عیار قند چغندر قند افزایش می‌یابد)، لذا از رابطه خطی «عیار قند - آب مصرفی»، «قیمت چغندر - آب مصرفی» به دست می‌آید:

$$P_C = (a_3 + b_3 w) P_{C16} \quad (۴-۶)$$

$$(c_1 P_C - c_2) W_{ev}^* + \left[\frac{2a_1 c_1 P_C}{b_1} + \frac{b_1 P_C}{2} - \frac{2a_2 c_2}{b_1} - \frac{c_2 b_1}{2c_1} \right] W_{ev} + a_1 P_C = 0 \quad (۲۰-۵)$$

که یک معادله درجه دو بوده و به سادگی قابل حل می‌باشد:

$$W_{ev} = \frac{- \left[\frac{b_1 P_C}{2} + \frac{2a_1 c_1 P_C}{b_1} - \frac{2a_2 c_2}{b_1} - \frac{c_2 b_1}{2c_1} \right] \pm Z_1}{2(c_1 P_C - c_2)} \quad (۲۱-۵)$$

که در آن:

$$Z_2 = \left\{ \left[\frac{b_1 P_C}{2} + \frac{2a_1 c_1 P_C}{b_1} - \frac{2a_2 c_2}{b_1} - \frac{c_2 b_1}{2c_1} \right]^2 - 4(c_1 P_C - c_2)(a_1 P_C) \right\}^{0.5} \quad (۲۲-۵)$$

۶- عمق آب مصرفی در حالت سر به سری (W_k)

$$P_C y(W_k) = c(W_k) \quad (۲۳-۵)$$

$$P_C [a_1 + b_1 W_k + c_1 W_k^2] = a_2 + b_2 W_k + c_2 W_k^2 \quad (۲۴-۵)$$

$$(c_1 P_C - c_2) W_k^* + (b_1 P_C - b_2) W_{ev} + (a_1 P_C - a_2) = 0 \quad (۲۵-۵)$$

که یک معادله درجه دو بوده و به سادگی حل می‌شود:

$$W_k = \frac{(b_2 - b_1 P_C) \pm Z_3}{2(c_1 P_C - c_2)} \quad (۲۶-۵)$$

که در آن:

$$Z_3 = \left[(b_1 P_C - b_2)^2 - 4(c_1 P_C - c_2)(a_1 P_C - a_2) \right]^{0.5} \quad (۲۷-۵)$$

پس از مرتب کردن معادله:

$$b_r c_1 P_{C16} W_w^* + (a_r c_1 P_{C16} - c_r) W_w^* - b_r a_1 P_{C16} W_w + (a_r - a_r a_1 P_{C16}) = 0 \quad (۱۳-۶)$$

که با فرض:

$$P_1 = b_3 c_1 P_{C16} \quad (۱۴-۶)$$

$$P_r = a_r c_1 P_{C16} - c_r \quad (۱۵-۶)$$

$$P_3 = -b_3 a_1 P_{C16} \quad (۱۶-۶)$$

$$P_4 = a_2 - a_3 a_1 P_{C16} \quad (۱۷-۶)$$

در نتیجه:

$$P_1 W_w^* + P_r W_w^* + P_3 W_w + P_4 = 0 \quad (۱۸-۶)$$

مجدداً تأکید می‌شود که در این شرایط (مثلاً معادله ۱۸-۶)، که طبق منطق ریاضی دارای سه جواب (موهومی یا حقیقی) است، تنها آن جوابی (یک جواب) که مقدار آن بین W_m و W_k قرار دارد قابل قبول بوده و بقیه غیر قابل قبول هستند.

۴- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت زمین (W_{el})

$$P_{C(W_{el})} y(W_{el}) - c(W_{el}) = P_{C(W_m)} y(W_m) - c(W_m) \quad (۱۹-۶)$$

$$(a_3 + b_3 W_{el}) P_{C16} [a_1 + b_1 W_{el} + c_1 W_{el}^2] - [a_2 + b_2 W_{el} + c_2 W_{el}^2] = \quad (۲۰-۶)$$

$$\left[a_3 + b_3 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) \right] P_{C16} \left[a_1 + b_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) + c_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)^2 \right] - \left[a_2 + b_2 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) + c_2 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)^2 \right]$$

پس از ساده کردن، W_{el} از معادله زیر به دست می‌آید:

$$K_1 W_{el}^* + K_r W_{el}^* + K_3 W_{el} + K_4 = 0 \quad (۲۱-۶)$$

بر اساس توابع تولید و هزینه و قیمت فروش محصول (P_C)، شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی به دست می‌آید. نحوه محاسبه و روابط مربوطه به صورت زیر است:

۱- عمق آبیاری کامل (W_m)

$$W_m = -\frac{b_1}{2c_1} \quad (۵-۶)$$

۲- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت زمین (W_l)

$$P_C \frac{\partial y(w)}{\partial w} = \frac{\partial c(w)}{\partial w} \quad (۶-۶)$$

و

$$(a_3 + b_3 w) P_{C16} (b_1 + 2c_1 w) = b_2 + 2c_2 w \quad (۷-۶)$$

پس از مرتب کردن:

$$2b_r c_1 P_{C16} w^* + (2a_r c_1 P_{C16} + b_1 b_r P_{C16} - 2c_r) w + (a_r b_1 P_{C16} - b_r) = 0 \quad (۸-۶)$$

که یک معادله درجه دو بوده و به سادگی قابل حل می‌باشد:

$$W_l = \frac{-(2a_3 c_1 P_{C16} + b_1 b_3 P_{C16} - 2c_2) \pm Z_1}{4b_3 c_1 P_{C16}} \quad (۹-۶)$$

که در آن:

$$Z_1 = [(2a_3 c_1 P_{C16} + b_1 b_3 P_{C16} - 2c_2)^2 - 8b_3 c_1 P_{C16} (a_3 b_1 P_{C16} - b_2)]^{0.5} \quad (۱۰-۶)$$

۳- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت آب (W_w)

$$w \left[P_C \frac{\partial y(w)}{\partial w} - \frac{\partial c(w)}{\partial w} \right] = P_C y(w) - c(w) \quad (۱۱-۶)$$

$$w[(a_r + b_r w) P_{C16} (b_1 + 2c_1 w) - (b_r - 2c_r w)] =$$

$$(a_r + b_r w) P_{C16} (a_1 + b_1 w + c_1 w^*) - (a_r + b_r w + c_r w^*) \quad (۱۲-۶)$$

که در آن:

$$K_1 = b_3 c_1 P_{C16} \quad (22-6)$$

$$K_2 = a_3 c_1 P_{C16} + b_1 b_3 P_{C16} - c_2 \quad (23-6)$$

$$K_3 = a_3 b_1 P_{C16} + b_3 a_1 P_{C16} - b_2 \quad (24-6)$$

$$K_4 = \left[\frac{a_3 b_1}{4c_1} + \frac{b_3 b_1 a_1}{2c_1} - \frac{b_3 b_1^2}{8c_1^2} \right] P_{C16} + \frac{b_1^2 c_2}{4c_1^2} - \frac{b_1 b_2}{2c_1} \quad (25-6)$$

 ۵- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب (W_{ew})

$$\frac{P_{C(W_{ew})} y(W_{ew}) - c(W_{ew})}{W_{ew}} = \frac{P_{C(W_m)} y(W_m) - c(W_m)}{W_m} \quad (26-6)$$

$$\frac{(a_3 + b_3 W_{ew}) P_{C16} [a_1 + b_1 W_{ew} + c_1 W_{ew}^2] - a_2 - b_2 W_{ew} - c_2 W_{ew}^2}{W_{ew}} = \quad (27-6)$$

$$\frac{\left[a_3 + b_3 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) \right] P_{C16} \left[a_1 + b_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) + c_1 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)^2 \right] - \left[a_2 + b_2 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right) + c_2 \left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)^2 \right]}{\left(\frac{-b_1}{2c_1} \right)}$$

پس از مرتب کردن:

$$S_1 W_{ew}^2 + S_2 W_{ew} + S_3 = 0 \quad (28-6)$$

که در آن:

$$S_1 = b_3 c_1 P_{C16} \quad (29-6)$$

$$S_2 = a_3 c_1 P_{C16} + b_1 b_3 P_{C16} - c_2 \quad (30-6)$$

$$S_3 = \left[\frac{a_3 b_1}{2} + \frac{2a_3 a_1 c_1}{b_1} + \frac{b_3 b_1^2}{4c_1} \right] P_{C16} - \frac{2a_2 c_1}{b_1} - \frac{b_1 c_2}{2c_1} \quad (31-6)$$

$$S_4 = a_3 a_1 P_{C16} - a_2 \quad (32-6)$$

 ۶- عمق آب مصرفی در حالت سر به سر (W_k)

$$P_C y(W_k) = c(W_k) \quad (33-6)$$

و

$$[a_3 + b_3 W_k] P_{C16} [a_1 + b_1 W_k + c_1 W_k^2] = a_2 + b_2 W_k + c_2 W_k^2 \quad (34-6)$$

 در نتیجه، W_k از رابطه زیر حاصل می‌شود که در آن:

$$Q_1 W_k^2 + Q_2 W_k + Q_3 = 0 \quad (35-6)$$

$$Q_1 = b_3 c_1 P_{C16} \quad (36-6)$$

$$Q_2 = a_3 c_1 P_{C16} + b_1 b_3 P_{C16} - c_2 \quad (37-6)$$

$$Q_3 = a_3 b_1 P_{C16} + b_3 a_1 P_{C16} - b_2 \quad (38-6)$$

$$Q_4 = a_3 a_1 P_{C16} - a_2 \quad (39-6)$$

۶-۲ بهینه‌سازی آب مصرفی چغندر قند (کرج)

طی تحقیقی که در سال ۱۳۷۵ روی چغندر قند با سطوح مختلف آب مصرفی انجام شد (توکلی، ۱۳۷۵)، بر اساس داده‌های «آب مصرفی - عملکرد» و هزینه‌های تولید و آبیاری، توابع تولید و هزینه به صورت زیر به دست آمد:

$$y(W) = -24566/43 + 952/55W - 2/71W^2 \quad (40-6)$$

$$c(W) = 2375211 + 22528W - 48/28W^2 \quad (41-6)$$

$$P_C = (1/23 - 0/00166W) P_{C16} \quad (42-6)$$

۴- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت زمین (W_{el}).
با توجه به رابطه (۶-۲۱):

$$K_1 W_{el}^3 + K_2 W_{el}^2 + K_3 W_{el} + K_4 = 0$$

ضرایب K_1, K_2, K_3 و K_4 عبارتند از:

$$K_1 = 0.04003$$

$$K_2 = -0.4161156$$

$$K_3 = 122962/0.129$$

$$K_4 = -78140.16/13$$

بنابراین:

$$W_{el} = 115/76 \text{ cm}$$

۵- عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب (W_{ew}).
با توجه به معادله (۶-۲۸):

$$S_1 W_{ew}^3 + S_2 W_{ew}^2 + S_3 W_{ew} + S_4 = 0$$

ضرایب S_1, S_2, S_3 و S_4 برابرند با:

$$S_1 = 0.04003$$

$$S_2 = -0.4161156$$

$$S_3 = 112643/39$$

$$S_4 = -60.1216/0.68$$

بنابراین:

$$W_{ew} = 85/25 \text{ cm}$$

۶- عمق آب مصرفی در حالت سر به سری (W_k) که درآمد با هزینه‌ها برابر است.
با توجه به معادله (۶-۳۵):

$$Q_1 W_k^3 + Q_2 W_k^2 + Q_3 W_k + Q_4 = 0$$

قیمت سال ۱۳۷۵ ریال هر کیلوگرم ۱۲۰ $P_{C16} =$

با توجه به ضرایب $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3$ و b_3 و روابط موجود، شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی چنین محاسبه می‌شود:

۱- عمق آبیاری کامل (W_m)

$$W_m = \left[\frac{-952/55}{2(-2/711)} \right] = 175/68 \text{ cm}$$

۲- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت زمین (W_l)
با توجه به روابط (۶-۹) و (۶-۱۰):

$$Z_1 = 536/8547$$

در نتیجه:

$$W_l = \left[\frac{893/4752 - 536/8547}{-2/160.1248} \right] = 165/1 \text{ cm}$$

۳- عمق آب مصرفی در حالت محدودیت آب (W_w).
با توجه به رابطه (۶-۱۸):

$$P_1 W_w^3 + P_2 W_w^2 + P_3 W_w + P_4 = 0$$

ضرایب P_1, P_2, P_3 و P_4 عبارتند از:

$$P_1 = 0.04003$$

$$P_2 = -351/8636$$

$$P_3 = -4893/63286$$

$$P_4 = 60.1216/0.68$$

در نتیجه:

$$W_w = 138/68 \text{ cm}$$

ضرایب Q_1, Q_2, Q_3 و Q_4 عبارتند از:

$$Q_1 = 0.54003$$

$$Q_2 = -541.61156$$

$$Q_3 = 122962.0129$$

$$Q_4 = -60.1216/0.68$$

در نتیجه:

$$W_k = 67.53 \text{ cm}$$

پس از تعیین شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی، به روند بهینه‌سازی آن پرداخته می‌شود که مراحل و روند کار در جداول (۱-۶) و (۲-۶) نشان داده شده است.

جدول ۱-۶ تحلیل شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی چغندر قند (کرج)

۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
	(ریال در هکتار)	(ha)	NB	(Cm)	B/C	شکر (kg/ha)	Pol (%)	y (kg/ha)	w (cm)
W_k			۰		۱/۰۰	۴۲۴۱	۱۷/۵۳	۲۷۳۹۶	۶۷/۵۳
W_{ew}	۱۸۲۵۰۰۶	۱/۰۵۰	۸۷۹۶۶۹	۹۰/۲	۱/۲۲	۵۵۳۴	۱۷/۴۰	۳۶۹۳۶	۸۵/۲۵
W_{el}	۲۷۵۱۷۳۴	۰/۵۱۸	۱۸۱۲۷۳۷	۵۹/۹	۱/۴۲	۶۹۵۶	۱۶/۴۹	۴۹۳۷۲	۱۱۵/۷۶
W_w	۲۶۳۰۵۵۶	۰/۲۶۷	۲۰۷۶۵۳۴	۳۷/۰	۱/۴۷	۷۳۷۳	۱۵/۹۹	۵۵۳۹۵	۱۳۸/۷۶
W_l	۲۰۸۴۱۰۵	۰/۰۶۰	۱۹۶۶۱۳۷	۱۰/۶	۱/۴۱	۷۳۵۰	۱۵/۴۲	۵۸۸۰۳	۱۶۵/۱
W_m	۱۸۱۲۴۹۴		۱۸۱۲۴۹۴	۰	۱/۳۷	۷۱۹۸	۱۵/۱۹	۵۹۱۰۶	۱۷۵/۶۸

ستون‌های جدول عبارتند از: ۱- عمق آب مصرفی، ۲- عملکرد غده، ۳- عیار قند، ۴- میزان قند قابل استحصال، ۵- نسبت درآمد ناخالص به هزینه تولید، ۶- میزان آب صرفه‌جویی شده نسبت به آبیاری کامل، ۷- سود خالص در واحد سطح (ریال در هکتار)، ۸- میزان امکان افزایش سطح زیر کشت با آب صرفه‌جویی شده، ۹- کل درآمد خالص با امکان افزایش سطح زیر کشت در مقایسه با آبیاری کامل و ۱۰- شاخص‌ها.

جدول ۲-۶ بهینه‌سازی شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی چغندر قند (کرج)

درآمد (سود) خالص نسبت به: افزایش درآمد با بهینه‌سازی در حالت:				شاخص‌های آب مصرفی میزان کاهش	
محدودیت آب	محدودیت زمین	واحد آب مصرفی **	واحد سطح *	(%)	(cm)
		۱۰۳۱۷	۱۸۱۲۴۹۴	۰	۱۷۵/۶۸
	۸/۵	۱۱۹۰۹	۱۹۶۶۱۳۷	۶	۱۶۵/۱۰
۴۵		۱۴۹۴۷	۲۰۷۶۵۳۴	۲۱	۱۳۸/۶۸
	۵۲/۰	۱۵۶۵۹	۱۸۱۲۷۳۷	۳۴	۱۱۵/۷۶
		۱۰۳۱۸	۸۷۹۶۶۹	۵۱	۸۵/۲۵
		-	-	۶۲	۶۷/۵۳

*: بر حسب ریال در هکتار **: بر حسب ریال بر متر مکعب در هکتار

نتیجه:

۱- آبیاری کامل (W_m)، بالاترین میزان عملکرد چغندر قند (۵۹/۱ تن در هکتار) را دارد. اما به دلیل زیاد شدن هزینه‌ها و کاهش عیار قند (و متعاقباً قیمت کل محصول)، سود خالص نهایی کاهش یافت.

۲- در W_w با ۲۱ درصد کاهش آب مصرفی بیشترین میزان نسبت درآمد ناخالص به هزینه تولید و بیشترین میزان درآمد خالص در واحد سطح را به همراه داشته است. اما منجر به کسب بیشترین میزان درآمد خالص به ازای واحد آب مصرفی نگردیده است.

۳- در W_{el} با ۳۴ درصد کاهش آب مصرفی بیشترین میزان درآمد به ازای واحد آب مصرفی را به همراه داشت. علاوه بر آن منجر به کسب بیشترین میزان درآمد خالص در حالت امکان افزایش سطح زیر کشت با آب صرفه‌جویی شده نیز شد. این عمق به نام عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت زمین (W_{el}) نامیده شده است.

۳-۶ بهینه سازی آب مصرفی چغندر قند (اصفهان)

طی تحقیقی که در مرکز تحقیقات کشاورزی اصفهان صورت گرفته (اکبری، ۱۳۷۷)، به بررسی عکس العمل چغندر قند نسبت به سطوح مختلف آب مصرفی پرداخته شد. پس از بررسی نتایج به دست آمده و تحلیل هزینه ها، پارامترهای اصلی به صورت زیر به دست آمد:

$$y(w) = -27155/8 + 1122/85w - 3/96642w^2 \quad (43-6)$$

$$c(w) = 2092632 + 22965/6w - 63/46272w^2 \quad (44-6)$$

$$P_C = (1/8839 - 0/00718w) P_{C16} \quad (45-6)$$

قیمت سال ۱۳۷۵ ریال هر کیلوگرم ۱۲۰ P_{C16}

$y(w)$ = تابع تولید، کیلوگرم در هکتار

$c(w)$ = تابع هزینه، ریال در هکتار

w = عمق آب مصرفی، سانتی متر

P_C = قیمت محصول، ریال بر کیلوگرم

با توجه به نحوه تحلیل شاخص های آستانه ای عمق آب مصرفی (بخش ۲-۶)، نتایج این تحلیل نیز در جداول (۳-۶) و (۴-۶) آمده است.

نتیجه:

۱- در W_1 با ۴/۷ درصد کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل، فقط منجر به ۰/۳ درصد کاهش عملکرد شد اما ۲۳/۴ درصد سود خالص در واحد سطح بیشتر به دنبال داشته است.

۲- در W_w با ۲۱/۲ درصد کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل، سبب افزایش ۸۰ درصد سود خالص به ازای واحد آب مصرفی شد و تنها ۶/۹ درصد کاهش عملکرد در واحد سطح را نشان می دهد.

جدول ۳-۶ تحلیل شاخص های آستانه ای عمق آب مصرفی چغندر قند (اصفهان)

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
w (cm)	y (kg/ha)	Pol (%)	B/C	(cm)	NB	(ha)		
W_k	۴۶/۱۲	۲۳/۲	۱/۰۰۰					
W_{ew}	۵۱/۰۰	۲۲/۷	۱/۱۶۳	۹۰/۵۴	۵۰۵۴۹۴	۱/۷۷۵	۱۴۰۲۷۴۶	
W_w	۱۱۱/۵۲	۱۷/۱۰	۱/۶۳۷	۳۰/۰۰	۲۴۶۲۲۹۱	۰/۲۷۰	۳۱۲۷۱۱۰	
W_l	۱۳۴/۸۳	۱۴/۹	۱/۴۱۸	۶/۷۱	۱۶۸۸۷۰۷	۰/۰۵۰	۱۷۷۳۱۴۲	
W_{cl} W_m	۱۴۱/۵۴	۱۴/۳	۱/۳۳۶	-	۱۳۶۸۵۴۶	-	۱۳۶۸۵۴۶	

ستون های جدول عبارتند از: ۱- عمق آب مصرفی، ۲- عملکرد غده، ۳- عیار قند، ۴- نسبت درآمد ناخالص به هزینه تولید، ۵- میزان آب صرفه جویی شده نسبت به آبیاری کامل، ۶- سود خالص در واحد سطح (ریال در هکتار)، ۷- میزان امکان افزایش سطح زیر کشت با آب صرفه جویی شده، ۸- کل درآمد خالص با امکان افزایش سطح زیر کشت در مقایسه با آبیاری کامل (ریال در هکتار) و ۹- شاخص ها.

جدول ۴-۶ بهینه سازی شاخص های آستانه ای عمق آب مصرفی چغندر قند (اصفهان)

درآمد (سود) خالص نسبت به: افزایش درآمد با بهینه سازی در حالت:				شاخص های آستانه ای		آب مصرفی		میزان کاهش (%)		واحد سطح *		واحد آب مصرفی **		محدودیت زمین		محدودیت آب	
				W_m W_{cl}		(cm)		کاهش (%)		سطح *		مصرفی **		محدودیت زمین (%)		محدودیت آب (%)	
				W_l		۱۳۴/۸۳		۴/۷		۱۶۸۸۷۰۷		۱۲۵۲۵		۲۳/۴			
				W_w		۱۱۱/۵۲		۲۱/۲		۲۴۶۲۲۹۱		۲۲۰۷۹				۸۰	
				W_{ew}		۵۱/۰۰		۶۴/۰		۵۰۵۴۹۴		۹۹۱۲					
				W_k		۴۶/۱۲		۶۷/۰		۰							

*** بر حسب ریال در هکتار ** بر حسب ریال بر متر مکعب در هکتار

فصل ۷

شاخص‌های بهره‌وری آب در کم‌آبیاری

۷-۱ مقدمه

کم‌آبیاری توأم با بهینه‌سازی مصرف کود یک راهبرد مطلوب برای حصول تولید مناسب تحت شرایط محدودیت منابع آب است که در مقایسه با آبیاری کامل، عموماً همراه با کاهش عملکرد در واحد سطح می‌باشد (توکلی، ۱۳۸۲، توکلی و همکاران، ۱۳۸۲، توکلی، ۱۳۸۳). اعمال مدیریت کم‌آبیاری سبب کاهش مصرف کودهای شیمیایی و آفت‌کش‌ها می‌شود، ضمن اینکه برای کاهش رقابت گیاهان در جذب آب، تراکم بوته در واحد سطح کاهش می‌یابد (خیرابی و همکاران، ۱۳۷۵؛ English et al., 1990). آنچه که در کم‌آبیاری همراه با مقادیر نیتروژن مورد توجه قرار می‌گیرد بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین حد بهینه نیتروژن به صورت دو جانبه است، که در این بخش مد نظر قرار گرفته است. از آنجا که مهم‌ترین عامل محدود کننده آب است، لذا کاربرد نتایج تحقیقات کم‌آبیاری می‌تواند در شکوفایی اقتصاد کشور اهمیت فراوانی داشته باشد. یکی از اهداف کم‌آبیاری افزایش کارایی مصرف آب از طریق کاهش میزان آب آبیاری در مقابل افت ناچیز عملکرد است (Kirda, 2002).

تاکنون تلاش‌های محققین و متخصصان کشاورزی عمدتاً به زیاد کردن تولید در واحد سطح معطوف شده و میزان تولید به ازای واحد نهاده و از جمله آب مصرفی، کمتر مد نظر بوده است. در صورتی که بر اساس قانون حداقل و در شرایط محدود بودن منابع آب و فراوانی نسبی اراضی قابل کشت، هدف بایستی افزایش تولید به ازای واحد آب مصرفی و استفاده بهینه از منابع آب محدود باشد. گرچه تحقیقات

متعددی در اقصای نقاط کشور در مورد عملکرد، سطح زیر کشت و مصرف آب گیاهان مختلف انجام شده ولی بانک اطلاعاتی دقیق از کارایی مصرف آب به صورت یکجا در دسترس نیست.

در شرایط محدودیت منابع آب و فراوانی نسبی اراضی قابل کشت (شرایط حاکم بر اکثر مناطق ایران)، هدف اساسی بایستی بالا بردن تولید به ازای واحد آب مصرفی و استفاده بهینه از این منابع باشد (اصطلاح Crop per drop در مقابل Crop per ha در این مورد مصداق دارد).

میزان آب آبیاری برای تولید محصولات کشاورزی غالباً زیاد و کارایی آن اندک است. به طوری که حجم آب مورد نیاز گندم ۵۰۰۰ تا ۸۰۰۰ متر مکعب در هکتار برآورد شده در حالی که کارایی مصرف آب آبیاری حدود ۲۵ درصد است. گندم که یکی از محصولات اساسی ایران است، حدود ۴۵ درصد کالری و ۷۰ درصد پروتئین مصرفی مردم را تأمین می‌کند (بای‌بوردی و همکاران، ۱۳۸۰) و از کل سطح زیر کشت گندم (حدود ۶/۴ میلیون هکتار) ۶۲ درصد به زراعت دیم و ۳۷ درصد به زراعت آبی اختصاص دارد و از کل تولید آن (حدود ۱۳/۴ میلیون تن در سال) حدود ۶۵ درصد آن از زراعت آبی و بقیه از زراعت دیم حاصل می‌شود (بی‌نام، ۱۳۸۳). سازمان خواروبار و کشاورزی سازمان ملل متحد (FAO) برآورد کرده که حداقل دو سوم افزایش تولیدات محصولات مورد نیاز در دهه‌های آینده باید از طریق عملکرد بیشتر در واحد سطح به دست آید، اگرچه از بارش و آبیاری نیز بایستی حداکثر استفاده را نمود و بهره‌وری آب را افزایش داد (FAO, 1988).

در مطالعات متعدد، تأثیر میزان کود مصرفی به خصوص نیتروژن روی گندم بررسی شده است. تغذیه صحیح ریشه‌ها برای حداکثر رشد گیاهی و تولید محصول ضروری است. بر اساس تحقیقات انجام شده، گندم عموماً به نیتروژن عکس‌العمل خوبی نشان می‌دهد (بلسون، ۱۳۷۲ و ۱۳۷۸، توشیح، ۱۳۷۳، توکلی، ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳، جام‌جم، ۱۳۷۵، حقیقتی‌ملکی، ۱۳۷۷، خلج و همکاران، ۱۳۸۰، سیاوشی، ۱۳۷۶، ظلیعی و حق پرست، ۱۳۷۸، علیزاده، ۱۳۷۵، Pala et al., 1996; Pala and Studer, 1999).

Oweis et al., 1998; Oweis and Hachum, 2004; Mossedque and Smith, 1994; Krentons and Orphonos, 1979; Harmsen et al., 1983). هم‌چنین رابطه نزدیکی بین میزان نیتروژن و آب آبیاری وجود دارد (Oweis and Zhang, 1996; Oweis and Hachum, 2003 & 2004; Oweis et al., 1999; Oweis et al., 2004a & 2004b; Oweis et al., 1998; Oweis et al., 2001; Perrier and Salkini, 1991; Tavakkoli and Oweis, 2004; Tavakoli et al., 2005).

مصرف متعادل کود یکی از عوامل مهم در افزایش تولید و بهبود کیفیت محصولات کشاورزی است (ملکوتی و همکاران، ۱۳۸۰). نحوه و مدیریت مصرف نیتروژن برای جلوگیری از تلفات آن در اثر آبیاری بسیار مهم است (Bock, 1984). آبیاری بیش از اندازه می‌تواند منجر به آبشویی بیشتر نیتروژن گردد، به طوری که آبشویی مقدار ۴۰ درصد نیتروژن قابل استفاده در ناحیه ریشه‌ها با مصرف ۳۰۰ میلی‌متر آب گزارش شده است (Artiola, 1991). متوسط کارایی مصرف نیتروژن (Nitrogen Use Efficiency, NUE) برای غلات در دنیا برابر ۳۳ درصد است (Raun and Johnson, 1999).

یکی از شاخص‌های مورد استفاده در مباحث عملکرد گیاه و آب مصرفی، که مبنایی اقتصادی دارد، بهره‌وری از آب (Water Productivity, WP) است که به صورت نسبت عملکرد محصول به مقدار آب مصرفی تعریف می‌شود. آب مصرفی شامل بارش، آبیاری یا آبیاری بعلاوه بارش می‌باشد. بهره‌وری از آب مصرفی بیانگر میزان تولید به ازای واحد نهاده است. در این بخش دو نهاده آب و نیتروژن مد نظر قرار گرفته است که اهمیت و اثرات آب به مراتب بیشتر و تأثیرگذارتر از نیتروژن است.

شاخص‌های بهره‌وری از آب مصرفی (WP) از جنبه‌های مختلف (بهره‌وری از آب آبیاری در اضافه تولید نسبت به شرایط دیم (و یا هر تیمار دیگر)، بهره‌وری از آب آبیاری در عملکرد کل، بهره‌وری از بارش و بهره‌وری از آب آبیاری + بارش در عملکرد کل) مورد توجه محققان قرار گرفته است (توکلی و همکاران، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۲؛ توکلی، ۱۳۸۳; Zhang et al., 1998, 1999 & 2000 Zhang and Zhang, 2003).

Oweis, 1999; Tuong, 1999; Tavakkoli and Oweis, 2004; Schneider *et al.*, 1976; Oweis *et al.*, 2004a & 2004b; Oweis and Hachum, 2003 & 2004; Mossedque and Smith, 1994; Kitamura, 1990; Cabangon *et al.*, 2002; Bouman and Tuong, 2001; Bhuiyan *et al.*, 1995; Bhatti and (Kijne, 1992; Kijne *et al.*, 2003

علاوه بر شاخص بهره‌وری آب مصرفی، کارایی مصرف آب (WUE, Water Use Efficiency) نیز در بهینه‌سازی کاربرد دارد (Gregory, 1991; Howell, 1990; Jensen *et al.*, 1990; Jensen, 1968 & 1987) که از نسبت عملکرد دانه به میزان تبخیر - تعرق واقعی گیاه به دست می‌آید. در برخی منابع به کارایی مصرف آب، بهره‌وری از تبخیر - تعرق گفته شده و آن را به صورت WP_{ET} نشان می‌دهند (Deju and Jingwen, 1993; Sharma *et al.*, 1990; Tuong, 1999; Turner, 1997). تبخیر - تعرق واقعی از فرمول زیر تعیین می‌گردد:

$$ETa = I + P + \Delta S - R - DP \quad (۷-۱)$$

که در آن:

ETa = تبخیر - تعرق واقعی طی دوره زمانی مشخص (میلی‌متر)

I = میزان آب آبیاری در طی دوره زمانی مشخص (میلی‌متر)

P = میزان بارش دوره (میلی‌متر)

ΔS = تغییر رطوبت خاک در ابتدا و انتهای دوره (میلی‌متر)

R = رواناب سطحی (میلی‌متر)

DP = تلفات نفوذ عمقی (میلی‌متر)

معمولاً در کرت‌های آزمایشی که دور تا دور آن با پشته‌هایی به ارتفاع ۲۰-۳۰ سانتی‌متر محصور است، میزان رواناب سطحی برابر صفر است. همچنین با توجه به کشت محصول در این کرت‌ها و برنامه آبیاری بر مبنای تخلیه رطوبت خاک، از تلفات نفوذ عمقی صرف‌نظر می‌شود. لذا با در دسترس بودن رطوبت خاک در ابتدا و انتهای دوره رشد می‌توان تبخیر - تعرق واقعی را به دست آورد و با داشتن بارش و میزان آب آبیاری، شاخص کارایی مصرف آب را تعیین کرد. بدیهی است در صورتی که

رواناب و تلفات نفوذ عمقی وجود داشته و اندازه‌گیری شده باشند، در معادله فوق لحاظ خواهند شد.

بر اساس تحقیقی که توسط توکلی (۱۳۸۳ و ۱۳۸۵) در مراغه صورت گرفته، اکنون به چگونگی تعیین شاخص‌های بهره‌وری آب پرداخته می‌شود. یک آبیاری یکنسان برای تمام تیمارها بجز دیم در پاییز صورت گرفت و تیمارهای آبیاری در بهار بر مبنای ۵۰ درصد تخلیه رطوبت خاک (SMD , Soil Moisture Deficit) در عمق ۸۰-۱۰ سانتی‌متری خاک در تیمار آبیاری کامل و تأمین ۱۰۰، ۶۶ و ۳۳ درصد به ترتیب برای تیمارهای آبیاری (FI , 66% FI و 33% FI) بوده است. میزان آب (d) در هر نوبت ۷۲، ۴۸ و ۲۴ میلی‌متر برای تیمارهای آبیاری بود که از فرمول زیر به دست آمد:

$$d = (\theta_{FC} - \theta_{WP}) * D * \gamma \quad (۷-۲)$$

که در آن درصد تخلیه مجاز (γ) و عمق توسعه ریشه (D) برای آبیاری‌های بهاره به ترتیب ۵۰ درصد و ۸۰ سانتی‌متر منظور گردید. در این فرمول، θ_{FC} رطوبت حجمی در ظرفیت زراعی و θ_{WP} رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی دائم است.

در این تحقیق از گندم آبی رقم الموت استفاده شد که دارای پتانسیل عملکرد مناسب است به نحوی که میزان عملکرد آن در ۸ منطقه سردسیر کشور، در طی سه سال (۱۳۷۰-۷۳) از ۵/۱ تا ۸/۰۵ تن در هکتار متغیر بوده است. الموت که گندمی با تیپ رشد زمستانه، مقاوم به زنگ زرد، مقاوم به سرما و مقاوم به ریزش دانه است از نظر خواص نانوائی دارای کیفیت مناسب نان‌های ایرانی بوده و عملکرد آن نسبت به رقم نوید ۱۰ درصد بیشتر است (عطاری و اکبری، ۱۳۷۵).

متوسط میزان آب آبیاری دو سال آزمایش برای گندم آبی الموت برای تیمارهای آبیاری (آبیاری کامل، ۶۶٪ آبیاری کامل، ۳۳٪ آبیاری کامل و شرایط دیم) به ترتیب برابر ۲۲۰، ۱۶۰، ۱۰۰ و صفر میلی‌متر بود. جدول (۷-۱) عملکرد تیمارهای آبیاری و کود نیتروژن را نشان می‌دهد (توکلی، ۱۳۸۳).

جدول ۱-۷ متوسط عملکرد دانه گندم (کیلوگرم در هکتار)

تیمارهای آبیاری	مقادیر نیتروژن (کیلوگرم در هکتار)					میانگین
	۰	۳۰	۶۰	۹۰	۱۲۰	
دیم	۱۴۶۴	۱۴۴۶	۱۳۵۴	۱۱۷۸	۷۹۶	۱۲۴۸
(۱۰۰ mm) ۳۳٪	۲۴۷۶	۲۶۷۰	۲۷۲۴	۲۷۱۳	۲۳۱۹	۲۵۸۰
(۱۶۰ mm) ۶۶٪	۳۰۶۴	۳۵۴۰	۳۹۸۳	۴۴۶۷	۴۰۴۹	۳۸۲۰
(۲۲۰ mm) ۱۰۰٪	۳۳۱۸	۳۸۸۷	۴۵۵۹	۵۵۷۲	۴۹۱۹	۴۴۵۱
میانگین	۲۵۸۰	۲۸۸۶	۳۱۵۵	۳۴۸۲	۳۰۲۱	

بر اساس جدول (۱-۷) و در مقایسه میانگین‌ها، تیمار آبیاری کامل و نیتروژن ۹۰ کیلوگرم در هکتار در کلاس برتر قرار می‌گیرد. اگر چه برای نیتروژن برتری تیمار N₉₀ (۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص) صادق و پذیرفتنی است اما برای تیمار آبیاری کامل، به این دلیل که مبنای مقایسه آن عملکرد در واحد سطح است نه به ازای واحد نهاده، برتری تیمار آبیاری کامل محل تردید است. لذا لازم است برتری تیمارهای آبیاری بر اساس شاخص‌های بهره‌وری آب (WP) مطالعه شود.

حد بالای مصرف آب در زراعت آبی، آبیاری کامل است و با کم آبیاری، حد بهینه کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل تعیین می‌شود. در سطح کودی N₉₀، عملکرد تیمارهای آبیاری شامل دیم، ۳۳٪ آبیاری کامل، ۶۶٪ آبیاری کامل و آبیاری کامل به ترتیب ۱۱۷۸، ۲۷۱۳، ۴۴۶۷ و ۵۵۷۲ کیلوگرم در هکتار است (جدول ۱-۷). مشاهده می‌شود که تیمارهای ۳۳٪ آبیاری کامل نسبت به دیم، ۶۶٪ آبیاری کامل نسبت به ۳۳٪ آبیاری کامل و ۶۶٪ آبیاری کامل نسبت به ۳۳٪ آبیاری کامل به ترتیب ۱۵۳۵، ۱۷۵۴ و ۱۱۰۵ کیلوگرم در هکتار عملکرد بیشتری دارند.

۲-۷ شاخص‌های بهره‌وری آب (WP)

بهره‌وری آب از سه جنبه (WP_P، WP_{P+1} و WP_I) و کارایی مصرف نیتروژن (NUE) طبق معادلات (۳-۷) تا (۶-۷) بررسی شد. لازم به ذکر است که بهره‌وری

بارش از نسبت عملکرد محصول تحت شرایط دیم بر میزان بارش طول فصل رشد به دست می‌آید. نتیجه محاسبه این بهره‌وری‌ها در جداول (۲-۷) تا (۵-۷) برای مطالعه توکلی ارائه شده است.

همواره حداکثر عملکرد در واحد سطح لزوماً ملاک گزینش تیمار برتر نیست و باید عملکرد به ازای واحد آب مصرفی و توجیه اقتصادی کشت نیز مد نظر باشد. گزارش‌های موجود حکایت از این دارد که در شرایط محدودیت آب، حداکثر تولید به ازای واحد آب مصرفی ملاک مقایسه و گزینش تیمار برتر قرار می‌گیرد. لذا، انتخاب تیمار ۶۶FI٪ که کاهش ۲۷/۳ درصدی آب مصرفی نسبت به تیمار آبیاری کامل دارد و افت عملکرد آن به میزان ۱۹/۸ درصد خواهد بود (از ۵۵۷۲ به ۴۴۶۷ کیلوگرم در هکتار)، با نتایج دیگر محققان همسو است.

غالباً اهمیت نیتروژن در مقایسه با آب آبیاری کمتر است، اما کاربرد متعادل آن ضمن کاهش اثرات سوء، سبب افزایش عملکرد دانه می‌شود. مصرف ۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص در دو قسط، از نظر میزان عملکرد در کلاس برتر قرار می‌گیرد و دارای بیشترین میزان کارایی در تولید دانه می‌باشد (۱۵/۵۹ و ۲۵/۰۴ کیلوگرم دانه بر کیلوگرم نیتروژن). این نتیجه با توصیه‌های محققین دیگر همسو و در راستای سیاست کاهش مصرف کودهای شیمیایی و سموم می‌باشد.

طی تحقیقی در ایکاردا (ICARDA)^۱، مصرف بیش از ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص را برای وضعیت بهینه آبیاری (۶۶FI٪) مجاز ندانسته‌اند (Oweis and Hachum, 2003 & 2004; Oweis et al., 1998; Oweis, 1997). بسته به نوع زمین، ۴۰ تا ۸۰ کیلوگرم در هکتار کودهای نیتروژن‌دار به صورت خالص، بهترین و مناسب‌ترین مقدار برای گندم پیش‌بینی شده و نحوه مصرف به صورت نیمی از آن در موقع کاشت (پاییز) و نصف دیگر در اوایل بهار به صورت سرک توصیه شده است (به نقل از توکلی و همکاران، ۱۳۸۲). این گزارش‌ها، نتایج این تحقیق را تأیید می‌کنند.

جدول ۲-۷ کارایی مصرف نیتروژن در تولید دانه گندم^۱

NUE (kg.N ⁻¹) در عملکرد دانه				
دیم	%۳۳FI	%۶۶FI	FI	
N ₀	-	-	-	
N ₃₀	-	۶/۴۷	۱۵/۸۷	۱۸/۹۷
N ₆₀	-	۴/۱۳	۱۴/۸۲	۲۰/۷۸
N ₉₀	-	۲/۶۳	۱۵/۵۹	۲۵/۰۴
N ₁₂₀	-	-	۸/۲۱	۱۳/۳۲

$$(۳-۷) \quad \text{عملکرد بدون مصرف نیتروژن - عملکرد با مصرف نیتروژن} = \frac{\text{کارایی مصرف نیتروژن}}{\text{میزان نیتروژن مصرفی}}$$

$$NUE = \frac{Yield_N - Yield_{N_0}}{N}$$

جدول ۳-۷ متوسط بهره‌وری آب آبیاری در تولید گندم^۲

WP _{irr} (kg.mm ⁻¹) در عملکرد کل				
دیم	%۳۳FI	%۶۶FI	FI	
N ₀	-	۲۴/۷۶	۱۹/۱۵	۱۵/۰۸
N ₃₀	-	۲۶/۷۰	۲۲/۱۳	۱۷/۶۷
N ₆₀	-	۲۷/۲۴	۲۴/۷۱	۲۰/۷۲
N ₉₀	-	۲۷/۱۳	۲۷/۹۲	۲۵/۳۰
N ₁₂₀	-	۲۳/۱۹	۲۵/۳۱	۲۲/۳۶

$$(۴-۷) \quad (WP_{irr}) = \frac{\text{عملکرد محصول}}{\text{میزان آب آبیاری}}$$

$$WP_{irr} = \frac{Yield}{irr}$$

جدول ۴-۷ متوسط بهره‌وری آب آبیاری + بارش در تولید دانه گندم^۳

WP _{rain+irr} (kg.mm ⁻¹) در عملکرد کل				
دیم	%۳۳FI	%۶۶FI	FI	
N ₀	۴/۷۸	۶/۱۰	۶/۵۷	۶/۳۱
N ₃₀	۴/۷۲	۶/۵۸	۷/۶۰	۷/۳۹
N ₆₀	۴/۴۲	۶/۷۱	۸/۴۸	۸/۶۷
N ₉₀	۳/۸۵	۶/۶۸	۹/۵۸	۱۰/۵۹
N ₁₂₀	۲/۶۰	۵/۷۱	۸/۶۹	۹/۳۵

$$(۵-۷) \quad (WP_{irr+rain}) = \frac{\text{عملکرد محصول}}{\text{مجموع آب آبیاری و بارش}}$$

$$WP_{irr+rain} = \frac{Yield}{irr + rain}$$

جدول ۵-۷ بهره‌وری آب آبیاری در اضافه عملکرد نسبت به شرایط دیم^۴

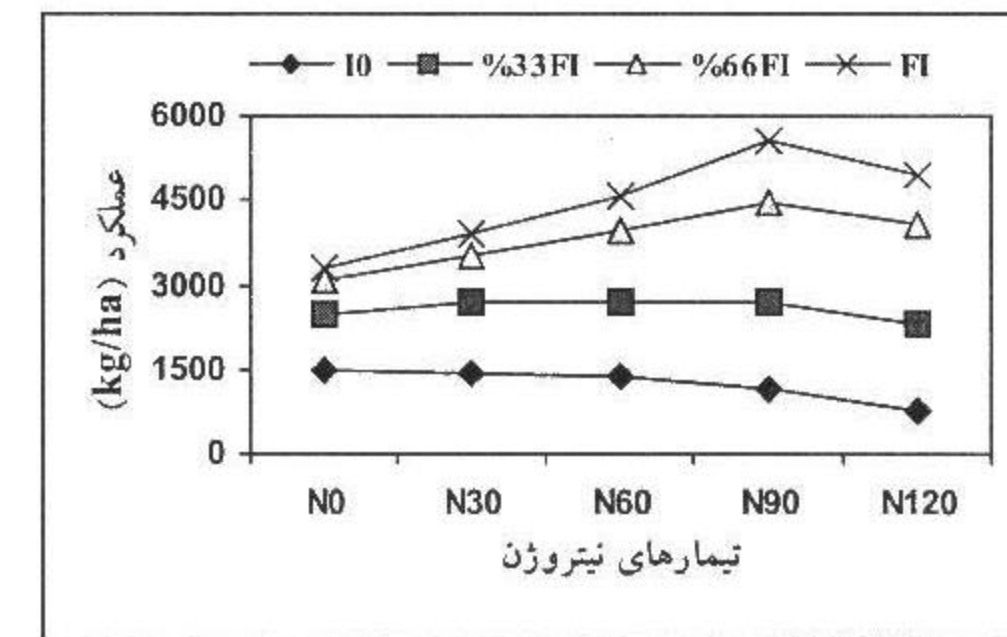
WP _{irr} (kg.mm ⁻¹) در اضافه عملکرد نسبت به شرایط دیم				
دیم	%۳۳FI	%۶۶FI	FI	
N ₀	-	۱۰/۱۲	۱۰	۸/۴۳
N ₃₀	-	۱۲/۲۴	۱۳/۰۹	۱۱/۱
N ₆₀	-	۱۳/۷	۱۶/۲۴	۱۴/۵۷
N ₉₀	-	۱۵/۳۵	۲۰/۵۶	۱۹/۹۷
N ₁₂₀	-	۱۵/۲۳	۲۰/۳۳	۱۸/۷۴

$$(۶-۷) \quad (WP_{irr}) = \frac{\text{عملکرد در شرایط دیم - عملکرد تحت شرایط آبیاری}}{\text{میزان آب آبیاری}}$$

$$WP_{irr} = \frac{Yield_{irr} - Yield_{rainfed}}{irr}$$

در بین نهادهای زراعی، نقش آب و مدیریت آبیاری به مراتب بیشتر و مؤثرتر از کود نیتروژن است، زیرا در حالی که نیتروژن نهادهای نسبتاً ارزان، قابل دسترس و با کاربرد آسان است، آب آبیاری عاملی محدود کننده و استحصال و مصرف آن پرهزینه است. لذا تعیین میزان تولید به ازای هر واحد آب مصرفی در زراعت دارای توجیه ویژه‌ای است. با توجه به اینکه در این مطالعه (توکلی، ۱۳۸۳) تلفیق دو نهاده آب و نیتروژن مد نظر بوده، بنابراین تعیین حد مطلوب مصرف آب، میزان مناسب مصرف نیتروژن را نیز تعیین خواهد کرد (شکل ۱-۷).

آبیاری سبب افزایش بهره‌وری از بارش گردید زیرا در حالی که بهره‌وری آب بارش در تولید دانه WP_p (نسبت عملکرد محصول به بارش)، $4/78$ کیلوگرم بر میلی‌متر بارش بود. با انجام آبیاری در حد بهینه ($66FI\%$) بهره‌وری آب ناشی از مجموع بارش و آب آبیاری (WP_{p+i} در معادله ۵-۷) به $9/58$ کیلوگرم بر میلی‌متر افزایش یافت (جدول ۴-۷) که افزایشی برابر ۱۰۰ درصد است.



شکل ۱-۷ متوسط عملکرد گندم تحت شرایط مقادیر مختلف آب آبیاری و نیتروژن طی دو سال تحقیق

بهره‌وری آب آبیاری در اضافه عملکرد نسبت به شرایط دیم (معادله ۶-۷) نشان می‌دهد که تیمار حد بهینه مصرف آب (160 میلی‌متر) با $20/56$ کیلوگرم در هکتار تولید دانه مطلوب‌ترین وضعیت را دارا می‌باشد (جدول ۵-۷). از لحاظ

بهره‌وری آب آبیاری در عملکرد کل (معادله ۴-۷)، تیمار بهینه کم آبیاری ($27/3$ درصد کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل) با $27/92$ کیلوگرم دانه به ازای هر میلی‌متر آب مطلوب‌ترین شرایط تحت تیمار بهینه نیتروژن (90 کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص) را ایجاد کرده است (جدول ۳-۷).

در شکل (۲-۷) رابطه بین میزان آب آبیاری و مقادیر نیتروژن با بهره‌وری آب نشان داده شده و معادله مربوط به شکل (۲-۷) یعنی معادله (۷-۷) نیز به دست آمده است.

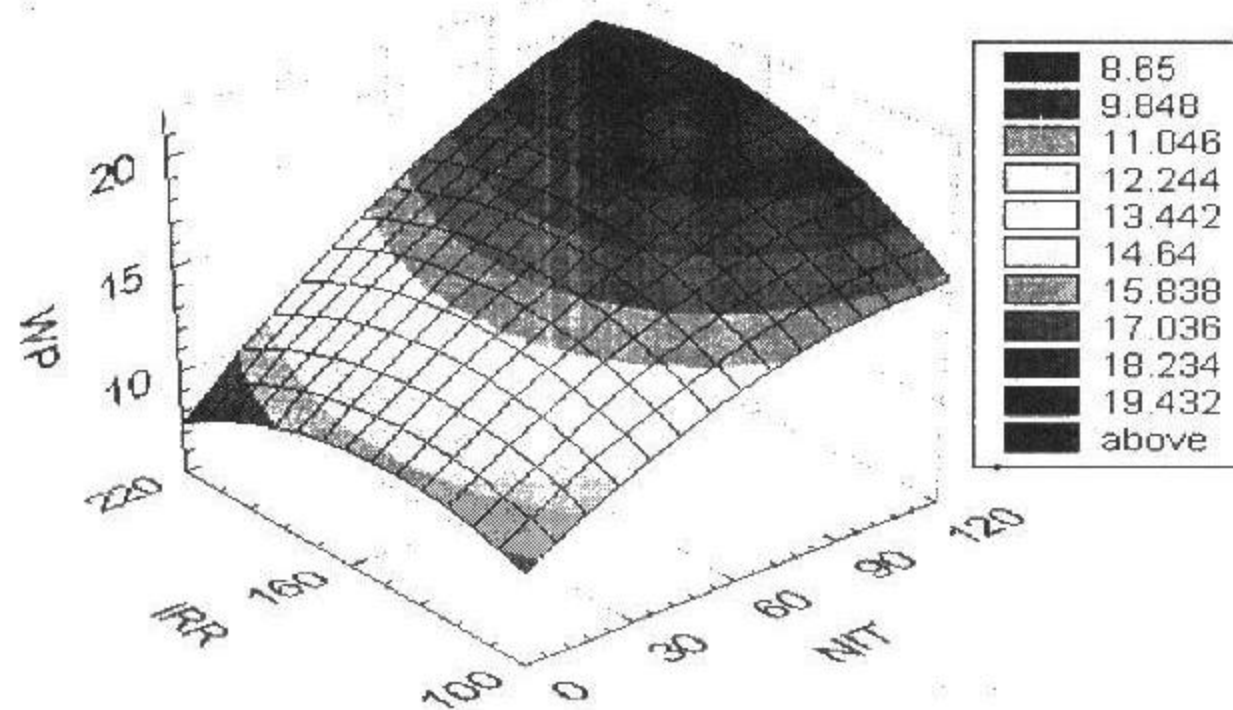
$$WP_{irr} = -1.947 + 0.058 * N + 0.173 * IRR - 4.225 * 10^{-4} * N^2 + 4.489 * 10^{-4} * IRR * N - 5.939 * 10^{-4} * IRR^2 \quad (7-7)$$

که در آن:

WP_{irr} = بهره‌وری آب آبیاری، کیلوگرم بر میلی‌متر

IRR = میزان آب آبیاری، میلی‌متر

N = میزان نیتروژن مصرفی، کیلوگرم نیتروژن خالص در هکتار



شکل ۲-۷ اثر مقادیر آب آبیاری و نیتروژن بر بهره‌وری از آب مصرفی

فصل ۸

ارزیابی اقتصادی کم آبیاری و نیتروژن

۸-۱ تخمین تابع تولید گندم

در زمینه آب مصرفی و توابع تولید سه نگرش مربوط به سه تخصص وجود دارد: متخصصین زراعت که هدف اساسی آنها حصول حداکثر عملکرد در واحد سطح است، کارشناسان آبیاری که حداقل در تئوری هدفشان حصول حداکثر بهره‌وری از آب مصرفی است و نهایتاً اقتصاددانان که به حداکثر سود و درآمد خالص نهایی توجه دارند (Vaux and Pruitt, 1983). در این میان اگر چه دیدگاه‌های متخصصین آبیاری و اقتصاددانان به یکدیگر نزدیک است اما فقط متخصصین آبیاری به تولید به ازای واحد نهاده تولید توجه دارند. بنابراین با توجه به سطح زیر کشت و تولید گندم در زراعت آبی و دیم و محدودیت منابع آب در کشور، ضروری است با بهینه‌سازی مصرف آب در زراعت آبی از طریق کم آبیاری و به کارگیری آبیاری تکمیلی بهینه در زراعت دیم، ضمن کسب سود خالص بیشتر، از آب موجود (بارش و آب آبیاری) حداکثر استفاده به عمل آید.

تعیین تابع تولید، راه را برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری تولیدات کشاورزی هموار می‌کند. تحقیقات گسترده‌ای در خصوص تعیین تابع تولید بر اساس میزان آب آبیاری، کود و دیگر نهاده‌های تولید صورت گرفته است. استفاده از برنامه‌ریزی خطی و تحلیل رگرسیونی (Wagner, 1959)، برنامه‌ریزی بر مبنای حداقل انحرافات مطلق برآورد پارامترها (Fisher, 1961; Wilson, 1978)، برنامه‌ریزی بر اساس حداقل مربعات (Draper and Smith, 1981; Gujarati, 1978; Heady and Dillon, 1988; Johnson, 1972; Judge et al., 1980; Kmenta, 1971; Sankhayan, 1988; Theil, 1978; Wannacott and Wannacott, 1979) و نیز مدل برنامه‌ریزی ریاضی غیر خطی (پیکانی، ۱۳۸۱) از جمله این تحقیقات است.

نتایج دیگر محققان نیز این یافته‌ها را تأیید می‌کنند. در حالی که در حوزه غرب آسیا و شمال آفریقا متوسط بهره‌وری آب ناشی از بارش در تولید گندم در حدود ۰/۳۴ کیلوگرم بر متر مکعب (۳/۴ کیلوگرم بر میلی‌متر) است و برای آبیاری کامل گندم ۰/۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد، با کاربرد حد بهینه آبیاری، متوسط بهره‌وری آب به حدود ۲/۲۱ کیلوگرم بر متر مکعب (۲۲/۱ کیلوگرم بر میلی‌متر) افزایش یافت (Oweis, 1997; Oweis et al., 1999).

۷-۳ نتیجه‌گیری

در مجموع، بر اساس نتایج این تحقیق، تیمار ۱۶۰ میلی‌متر مصرف آب (۲۷/۳ درصد کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل) به همراه ۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص به صورت دو بار تقسیط قابل توصیه است. آبیاری در سه مرحله شامل: زمان کاشت، مرحله ساقه رفتن و مرحله ظهور سنبله تا گل‌دهی مناسب است. بدیهی است در اعمال آبیاری بایستی راندمان سیستم و روش آبیاری مد نظر قرار گیرد. ضمن اینکه پیشنهاد می‌شود با در نظر داشتن جنبه‌های اقتصادی، تحقیقاتی مشابه برای دیگر محصولات و در قالب الگوی کشت انجام شود و نتایج آنها در طرح‌های توسعه منابع آب و مدیریت بهره‌برداری از شبکه‌های آبیاری مد نظر قرار گیرد.

در بررسی اقتصادی تحقیق، پس از تعیین تابع تولید گندم، با استفاده از روش OLS^۱ و نرم افزارهای Statistica 5.5 و Engineering Data Fit 6.1.10 (سازگار برای مدل های خطی و غیر خطی)، از طریق بودجه بندی جزئی^۲، تحلیل نهایی نسبت اختلاف منافع به اختلاف هزینه^۳، نسبت درآمد به هزینه هر تیمار، سود خالص و تعیین حد سودآوری هر یک از تیمارها با توجه به قیمت آب و آبیاری صورت می گیرد. بعد از تعیین قیمت تمام شده آب آبیاری، تیمارها بر اساس درآمد خالص و به صورت نزولی مرتب می شوند. پس از حذف گزینه های تحت تسلط^۴، اختلاف میانگین منافع تیمارها و اختلاف میانگین هزینه ها محاسبه می گردد. طبق روابط (۱-۸) و (۲-۸)، اختلاف بین منافع خالص و اختلاف بین هزینه ها تعیین و با استفاده از رابطه (۳-۸) تحلیل نهایی بین تیمارهای مسلط انجام و تیمارهایی که نسبت اختلاف منافع نهایی آنها به اختلاف هزینه نهایی مربوطه کمتر از واحد باشد، حذف می شوند.

$$\overline{\Delta B} = \overline{B_i} - \overline{B_{i+1}} \quad (1-8)$$

$$\overline{\Delta C} = \overline{C_i} - \overline{C_{i+1}} \quad (2-8)$$

$$\frac{\overline{\Delta B}}{\overline{\Delta C}} \geq 1 \quad (3-8)$$

در این جا به بیان مختصر روش های فوق اشاره می شود.

روش بودجه بندی جزئی:

این روش در مواردی به کار می رود که در سازمان تولید مزرعه، تغییرات جزئی رخ داده باشد. در این حالت اثرات این تغییر جزئی بر درآمد و هزینه های مزرعه تعیین و در مورد جایگزینی آن تصمیم گیری می شود. البته برای اتخاذ تصمیم پیرامون تغییر جزئی، برآورد افزایش یا کاهش هزینه منتج از انتخاب روش جدید و

- 1- Ordinary least square
- 2 - Partial budgeting (PB)
- 3- Marginal benefit cost ratio (MBCR)
- 4- Dominated alternatives

افزایش یا کاهش درآمد ناشی از انتخاب روش جدید لازم است. هرگاه مجموع کاهش هزینه و افزایش درآمد ناشی از کاربرد روش جدید بیشتر از مجموع افزایش هزینه و کاهش درآمد ناشی از انتخاب روش جدید باشد، انتخاب تکنیک جدید اقتصادی خواهد بود.

نسبت منفعت به هزینه نهایی:

در این روش تیمارها بر اساس صعود ارزش کنونی هزینه مرتب می گردند. سپس تفاوت ایجاد شده در ارزش کنونی هزینه ها و درآمدهای به علت گذار از یک تیمار و رسیدن به تیمار بعدی برای دو به دوی تیمارها محاسبه می گردد. حاصل تقسیم تفاوت درآمدها (منافع گذار از یک تیمار و رسیدن به تیمار بعدی) و تفاوت هزینه ها معرف نسبت منفعت به هزینه نهایی خواهد بود. در صورتی که نسبت منفعت به هزینه نهایی کوچکتر یا برابر یک باشد تیماری که دارای هزینه کمتری است ارجح و چنانچه نسبت منفعت به هزینه نهایی بزرگتر از یک باشد تیمار دارای هزینه بیشتر ارجح می باشد. پس از انتخاب اولین تیمار ارجح نسبت منفعت به هزینه نهایی این تیمار با تیمار بعدی محاسبه و این روند تا انتخاب برترین تیمار ادامه خواهد داشت.

تحلیل ارجحیت سرمایه گذاری در تیمارها:

در روش تجزیه و تحلیل ارجحیت سرمایه گذاری، پس از مرتب نمودن تیمارها بر اساس کاهش سود خالص، میزان سود خالص و هزینه های متغیر دو به دوی تیمارها مقایسه می گردند. در صورتی که تیماری وجود داشته باشد که سود خالص بیشتری را با صرف هزینه متغیر کمتری ایجاد نماید، سرمایه گذاری در این تیمار در مقایسه با تیمار دیگر ارجحیت دارد و در صورتی که این حالت اتفاق نیفتد برای تعیین ارجحیت سرمایه گذاری تجزیه و تحلیل نرخ بازده نهایی سرمایه گذاری الزامی است.

تملیل نرخ بازده نهایی سرمایه‌گذاری:

به منظور تعیین نرخ بازده نهایی سرمایه‌گذاری و تعیین ارجحیت سرمایه‌گذاری، میزان تغییرات سود خالص و هزینه‌های متغیر منتج از جایگزینی یک تیمار به جای تیمار دیگر را محاسبه و تحت عنوان سود خالص نهایی و هزینه متغیر نهایی معرفی می‌شود. حاصل ضرب خارج قسمت موارد فوق در ۱۰۰، معرف نرخ بازده نهایی سرمایه‌گذاری می‌باشد. چنانچه این نرخ بالاتر از نرخ سود سپرده‌های بانکی باشد، سرمایه‌گذاری در تیمار با سود خالص بیشتر نسبت به تیمار دیگر (تیماری که سود خالص کمتری دارد) ارجحیت دارد.

قیمت تمام شده آب آبیاری

جهت برآورد قیمت تمام شده آب آبیاری، تمام هزینه‌های سرمایه‌ای اولیه برای راه‌اندازی سیستم‌های دوره تأسیس و پیش از بهره‌برداری جهت انتقال آب آبیاری شامل (حفر چاه و کانال، لوله‌گذاری، الکتروموتور و تاسیسات مربوط، نصب ماشین‌آلات، حقوق و دستمزد و غیره برای مرحله تأسیس و راه‌اندازی و هزینه‌های پیش‌بینی نشده) و هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری شامل هزینه‌های طی دوره بهره‌برداری (حقوق و دستمزد، آب، برق، بیمه و اجاره، تعمیر و نگهداری، هزینه‌های پیش‌بینی نشده) مورد نظر قرار خواهد گرفت. سپس با استفاده از فرمول‌های سری‌های یکنواخت از جمله فرمول برگشت سرمایه، ارزش کنونی سرمایه‌گذاری اولیه سیستم یا مبلغی که می‌بایستی سالانه پرداخت گردد تا معادل مبلغ اولیه باشد را مشخص و سپس هزینه آب مشخص خواهد شد.

لذا برای تعیین قیمت تمام شده آب آبیاری بر اساس هزینه‌های استحصال آب (هزینه‌های سرمایه‌گذاری و جاری یا بهره‌برداری) از چاه با الکتروموتور و استفاده از فرمول برگشت سرمایه (روش تبدیل به معادل یکنواخت سالانه) (معادله ۴-۸) است.

$$A = P \frac{i(i+1)^n}{(i+1)^n - 1} \quad (4-8)$$

که در آن A ارزش کنونی اقساط سالانه (ریال)، P مقدار سرمایه‌گذاری (ریال)، n عمر مفید (طول دوره تحلیل) (سال) و i نرخ بهره (تنزیل) (درصد) است. سرمایه‌گذاری شامل حفر چاه و لوله‌گذاری، الکتروموتور، ترانس و برق رسانی از طریق خط هوایی، لوله‌های اصلی، فرعی، آبپاش‌ها و لوازم جانبی و هزینه‌های جاری بهره‌برداری است.

با استفاده از هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری، هزینه استهلاک سرمایه‌گذاری اولیه جهت راه‌اندازی سیستم، هزینه استهلاک بهره سرمایه‌گذاری و سالانه سرمایه و کل آب مصرف شده، هزینه تامین هر متر مکعب آب آبیاری مشخص خواهد شد.

۲-۸ تخمین ضرایب تابع تولید

برای تخمین ضرایب تابع تولید گندم با استفاده از روش OLS و نرم‌افزارهای Statistica 5.5 و Engineering Data Fit 6.1.10 مدل آماری زیر به کار گرفته می‌شود.

$$Y = a + bN + cW + dN^2 + eW^2 + fNW + E \quad (5-8)$$

که در آن:

Y = میزان تولید گندم در یک هکتار، کیلوگرم در هکتار

N = میزان کود نیتروژن مصرف شده در یک هکتار، کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص

W = میزان عمق آب آبیاری، میلی‌متر

E = پارامتر خطا

a, b, c, d, e, f = ضرایب تابع تولید گندم تحت دو متغیر آب آبیاری و نیتروژن، بی بعد

برای تعیین ضرایب شش‌گانه فوق می‌توان از نرم‌افزارهای نامبرده استفاده کرد.

$$\sum_{i=1}^n E^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - a - bN_i - cW_i - dN_i^2 - eW_i^2 - fN_iW_i)^2 \quad (6-8)$$

$$\frac{\partial \sum E^2}{\partial a} = \frac{\partial \sum E^2}{\partial b} = \dots = \frac{\partial \sum E^2}{\partial f} = 0 \quad (7-8)$$

و یا با استفاده از دو معادله (۶-۸) و (۷-۸) شش معادله زیر را حل نمود که از دو معادله فوق استخراج شده‌اند (n تعداد داده‌ها).

$$na + b \sum N + c \sum W + d \sum N^2 + e \sum W^2 + f \sum NW = \sum Y_i \quad (8-8)$$

(9-8)

$$a \sum N + b \sum N^2 + c \sum NW + d \sum N^3 + e \sum NW^2 + f \sum N^2 W = \sum NY_i \quad (10-8)$$

$$a \sum W + b \sum WN + c \sum W^2 N + d \sum N^2 W + e \sum W^3 + f \sum NW^2 = \sum WY_i \quad (11-8)$$

$$a \sum N^2 + b \sum N^3 + c \sum N^2 W + d \sum N^4 + e \sum N^2 W^2 + f \sum N^3 W = \sum N^2 Y_i \quad (12-8)$$

$$a \sum W^2 + b \sum W^2 N + c \sum W^3 + d \sum W^2 N^2 + e \sum W^4 + f \sum NW^3 = \sum W^2 Y_i \quad (13-8)$$

$$a \sum NW + b \sum N^2 W + c \sum W^2 N + d \sum N^3 W + e \sum W^3 N + f \sum N^2 W^2 = \sum WNY_i$$

تابع تولید و تولید جنبی (Marginal) برای کود نیتروژن و آب آبیاری در تعیین حداکثر سود به صورت زیر در می‌آید:

$$Y = a + b \times N + c \times W + d \times N^2 + e \times W^2 + f \times N.W \quad \text{تابع تولید} \quad (14-8)$$

$$Y = 1439/76 + 6/82N + 9/199W - 0/117N^2 - 0/012W^2 + 0/1013N.W \quad (R^2 = 0.969, R^2_{adj} = 0.958) \quad (15-8)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial W} = c - 2eW + fN = \frac{P_W}{P_C} \quad (16-8)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial N} = b - 2dN + fW = \frac{P_N}{P_C} \quad (17-8)$$

که P_W , P_N و P_C به ترتیب قیمت واحد نهاده آب و آبیاری، کود و فروش محصول است.

بر اساس تجزیه و تحلیل آماری صورت گرفته برای این تحقیق (توکل، ۱۳۸۳)، حد بهینه نیتروژن برای شرایط آبیاری گندم، مصرف ۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص است (جداول ۷-۱ تا ۷-۳). لذا پس از به دست آوردن تابع تولید و ضرایب آن، برای به دست آوردن سود خالص و حد سودآوری تیمارهای آبیاری، تنها سطح کودی N_{90} تحت تیمارهای آبیاری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. با این توضیح که اگر چه به کارگیری رقم آبی گندم برای وضعیت دیم توصیه نمی‌شود اما در صورت استفاده از آن میزان نیتروژن مصرفی برای شرایط دیم ۳۰ کیلوگرم در هکتار کفایت می‌کند. لذا در تحلیل هزینه‌ها و درآمدها، علاوه بر تیمار دیم با حد بهینه نیتروژن آزمایش (N_{90})، تیمار دیم با حد مطلوب نیتروژن در شرایط دیم (N_{30}) نیز ذکر شده است.

۸-۳ تابع درآمد خالص

هزینه‌ها شامل دو بخش هزینه‌های ثابت و هزینه‌های متغیر است. با توجه به این که بهینه‌سازی مصرف آب برای حد بهینه نیتروژن (N_{90}) صورت می‌گیرد، لذا هزینه‌های متغیر شرایط این تحقیق با ثابت ماندن میزان نیتروژن مصرفی (N_{90}) فقط شامل هزینه‌های مربوط به آب و آبیاری می‌شود. شکل عمومی تابع هزینه برای چنین شرایطی به صورت $C(w) = \alpha + \beta w$ است که α بیانگر هزینه‌های ثابت تولید و β بیانگر اثرات هزینه‌های آب و آبیاری است و تابع عمومی درآمد نیز برای شرایط این تحقیق به صورت زیر است:

$$NB = B(w) - C(w) = (Y_g P_1 + Y_s P_2) - (C_1 + \beta w) = A - 3000 w \quad (18-8)$$

در این معادله $NB, B(w), C(w), Y_g, Y_s, P_1, P_2, \beta, A$ و w به ترتیب بیانگر درآمد خالص، درآمد ناخالص، هزینه‌های تولید، عملکرد دانه، عملکرد کاه و کلش، قیمت فروش دانه (۱۲۲۵ ریال بر کیلوگرم متوسط قیمت سال‌های ۱۳۷۹ و ۸۰)، قیمت فروش کاه و کلش (۱۸۵ ریال بر کیلوگرم)، هزینه‌های ثابت تولید، هزینه واحد آب مصرفی، درآمد خالص بدون هزینه‌های آب و آبیاری و عمق آب مصرفی است.

جدول ۸-۱ هزینه‌های مختلف کاشت، داشت و برداشت برای هر هکتار گندم دیم بدون احتساب هزینه‌های آب و آبیاری

شرح عملیات	هزینه‌ها (ریال در هکتار)
کاشت (شخم، دیسک، بذر، کود زمان کاشت و کاشت با بذر کار)	۳۵۱۸۷۵
داشت (کود سرک، کارگر برای کودپاشی و سمپاشی)	۱۲۲۰۰۰
برداشت	۱۰۰۰۰۰
مجموع هزینه‌های تولید برای سال زراعی ۸۰-۱۳۷۹	۵۷۳۸۷۵
متوسط هزینه‌های سالانه تولید	۶۰۲۵۶۹

هزینه‌های ثابت تولید گندم دیم بدون احتساب هزینه‌های آب و آبیاری و برای سطح کودی ۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص در جدول (۸-۱) نشان داده شده است. هزینه‌های مختلف کاشت، داشت و برداشت بر اساس پرسشنامه‌های تکمیل شده در سطح مزارع زارعین، سالانه به طور متوسط ده درصد افزایش می‌یابد. لذا اگر به هزینه سال زراعی ۸۰-۱۳۷۹ به میزان ۵ درصد اضافه شود، مجموع هزینه‌های تولید برای متوسط دو سال آزمایش به دست خواهد آمد. بنابراین جمع کل هزینه‌های تولید بدون احتساب هزینه‌های آب و آبیاری برابر ۶۰۲۵۶۹ ریال خواهد شد.

چون هزینه‌های آب و آبیاری بسته به نوع منبع تأمین آب و سیستم آبیاری متفاوت است، لذا جدول (۸-۲) بر اساس ۳۰۰ ریال برای هر متر مکعب آب مصرفی استحصالی از چاه اراضی مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم مراغه، تنظیم شده است.

این هزینه شامل هزینه چاه (حفر، لوله‌گذاری، آزمایش پمپاژ و گالری‌های افقی در منطقه که محدودیت لایه غیر قابل نفوذ دارد) با عمر مفید ۳۰ سال، موتور پمپ و الکتروموتور (با عمر مفید ۲۰ سال)، برق‌رسانی هوایی و ترانس (با عمر مفید ۳۰ سال)، طراحی و نصب سیستم آبیاری بارانی کلاسیک (با عمر مفید ۲۰ سال) و هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری است. قیمت واحد آب مصرفی پس از تبدیل هزینه‌ها به ارزش کنونی اقساط سالانه (معادل هزینه یکنواخت سالانه و $i = 15/5\%$) و بر اساس عمر مفید هر بخش از سازه‌ها برابر ۳۰۰ ریال برای هر متر مکعب آب (۳۰۰۰ ریال برای هر میلی‌متر عمق آب مصرفی) به دست می‌آید. با تغییر هزینه‌های آب و آبیاری تا حد سودآوری در هر یک از تیمارها، تغییری در انتخاب گزینه مطلوب ایجاد نمی‌شود. مفهوم حد سودآوری این است که اگر قیمت آب بیش از آن میزان باشد سود ناشی از افزایش تولید با تغییر مدیریت آبیاری برابر با هزینه‌های آب و آبیاری خواهد شد. قابل ذکر است که با توجه به تغییرات نرخ تورم، پیش‌بینی آن برای سنوات آتی مشکل است. لذا در مقایسه تیمارها و با توجه به حد سودآوری تیمارها در شرایط فعلی این قیمت قابل قبول است. آنچه مهم است این است که با تغییر هزینه‌های آب و آبیاری تا حد سودآوری در هر یک از تیمارها، تغییری در انتخاب گزینه مطلوب ایجاد نمی‌شود. حد سودآوری برای تیمارهای ۲۲۰ میلی‌متر (آبیاری کامل)، ۱۶۰ و ۱۰۰ میلی‌متر زمانی است که هزینه‌های آب و آبیاری برای هر متر مکعب آب مصرفی به ترتیب برابر ۲۵۶۵، ۲۶۹۰ و ۱۴۸۹ ریال شود.

از طریق بودجه‌بندی جزئی، تعیین تابع درآمد آبیاری و با استفاده از تحلیل نهایی نسبت اختلاف منافع به اختلاف هزینه‌ها (جدول ۸-۲)، تیمار برتر انتخاب می‌شود. بدیهی است که پس از مرتب کردن نزولی تیمارها بر اساس منافع خالص ابتدا گزینه‌های تحت تسلط حذف می‌گردند. منظور از گزینه‌های تحت تسلط، تیمارهایی است که نسبت به یک تیمار برتر، منافع خالص کمتر ولی هزینه بیشتری دارند و در نتیجه مطلوبیت نداشته و از مقایسه کنار گذاشته می‌شوند. بر این اساس، تیمار دیم با مصرف ۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص و نیز تیمار (۲) ۱۰۰ در مقایسه با تیمار برتر (۲) ۱۶۰ حذف می‌گردند.

جدول ۸-۲ هزینه‌ها، درآمدها و سود خالص (ریال در هکتار) تیمارهای

مختلف آبیاری برای حد بهینه نیتروژن (N_{90})

تیمارهای آبیاری	عملکرد دانه (kg/ha)	کاه و کلش (kg/ha)	WP_1	درآمد ناخالص (B)	هزینه‌ها (C)	درآمد خالص (NB)
دیم (با N_{30})	۱۴۴۶	۴۷۰۰	-	۲۶۴۰۸۵۰	۵۴۲۵۶۸	۲۰۹۸۲۸۱
دیم	۱۱۷۸	۳۹۷۰	-	۲۱۷۷۵۰۰	۶۰۲۵۶۹	۱۵۷۴۹۳۱
۱۰۰	۲۷۱۳	۴۶۸۶	۱۵/۳۵	۴۱۹۰۳۳۵	۹۰۲۵۶۹	۳۲۸۷۷۶۶
۱۶۰	۴۴۶۷	۸۲۸۱	۲۰/۵۶	۷۰۰۴۰۶۰	۱۰۸۲۵۶۹	۵۹۲۱۴۹۱
۲۲۰	۵۵۷۲	۸۲۰۰	۱۹/۹۷	۸۳۴۲۷۰۰	۱۲۶۲۵۶۹	۷۰۸۰۱۳۱
۱۰۰ (۲)	۵۹۶۹	۱۰۳۰۹	-	۹۲۱۸۷۳۷	۱۹۸۵۶۵۱	۷۲۳۳۰۸۶
۱۶۰ (۲)	۶۱۴۲	۱۱۳۸۶	-	۹۶۳۰۵۸۳	۱۴۸۸۵۳۲	۸۱۴۲۰۵۰

یکی از فواید و اثرات کم آبیاری در حالت محدودیت آب و وجود آب قابل دسترس ثابت، امکان افزایش سطح تحت آبیاری بهینه با آب صرفه‌جویی شده است. لذا مفهوم گزینه‌های (۲) ۱۰۰ و (۲) ۱۶۰ این است که در شرایط وجود مقدار آب ثابت برابر با آبیاری کامل (۲۲۰ میلی‌متر) با اعمال تیمارهای ۱۰۰ و ۱۶۰ میلی‌متر آب مصرفی، سطح زیر کشت این مدیریت‌ها به جای یک هکتار به ترتیب ۲/۲ و ۱/۳۷۵ هکتار خواهد رسید. یعنی برای این تیمارها به ترتیب ۱/۲ و ۰/۳۷۵ هکتار به سطح تحت آبیاری افزوده می‌شود. لذا در برآورد عملکردها، هزینه‌ها و درآمدها سطوح جدید منظور می‌شود. میزان درآمد به دست آمده برای تیمارهای آبیاری نشان می‌دهد که در شرایط وجود مقدار ثابت آب (برابر آبیاری کامل) به همراه افزایش سطح زیر کشت بالاترین میزان درآمد ناخالص (۹۶۳۰۵۸۳ ریال در هکتار) مربوط به تیمار ۱۶۰ درصد آبیاری کامل است.

از میان تیمارهای آبیاری، کاربرد ۱۰۰ میلی‌متر آب مصرفی، اگر چه نسبت به شرایط دیم حدود ۱۰۰ درصد افزایش عملکرد نشان می‌دهد، اما ریسک و خطرپذیری آن زیاد است، ضمن اینکه بهره‌وری از آب مصرفی آن در اضافه عملکرد نسبت به شرایط دیم (WP_1) برابر ۱۵/۳۵ کیلوگرم بر میلی‌متر و سود خالص و نسبت درآمد ناخالص به هزینه‌های آن (B/C) در مقایسه با بقیه تیمارها کمتر می‌باشد. ولی با

کاربرد ۱۶۰ میلی‌متر یعنی کاهش ۲۷/۳ درصد آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل، اگرچه ۱۹/۸ درصد افت عملکرد در واحد سطح اتفاق می‌افتد، اما بالاترین میزان بهره‌وری از آب مصرفی در اضافه عملکرد نسبت به شرایط دیم (۲۰/۵۶ کیلوگرم بر میلی‌متر) را دارا بوده و از نظر نسبت B/C تفاوت چندانی با آبیاری کامل ندارد. در شرایط طرح توسعه و امکان افزایش سطح زیر کشت و عدم محدودیت زمین، میزان سود خالص بیشتر از تیمار ۱۶۰ میلی‌متر مصرف آب به دست می‌آید.

در تحلیل نهایی نسبت اختلاف منافع به اختلاف هزینه‌ها نیز نشان داده می‌شود که تیمار ۶۶ درصد آبیاری کامل نسبت به بقیه تیمارها، تیمار مسلط می‌باشد، ضمن اینکه ۱۰/۲ درصد میزان عملکرد دانه، ۱۵ درصد سود خالص و ۳۷/۵ درصد به سطح تحت آبیاری اضافه می‌شود. البته این نتیجه‌گیری برای شرایط آبیاری و باران فصل رشد پژوهش مربوطه صادق است.

نتیجه این تحقیق در تأیید نظر محققین دیگر می‌باشد. هانگ و میلر (Hang and Miller, 1983) طی تحقیقی نشان دادند که با کاهش ۵۰-۴۰ درصد آب مصرفی گندم نسبت به آبیاری کامل، افت عملکرد ناچیز بوده است. در کم آبیاری گندم، سود خالص در واحد سطح، ۲۵ درصد کمتر از آبیاری کامل، ولی سود خالص به ازای واحد آب مصرفی ۱۴/۵ درصد بیشتر از آبیاری کامل بود (English, 1990). بیشترین میزان سود خالص به ازای واحد آب مصرفی نیز در حد بهینه کم آبیاری به دست آمد (English and Raja, 1996; English et al., 1990). همچنین با ۴۳ درصد کاهش آب مصرفی گندم، ضمن داشتن سود خالصی معادل با آبیاری کامل، فقط ۱۵/۵ درصد کاهش عملکرد به وجود آمد (English and Raja, 1996; FAO, 2002). طی پژوهشی گزارش شد که با ۳۹ درصد کاهش آب مصرفی گندم، سود خالص ۴۹ درصد بیشتر از آبیاری کامل به دست آمد (English and Raja, 1996). سودآوری کم آبیاری از طریق کاهش هزینه‌های تولید در بخش سرمایه‌گذاری و هزینه‌های ثابت، هزینه‌های مستقیم آبیاری (انرژی، نیروی کار، نگهداری و غیره) و هزینه‌های کود شیمیایی، آفت‌کش‌ها و عملیات کاشت، داشت و برداشت ناشی می‌شود (English and Nuss, 1982).

۸-۴ نتیجه گیری

مزیت‌های نسبی به کارگیری مدیریت بهینه کم آبیاری یعنی کاربرد ۱۶۰ میلی‌متر آب مصرفی (کاهش ۲۷/۳ درصد آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل) شامل حصول «حداکثر سود به ازای واحد آب مصرفی»، «حداکثر تولید به ازای واحد آب مصرفی»، «افزایش سطح زیر کشت»، «کاهش هزینه‌های تولید» و «بهبود کیفیت محصول» می‌باشد. در شرایط خاص کشور ما که با محدودیت جدی منابع آب و فراوانی نسبی زمین مواجه است، به کارگیری و ترویج علمی و هوشمندانه کم آبیاری اهمیت فوق‌العاده‌ای پیدا می‌کند. بر این اساس و با توجه به نتایج به دست آمده، پیشنهاد می‌شود در طرح‌های توسعه منابع آب و سدسازی و در تدوین الگوی بهینه کشت و نیز در بخش انتقال، توزیع و بهره‌برداری، مدیریت کم آبیاری ملحوظ شود. چرا که با توجه به حد سودآوری کم آبیاری، این مقوله از ابعاد زراعی، تحلیل آماری و اقتصادی توجیه‌پذیر (توکلی و همکاران، ۱۳۸۲) و مقرون به صرفه است و ضمن افزایش بهره‌وری از آب، نقشی مؤثر در پایداری تولید و درآمد مطمئن دارد.

فصل ۹

بهینه‌سازی کم آبیاری و نیتروژن کاربردی

۹-۱ مقدمه

افزایش جمعیت، افزایش تقاضا برای محصولات کشاورزی و آب را به همراه دارد. برای افزایش تولید محصولات کشاورزی از آب و کود نیتروژن استفاده می‌شود. گسترش صنعت و نیاز بیشتر به آب شرب باعث کاهش سهم‌بری آب کشاورزی می‌شود. عمده آبی که در کشاورزی به کار برده می‌شود برای آبیاری گیاهان زراعی است که مقداری از آن در حین انتقال و مصرف در مزرعه تلف می‌گردد. بنابراین استفاده اقتصادی و بهینه از آب در مزرعه از راهبردهای مهم برنامه‌ریزی منابع آب می‌باشد.

عنصر نیتروژن نقش کلیدی در تولید محصولات کشاورزی ایفا می‌کند و در افزایش کمی و کیفی محصولات زراعی ضروری است، ولی میزان کاربرد آن ممکن است مطابق با نیاز گیاه نباشد و در مصرف آن زیاده‌روی گردد. در این صورت چنانچه کاربرد بی‌رویه نیتروژن همراه با مصرف بیش از حد آب آبیاری باشد منجر به شستشوی نیتروژن از خاک به آب‌های زیرزمینی شده و آلودگی آب را فراهم می‌آورد که پی‌آمدهای زیست محیطی دارد. بنابراین به تلفات نیتروژن نه تنها از نظر اقتصادی، نظیر کاهش محصول، بلکه از نظر آلودگی محیط زیست هم بایستی توجه خاصی مبذول گردد.

کاربرد بهینه آب آبیاری و نیتروژن به ویژه در مناطق خشک و نیمه خشک که با کمبود آب مواجه هستند از اهمیت خاصی برخوردار است. اعمال به موقع کم آبیاری و صرفه‌جویی در مصرف آب سبب کاهش آبتجویی نیتروژن و سایر مواد مغذی محلول

خاک از منطقه ریشه می‌شود. برای کاربرد نیتروژن در روش‌های مختلف آبیاری نیاز به مدیریت خاص از نظر زمان، مقدار و مکان کوددهی دارد (Howard et al., 1999). این پژوهشگران نشان دادند که با کاربرد نیتروژن در جویچه‌هایی که آبیاری نمی‌شوند (آبیاری جویچه‌ای یک در میان) می‌توان مقدار قابل توجهی از شستشوی نیتروژن از ناحیه ریشه جلوگیری نمود.

در پژوهشی که حسین و الجلود (Hussain and Al-Jaloud, 1998) در مورد اثرات متقابل مقادیر مختلف آب و نیتروژن بر میزان تولید و کارایی مصرف آب برای جو انجام دادند، نشان داده شد که کاربرد نیتروژن باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در کارایی مصرف آب شده است و کاربرد ۱۵۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار باعث افزایش تولید بهینه جو و کارایی مصرف آب می‌گردد. پژوهش‌هایی که توسط توکلی و اوئیس (Tavakkoli and Oweis, 2004)، توکلی و همکاران (Tavakoli et al., 2005) انجام شده نشان دادند که در شرایط کشت دیم گندم و با آبیاری تکمیلی، کاربرد ۶۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص کفایت نموده و مصرف نیتروژن بیشتر توصیه نمی‌شود. بنابراین با اعمال مدیریت صحیح تأمین نیتروژن و آب می‌توان بازده مصرف آب را افزایش داد. پنگ و لتی (Pang and Letey, 1998) مقادیر مختلف آب و نیتروژن برای تولید ذرت به کار بردند. نتیجه پژوهش آنها نشان داد که مقادیر زیاد آب آبیاری منجر به نفوذ عمقی بیشتر شده و در نتیجه باعث آبشویی نیتروژن و کاهش محصول شده است. از طرف دیگر کمبود آب و نیتروژن هم باعث کاهش محصول ذرت شده است. بنابراین از نظر اقتصادی مصرف آب آبیاری و نیتروژن بایستی بهینه شود. این بهینه‌سازی که در این فصل کتاب مورد تحلیل و بحث قرار می‌گیرد، توسط زندپارسا و سپاس‌خواه (۲۰۰۱) انجام شده است.

۲-۹ اصول نظری مسئله و کاربرد آن

محصول گیاه زراعی $y(W, N)$ تابعی از مقدار آب آبیاری و نیتروژن به کار رفته می‌باشد. هزینه تولید محصول $c(W, N)$ نیز شامل هزینه‌های ثابت و متغیر آب و

نیتروژن است. هزینه‌های ثابت شامل هزینه تهیه زمین، کاشت بذر، مدیریت مزرعه و هزینه برداشت و انتقال محصول می‌باشد. درآمد خالص حاصل از کاربرد آب و نیتروژن در مزرعه به مساحت A چنین محاسبه می‌شود:

$$I = A \times i(W, N) \quad (۱-۹)$$

که در آن $i(W, N)$ درآمد خالص در واحد سطح مزرعه، A مساحت مزرعه و I درآمد خالص کل مزرعه می‌باشد. تابع درآمد خالص در واحد سطح مزرعه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$i(W, N) = P \times y(W, N) - c(W, N) \quad (۲-۹)$$

که در آن P قیمت واحد محصول، $c(W, N)$ تابع هزینه تولید محصول در واحد سطح و $y(W, N)$ تابع تولید محصول در واحد سطح می‌باشد. مساحت مزرعه فاریاب نیز تابعی از مقدار آب آبیاری است. در شرایطی که محدودیت آب وجود دارد زارع ممکن است که مساحت زمین را متناسب با میزان آب موجود زیر کشت ببرد بنابراین مساحت مزرعه فاریاب به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A = \frac{W_T}{W} \quad (۳-۹)$$

که در آن W مقدار آب آبیاری کاربردی (متر) و W_T کل آب موجود (متر-هکتار) می‌باشد.

مقادیر آب و نیتروژن کاربردی که موجب حداکثر شدن محصول می‌شود (W_m و N_m) با مشتق‌گیری از تابع تولید محصول به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial y(W, N)}{\partial W} = 0 \quad (۴-۹)$$

$$\frac{\partial y(W, N)}{\partial N} = 0 \quad (۵-۹)$$

مقادیر W و N حاصل از حل معادلات (۳-۹) و (۴-۹) به ترتیب W_m و N_m می‌باشد.

در حالتی که آب محدود باشد، مقدار آب و نیتروژن کاربردی برای حداکثر کردن درآمد با مشتق‌گیری تابع تولید محصول نسبت به W و N و برابر صفر قرار دادن آنها به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial I}{\partial W} = A \cdot \frac{\partial i(W, N)}{\partial W} + i(W, N) \cdot \frac{\partial A}{\partial W} = 0 \quad (۶-۹)$$

$$\frac{\partial I}{\partial N} = A \cdot \frac{\partial i(W, N)}{\partial N} + i(W, N) \cdot \frac{\partial A}{\partial N} = 0 \quad (۷-۹)$$

وقتی که اثرات آلودگی نیتروژن در محیط زیست منظور نشود (یعنی که کاربرد نیتروژن محدودیتی نداشته باشد)، در این صورت $\frac{\partial A}{\partial N}$ برابر صفر خواهد شد. البته این حالت در شرایط محدودیت آب که باعث کاهش نفوذ عمقی در مزرعه می‌شود نیز ممکن است صادق باشد. وقتی که زمین محدود باشد، مقدار مساحت زمین ثابت است. لذا می‌توان $\frac{\partial A}{\partial N} = 0$ در نظر گرفت.

بنابراین مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی به ترتیب از معادلات زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\partial i(W, N)}{\partial W} = 0 \quad (۸-۹)$$

$$\frac{\partial i(W, N)}{\partial N} = 0 \quad (۹-۹)$$

مقادیر آب و نیتروژن کاربردی که با حل معادلات (۸-۹) و (۹-۹) به دست می‌آیند به ترتیب W_1 و N_1 (محدودیت زمین) نامیده می‌شوند.

وقتی که آب محدود باشد، مقدار مساحت زمین تابعی از آب آبیاری موجود (W) می‌باشد. از طرف دیگر بدون محدودیت در کاربرد نیتروژن، $\frac{\partial A}{\partial N}$ برابر صفر می‌شود.

بنابراین مقادیر بهینه W و N از معادلات (۳-۹)، (۶-۹) و (۷-۹) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$W \cdot \frac{\partial i(W, N)}{\partial W} = i(W, N) \quad (۱۰-۹)$$

$$\frac{\partial i(W, N)}{\partial N} = 0 \quad (۱۱-۹)$$

معادله (۱۱-۹) مشابه معادله (۹-۹) می‌باشد و نشان می‌دهد که با مقدار مساوی آب کاربردی، مقدار بهینه نیتروژن در شرایط محدودیت زمین و آب برابرند.

۳-۹ داده‌های تحلیل

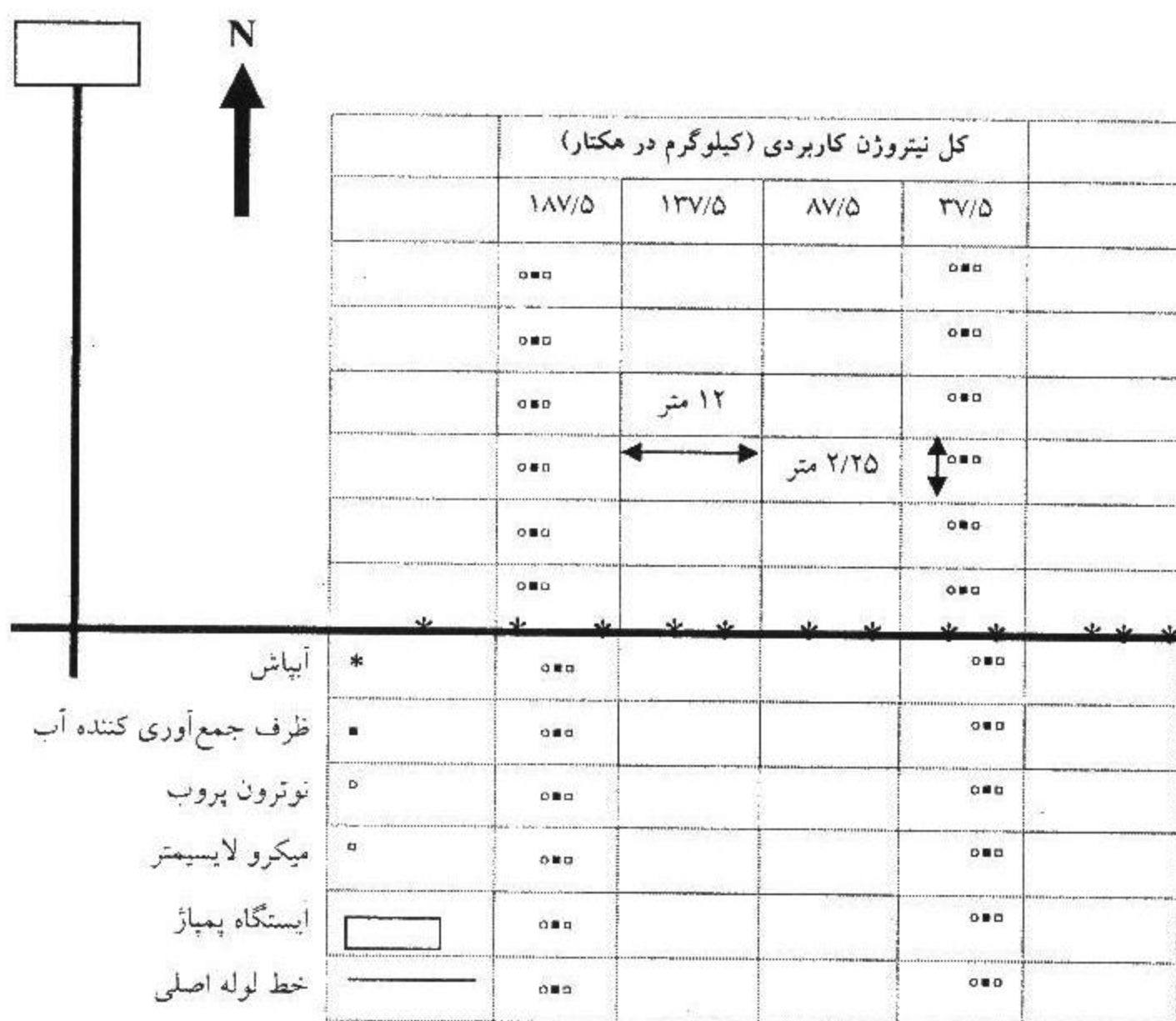
داده‌های تحلیل از پژوهشی که توسط زندپارسا و سپاسخواه (۲۰۰۱) گزارش شده گرفته شده است. در این پژوهش، ذرت در ۲۲ ردیف به فاصله ۰/۷۵ متر و به طول ۷۲ متر در ایستگاه پژوهشی باجگاه، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز در ۳۰ اردیبهشت ۱۳۷۸ (۲۰ ماه مه سال ۱۹۹۹) کاشته شد. این ایستگاه در عرض جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۶ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۲ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۸۵۰ متر از سطح دریا واقع شده است. این مزرعه در تاریخ ۲۲ خرداد تنک شده و جمعیت گیاهی به ۶۶۶۶۶ بوته در هکتار رسید. مقدار بارش فصل رشد ناچیز بوده و میانگین سالانه تبخیر از تشت کلاس A ۱۹۴۱ میلی‌متر می‌باشد. این مزرعه با روش آبیاری بارانی خطی آبیاری شد. فاصله آبپاش‌ها روی خط ۶ متر منظور گردید. فسفر به صورت فسفات آمونیم به میزان ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار قبل از کشت به خاک اضافه گردید. تیمار نیتروژن به صورت اوره به میزان صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار قبل از کشت به خاک داده شد. نحوه قرار گرفتن کرت‌های آزمایشی در روش آبیاری بارانی خطی در شکل (۱-۹) نشان داده شده است. مقدار آب باریده شده در این روش با چیدن چهار ردیف قوطی جمع‌آوری آب در جهت عمود بر خط لوله آبیاری به فاصله ۲/۳۵ متر از یکدیگر، اندازه‌گیری شد. در هر طرف خط لوله آبیاری شش تیمار آبیاری در نظر گرفته شد.

آبیاری با دور ۷ روزه انجام شد و تا ۲۳ شهریور ادامه یافت. آبیاری‌های اول و دوم مزرعه با دو خط لوله آبیاری بارانی متداخل انجام شد تا آبیاری به طور یکنواخت انجام شده باشد. سپس از آبیاری سوم تا هفدهم، آبیاری با یک خط لوله مستقر در وسط مزرعه انجام شد. بنابراین تیمارهای شش گانه آبیاری در طرفین خط لوله، مقادیر متفاوتی آب دریافت کردند که در جدول (۹-۱) نشان داده شده است.

جدول ۹-۱ مقادیر آب آبیاری در تیمارهای مختلف آبیاری

تیمارهای سمت شمال	مقدار آب (میلی‌متر)	تیمارهای سمت جنوب	مقدار آب (میلی‌متر)
۱	۱۱۵۹	۱	۱۲۳۳
۲	۹۸۲	۲	۹۳۸
۳	۸۷۲	۳	۷۹۴
۴	۷۶۷	۴	۷۴۲
۵	۶۸۶	۵	۶۴۱
۶	۴۵۴	۶	۴۳۸

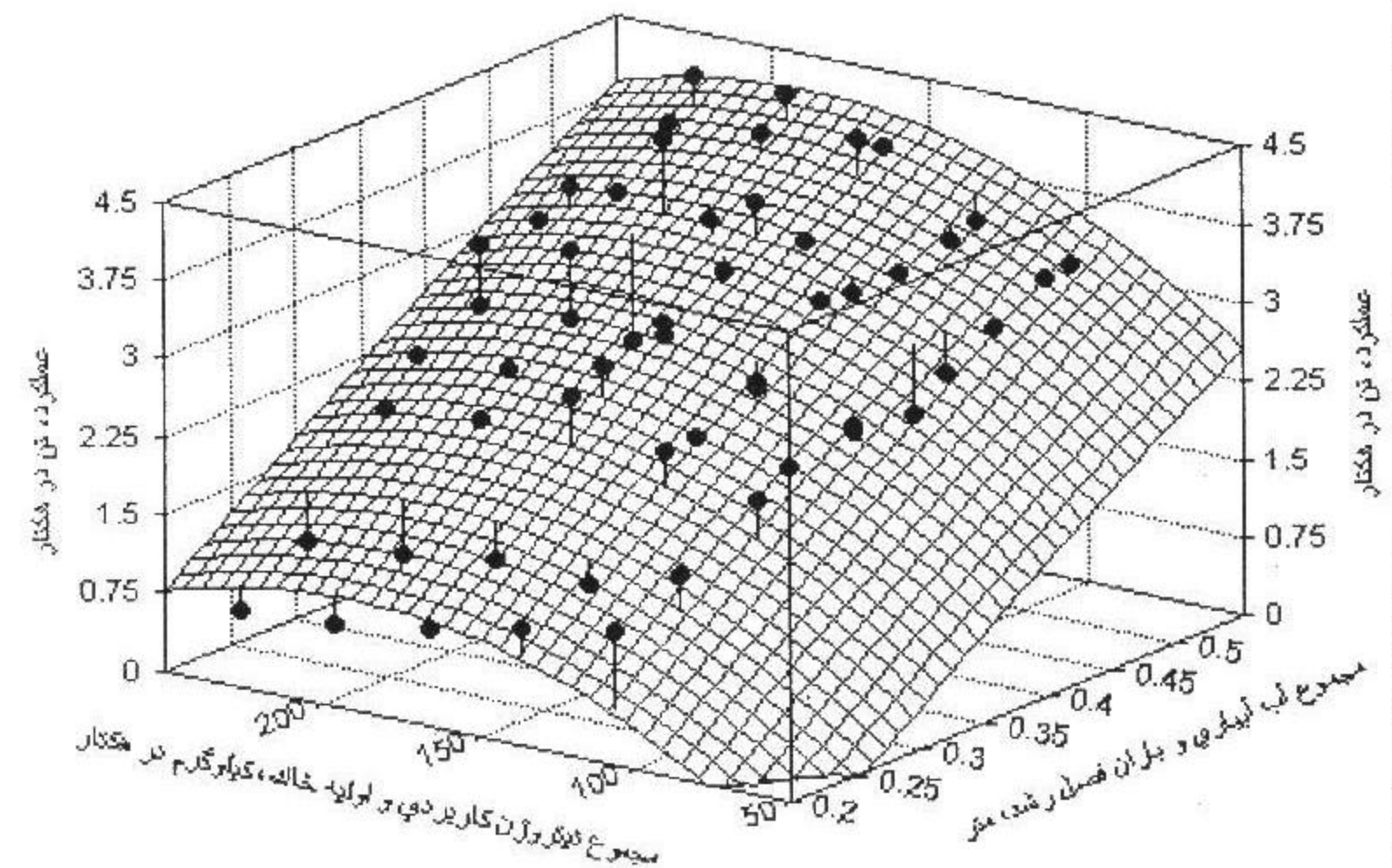
بافت خاک لوم سیلتی رسی بود. میزان نیتروژن نیتراسته خاک قبل از کاشت در اعماق ۰-۳۰ و ۳۰-۶۰ سانتی‌متر اندازه‌گیری شد و مقدار آن به طور میانگین $12/6 \pm 54/6$ کیلوگرم در هکتار برآورد شد. سرانجام در تاریخ ۴ آبان محصول ذرت در مرکز هر کرت به طول ۸ متر برداشت و مقدار آن با رطوبت ۱۵/۵ درصد تعیین گردید.



شکل ۹-۱ آرایش پژوهش

۹-۴ تجزیه و تحلیل نتایج

مقدار محصول دانه ذرت در مقادیر مختلف آب کاربردی و نیتروژن کاربردی به اضافه نیتروژن خاک در شکل (۹-۲) ارائه شده است.



شکل ۹-۲ مقادیر اندازه‌گیری شده (نقاط) و پیش‌بینی شده (رویه) عملکرد گندم در برابر آب آبیاری و باران فصل رشد و نیتروژن اولیه و مصرفی

۹-۴-۱ تابع تولید محصول

با استفاده از روش رگرسیون خطی چند متغیره تابع تولید محصول به صورت زیر به دست آمد:

(۹-۱۲)

$$Y(W, N) = a_0 + a_1W + a_2W^2 + a_3(N + N_r) + a_4(N + N_r)^2 + a_5W(N + N_r) + a_6W(N + N_r)^2 + a_7W^2(N + N_r) + a_8W^2(N + N_r)^2$$

که در آن $Y(W, N)$ میزان محصول دانه (تن در هکتار)، N و N_r به ترتیب نیتروژن کاربردی و موجود در خاک (کیلوگرم در هکتار) و a_0 الی a_8 ضرایب معادله می‌باشند که به همراه آماره‌های معادله در جدول (۹-۳) ارائه شده‌اند.

۹-۴-۲ تابع هزینه تولید

تابع هزینه تولید به میزان آب و نیتروژن کاربردی وابسته است و به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$c(W, N) = c_0 + c_1W + c_2N \quad (۹-۱۳)$$

که در آن c_0 هزینه ثابت تولید محصول بدون منظور کردن آب و نیتروژن کاربردی است (ریال در هکتار)، c_1 هزینه یک واحد آب کاربردی (ریال بر متر در هکتار) و c_2 هزینه یک واحد نیتروژن کاربردی (ریال بر کیلوگرم در هکتار) است. مقدار c_0 برابر ۱۵۰۰۰۰ ریال در هکتار، مقدار c_1 برابر ۱۵۵۵۰۰ ریال بر متر در هکتار (۱۵/۵۵ ریال بر متر مکعب) و مقدار c_2 نیز برابر ۶۲۵ ریال بر کیلوگرم در هکتار می‌باشد (بر مبنای قیمت‌های سال ۱۳۷۹).

جدول ۹-۳ ضرایب a_0 الی a_8 معادله تابع تولید محصول و آماره‌های آن

ضرایب	مقدار	آماره	مقدار
a_0	-۱/۸۶۲	ضریب تعیین	۰/۶۰
a_1	۶/۰۳۸۶	انحراف معیار	۱/۹۰
a_2	-۳/۵۸۰	تعداد مشاهدات	۴۶
a_3	-۰/۱۷۸	سطح احتمال (p)	$2/23 * 10^{-10}$
a_4	۰/۰۰۰۵		
a_5	۰/۵۷۳۳		
a_6	-۰/۰۰۱۴۸		
a_7	-۰/۳۰۲۱		
a_8	۰/۰۰۰۸۰۶		

مقادیر c_1 و c_2 قبلاً ارائه شده و مقدار P قیمت محصول به نرخ سال ۱۳۷۹ برابر ۱۰۰۰۰۰۰ ریال در هر تن می‌باشد. معادلات (۹-۱۶) و (۹-۱۷) به روش نیوتون - رافسون برای مقادیر W_1 و N_1 حل شدند و مقادیر آنها به ترتیب برابر ۰/۹۹ متر و ۲۱۲ کیلوگرم در هکتار به دست آمد.

تغییرات مقادیر W_1 و N_1 در ارتباط با قیمت‌های آب و نیتروژن در شکل‌های (۹-۳ الف و ب) ارائه شده است. وقتی که قیمت یک متر مکعب آب (c_1) و یک کیلوگرم نیتروژن افزایش یابد (بیش از ۱۰۰۰ ریال بر کیلوگرم)، مقادیر W_1 و N_1 کاهش می‌یابد. برای مثال، زمانی که مقادیر c_1 و c_2 به ترتیب ۱۰۰ ریال بر متر مکعب و ۵۰۰۰۰ ریال بر کیلوگرم باشد، مقادیر W_1 و N_1 به ترتیب ۰/۹۳ متر و ۶۷ کیلوگرم در هکتار می‌شود. در این حالت مقدار W_1 نسبت به قیمت آب نسبتاً حساس است ولی N_1 نسبت به قیمت آب حساسیت زیادی ندارد. این دو پارامتر نسبت به قیمت نیتروژن تا حد ۱۰۰۰۰ ریال بر کیلوگرم حساسیت چندانی ندارد.

۹-۴-۵ شرایط محدودیت آب

مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی در شرایط محدودیت آب (W_w) و (N_w) با جای‌گذاری معادلات (۹-۱۲) و (۹-۱۳) در معادلات (۹-۱۰) و (۹-۱۱) به صورت زیر به دست می‌آید:

(۹-۱۸)

$$P[a_3 + 2a_4(N_w + N_r) + a_5w + 2a_6W_w(N_w + N_r) + a_7W_w^2 + 2a_8W_w^2(N_w + N_r)] - c_2 = 0$$

(۹-۱۹)

$$P[a_2W_w^2 - a_3(N_w + N_r) - a_4(N_w + N_r)^2 + a_7W_w^2(N_w + N_r) + a_8W_w^2(N_w + N_r)^2] + c_0 + c_2N_w = 0$$

۹-۴-۳ مقادیر بهینه آب و نیتروژن

بر اساس معادلات (۹-۴) و (۹-۵) مقادیر W_m و N_m به ترتیب از معادلات زیر تعیین می‌شوند:

$$a_1 + 2a_2W_m + a_5(N_w + N_r) + a_6(N_m + N_r)^2 + 2a_7W_m(N_m + N_r) + 2a_8W_m(N_m + N_r)^2 = 0 \quad (۹-۱۴)$$

$$a_3 + 2a_4(N_m + N_r) + a_5W_m + 2a_6W_m(N_m + N_r) + a_7W^2 + 2a_8W_m^2(N_m + N_r) = 0 \quad (۹-۱۵)$$

با جای‌گذاری ضرایب معادله (۹-۱۲) در معادلات (۹-۱۴) و (۹-۱۵)، این معادلات با روش نیوتون - رافسون حل شدند و مقادیر W_m و N_m (مقادیر آب و نیتروژن کاربردی برای حداکثر تولید محصول) به دست آمد که به ترتیب عبارتند از ۱ متر و ۲۱۲ کیلوگرم بر هکتار.

۹-۴-۴ شرایط محدودیت زمین

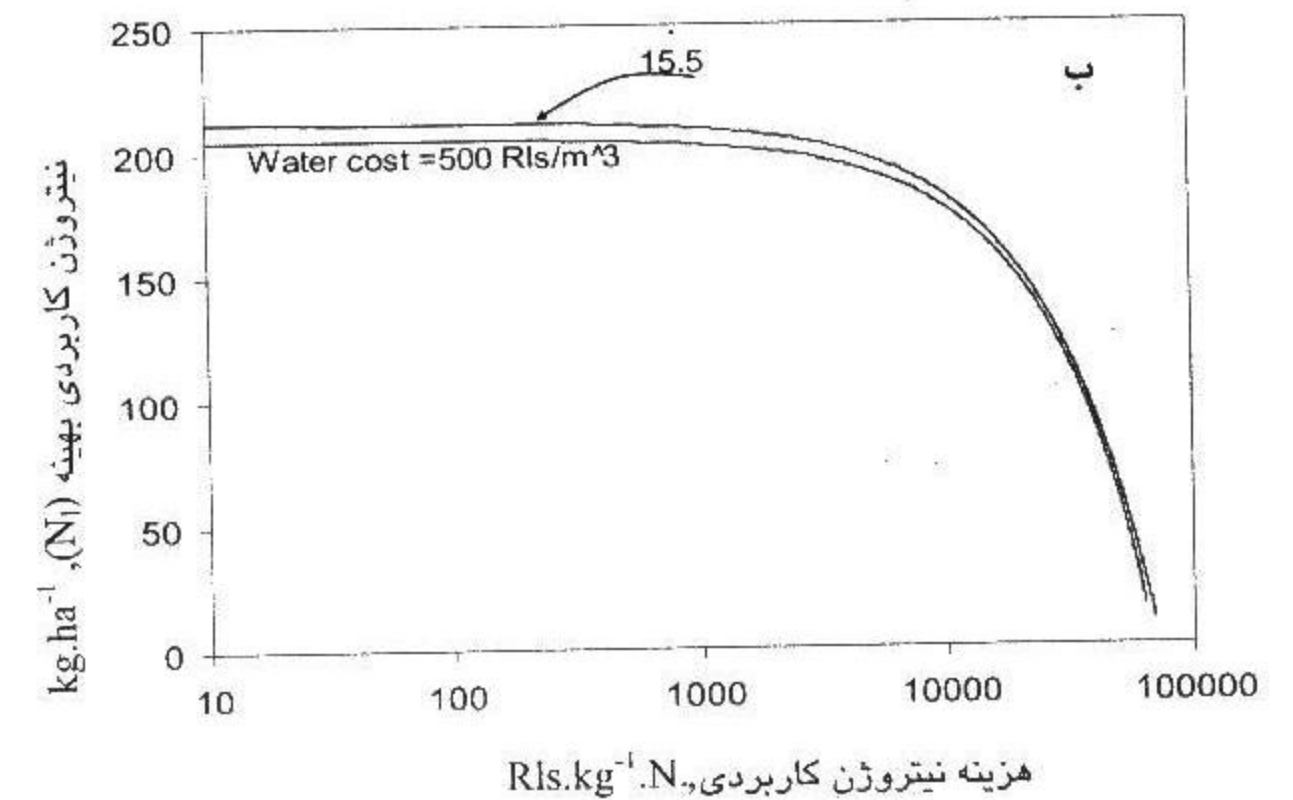
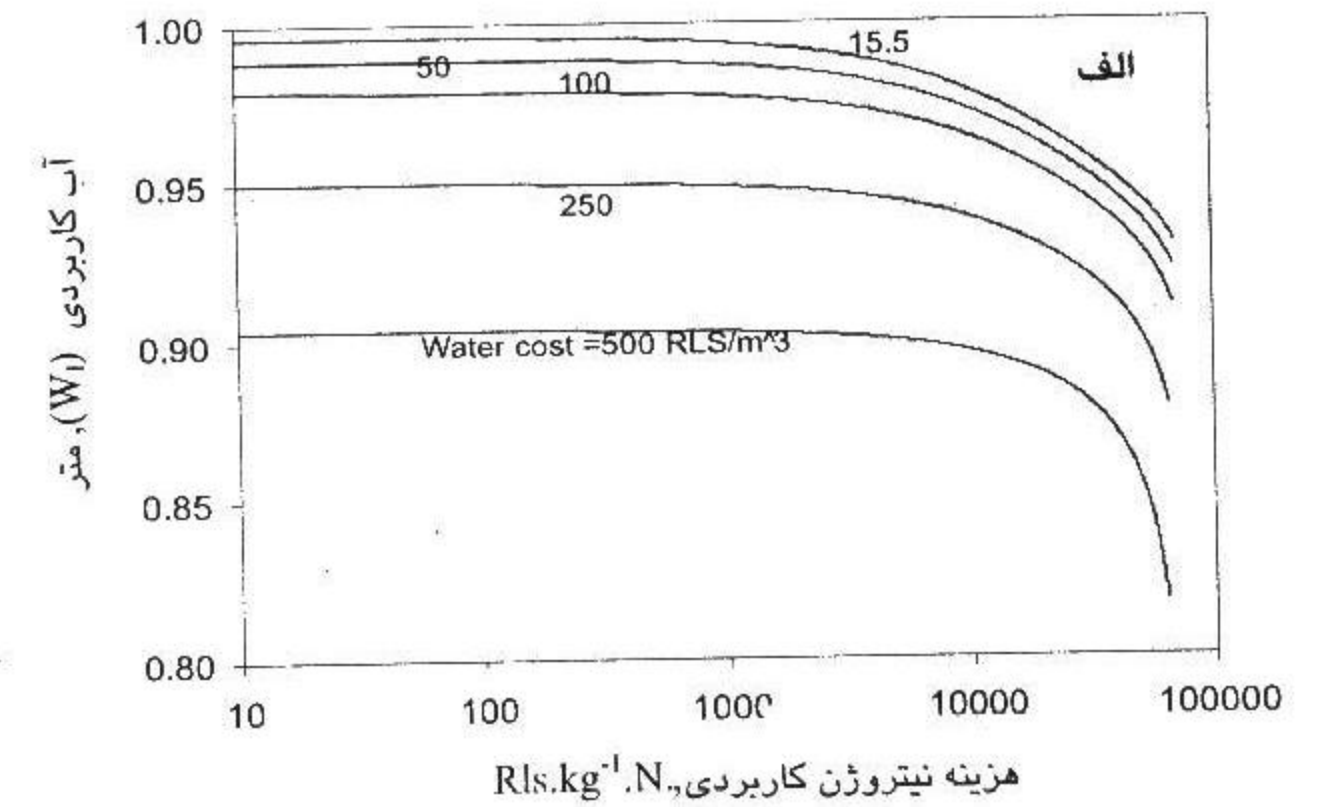
بر اساس معادلات (۹-۸) و (۹-۹) و با استفاده از معادلات (۹-۱۰) و (۹-۱۱) معادلات زیر برای محاسبه مقادیر آب و نیتروژن کاربردی در شرایط محدودیت زمین، W_1 و N_1 ارائه شده است:

(۹-۱۶)

$$P[a_1 + 2a_2W_1 + a_5(N_l + N_r) + a_6(N_l + N_r)^2 + 2a_7W_1(N_l + N_r) + 2a_8W_1(N_l + N_r)^2] - c_1 = 0$$

(۹-۱۷)

$$P[a_3 + 2a_4(N_l + N_r) + a_5W_1 + 2a_6W_1(N_l + N_r) + a_7W_1^2 + 2a_8W_1^2(N_l + N_r)] - c_2 = 0$$

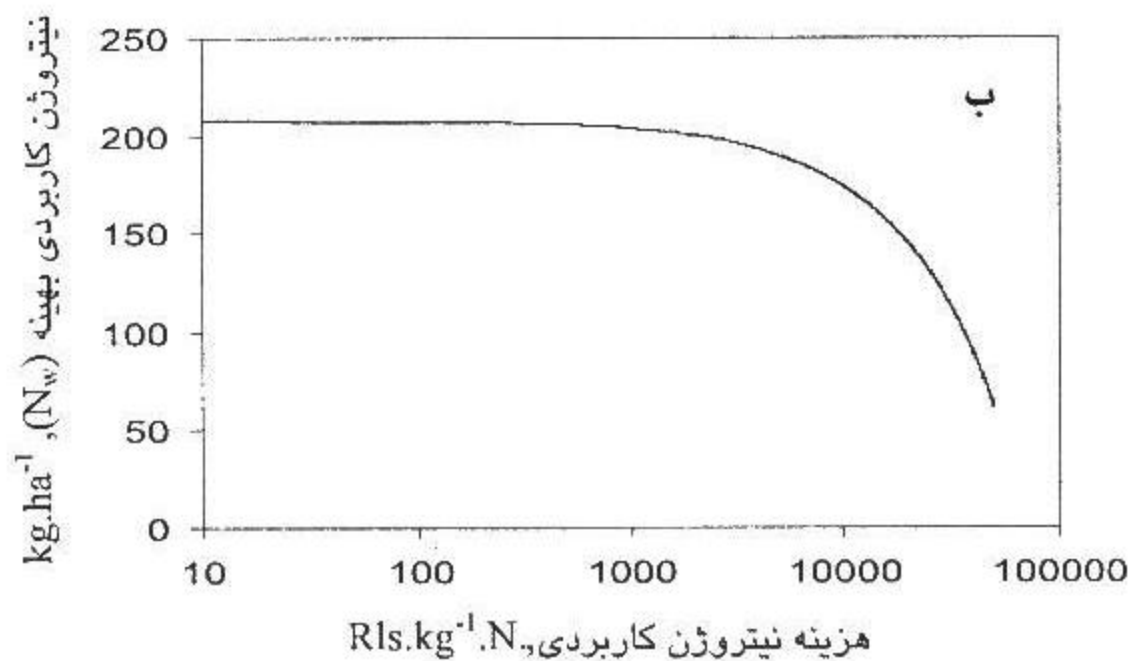
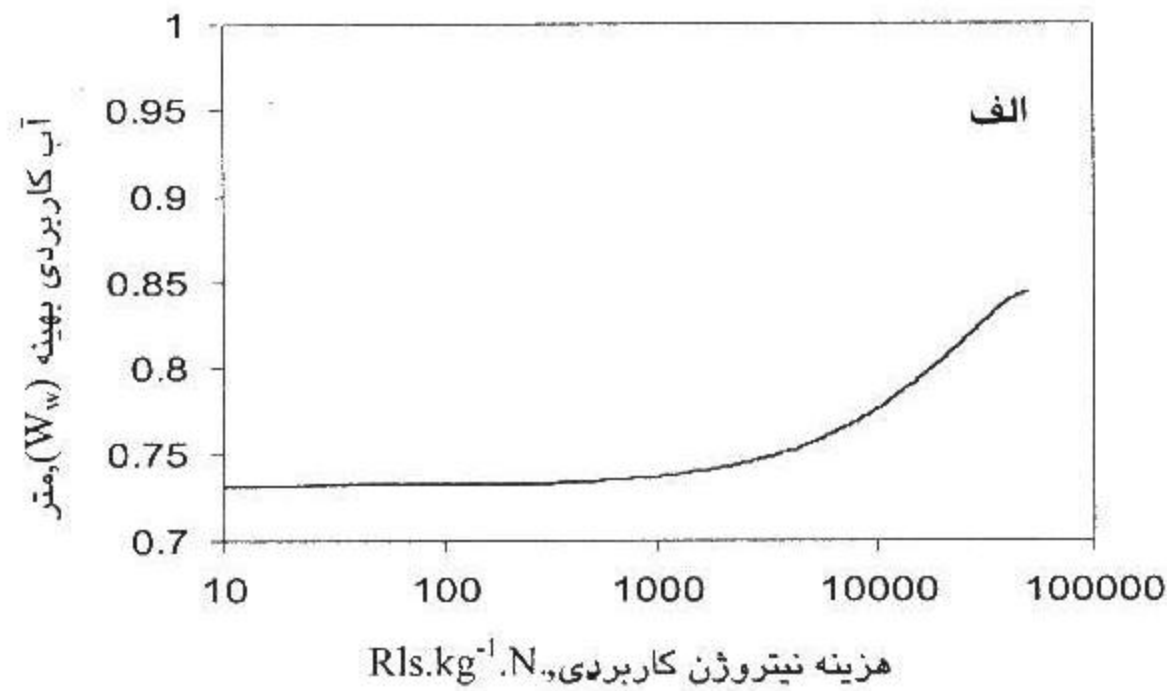


شکل ۹-۳ تغییرات حد بهینه آب مصرفی (W_1) و نیتروژن (N_1) در ارتباط با

هزینه‌هایشان وقتی که زمین محدود است.

الف) آب مصرفی بهینه (W_1) و ب) نیتروژن بهینه کاربردی (N_1)

معادلات (۹-۱۸) و (۹-۱۹) بر اساس مقادیر C_0 ، C_1 و C_2 که قبلاً ارائه شده با روش نیوتون-رافسون برای W_w و N_w حل شدند و مقادیر آنها به ترتیب برابر 0.735 متر و 20.6 کیلوگرم در هکتار برای قیمت‌های پایین آب و نیتروژن به دست آمد. مقادیر W_w و N_w فقط به قیمت نیتروژن وابسته بوده و تغییرات آنها در شکل‌های (۹-۴ الف و ب) نشان داده شده است.



شکل ۹-۴ تغییرات حد بهینه آب مصرفی (W_w) و نیتروژن (N_w) در ارتباط

با هزینه‌هایشان وقتی که زمین محدود است الف) آب مصرفی بهینه (W_w)

و ب) نیتروژن بهینه کاربردی (N_w)

با افزایش قیمت نیتروژن (C_2) به بیشتر از ۱۰۰۰ ریال بر کیلوگرم مقدار W_w افزایش می‌یابد (شکل ۴-۹ الف) ولی مقدار N_w کاهش می‌یابد (شکل ۴-۹ ب). مثلاً وقتی که مقدار C_2 برابر ۵۰۰۰۰ ریال بر کیلوگرم باشد در این صورت مقادیر W_w و N_w به ترتیب برابر ۰/۸۴ متر و ۶۱ کیلوگرم در هکتار خواهد شد.

۹-۵ تحلیل اقتصادی

بر اساس تابع تولید محصول (معادله ۹-۱۲) با مقدار آب و نیتروژن کاربردی به ترتیب ۱ متر و ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار، مقدار تولید دانه ذرت برابر ۸۲۲۰ کیلوگرم در هکتار خواهد شد. در حالی که با کاربرد ۲۱۲ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، میزان تولید دانه ذرت برابر ۱۳۵۰۰ کیلوگرم در هکتار به دست می‌آید. یعنی ۵۱۱۰ کیلوگرم در هکتار بیش از کاربرد ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن، محصول تولید خواهد شد. بنابراین معلوم می‌شود که به خاطر قیمت پایین نیتروژن، زارع از کاربرد نیتروژن بسیار منتفع خواهد شد. در قیمت‌های یارانه‌ای نیتروژن (کمتر از ۲۰۰۰ ریال بر کیلوگرم) مقادیر N_l و N_w برابر حداکثر مقادیر کاربردی (N_m) می‌باشد. قیمت نیتروژن در سال پایه محاسبه خیلی پایین (۶۲۵ ریال بر کیلوگرم) بود. بنابراین زارع تمایل دارد تا بیش از حداکثر مقدار مورد نیاز از آن استفاده کند (نوشاد و رونقی، ۱۳۷۸). البته بایستی توجه داشت که در این تحلیل اقتصادی هزینه‌های آلودگی هوا و آب زیرزمینی منظور نشده است و گرنه میزان بهینه نیتروژن کاربردی کمتر از حداکثر مقدار کاربردی آن خواهد شد. شکل‌های (۳-۹) و (۴-۹) نشان می‌دهند که با افزایش قیمت نیتروژن میزان کاربرد آن کاهش می‌یابد. در شرایط محدودیت زمین، با افزایش قیمت آب مقدار بهینه کاربردی آن (W_l) کاهش می‌یابد (شکل ۳-۹ الف). البته این نکته از معادلات (۹-۱۶) و (۹-۱۷) نیز قابل استنتاج است.

بر اساس معادلات (۹-۱۸) و (۹-۱۹) مقادیر آب و نیتروژن کاربردی در شرایط محدودیت آب (W_w و N_w) به قیمت آب وابسته نبوده و فقط تابعی از قیمت نیتروژن می‌باشند (شکل‌های ۴-۹ الف و ۴-۹ ب). در این حالت با افزایش قیمت نیتروژن،

مقدار بهینه آب کاربردی افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج حاصل از پژوهش‌های فیزیولوژیک در مزرعه نیز مطابقت دارد. لیائو و بارتولومف (Liao and Bartholomew, 1974) مشاهده کردند که جذب نیتروژن توسط گیاه در خاک مرطوب‌تر بهتر بوده است. به همین دلیل، وقتی که قیمت نیتروژن افزایش یابد، برای استفاده بهتر از نیتروژن در خاک، آب بیشتری بایستی مصرف شود.

در شرایط محدودیت زمین، بر اساس شکل (۳-۹ الف) در قیمت‌های پایین آب و نیتروژن (به ترتیب کمتر از ۱۰۰ ریال بر متر مکعب و ۲۰۰۰ ریال بر کیلوگرم) مقدار بهینه آب کاربردی (W_l) به حداکثر آب مصرفی (۱ متر W_m) نزدیک می‌شود. با افزایش قیمت آب به بیش از ۱۰۰ ریال بر متر مکعب یا افزایش قیمت نیتروژن به بیش از ۲۰۰۰ ریال بر کیلوگرم، مقدار بهینه آب کاربردی (W_l) شدیداً کاهش می‌یابد.

جدول ۹-۳ مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی، محصول دانه و درآمد خالص مزرعه ذرت

شرایط	عمق آبیاری (m)	نیتروژن کاربردی (N) (کیلوگرم در هکتار)	$N + N_r$ ^a (کیلوگرم در هکتار)	محصول دانه (تن در هکتار)	درآمد خالص (ریال در هکتار)
حداکثر محصول	۱/۰	۲۱۲	۲۶۶/۶	۱۳/۲۹	^b ۱/۱ * ۱۰ ^۷
محدودیت زمین	۰/۹۹	۲۱۲	۲۶۶/۶	۱۳/۲۹	^b ۱/۱ * ۱۰ ^۷
محدودیت آب	۰/۷۳۵	۲۰۶	۲۶۰/۶	۱۱/۴۴	^c ۱/۳ * ۱۰ ^۷

a- N_r مقدار نیتروژن موجود در خاک در عمق ۶۰-۰ سانتی‌متر است

b- درآمد خالص محاسبه شده از معادله (۳-۹) بر اساس قیمت آب ۱۵/۵ ریال بر متر مکعب، قیمت نیتروژن ۶۵۲ ریال بر کیلوگرم، هزینه ثابت تولید ۱۵۰۰۰۰۰ ریال بر هکتار و قیمت دانه ذرت ۱۰۰۰ ریال بر کیلوگرم

c- در این شرایط افزایش نسبی سطح زیر کشت برابر $\frac{W_m}{W_w}$ می‌باشد

در شرایط محدودیت آب، مقدار W_w برابر ۰/۷۳۵ متر می‌باشد که ۲۶/۵ درصد کمتر از مقدار W_m (۱ متر) است. بنابراین ۲۶ درصد زمین بیشتر می‌تواند زیر کشت قرار گیرد. مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی، محصول دانه و درآمد خالص در

شرایط مختلف در جدول (۳-۹) ارائه شده است. بر اساس داده‌های این جدول، در شرایط محدودیت آب، زارع می‌تواند زمین بیشتری کشت و آبیاری کند و در نتیجه درآمد مزرعه و بازده مصرف آب را افزایش دهد، گرچه تولید محصول در واحد سطح کاهش پیدا می‌کند.

۹-۶ نتیجه‌گیری

تولید محصول دانه ذرت به صورت معادله (۹-۱۲) تابعی از مقادیر آب کاربردی و مجموع نیتروژن کاربردی و نیتروژن معدنی موجود در خاک ارائه شده است. به همین دلیل در تحلیل بهینه‌سازی، حل معادلات حاصل از آن از روش صریح ممکن نیست (معادلات ۹-۱۴ تا ۹-۱۹) و از روش نیوتون - رافسون استفاده شده است. البته چنانچه معادله تابع تولید از نوع درجه ۲ کاهنده برای آب و نیتروژن کاربردی به دست آید، در این صورت معادلات حاصل از تحلیل بهینه‌سازی دارای حل صریح خواهند بود. جزئیات بیشتر روش صریح در فصل‌های بعد ارائه خواهد شد.

در شرایط محدودیت زمین و قیمت‌های آب و نیتروژن در سال پایه، زارع درآمد مزرعه را با کاربرد بهینه آب و نیتروژن به میزان ۰/۹۹ متر و ۲۰۲ کیلوگرم در هکتار به حداکثر می‌رساند. در شرایط محدودیت آب، زمین بیشتری با آب موجود آبیاری شده و بدین ترتیب گرچه محصول در واحد سطح کاهش می‌یابد ولی درآمد مزرعه و بازده مصرف آب افزایش می‌یابد. در این بررسی در شرایط محدودیت آب، مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی به ترتیب برابر ۰/۷۳۶ متر و ۲۰۶ کیلوگرم در هکتار می‌باشد. بنابراین با قیمت یارانه‌ای نیتروژن، مقدار بهینه نیتروژن کاربردی برای تولید حداکثر محصول و حداکثر درآمد خالص در شرایط محدودیت زمین و آب تفاوت چندانی ندارد. در صورت افزایش قیمت آب و نیتروژن، مقادیر بهینه نیتروژن کاربردی برای حداکثر کردن درآمد خالص در شرایط محدودیت زمین یا آب کاهش می‌یابد ولی مقدار بهینه آب کاربردی در شرایط محدودیت زمین، کاهش و در شرایط محدودیت آب، افزایش می‌یابد.

در انتها بایستی به این نکته توجه شود که نتایج حاصل از تحلیل ارائه شده در این فصل تنها برای محصولات زراعی صیفی (تابستانه) بدون بارش فصل رشد صادق است و برای محصولات شتوی (زمستانه) همراه با بارش فصل رشد و یا محصولات صیفی در مناطقی که همراه با بارش فصل رشد است عمومیت ندارد. میزان نیتروژن موجود در خاک‌ها و مناطق مختلف ممکن است متفاوت باشد ولی در این تحلیل مقدار آن در تابع تولید محصول به همراه نیتروژن کاربردی در نظر گرفته شده است. بنابراین تغییرات موجود در میزان نیتروژن در خاک‌ها و مناطق مختلف در این تحلیل ملحوظ شده است.

فصل ۱۰

کم آبیاری با وجود بارندگی در فصل رشد

۱۰-۱ مقدمه

در حال حاضر نیاز به تولید محصولات زراعی موجب استفاده بیش از حد آب‌های زیر زمینی شده، و در نتیجه بیلان آب در بسیاری از آبخوان‌های زیر زمینی منفی می‌باشد. به طور کلی برای تولید مواد غذایی مورد نیاز جمعیت ایران در دو دهه آینده تمام منابع آب زیر زمینی و سطحی مصرف شده و کشور با کمبود آب مواجه خواهد شد. برای مقابله با این بحران، روش کم آبیاری برای استفاده بهینه از منابع آب پیشنهاد شده است تا بازده مصرف آب را افزایش دهد. در این زمینه عمدتاً تحلیل نظری را بدون توجه به میزان آب باران در فصل رشد به انجام رسیده است. این روش در سال‌های اخیر توسط راکستورم و همکاران (Rockstorm *et al.*, 2003) به نقد کشیده شده زیرا کمک آب باران را به تأمین بخشی از تبخیر - تعرق گیاه نادیده می‌گیرد.

در کم آبیاری، مقدار بهینه آب مصرفی فصل رشد به روش تحلیل اقتصادی توابع تولید محصول - آب و هزینه - آب تعیین می‌شود (English, 1990). با استفاده از این روش مقدار بهینه آب مصرفی فصل رشد محصولات مختلف زراعی توسط محققین مختلف ارائه شده است (قهرمان و همکاران، ۲۰۰۱؛ سپاس‌خواه و همکاران، 2005؛ توکلی، ۱۳۸۵؛ English and Raja, 1996; English and James, 1990). در این روش تابع تولید محصول - آب بدون توجه به میزان بارندگی در فصل رشد به دست آمده و به کار گرفته شده است. بنابراین نتایج حاصل فقط برای شرایطی که در آن تابع تولید محصول - آب به دست آمده صادق است و در شرایط دیگر با میزان بارش متفاوت در فصل رشد کاربرد ندارد. از این رو اثر میزان بارش فصل

رشد بایستی در تابع تولید محصول - آب ملحوظ گردد. تحلیل جامع اقتصادی تعیین مقدار بهینه آب مصرفی فصل رشد در کم آبیاری با وجود بارندگی در فصل رشد توسط سپاسخواه و اکبری (۲۰۰۵) ارائه شده است.

۱۰-۲ اصول نظری و کاربرد آن

تابع تولید محصول - آب با وجود بارندگی در فصل رشد به صورت زیر نوشته می شود:

$$y(w') = a'_1 + b'_1 w' + c'_1 w'^2 \quad (1-10)$$

که در آن a'_1 , b'_1 و c'_1 ضرایب ثابت معادله و w' مجموع آب مصرفی در فصل رشد به اضافه میزان بارش در فصل رشد است:

$$w' = w + R \quad (2-10)$$

که در آن R میزان بارش فصل رشد می باشد. بنابراین معادله (۱-۱۰) به صورت زیر نوشته می شود:

$$y(w') = a'_1 + b'_1 R + c'_1 R^2 + (b'_1 + 2c'_1 R)w + c'_1 w^2 \quad (3-10)$$

معادله تابع تولید محصول - آب در شرایط بدون بارش در فصل رشد چنین است:

$$y(w) = a_1 + b_1 w + c_1 w^2 \quad (4-10)$$

مقایسه معادلات (۳-۱۰) و (۴-۱۰) ضرایب معادله (۴-۱۰) را به صورت زیر بیان می کند:

$$a_1 = a'_1 + b'_1 R + c'_1 R^2 \quad b_1 = b'_1 + 2c'_1 R \quad (5-10)$$

بنابراین معادله تعیین مقدار بهینه آب آبیاری در شرایط زمین و آب محدود یعنی:

$$W_l = \frac{b_2 - P_c b_1}{2P_c c_1} \quad (6-10)$$

$$W_w = \left[\frac{P_c a_1 - a_2}{P_c c_1} \right]^{0.5} \quad (7-10)$$

به صورت زیر نوشته می شود:

$$W_l = \frac{b_2 - P_c b_1}{2P_c c_1} - R \quad (8-10)$$

$$W_w = \left[\frac{P_c (b'_1 R + c'_1 R^2 + a') - a_2}{P_c c_1} \right]^{0.5} \quad (9-10)$$

اصول نظری تشریح شده برای داده های تولید محصول پنبه در ایستگاه پژوهشی هاشم آباد گرگان (ضیغمی گل، ۱۳۷۸) و گندم زمستانه در ایستگاه پژوهشی کرج، دانشگاه تهران (فرداد و گلکار، ۱۳۸۱) به کار گرفته شده است.

۱۰-۳ مطالعه پنبه

مطالعه در مورد پنبه در ایستگاه پژوهشی هاشم آباد گرگان (وزارت جهاد کشاورزی) در موقعیت عرض جغرافیایی ۲۶ درجه و ۴۹ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۵۵ متر از سطح دریا با آب و هوای نیمه مرطوب انجام شده است. میانگین بارش سالانه، دمای هوا و رطوبت نسبی به ترتیب ۵۷۵ میلی متر، ۱۷/۸ درجه سانتی گراد و ۷۸ درصد می باشد. بافت خاک محل پژوهش لوم رس سیلتی با چگالی ظاهری ۱/۴ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. مقدار حجمی آب خاک در حد ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم به ترتیب ۳۹ و ۱۹ درصد است.

قالب طرح پژوهشی بلوک های کاملاً تصادفی با سه تکرار بود. تیمارهای آبیاری عبارتند از: آبیاری به میزان ۸۵، ۷۰، ۵۵، ۴۰ و صفر درصد نیاز آبی گیاه. ابعاد کرت های آزمایشی ۴/۸ * ۶ متر بوده که در هر کدام از آنها شش ردیف گیاه به فاصله ۸۰ سانتی متر کاشته شده بود. فاصله بین گیاهان روی هر ردیف ۲۰ سانتی متر منظور شده بود. بذر پنبه در تاریخ ۱۹ ماه اردیبهشت کاشته شد و

محصول در دو مرحله در تاریخ‌های ۴ مهر و ۶ آبان برداشت گردید. اولین آبیاری کرت‌ها در تاریخ ۱۹ تیر و آبیاری‌های بعدی با دور ۱۲ روزه انجام شد. مقدار آب اولین آبیاری در شرایط آبیاری کامل با اندازه‌گیری آب خاک در عمق ۸۰ - ۰ سانتی‌متری و رساندن آن به حد ظرفیت زراعی تعیین گردید. مقادیر آب اولین آبیاری در تیمارهای مختلف آبیاری در جدول (۱۰-۱) ارائه شده است.

جدول ۱۰-۱ زمان و میزان کاربرد آب آبیاری (میلی‌متر) و عملکرد پنبه برای تیمارهای مختلف آبیاری

تیمار آبیاری	۱۹ تیر	۳۱ تیر	۱۲ مرداد	۲۴ مرداد	۵ شهریور	کل آب مصرفی		عملکرد پنبه (کیلوگرم در هکتار)
						(میلی‌متر)	(میلی‌متر)	
T ₁	۱۰۶	۶۶/۳	۷۴/۵	۶۸/۶	۶۲/۷	۳۷۸	۳۰۳۰	
T ₂	۹۰/۱	۵۶/۴	۶۳/۳	۵۸/۳	۵۳/۳	۳۲۱	۳۱۴۰	
T ₃	۷۴/۲	۴۶/۴	۵۲/۲	۴۸/۰	۴۳/۹	۲۶۵	۳۰۰۰	
T ₄	۵۸/۳	۳۶/۵	۴۱/۰	۳۷/۸	۳۴/۵	۲۰۸	۲۷۵۰	
T ₅	۴۲/۲	۲۶/۵	۲۹/۸	۲۷/۴	۲۵/۱	۱۵۱	۲۲۸۰	
T ₆	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۴۴۰	

آب آبیاری برای آبیاری‌های بعدی بر اساس نیاز آبی گیاه محاسبه شده از روش پن‌من - مانتیس فائو تعیین گردید (Allen et al., 1998). مقادیر آب آبیاری در آبیاری‌های بعدی برای تیمارهای مختلف آبیاری در جدول (۱۰-۱) نشان داده شده است. مقدار آب آبیاری کاربردی در هر آبیاری با کنتور حجمی اندازه‌گیری شد. مقدار بارش در فصل رشد بین فروردین تا شهریور ۲۵۷ میلی‌متر بود.

۱۰-۴ مطالعه گندم

مطالعه گندم زمستانه در ایستگاه پژوهشی دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران واقع در کرج در موقعیت عرض جغرافیایی ۳۶ درجه شمالی و ۵۱ درجه شرقی و ارتفاع ۱۳۱۲ متر از سطح دریا با آب و هوای سرد و خشک انجام شده است. بافت

خاک محل پژوهش لوم رسی با چگالی ظاهری ۱/۵۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. میانگین بارش سالانه، دمای هوا و رطوبت نسبی به ترتیب ۲۸۰ میلی‌متر، ۱۲/۹ درجه سانتی‌گراد و ۴۸ درصد است.

جدول ۱۰-۲ مقادیر فصلی آب آبیاری در تیمارهای مختلف آبیاری گندم زمستانه قدس (فرداد و گلکار، ۱۳۸۱)

تیمار آبیاری (% نیاز آبی)	دور آبیاری (روز)	مقدار فصلی آب آبیاری (میلی‌متر)
۱۱۰	۷	۴۳۵
۱۰۰	۷	۴۰۰
۹۰	۷	۳۶۵
۸۰	۷	۳۳۰
۷۰	۷	۲۹۵
۶۰	۱۴	۲۶۰
۵۰	۱۴	۲۲۵
۴۰	۱۴	۱۹۰
۳۰	۲۱	۱۳۰
۲۰	۲۱	۱۰۵
۱۰	۲۱	۸۰
آخرین	-	۵۴

قالب طرح پژوهشی بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار بود. تیمارهای آبیاری عبارتند از: آبیاری به میزان ۱۱۰، ۱۰۰، ۹۰، ۸۰ و ۷۰ درصد (با دور آبیاری ۷ روز)، ۶۰، ۵۰ و ۴۰ درصد (با دور آبیاری ۱۴ روزه) و ۳۰، ۲۰ و ۱۰ درصد (با دور آبیاری ۲۱ روزه) نیاز آبی گیاه بعد از شروع دوباره فصل رشد در بهار. آخرین تیمار آبیاری شامل خاکاب بعد از کاشت بذر به میزان ۳۰ میلی‌متر و آبیاری به میزان ۲۴ میلی‌متر در شروع فصل رشد بهاری (۱۹ فروردین) و بدون آبیاری‌های بعدی می‌باشد. ابعاد کرت‌های آزمایشی ۳×۳ متر بوده که در هر کدام از آنها ۱۰ ردیف گیاه به فاصله ۳۰ سانتی‌متر کاشته شده بود. فاصله بین گیاهان روی هر ردیف ۳ سانتی‌متر منظور شده بود. بذر ضد عفونی شده گندم قدس در تاریخ ۱۴ آبان به

میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار کاشته شد و محصول در تاریخ ۲۰ خرداد برداشت گردید. تهیه زمین و کاربرد کود شیمیایی مطابق دستورالعمل محلی مدیریت کاشت گندم انجام شد.

مقدار آب در هر آبیاری بر اساس نیاز آبی گیاه محاسبه شده از روش پن-من - مانتیس فانو (Allen et al., 1998) محاسبه گردید. مقادیر فصلی آب آبیاری در تیمارهای مختلف آبیاری در جدول (۱۰-۲) نشان داده شده است. مقدار آب آبیاری کاربردی در هر آبیاری با کنتور حجمی اندازه گیری شد. مقدار بارش در فصل رشد از آبان تا خرداد ۲۲۳ میلی متر بوده است.

۱۰-۵ نتایج تحلیل

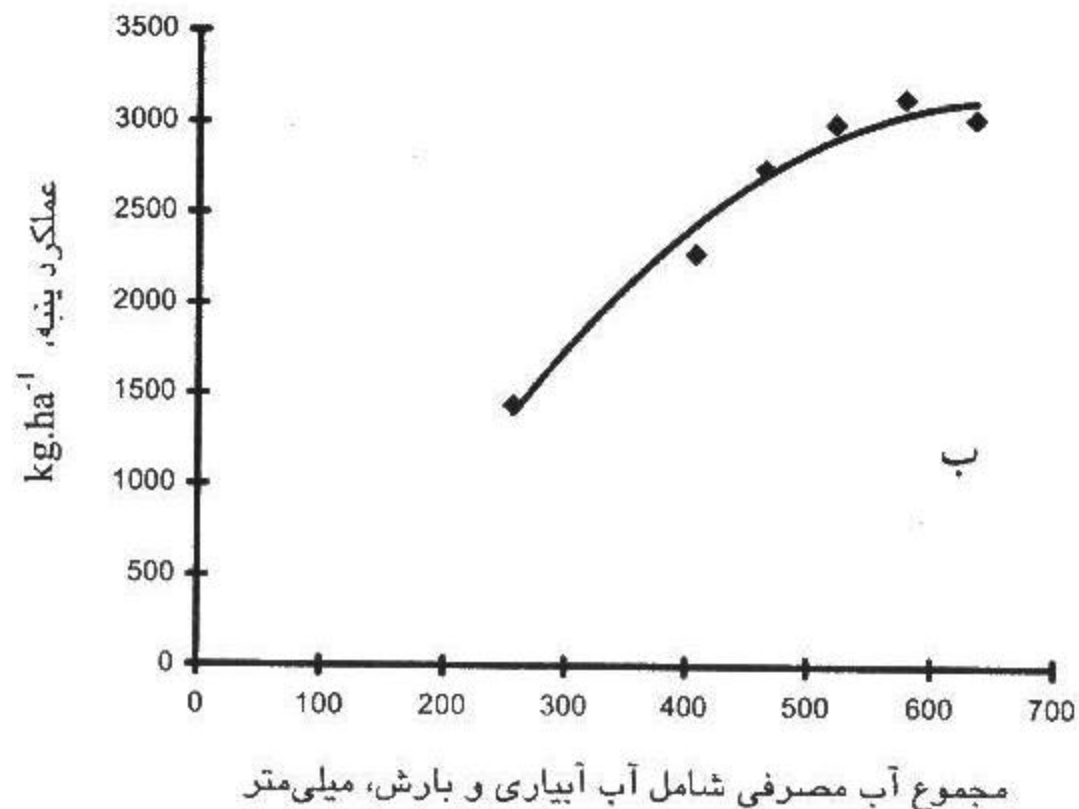
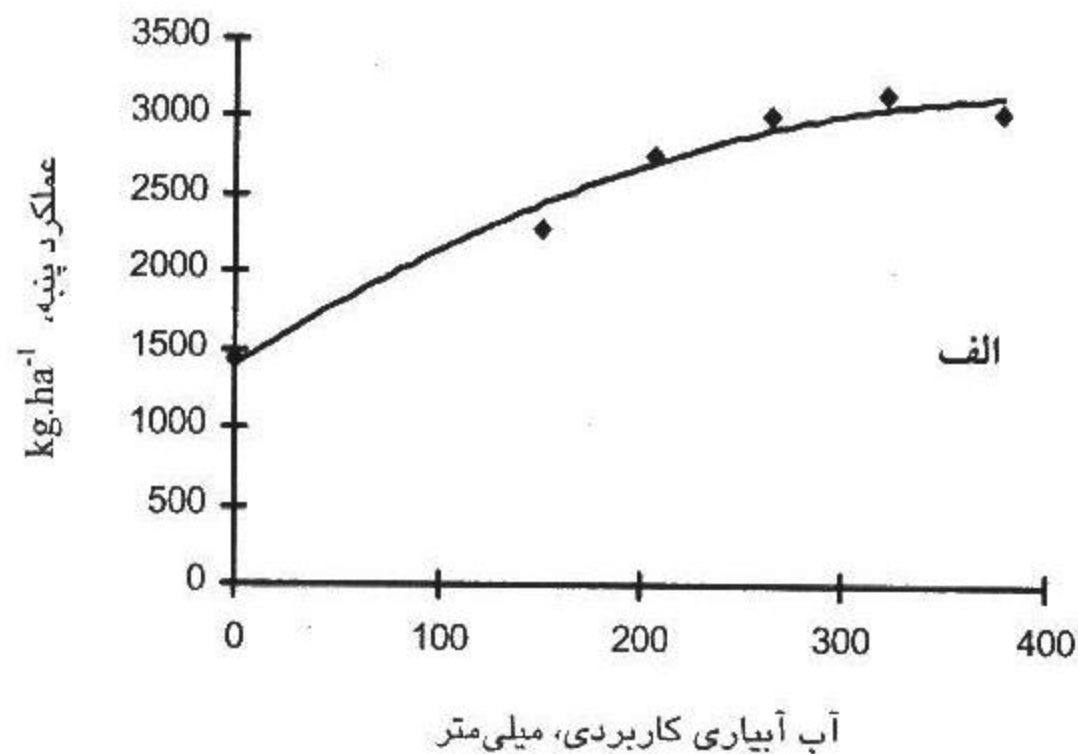
۱۰-۵-۱ تابع تولید محصول پنبه

مقادیر آب مصرفی و محصول پنبه در جدول (۱۰-۱) نشان داده شده است. بر اساس این داده ها تابع تولید محصول - آب بدون در نظر گرفتن بارش فصل رشد به صورت زیر می باشد:

$$y(w) = 1399 + 8.46w - 0.0103w^2 \quad (10-1)$$

$$r^2 = 0.98 \quad SE = 132.3 \quad n = 6 \quad p \leq 0.004$$

که در آن $y(w)$ محصول پنبه بر حسب کیلوگرم در هکتار و w مقدار آب مصرفی در فصل رشد بر حسب میلی متر می باشد. رابطه بین محصول پنبه و میزان آب مصرفی در فصل رشد در شکل (۱۰-۱ الف) نشان داده شده است. برای اینکه اثر باران فصل رشد در تحلیل اقتصادی منظور شود رابطه بین محصول پنبه و میزان فصلی آب مصرفی به اضافه بارش در فصل رشد در شکل (۱۰-۱ ب) نشان داده شده است. معادله رگرسیونی حاصل به صورت زیر است:



شکل ۱۰-۱ رابطه بین عملکرد پنبه و الف) آب آبیاری و ب) مجموع آب آبیاری و بارش

$$y(w') = -1451 + 13.75w' - 0.0103w'^2 \quad (11-10)$$

$$r^2 = 0.98 \quad SE = 132.3 \quad n = 6 \quad p \leq 0.004$$

که $y(w')$ محصول پنبه بر حسب کیلوگرم در هکتار و w' میزان فصلی آب مصرفی به اضافه بارش در فصل رشد ($w+R$) بر حسب میلی متر می باشد. در این تحلیل فرض شده تمام بارش در خاک نفوذ می کند و توزیع بارش در فصل رشد و سالی که داده برداری شده، نماینده سال های دیگر نیز می باشد. این فرض به خاطر نبود داده برای چند سال متوالی است و گرنه نیازی به این فرض نبود و تغییرات میزان بارش در سال های مختلف در ضرایب معادله (۱۱-۱۰) اعمال می گردید.

۱۰-۵-۲ تابع هزینه تولید پنبه

هزینه تولید پنبه، بدون منظور کردن هزینه آبیاری، با قیمت های سال ۱۳۷۷ برابر ۳۱۳۴۰۰۰ ریال می شود. این هزینه شامل هزینه تهیه زمین، کاشت، بذر، کوددهی، سمپاشی و کاربرد علف کش، تنک کردن، برداشت، انتقال محصول و نیز اجاره زمین می باشد. هزینه تولید محصول در آبیاری کامل ۲۹۳۲۴۱۰ ریال است. با استفاده از معادله زیر برای محاسبه آب لازم برای حداکثر محصول:

$$W_m = \frac{-b_1}{2c_1} \quad (12-10)$$

مقدار W_m به صورت زیر محاسبه می شود:

$$W_m = \frac{-8.46}{2(-0.0103)} = 410 \text{ mm}$$

با فرض اینکه هزینه های کاشت و برداشت برای مزارع فاریاب و بدون آبیاری برابر باشند مقدار ضریب b_2 در تابع هزینه یعنی:

$$c(w) = a_2 + b_2 w \quad (13-10)$$

به صورت زیر محاسبه می شود:

$$3932410 = 313400 + b_2 w$$

یا

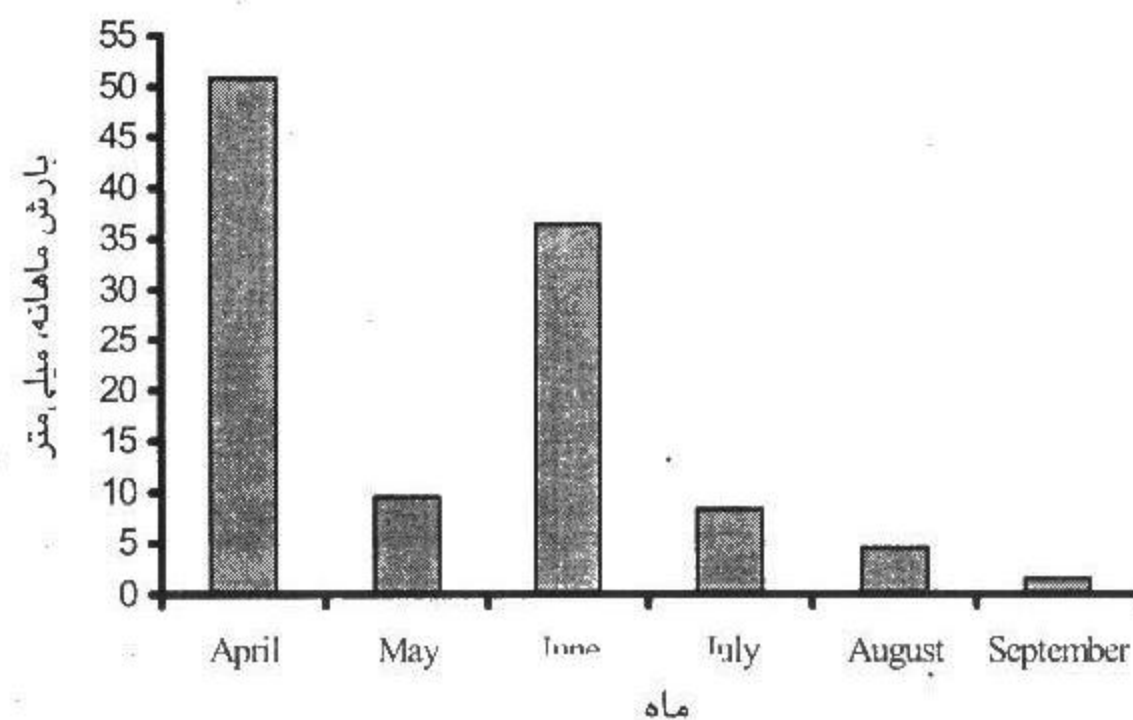
$$b_2 = 1947$$

بنابراین معادله (۱۳-۱۰) به صورت زیر خواهد بود:

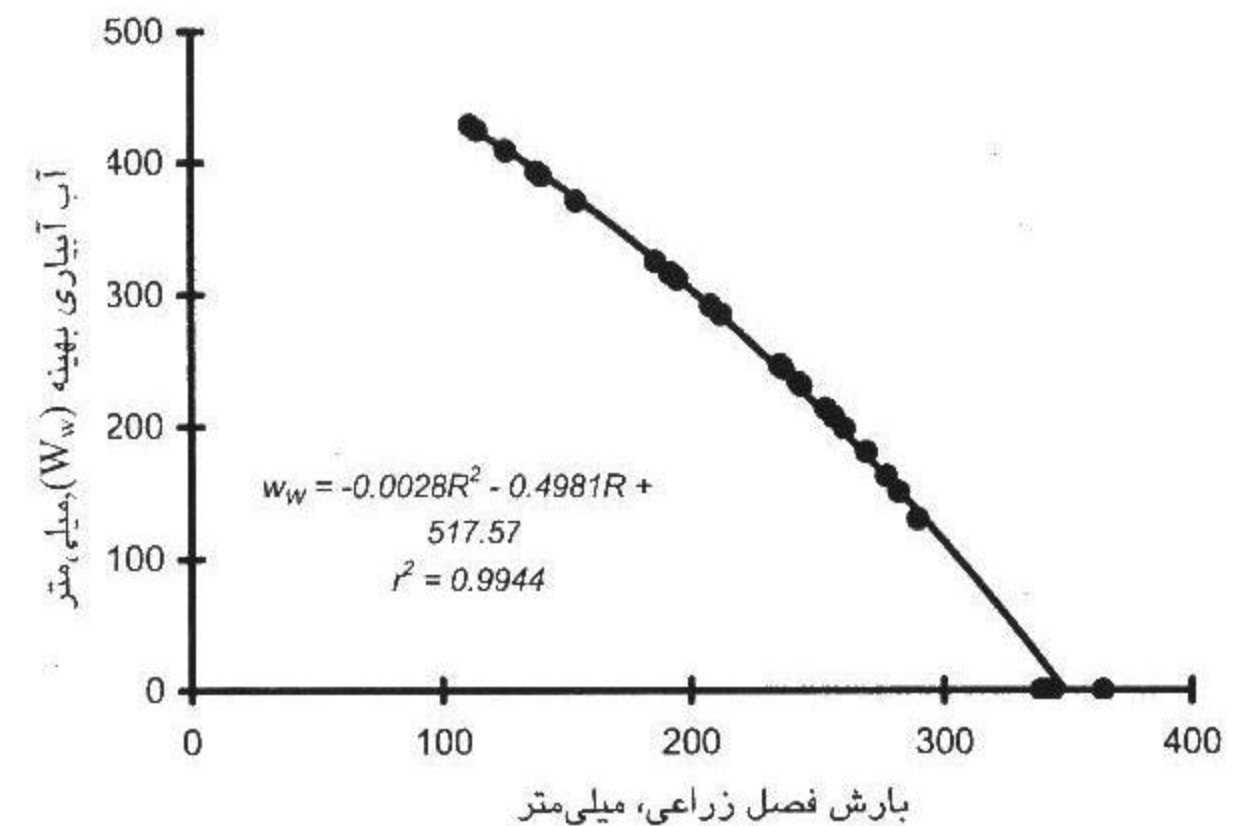
$$c(w) = 313400 + 1947w$$

۱۰-۵-۳ تحلیل کم آبیاری پنبه

برای برنامه ریزی منابع آب در تولید پنبه که یک محصول صیفی است شرایط محدودیت آب حکمفرما است. بنابراین در تحلیل کم آبیاری، مقدار بهینه آب محاسبه می شود. این محاسبه بر اساس قیمت پنبه ۱۷۰۰ ریال بر کیلوگرم (قیمت سال ۱۳۷۷)، ضرایب معادلات (۱۱-۱۰) و (۱۳-۱۰) و مقادیر بارش فصل رشد در سال های ۱۳۷۸-۱۳۵۱ در معادله (۹-۱۰) به دست می آید. مقادیر W_m در سال های مختلف در جدول (۳-۱۰) نشان داده شده است. توزیع بارش ماهانه در فصل رشد سال ۱۳۷۵ با ۱۱۱/۱ میلی متر بارش در شکل (۲-۱۰) ارائه شده است. البته توزیع بارش ماهانه در بارش های بیشتر فصل رشد یکنواخت تر می شود.



شکل ۲-۱۰ بارش ماهانه در دوره فصل رشد پنبه (۱۳۷۵)



شکل ۱۰-۳ رابطه بین آب آبیاری بهینه (W_w) و بارش فصل زراعی (R) برای پنبه

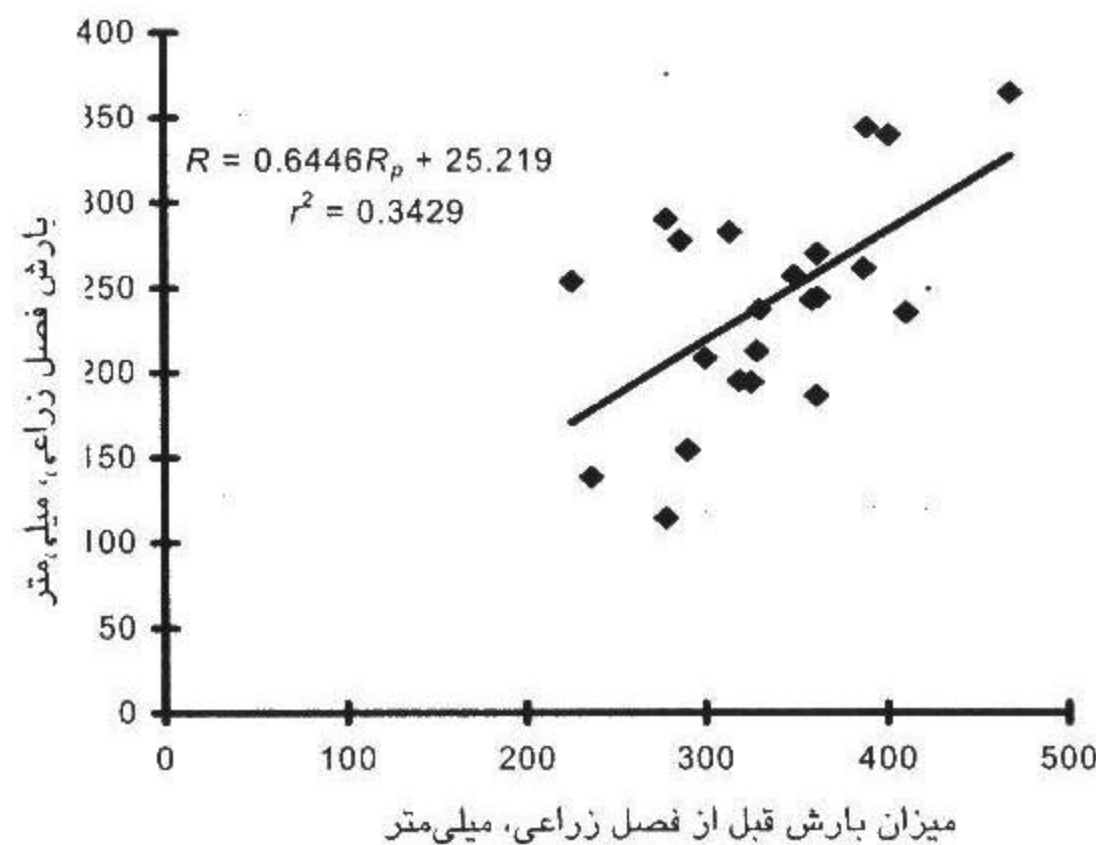
مقادیر W_w در سال‌های ۱۳۵۱، ۱۳۵۳، ۱۳۵۶ و ۱۳۷۰ به خاطر زیاد بودن بارش فصل رشد (بیش از ۳۳۹ میلی‌متر) صفر می‌باشد. با کاهش بارش فصل رشد مقدار W_w کاهش می‌یابد (شکل ۱۰-۳). رابطه بین W_w و بارش فصل رشد R به صورت زیر به دست آمد:

$$W_w = -0.0028R^2 - 0.498R + 517.6 \quad (10-14)$$

$$r^2 = 0.99 \quad SE = 10.38 \quad n = 28 \quad p \leq 7.09 \times 10^{-2}$$

که در آن W_w مقدار بهینه آب آبیاری در شرایط محدودیت آب بر حسب میلی‌متر و R مقدار بارش فصل رشد بر حسب میلی‌متر می‌باشد. چنانچه در فصل رشد بارش نیارد مقدار W_w برابر ۵۱۷/۶ میلی‌متر خواهد بود.

کاربرد معادله (۱۰-۱۴) به پیش‌بینی مقدار بارش فصل رشد وابسته است. رابطه بین مقدار بارش فصل رشد، R و بارش پاییز و زمستان قبل از فصل رشد، R_p برای منطقه پژوهش به صورت زیر می‌باشد (شکل ۱۰-۴):



شکل ۱۰-۴ رابطه بین بارش فصل رشد (بهار و تابستان)، R و بارش قبل از فصل رشد (پاییز و زمستان)، R_p برای پنبه

$$R = 0.648R_p + 25.2 \quad (10-15)$$

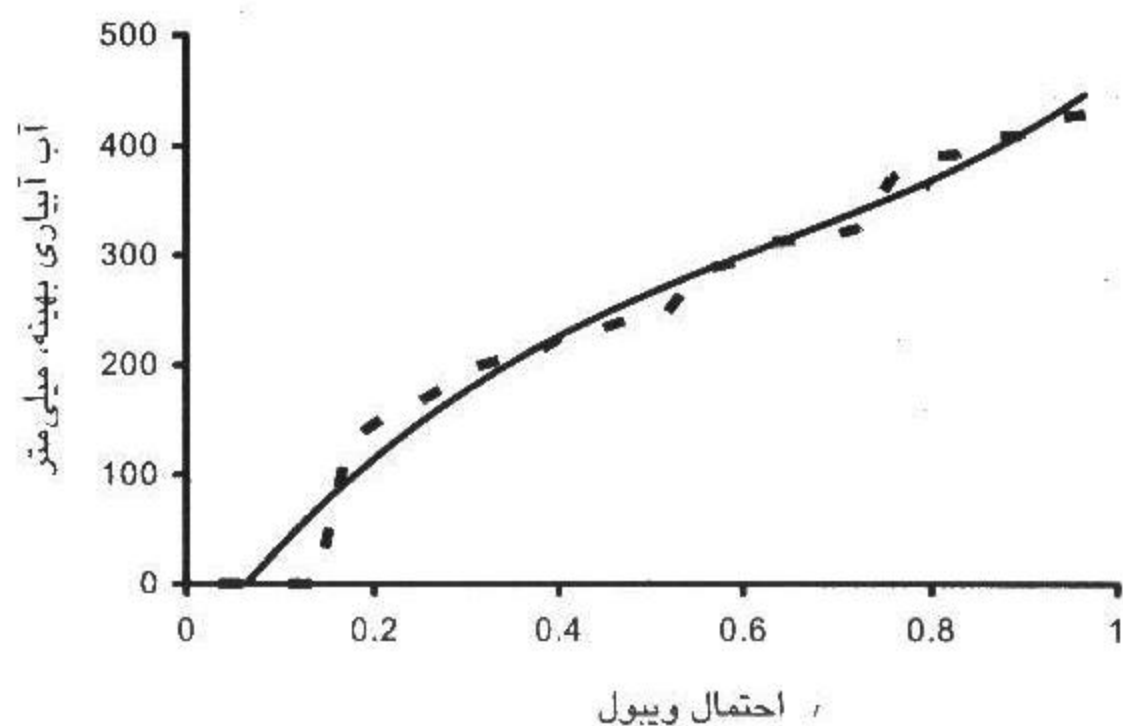
$$r^2 = 0.31 \quad SE = 53.1 \quad n = 22 \quad p \leq 0.004$$

با استفاده از معادله (۱۰-۱۵) و مقدار بارش در فصول پاییز و زمستان و قبل از فصل رشد مقدار بارش فصل رشد تخمین زده می‌شود. سپس به کمک مقدار بارش فصل رشد مقدار W_w از معادله (۱۰-۱۴) تخمین زده می‌شود. از روی این مقدار و مقدار منابع آبی موجود می‌توان مساحت زیر کشت پنبه را مشخص نمود.

با استفاده از داده‌های جدول (۳-۱۰) احتمال وقوع مقادیر مختلف W_w به کمک معادله ویبول (Chow et al., 1988) به صورت زیر محاسبه شد:

$$P = \frac{m}{n+1} \quad (۱۶-۱۰)$$

که در آن P احتمال وقوع، m رتبه هر کدام از مشاهدات و n تعداد مشاهدات می‌باشد. توزیع احتمال وقوع مقادیر مختلف W_w در شکل (۵-۱۰) نشان داده شده است. مناسب‌ترین تابع توزیع برازش داده شده با این داده‌ها، پیرسون تیپ III می‌باشد. با استفاده از این تابع توزیع برای احتمال وقوع ۵۰ و ۸۰ درصد مقدار W_w به ترتیب ۲۶۰ و ۳۶۰ میلی‌متر به دست می‌آید و برای برنامه‌ریزی منابع آب آبیاری به کار برده می‌شود.



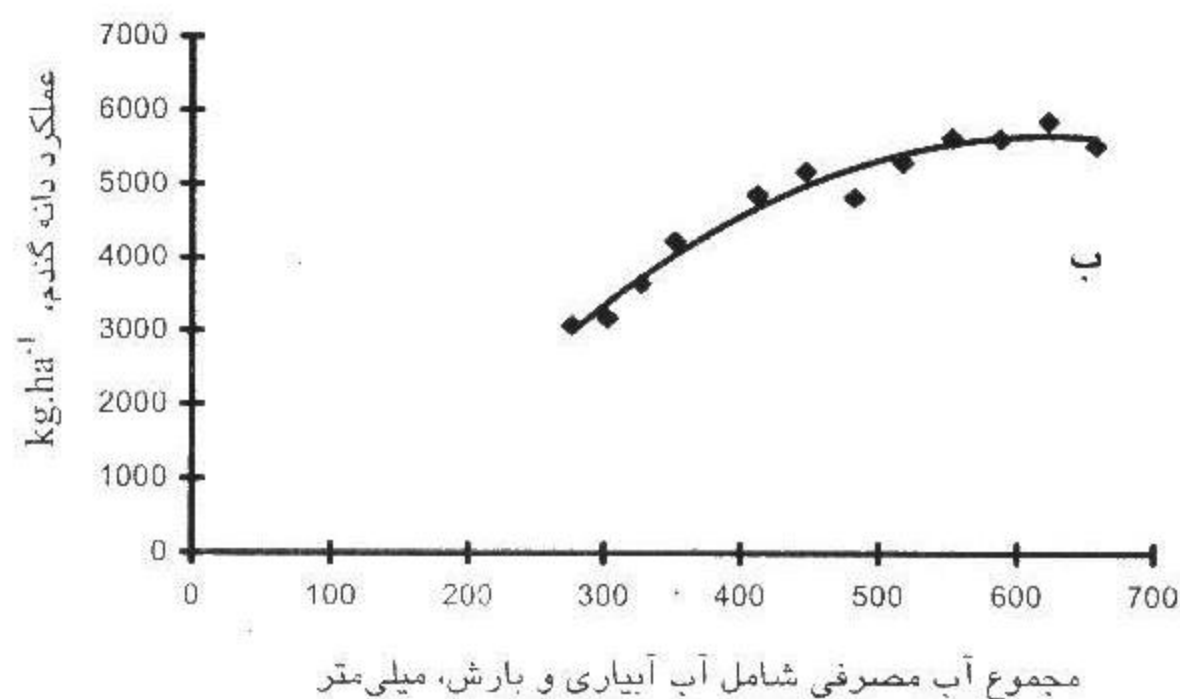
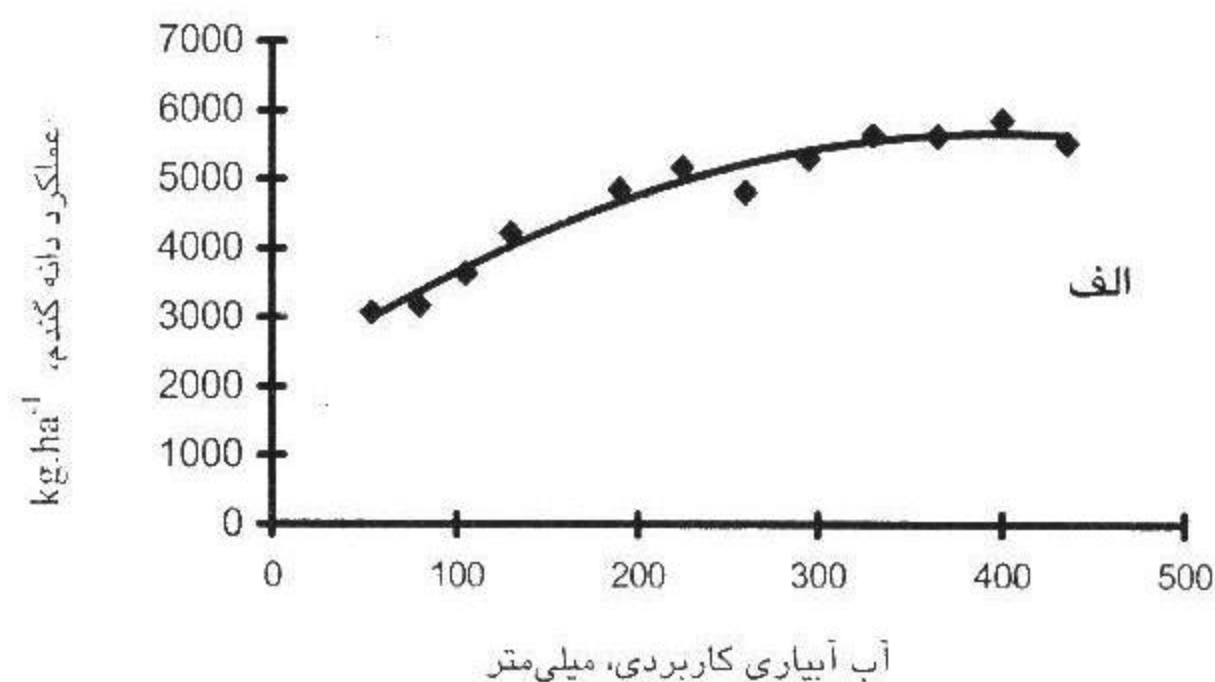
شکل ۵-۱۰ توزیع پیرسون تیپ III و احتمال وقوع آب آبیاری بهینه (W_w) برای پنبه (خط چین داده‌های واقعی و خط ممتد توزیع داده‌ها است)

۴-۵-۱۰ تابع تولید محصول گندم

رابطه بین تولید دانه گندم و مقادیر آب آبیاری به کار رفته در جدول (۴-۱۰) نشان داده شده است. تابع تولید محصول گندم بدون منظور کردن بارش فصل رشد

جدول ۳-۱۰ بارش فصل رشد (فروردین - شهریور) برای پنبه و تخمین آب آبیاری بهینه تحت شرایط محدودیت آب، W_w برای سال‌های مختلف در گرگان

سال	بارش فصل رشد، میلی‌متر	کل آب کاربردی (W_w)، میلی‌متر
۱۳۵۱	۳۴۱/۴	.
۱۳۵۲	۲۶۹/۶	۱۸۰/۴
۱۳۵۳	۳۳۹/۲	.
۱۳۵۴	۱۴۰/۵	۳۸۹/۹
۱۳۵۵	۱۹۲/۲	۳۱۶/۴
۱۳۵۶	۲۸۲/۳	۱۵۰/۳
۱۳۵۷	۳۴۳/۶	.
۱۳۵۸	۲۳۵/۳	۲۴۷
۱۳۵۹	۱۲۶/۱	۴۰۹
۱۳۶۰	۳۶۴/۲	.
۱۳۶۱	۲۴۲/۸	۲۳۳/۶
۱۳۶۲	۱۹۴/۱	۳۱۳/۶
۱۳۶۳	۲۴۴/۲	۲۳۱/۱
۱۳۶۴	۱۲۵/۷	۴۰۹/۶
۱۳۶۵	۱۱۴/۲	۴۲۴/۷
۱۳۶۶	۲۶۱/۱	۱۹۸/۴
۱۳۶۷	۲۳۷/۰	۲۴۴
۱۳۶۸	۱۹۵/۱	۳۱۲
۱۳۶۹	۱۳۸/۴	۳۹۲/۶
۱۳۷۰	۱۵۴/۳	۱۵۴/۳
۱۳۷۱	۲۸۹/۸	۱۲۹/۹
۱۳۷۲	۲۷۷/۳	۱۶۲/۷
۱۳۷۳	۲۰۸/۳	۲۰۸/۳
۱۳۷۴	۲۱۲/۴	۲۱۲/۴
۱۳۷۵	۱۱۱/۱	۴۲۸/۷
۱۳۷۶	۱۸۶/۳	۳۲۵/۲
۱۳۷۷	۲۵۶/۷	۲۰۷/۳
۱۳۷۸	۲۵۳/۶	۲۱۳/۴



شکل ۶-۱۰ رابطه بین عملکرد گندم و الف) آب آبیاری و ب) مجموع آب مصرفی شامل آب آبیاری و بارش، میلی‌متر

(معادله ۴-۱۰) به کمک روش رگرسیون چند متغیره به صورت زیر به دست آمده است:

$$y(w) = 2095 + 17.84w - 0.0223w^2 \quad (۱۷-۱۰)$$

$$r^2 = 0.96 \quad SE = 208.9 \quad n = 12 \quad p \leq 3.49 \times 10^{-7}$$

که در آن $y(w)$ محصول دانه گندم بر حسب کیلوگرم در هکتار و w مقدار آب به کار رفته بر حسب میلی‌متر می‌باشد. رابطه بین محصول دانه و مجموع آب آبیاری و بارش فصل رشد در شکل (۶-۱۰ الف) ارائه شده است.

جدول ۴-۱۰ آب کاربردی و عملکرد گندم زمستانه رقم قدس در تیمارهای مختلف

آبیاری بر اساس کسری از تبخیر - تعرق پتانسیل (ET_p)

تیمارهای آبیاری بر اساس کسری از تبخیر - تعرق پتانسیل	آب کاربردی، میلی‌متر	عملکرد دانه، کیلوگرم در هکتار
$1/1 ET_p$	۴۳۵	۵۵۳۲
$1/0 ET_p$	۴۰۰	۵۸۵۹
$0/9 ET_p$	۳۶۵	۵۶۲۸
$0/8 ET_p$	۳۳۰	۵۶۳۸
$0/7 ET_p$	۲۹۵	۵۳۰۸
$0/6 ET_p$	۲۶۰	۴۸۱۸
$0/5 ET_p$	۲۲۵	۵۱۷۱
$0/4 ET_p$	۱۹۰	۴۸۵۲
$0/3 ET_p$	۱۳۰	۴۲۲۹
$0/2 ET_p$	۱۰۵	۳۶۴۱
$0/1 ET_p$	۸۰	۳۱۷۴
$0/0 ET_p$	۵۴	۳۰۷۴

برای منظور کردن میزان بارش فصل رشد در تابع تولید محصول، رابطه بین تولید محصول و میزان آب به کار رفته به اضافه بارش فصل رشد (معادله ۱۰-۱) به کمک روش رگرسیون چند متغیره به صورت زیر به دست می آید:

(۱۸-۱۰)

$$y(w') = -2981 + 27.77w' - 0.0223w'^2$$

$$r^2 = 0.96 \quad SE = 208.9 \quad n = 12 \quad p \leq 3.49 \times 10^{-7}$$

که در آن $y(w')$ محصول دانه گندم بر حسب کیلوگرم در هکتار و w' مجموع آب آبیاری به کار رفته و بارش فصل رشد ($w+R$) بر حسب میلی متر می باشد. رابطه بین محصول دانه و مجموع آب آبیاری و بارش فصل رشد در شکل (۱۰-۶) ارائه شده است.

۱۰-۵-۵ تابع هزینه تولید گندم

هزینه تولید گندم بدون هزینه آب آبیاری برابر ۱۴۱۱۰۷۶ ریال محاسبه شد. این هزینه شامل هزینه تهیه زمین، کاشت، بذر، کوددهی، سمپاشی و کاربرد علف کش، برداشت، انتقال محصول و نیز اجاره زمین می باشد. هزینه تولید گندم در شرایط حداکثر تولید (آبیاری کامل) برابر ۱۶۵۲۸۸۶ ریال محاسبه شد. بر اساس معادله (۱۰-۱۲) مقدار W_w به صورت زیر محاسبه می شود:

$$W_w = \frac{-b_1}{2c_1} = \frac{-17.84}{2(-0.0223)} = 400 \text{ mm}$$

با فرض بر اینکه هزینه های کاشت و برداشت گندم فاریاب و غیر فاریاب (دیم) برابر باشد مقدار ضریب b_2 در معادله (۱۰-۱۳) به صورت زیر محاسبه می شود:

$$1652886 = 1411076 + b_2(400)$$

$$b_2 = 605$$

بنابراین:

و معادله (۱۰-۱۳) به صورت زیر خواهد بود:

(۱۹-۱۰)

$$c(w) = 1411076 + 605w$$

۱۰-۶ تحلیل کم آبیاری گندم

در ناحیه پژوهش شرایط محدودیت آب حکم فرما است. بنابراین در تحلیل اقتصادی مقدار بهینه آب کاربردی، W_w محاسبه گردید. در این محاسبه قیمت یک کیلوگرم گندم برابر ۳۶۰ ریال (به قیمت سال ۱۳۸۰)، ضرایب معادلات (۱۰-۱۸) و (۱۰-۱۹) و مقادیر بارش فصل رشد برای ۱۴ سال (سال های ۱۳۷۸-۱۳۶۴) در معادله (۱۰-۹) به کار برده شد و نتایج W_w در جدول (۱۰-۵) نشان داده شده است.

جدول ۱۰-۵ بارش فصل رشد (فروردین تا شهریور) برای گندم و تخمین آب آبیاری بهینه تحت شرایط محدودیت آب، W_w برای سال های مختلف در کرج

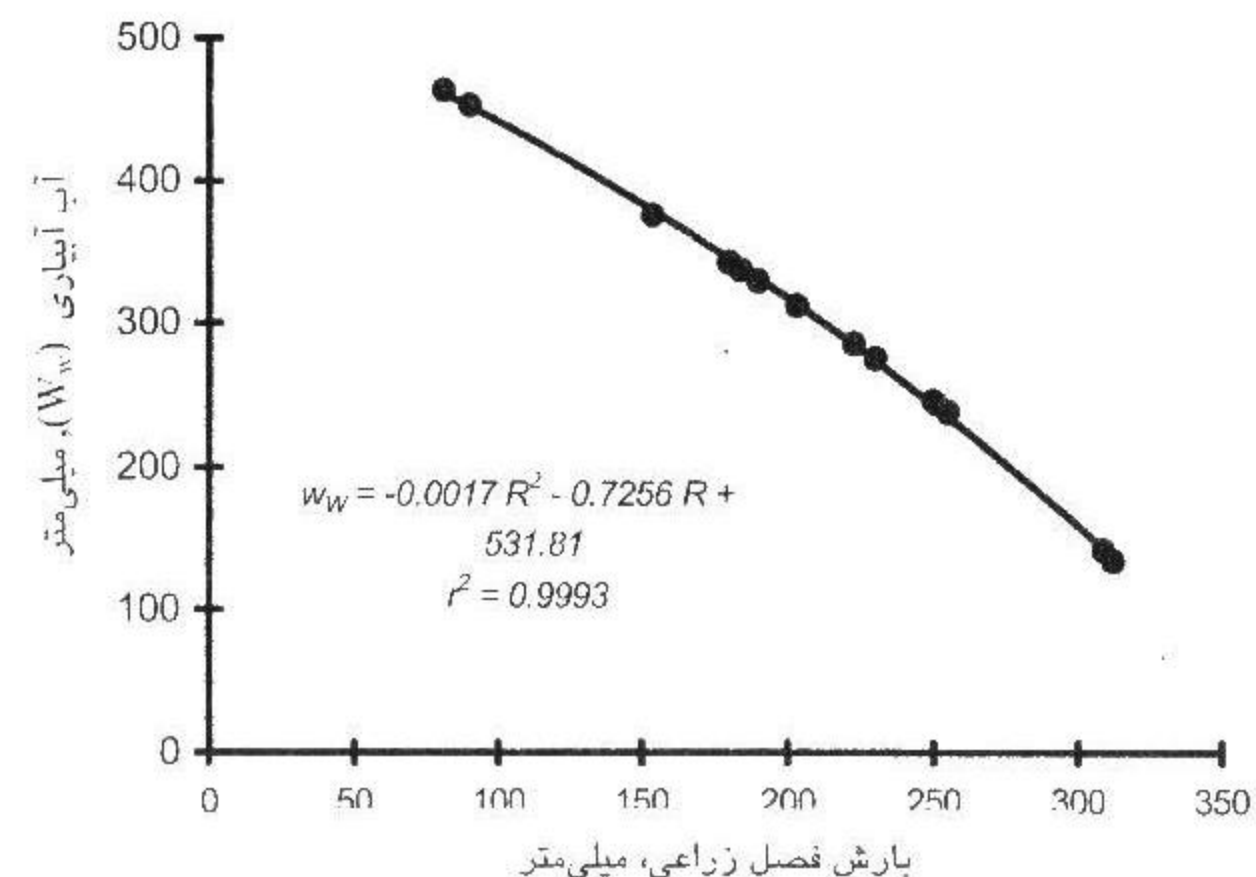
سال	بارش فصل رشد، میلی متر	کل آب کاربردی (W_w)، میلی متر
۱۳۶۴-۶۵	۲۵۱	۲۴۴/۷
۱۳۶۵-۶۶	۲۵۰	۲۴۶/۲
۱۳۶۶-۶۷	۱۸۴	۳۳۷/۹
۱۳۶۷-۶۸	۱۹۰	۳۳۰
۱۳۶۸-۶۹	۱۵۴	۳۷۶
۱۳۶۹-۷۰	۲۳۰	۲۷۵/۵
۱۳۷۰-۷۱	۳۰۹	۱۴۱/۸
۱۳۷۱-۷۲	۱۸۰	۳۴۳
۱۳۷۲-۷۳	۲۵۵	۲۳۸/۵
۱۳۷۳-۷۴	۳۱۲	۱۳۴/۱
۱۳۷۴-۷۵	۲۰۳	۳۱۲/۸
۱۳۷۵-۷۶	۹۰	۴۵۳/۳
۱۳۷۶-۷۷	۲۲۳	۲۸۶
۱۳۷۷-۷۸	۸۱	۴۶۳/۸

کمترین مقدار W_w برابر $134/1$ میلی متر برای بیشترین مقدار بارش فصل رشد ($312/4$ میلی متر) حاصل شده و برعکس مقدار W_w برابر $463/8$ میلی متر برای کمترین مقدار بارش فصل رشد (81 میلی متر) به دست آمده است. هر چه بارش فصل رشد کاهش یابد مقدار W_w افزایش می یابد (شکل ۷-۱۰). رابطه بین مقادیر W_w و بارش فصل رشد R به روش رگرسیون چند متغیره به صورت زیر به دست آمده است:

$$W_w = -0.0017 R^2 - 0.7256 R + 531.8 \quad (20-10)$$

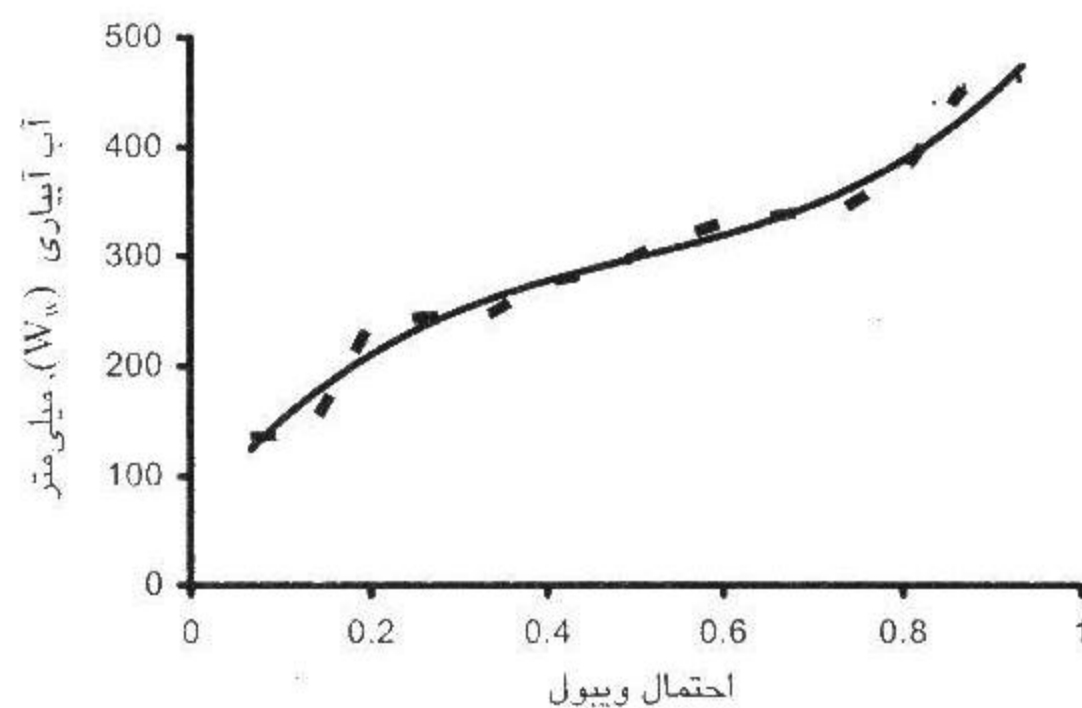
$$r^2 = 0.999 \quad SE = 2.71 \quad n = 14 \quad p \leq 3.09 * 10^{-18}$$

که در آن W_w مقدار بهینه آب آبیاری در شرایط محدودیت آب بر حسب میلی متر و R مقدار بارش فصل رشد بر حسب میلی متر می باشد. در شرایط بدون بارش فصل رشد مقدار W_w برابر $531/8$ میلی متر است.



شکل ۷-۱۰ رابطه بین آب آبیاری بهینه (W_w) و بارش فصل زراعی گندم (R)

کاربرد معادله ($10-18$) به تخمین بارش فصل رشد در قبل از شروع فصل وابسته است که ممکن است قابل پیش بینی نباشد. در این صورت روش احتمال وقوع برای تعیین مقدار W_w به کار برده می شود. احتمال وقوع مقادیر W_w با استفاده از معادله ($10-16$) محاسبه شد و مقادیر آن در شکل ($10-8$) ارائه شده است. مناسب ترین تابع توزیع برازش داده شده با این داده ها، پیرسون تیپ III می باشد. با استفاده از این تابع توزیع (شکل $10-8$) مقدار W_w برای احتمال وقوع ۵۰ و ۸۰ درصد مقادیر به ترتیب ۲۹۹ و ۲۸۱ میلی متر به دست می آید که می تواند در برنامه ریزی منابع آب آبیاری به کار برده شود.



شکل ۸-۱۰ توزیع پیرسون تیپ III و احتمال وقوع آب آبیاری بهینه (W_w) برای گندم (خط چین داده های واقعی و خط ممتد توزیع داده ها)

۷-۱۰ نتیجه گیری

در این فصل از کتاب میزان بارش فصل رشد در تحلیل اقتصادی مقدار بهینه آب آبیاری لازم در فصل رشد (W_w) برای محصولات پنبه و گندم به کار برده شد. در این تحلیل، معادله تعیین W_w در سال های مختلف با مقادیر مختلف بارش فصل رشد

ارائه گردید که در آن ضریب تابع تولید محصول با در نظر گرفتن بارش فصل رشد به کار رفته است.

بر اساس این معادله، مقدار W_w در سال‌های مختلف با افزایش میزان بارش فصل رشد کاهش می‌یابد. بر اساس نتایج حاصل، معادله درجه دوم برای تعیین مقدار W_w از روی میزان بارش فصل رشد تهیه شد.

برای محصول پنبه در منطقه گرگان، برای چهار سال از ۲۸ سال، آبیاری در فصل رشد لازم نیست و بارش فصل رشد کفایت می‌کند. برای این گیاه، بر اساس میزان بارش پاییز و زمستان قبل از فصل رشد (بهار و تابستان) میزان بارش فصل رشد از روی معادله پیشنهادی قابل پیش‌بینی است و متعاقباً بر اساس میزان بارش فصل رشد مقدار تخمینی W_w تعیین می‌شود. با استفاده از مقدار W_w و مقدار منابع آب آبیاری موجود، سطح زیر کشت پنبه برنامه‌ریزی می‌شود. برای محصول گندم بر اساس احتمال وقوع ۵۰ یا ۸۰ درصد میزان W_w تعیین می‌شود و با توجه به منابع آب آبیاری موجود سطح زیر کشت مشخص می‌شود.

فصل ۱۱

بهینه‌سازی کم آبیاری و نیتروژن کاربردی همراه با بارش فصل

۱-۱۱ مقدمه

افزایش جمعیت در ایران موجب نیاز به غذای بیشتر می‌شود و تولید محصولات زراعی بیشتر در آینده بایستی از طریق افزایش عملکرد به دست آید. عامی اصلی کنترل‌کننده این افزایش، آب و عناصر غذایی می‌باشد. یکی از محصولات مهم زراعی که در تغذیه انسان نقش مهمی دارد غلات و به ویژه گندم است که عمدتاً به صورت دیم و یا فاریاب در پاییز کشت شده و از باران‌های پاییز و زمستان استفاده کرده و نوع فاریاب آن معمولاً در بهار آبیاری می‌شود. بنابراین میزان آب آبیاری متأثر از بارش‌های پاییز، زمستان و همچنین بهار می‌باشد و بایستی به گونه‌ای به کار برده شود که باعث افزایش بازده مصرف آب شود. البته افزایش بازده مصرف آب آبیاری و باران متأثر از کاربرد صحیح کود شیمیایی به ویژه نیتروژن می‌باشد (Oweis et al., 1998; Weinhold et al., 1995; Tavakkoli and Oweis, 2004;) (Tavakoli et al., 2005).

پس از آب، کمبود نیتروژن از مهم‌ترین عوامل کاهش دهنده تولید محصولات زراعی به ویژه غلات و از جمله گندم می‌باشد (Campbell et al., 1998) که در مناطق گندم‌خیز ایران نیز صادق است (Tavakkoli and Oweis, 2004;) (Tavakoli et al., 2005). همان طوری که تأثیر نیتروژن مستقیماً به میزان باران بستگی دارد (Pala et al., 1996) نیاز به نیتروژن با کاربرد آب آبیاری نیز افزایش می‌یابد (Oweis et al., 1998). بنابراین در تحلیل اقتصادی کم آبیاری بایستی اثر بر همکنش آب و نیتروژن منظور شود.

در تحلیل بهینه‌سازی کم آبیاری به خاطر منظور نکردن بعضی عوامل از جمله باران فصل رشد در تابع تولید محصول مقداری خطر پذیری وجود دارد. بنابراین اثر

بارش فصل رشد در تحلیل بهینه‌سازی کم‌آبیاری بایستی مد نظر قرار گیرد. اثر بارش فصل رشد در تحلیل بهینه‌سازی کم‌آبیاری برای محصول پنبه (محصول زراعی صیفی) و گندم (گیاه زراعی شتوی) توسط سپاس‌خواه و اکبری (۲۰۰۵) تحلیل شده است (فصل ۱۰). با منظور کردن بارش فصل رشد در تحلیل اقتصادی کم‌آبیاری، مقادیر بهینه آب کاربردی، W_w با افزایش بارش فصل رشد کاهش یافت و معادله درجه دوم برای این رابطه ارائه گردید. برای محصول پنبه در منطقه کرگان در ۴ سال از ۲۸ سال به علت کفایت بارش فصل رشد به آبیاری نیازی نبود. برای کشت گندم زمستانه مقادیر W_w با احتمال وقوع ۵۰ و ۸۰ درصد به ترتیب ۲۹۹ و ۳۸۱ میلی‌متر تخمین زده شد.

نظر به این که مصرف آب و نیتروژن اثر برهمکنش بر تولید محصول دارند، بهینه‌سازی کم‌آبیاری و کاربرد نیتروژن بر تولید محصول ذرت توسط زندپارسا و سپاسخواه (۲۰۰۱) مورد تحلیل قرار گرفته است (فصل ۹). این تحلیل نشان داد که با قیمت آب و نیتروژن به ترتیب ۱۵/۶ ریال بر متر مکعب و ۶۵۲ ریال بر کیلوگرم، مقدار بهینه آب و نیتروژن کاربردی برای ذرت دانه‌ای در شرایط محدودیت آب به ترتیب ۰/۷۴ متر و ۲۰۶ کیلوگرم بر هکتار می‌شود. در قیمت زیاد آب و نیتروژن (۱۰۰ ریال بر متر مکعب برای آب و ۵۰۰۰۰ ریال بر کیلوگرم برای نیتروژن) مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی به ترتیب ۰/۸۴ متر و ۶۱ کیلوگرم بر هکتار می‌باشد. در این تحلیل‌ها اثر بارش فصل رشد منظور نشده است.

۱۱-۲ اصول نظری و کاربرد آن

روابط تحلیل کم‌آبیاری و نیتروژن کاربردی به صورت زیر توسط زندپارسا و سپاسخواه (۲۰۰۱) ارائه شده است:

$$i_f(w, N) = A i_l(w, N) \quad (۱-۱۱)$$

$$i_l(w, N) = P_c \cdot y(w, N) - c(w, N) \quad (۲-۱۱)$$

که در آنها A کل مساحت کشت شده فاریاب بر حسب هکتار، w مقدار آب کاربردی بر حسب متر مکعب بر هکتار، N مقدار نیتروژن کاربردی بر حسب کیلوگرم بر هکتار، $y(w, N)$ تابع تولید محصول در واحد سطح بر حسب کیلوگرم بر هکتار، $c(w, N)$ تابع هزینه تولید در واحد سطح بر حسب ریال بر هکتار، PC قیمت واحد وزن محصول بر حسب ریال بر کیلوگرم، $il(w, N)$ درآمد خالص در واحد سطح اراضی فاریاب بر حسب ریال بر هکتار و $if(w, N)$ درآمد خالص در تمام مساحت مزرعه فاریاب بر حسب ریال می‌باشد.

ممکن است که مساحت اراضی فاریاب تابعی از مقدار آب موجود باشد. اگر مقدار آب محدود باشد، زارع ممکن است که آن قدر زمین زیر کشت ببرد که تمام آب موجود و بارش فصل رشد (R) را مصرف نماید. بنابراین مساحت اراضی فاریاب به صورت زیر می‌باشد:

$$A = \frac{w_T + R}{w} \quad (۳-۱۱)$$

که در آن w_T کل آب موجود بر حسب میلی‌متر و R مقدار بارش فصل رشد بر حسب میلی‌متر می‌باشد. از طرف دیگر، اگر زمین محدود باشد و محدودیت در مقدار آب وجود نداشته باشد، منطقی است که زارع تمام زمین موجود را زیر کشت ببرد. در غیر این صورت مساحت اراضی فاریاب تابعی از آب موجود نمی‌باشد.

مقادیر آب و نیتروژن کاربردی که تولید محصول را حداکثر کند (یعنی به ترتیب W_m و N_m) از مشتق تابع تولید محصول و برابر صفر قرار دادن آن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial y(w, N)}{\partial w} = 0 \quad (۴-۱۱ الف)$$

$$\frac{\partial y(w, N)}{\partial N} = 0 \quad (۴-۱۱ ب)$$

مقادیر w و N که از معادلات (۴-۱۱ الف) و (۴-۱۱ ب) به دست می‌آیند همان W_m و N_m می‌باشند.

مقادیر آب و نیتروژن کاربردی که در شرایط محدودیت زمین، درآمد خالص را حداکثر کند از مشتق‌گیری معادله (۱-۱۱) نسبت به w و N به صورت زیر به دست می‌آید:

$$(۱۱-۵ \text{ الف})$$

$$\frac{\partial i_f(w, N)}{\partial w} = A \frac{\partial i_l(w, N)}{\partial w} + i_l \frac{\partial A}{\partial w}$$

$$(۱۱-۵ \text{ ب})$$

$$\frac{\partial i_f(w, N)}{\partial N} = A \frac{\partial i_l(w, N)}{\partial N} + i_l \frac{\partial A}{\partial N}$$

در شرایط محدودیت زمین، مقدار A ثابت فرض می‌شود. با صفر قرار دادن معادلات (۱۱-۵ الف) و (۱۱-۵ ب) و حذف A مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی یعنی به ترتیب W_l و N_l به صورت زیر خواهد شد:

$$(۱۱-۶ \text{ الف})$$

$$\frac{\partial i_l(w, N)}{\partial w} = 0$$

$$(۱۱-۶ \text{ ب})$$

$$\frac{\partial i_l(w, N)}{\partial N} = 0$$

که مشتق معادله (۱۱-۲) بوده و برابر صفر قرار داده می‌شود.

در شرایط محدودیت آب، مقدار A تابعی از مقدار آب موجود و بارندگی ($W_T + R$) بوده و اگر محدودیتی در مصرف نیتروژن وجود نداشته باشد (یعنی $\frac{\partial A}{\partial N}$ برابر صفر باشد) مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی (به ترتیب W_w و N_w) از معادلات (۱۱-۵ الف و ب) به دست می‌آید. مشتق معادلات (۱۱-۲) و (۱۱-۳) به صورت زیر انجام شده و در معادلات (۱۱-۵ الف و ب) قرار داده می‌شود:

$$(۱۱-۷ \text{ الف}) \text{ مشتق معادله (۱۱-۲)}$$

$$\frac{\partial i_l(w, N)}{\partial w} = P_c \frac{\partial y(w, N)}{\partial w} - \frac{\partial c(w, N)}{\partial w}$$

$$(۱۱-۷ \text{ ب}) \text{ مشتق معادله (۱۱-۳)}$$

$$\frac{\partial A}{\partial w} = -\frac{w_T}{w^2}$$

$$(۱۱-۸ \text{ الف})$$

$$\frac{\partial i(w, N)}{\partial N} = 0$$

بنابراین معادلات محاسبه مقدار بهینه آب در شرایط محدودیت زمین به صورت

زیر است:

$$P_c \frac{\partial y(w, N)}{\partial w} = \frac{\partial c(w, N)}{\partial w} \quad (۱۱-۹)$$

$$(۱۱-۸ \text{ ب})$$

$$\frac{\partial i(w, N)}{\partial N} = 0$$

و در شرایط محدودیت آب معادلات (۱۱-۵ الف و ب) به صورت زیر نوشته می‌شود (مشتق برابر صفر قرار داده می‌شود):

$$-A \frac{\partial i_l(w, N)}{\partial w} = i_l \frac{\partial A}{\partial w} \quad (۱۱-۱۰)$$

$$(۱۱-۸ \text{ ج})$$

$$\frac{\partial i(w, N)}{\partial N} = 0$$

$$w \left[P_c \frac{\partial y(w, N)}{\partial w} - \frac{\partial c(w, N)}{\partial w} \right] = P_c \cdot y(w, N) - c(w, N) \quad (۱۱-۱۱)$$

حل معادلات (۱۱-۸)، (۱۱-۹) و (۱۱-۱۱) برای w و N مقادیر بهینه آب کاربردی در شرایط محدودیت زمین و آب به ترتیب W_l و N_l و مقادیر بهینه نیتروژن در شرایط محدودیت زمین و آب به ترتیب N_l و N_w را به دست می‌دهد. معادله (۱۱-۴) یعنی مشتق تابع تولید نسبت به آب و نیتروژن کاربردی و برابر صفر قرار دادن آن منجر به محاسبه W_m و N_m یعنی مقادیر آب و نیتروژن کاربردی برای حداکثر تولید محصول خواهد شد.

کاربردی در شرایط محدودیت زمین و آب به دست آورد. توابع تولید محصول و هزینه تولید به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$(۱۶-۱۱)$$

$$y(w, N) = a_0 + a_1(w + R) + a_2(w + R)^2 + a_3(N + N_r) + a_4(N + N_r)^2$$

$$c(w, N) = c_0 + c_1 w + c_2 N \quad (۱۷-۱۱)$$

که در آنها $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, c_0, c_1, c_2$ ضرایب ثابت، w مقدار آب کاربردی، R مقدار بارش فصل رشد، N مقدار نیتروژن کاربردی و N_r مقدار نیتروژن معدنی موجود در خاک می‌باشد. با قرار دادن معادلات (۱۶-۱۱) و (۱۷-۱۱) در معادلات (۴-۱۱)، (۹-۱۱)، (۱۱-۱۱)، (۱۳-۱۱) و (۱۵-۱۱) معادلاتی برای محاسبه N_m, W_m ، N_w, W_w, N_l, W_l به صورت زیر به دست می‌آید:

$$w_m = -\frac{a_1}{2a_2} - R \quad (۱۸-۱۱ \text{ الف})$$

$$N_m = -\frac{a_3}{2a_4} - N_r \quad (۱۸-۱۱ \text{ ب})$$

$$w_l = \frac{c_1 - a_1 P_C}{2a_2 P_C} \quad (۱۹-۱۱ \text{ الف})$$

$$N_l = \frac{c_2 - a_3 P_C}{2a_4 P_C} - N_r \quad (۱۹-۱۱ \text{ ب})$$

$$(۲۰-۱۱ \text{ الف})$$

$$w_w = \left[R^2 + \frac{a_1}{a_2} R + \frac{a_0}{a_2} + \frac{a_3}{a_2} (N_w + N_r) + \frac{a_4}{a_2} (N_w + N_r)^2 - \frac{c_0}{a_2 P_C} - \frac{c_2}{a_2 P_C} N_w \right]^{0.5}$$

$$N_w = \frac{c_2 - a_3 P_C}{2a_4 P_C} - N_r \quad (۲۰-۱۱ \text{ ب})$$

با جایگذاری مقادیر W_m و N_m در معادله (۲-۱۱) درآمد خالص در تولید حداکثر محصول (آبیاری کامل) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$i_l(w_m, N_m) = P_C \cdot y(w_m, N_m) - c(w_m, N_m) \quad (۱۲-۱۱)$$

سپس درآمد خالص در تولید حداکثر محصول (معادله ۱۲-۱۱) در طرف چپ معادله (۲-۱۱) قرار داده شده و نتیجه زیر حاصل می‌شود:

$$i_l(w_m, N_m) = P_C \cdot y(w, N) - c(w, N) \quad (۱۳-۱۱)$$

حل معادله (۱۳-۱۱) منجر به محاسبه مقادیر آب و نیتروژن کاربردی می‌شود که درآمد خالص در واحد سطح معادل آن چه که در آبیاری کامل (حداکثر تولید محصول در واحد سطح) تولید می‌شود، ایجاد می‌کند که همان مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی در شرایط محدودیت زمین است (N_l و W_l).

با تحلیل مشابه آن چه گذشت، مقدار درآمد خالص برای کاربرد آب و نیتروژن در شرایط محدودیت آب از معادلات (۱-۱۱) و (۳-۱۱) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$i_f(w_m, N_m) = \frac{(w_r + R)}{w_m} \cdot i_l(w_m, N_m) \quad (۱۴-۱۱)$$

$$i_f(w_m, N_m) = \frac{(w_r + R)}{w} \cdot i_l(w, N) \quad (۱۵-۱۱)$$

معادله (۱۵-۱۱) برای محاسبه مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی در شرایط محدودیت آب (N_w و W_w) حل می‌شود.

معادلات (۴-۱۱)، (۹-۱۱)، (۱۱-۱۱)، (۱۳-۱۱) و (۱۵-۱۱) معادلات کاملاً عمومی هستند و در صورت تهیه توابع تولید محصول و هزینه تولید و به کارگیری آنها در معادلات مذکور می‌توان معادلات صریح برای محاسبه مقادیر بهینه آب و نیتروژن

همان گونه که انتظار می‌رفت معادله (۱۱-۲۰-ب) شبیه معادله (۱۱-۱۹-ب) می‌باشد زیرا معادلات (۱۱-۸-الف)، (۱۱-۸-ب) و (۱۱-۸-ج) مشابه‌اند.

۱۱-۳ داده‌های تحلیل

داده‌های تحلیل از پژوهشی که در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور طی سال‌های ۸۱-۱۳۷۹ در مراغه انجام شده و توسط توکلی (۱۳۸۳) گزارش شده گرفته شده است. خاک محل پژوهش دارای بافت رس سیلتی با حد ظرفیت زراعی، نقطه پژمردگی دائم و چگالی ظاهری به ترتیب ۳۸ درصد حجمی، ۲۰ درصد حجمی و ۱/۱۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده و متوسط آب قابل استفاده در یک متر عمق خاک برابر ۱۸۰ میلی‌متر است.

ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم مراغه در عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۷۲۵ متر از سطح دریا قرار دارد.

میزان نیتروژن معدنی خاک در سه سال آزمایش به ترتیب ۱۱۱، ۱۰۷/۵ و ۹۶/۹ کیلوگرم بر هکتار تخمین زده شده است. میانگین بارش سالانه، دمای هوا و رطوبت نسبی در سه سال آزمایش به ترتیب ۲۷۲ میلی‌متر، ۱۰/۵ درجه سانتی‌گراد و ۵۰/۴ درصد بود. میزان بارش سالانه در سال‌های متوالی پژوهش به ترتیب ۲۶۳، ۲۳۴ و ۳۸۲ میلی‌متر بود که در فصل رشد اتفاق افتاد، مگر در فصل رشد سال ۸۰-۱۳۷۹ که ۳۱/۶ میلی‌متر بعد از فصل رشد به وقوع پیوست.

طرح آزمایشی کرت‌های خرد شده با بلوک‌های کامل تصادفی و در سه تکرار بود. کرت‌های اصلی شامل تیمارهای آبیاری کامل، آبیاری با ۶۶ درصد آبیاری کامل، آبیاری با ۳۳ درصد آبیاری کامل و بدون آبیاری (شرایط دیم) و کرت‌های فرعی شامل تیمارهای نیتروژن با صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص می‌باشد. نصف نیتروژن در هنگام تهیه زمین و کاشت همراه با کل فسفر (۳۰)

کیلوگرم در هکتار فسفر خالص) در پائیز و نیم دیگر در اوائل بهار به صورت سرک مصرف شد.

جدول ۱۱-۱ تعداد آبیاری، مقدار آب در هر آبیاری و کل آب مصرفی در تیمارهای مختلف و سال‌های مختلف پژوهش

سال	تیمار آبیاری	مقدار آب در هر آبیاری (میلی‌متر)	تعداد آبیاری در فصل رشد	کل آب مصرفی در فصل رشد (میلی‌متر)
۱۳۷۸-۷۹	کامل (۱۰۰٪)	۷۲	۳	۱۸۰
	۶۶٪	۴۸	۳	۱۳۲
	۳۳٪	۲۴	۳	۸۴
	دیم	-	-	۰
۱۳۷۹-۸۰	کامل (۱۰۰٪)	۷۲	۴	۲۵۶
	۶۶٪	۴۸	۴	۱۸۴
	۳۳٪	۲۴	۴	۱۱۲
	دیم	-	-	۰
۱۳۸۰-۸۱	کامل (۱۰۰٪)	۷۲	۳	۱۸۴
	۶۶٪	۴۸	۳	۱۳۶
	۳۳٪	۲۴	۳	۸۸
	دیم	-	-	۰

مساحت کرت‌های فرعی ۲۰ متر مربع بود و در آن گندم زمستانه رقم سبلان به میزان ۴۰۰ بذر در متر مربع در پائیز و در عمق ۵-۳ سانتی‌متری کاشته شد. اولین آبیاری در پاییز، بلافاصله بعد از کاشت و به طور یکسان برای تمامی تیمارها، به جز تیمار بدون آبیاری (دیم)، و به میزان ۴۰ میلی‌متر اعمال گردید. تیمارهای آبیاری در بهار بر مبنای ۵۰ درصد تخلیه رطوبت خاک (S.M.D) در تیمار آبیاری کامل و تأمین ۱۰۰، ۶۶ و ۳۳ درصد به ترتیب برای تیمارهای آبیاری بوده است و میزان آن (d) در هر نوبت ۷۲، ۴۸ و ۲۴ میلی‌متر برای تیمارهای آبیاری محاسبه گردید. تعداد آبیاری‌ها، مقدار آب در هر آبیاری و کل آب مصرفی در سال‌های مختلف پژوهش در

جدول (۱-۱۱) ارائه شده است. آب آبیاری به وسیله لوله‌های سوراخ‌دار به طول ۴ متر که به شیلنگ و سیستم لوله‌ای تحت فشار متصل بود، در سطح کرت توزیع و مقدار آن از طریق کنتور حجمی کنترل می‌گردید. منبع تأمین آب (یعنی چاه) فاقد مشکلات شوری بوده است.

اولین باران مؤثر در روزهای ۲۱۹ الی ۱۰ آبان به میزان ۲۷ میلی‌متر در سال اول، در روزهای ۲-۴ آبان به میزان ۱۷/۴ میلی‌متر در سال دوم و در روز ۲۶ مهر به میزان ۱۳ میلی‌متر در سال سوم به وقوع پیوست. آخرین باران مؤثر در روز ۱۸ اردیبهشت به میزان ۷ میلی‌متر در سال اول، در روز ۱۵ اردیبهشت به میزان ۷ میلی‌متر در سال دوم و در روزهای ۲۱-۲۳ اردیبهشت به میزان ۹/۲ میلی‌متر در سال سوم ریزش کرد. تاریخ‌های کاشت و برداشت به ترتیب روزهای ۱۴-۲۲ مهر و ۳۱ تیر تا ۷ مرداد بود.

۴-۱۱ تجزیه و تحلیل نتایج

۱-۴-۱۱ تابع تولید محصول

مقادیر دانه گندم در تیمارهای مختلف آب و نیتروژن در سال‌های مختلف در جدول (۲-۱۱) ارائه شده است. رابطه رگرسیونی بین میزان محصول دانه و مجموع مقادیر آب آبیاری و بارش فصل رشد در تیمارهای مختلف نیتروژن در شکل (۱-۱۱) ارائه شده است. منحنی‌های شکل (۱-۱۱) نشان می‌دهند که تابع تولید از نوع درجه ۲ کاهنده می‌باشد. بنابراین معادله تابع تولید محصول (معادله ۱۱-۱۶) به کمک روش رگرسیون چند متغیره به صورت رابطه بین میزان محصول دانه، مقدار مجموع آب و بارش فصل رشد و مجموع نیتروژن کاربردی و موجود در خاک به صورت زیر تهیه گردید:

(۲۱-۱۱)

$$y(w, N) = -4.28 + 11.79(w+R) - 3.78(w+R)^2 + 0.03(N+N_r) - 8.54 \times 10^{-5}(N+N_r)^2$$

$$r^2 = 0.90 \quad SE = 0.31 \quad n = 56 \quad p \leq 1.56 \times 10^{-24}$$

که در آن $y(w, N)$ محصول دانه بر حسب تن در هکتار، w مقدار آب کاربردی بر حسب متر ((R, m) میزان بارش فصل رشد بر حسب متر، N میزان نیتروژن کاربردی بر حسب کیلوگرم در هکتار و N_r میزان نیتروژن معدنی موجود در خاک بر حسب کیلوگرم بر هکتار می‌باشد.

جدول ۱۱-۲ مقادیر محصول دانه گندم زمستانه رقم سبلان (کیلوگرم در هکتار) در تیمارهای مختلف آب و کود نیتروژن در سال‌های مختلف

سال	تیمار	تیمار کود نیتروژن، کیلوگرم در هکتار			
زراعی	آبیاری	صفر	۳۰	۶۰	۹۰
۱۳۷۸-۷۹	دیم	۱۴۵۶	۱۱۸۸	۱۲۳۳	۱۱۱۰
	%۳۳	۲۰۶۲	۲۱۷۶	۲۶۶۱	۲۴۳۷
	%۶۶	۲۱۶۶	۲۴۱۳	۲۷۲۶	۲۶۷۰
	کامل (%۱۰۰)	۲۰۸۳	۲۹۹۳	۲۰۷۹	۳۲۳۳
۱۳۷۹-۸۰	دیم	۱۲۵۷	۱۰۹۰	۹۱۵	۷۶۴
	%۳۳	۱۹۵۷	۲۲۱۷	۲۵۶۶	۲۱۵۵
	%۶۶	۲۲۸۸	۲۵۱۹	۲۸۹۵	۳۴۱۹
	کامل (%۱۰۰)	۲۴۳۸	۳۰۱۴	۳۶۹۵	۴۱۱۰
۱۳۸۰-۸۱	دیم	۷۴۹	۷۸۶	۶۷۲	۵۶۴
	%۳۳	۲۸۷۰	۳۲۰۰	۳۳۱۸	۳۳۴۷
	%۶۶	۳۱۴۷	۳۳۱۹	۴۰۹۰	۳۹۵۹
	کامل (%۱۰۰)	۳۱۶۶	۳۴۰۴	۳۹۲۴	۴۲۲۸

۲-۴-۱۱ تابع هزینه تولید

هزینه ثابت تولید (بدون هزینه آب آبیاری و نیتروژن کاربردی) ۲۴۳۱۵۲۹ ریال محاسبه شد. هزینه ثابت شامل هزینه‌های تهیه زمین، بذرکاری، کود دهی، آفت و علف‌کش، برداشت، انتقال محصول و اجاره زمین می‌باشد. تابع هزینه تولید شامل هزینه‌های ثابت و متغیر به قرار زیر است:

$$c(w, N) = 3431529 + 1200w + 913N \quad (11-22)$$

که در آن $c(w, N)$ هزینه تولید بر حسب ریال در هکتار، w مقدار آب کاربردی بر حسب میلی‌متر (mm) و N میزان نیتروژن کاربردی بر حسب کیلوگرم در هکتار است.

۱۱-۵ تحلیل اقتصادی

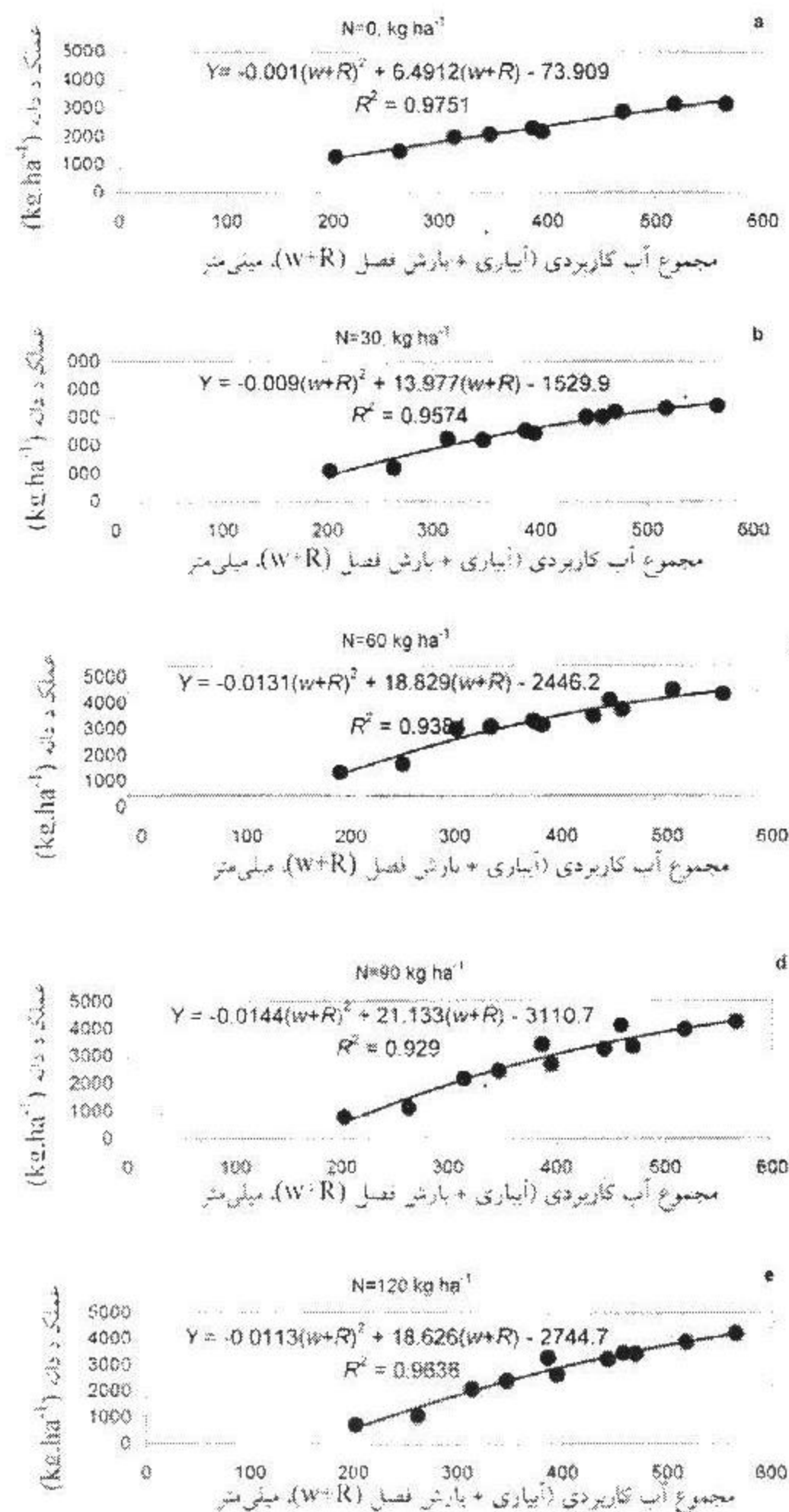
۱۱-۵-۱ شرایط محدودیت زمین

برای تولید گندم زمستانه وقتی که مقدار معینی زمین در پائیز کشت شده، در صورتی که محدودیت آب در بهار و تابستان وجود نداشته باشد، تحلیل اقتصادی برای بهینه‌سازی مصرف آب در بهار و تابستان بایستی در شرایط محدودیت زمین صورت گیرد. با استفاده از قیمت واحد وزن (تن در هکتار) گندم، ۱۷۵۵۰۰۰ ریال و ضرایب معادلات (۱۱-۲۱) و (۱۱-۲۲)، معادلات تعیین مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی (N_I و W_I) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$W_I + R = 1.47 \quad (11-23)$$

$$N_I + N_r = 190 \quad (11-24)$$

در شرایط محدودیت زمین، شرایط معین تولید محصول و هزینه تولید، مجموع مقدار بهینه آب کاربردی و بارش فصل رشد ($W_I + R$) و مجموع مقدار بهینه نیتروژن کاربردی و موجود در خاک ($N_I + N_r$) ثابت هستند و مقادیر N_I و W_I به هم وابستگی ندارند. با استفاده از مقادیر بارش فصل رشد و نیتروژن معدنی موجود در خاک برای سال‌های مختلف پژوهش، مقادیر N_I و W_I محاسبه شد. نتایج در جدول (۱۱-۳) ارائه شده است. بر اساس معادلات (۱۱-۲۳) و (۱۱-۲۴) با افزایش مقادیر R و N_r مقادیر W_I و N_I کاهش می‌یابد. مقدار W_I به مراتب بیش از مقداری است که در منطقه برای کشت گندم قابل دسترس است. بنابراین در منطقه پژوهش شرایط محدودیت آب حکمفرما است.



شکل ۱۱-۱ رابطه بین عملکرد دانه و کل آب مصرفی (بارش + آب آبیاری) در کاربرد مقادیر مختلف نیتروژن

جدول ۱۱-۳ مقدار بهینه آب و نیتروژن کاربردی تحت شرایط محدودیت آب و

محدودیت زمین

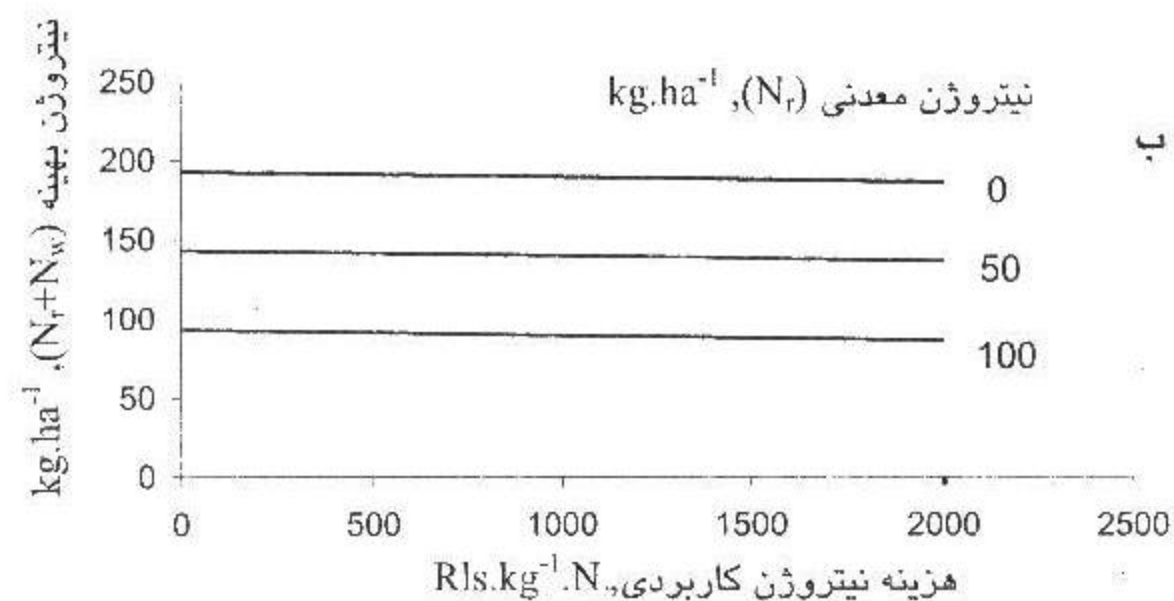
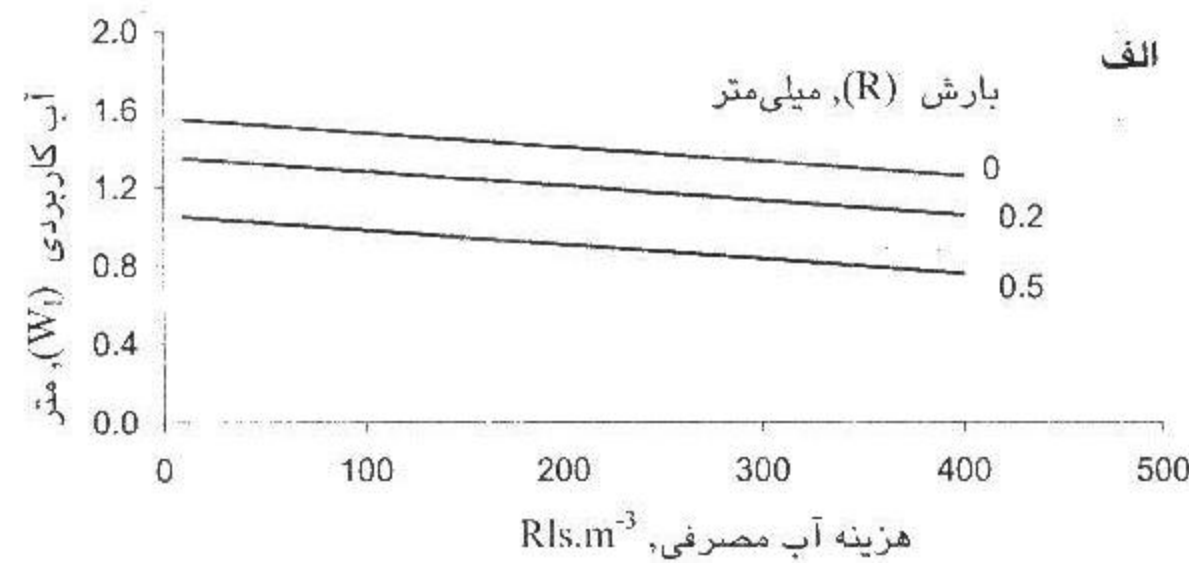
محدودیت آب		محدودیت زمین		
نیتروژن کاربردی (kg.ha ⁻¹)	آب کاربردی (متر)	نیتروژن کاربردی (kg.ha ⁻¹)	آب کاربردی (متر)	
۸۲/۳	۰/۲۵۷	۸۲/۳	۱/۲۰۷	۱۳۷۸-۱۳۷۹
۸۲/۸	۰/۴۷۷	۸۲/۸	۱/۲۶۸	۱۳۷۹-۱۳۸۰
۹۳/۳	—	۹۳/۳	۱/۰۳۸	۱۳۸۰-۱۳۸۱

در شرایط محدودیت زمین، تحلیل اقتصادی با قیمت‌های مختلف آب و نیتروژن انجام شد. نتایج در شکل (۱۱-۲) ارائه شده است. مقادیر بهینه نیتروژن کاربردی به قیمت نیتروژن حساس نیست. به هر حال مقدار N_1 با افزایش مقدار نیتروژن معدنی خاک (N_r) کاهش می‌یابد (شکل ۱۱-۲ ب). مقادیر W_1 با افزایش قیمت آب کاهش می‌یابد.

۱۱-۵-۲ شرایط محدودیت آب

در منطقه پژوهش، آب عامل محدود کننده است. بنابراین تحلیل اقتصادی در این شرایط انجام شده است. با استفاده از قیمت واحد وزن گندم و ضرایب معادلات (۱۱-۲۰ الف) و (۱۱-۲۰ ب) مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی (N_w و W_w) محاسبه شده‌اند. معادله تعیین کننده N_w و W_w به صورت زیر است:

$$w_w + N_r = 190 \quad (11-25)$$



شکل ۱۱-۲ رابطه بین پارامترهای مختلف تحت شرایط محدودیت زمین:
الف) رابطه بین آب مصرفی بهینه و هزینه آب برای بارش‌های مختلف فصل
و ب) رابطه بین نیتروژن کاربردی بهینه و هزینه نیتروژن برای مقادیر مختلف نیتروژن معدنی خاک

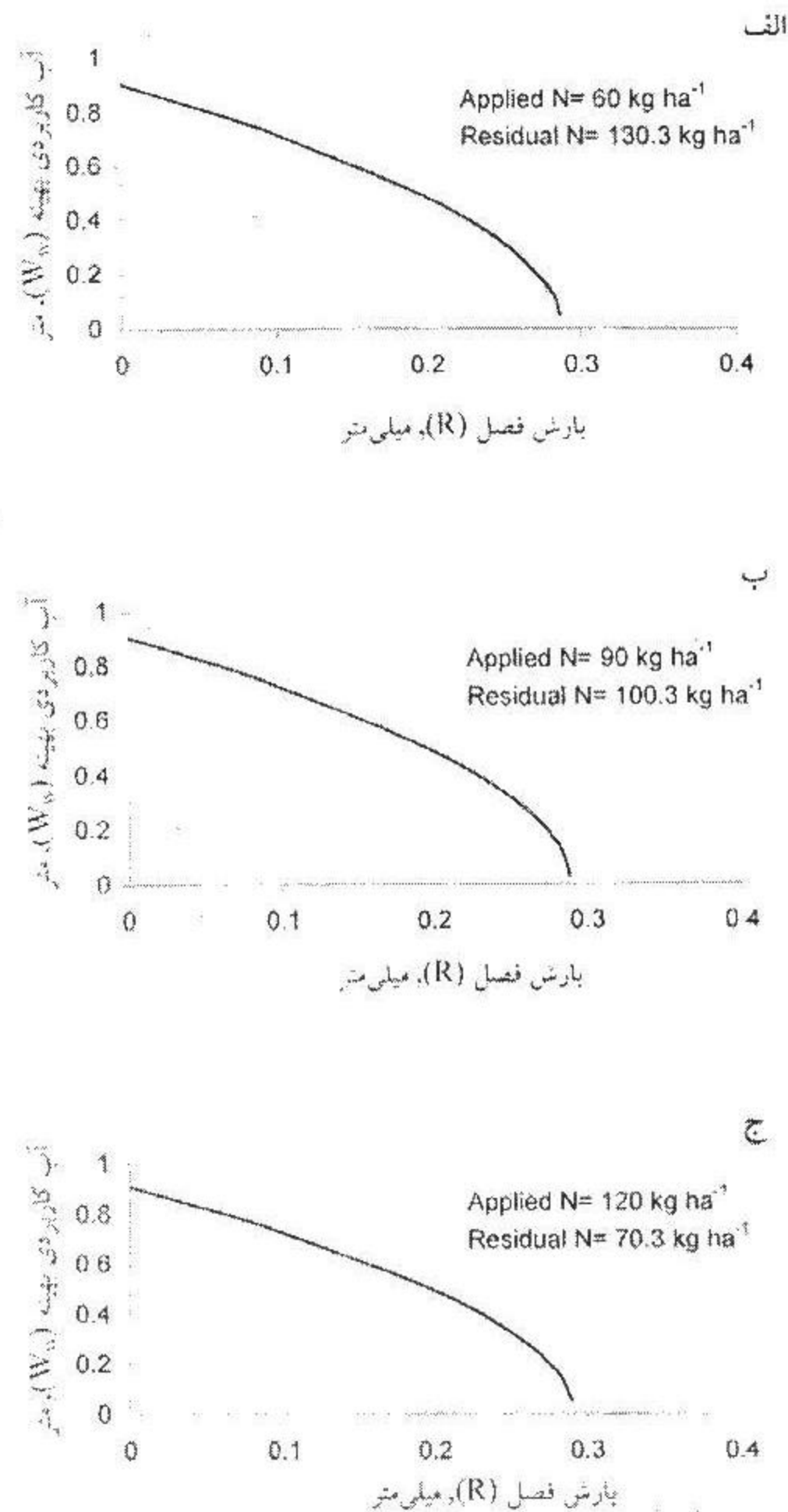
$$w_w = (R^2 - 3.12R + 1.38 \times 10^{-4} N_w + 0.81)^{0.5} \quad (11-26)$$

همان طور که انتظار می‌رفت معادلات (۱۱-۲۳) و (۱۱-۲۵) مشابه‌اند. با استفاده از مقادیر بارش فصل رشد (R) و مقدار بهینه نیتروژن کاربردی (N_w) برای سال‌های پیاپی آزمایش، مقادیر W_w محاسبه شد و نتایج در جدول (۱۱-۳) نشان داده شده

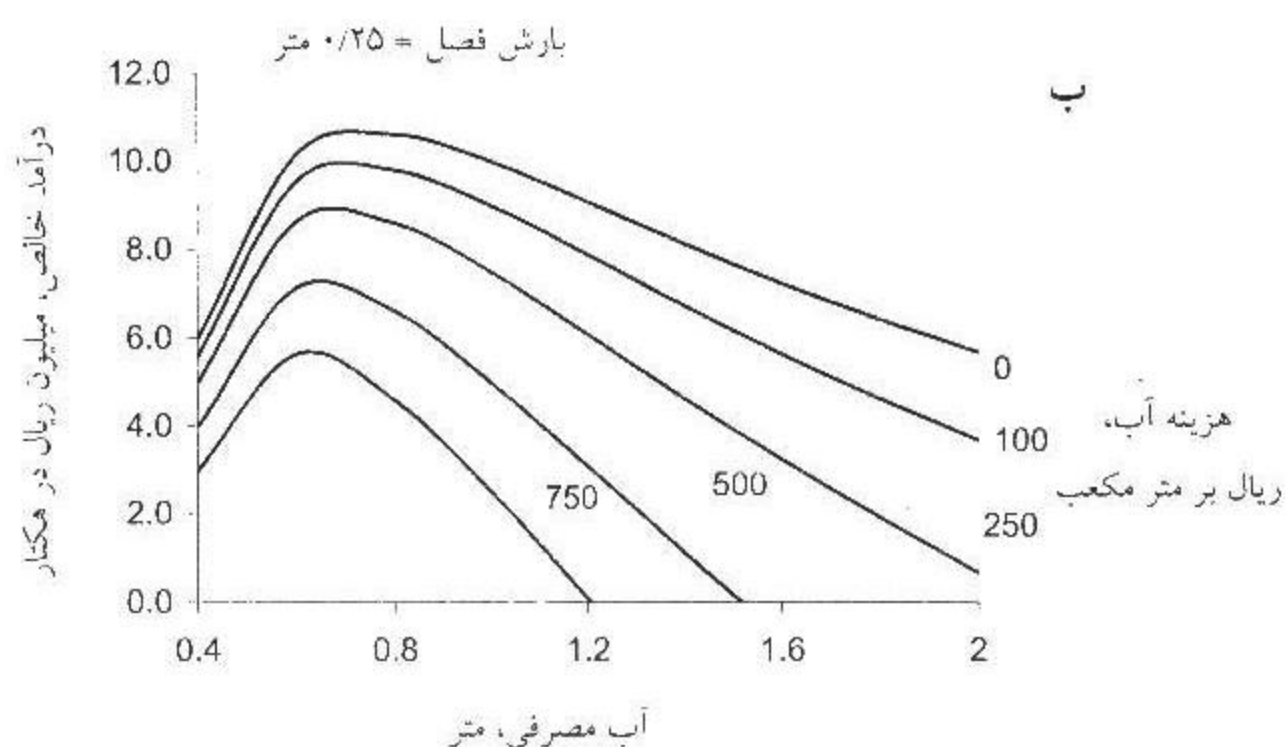
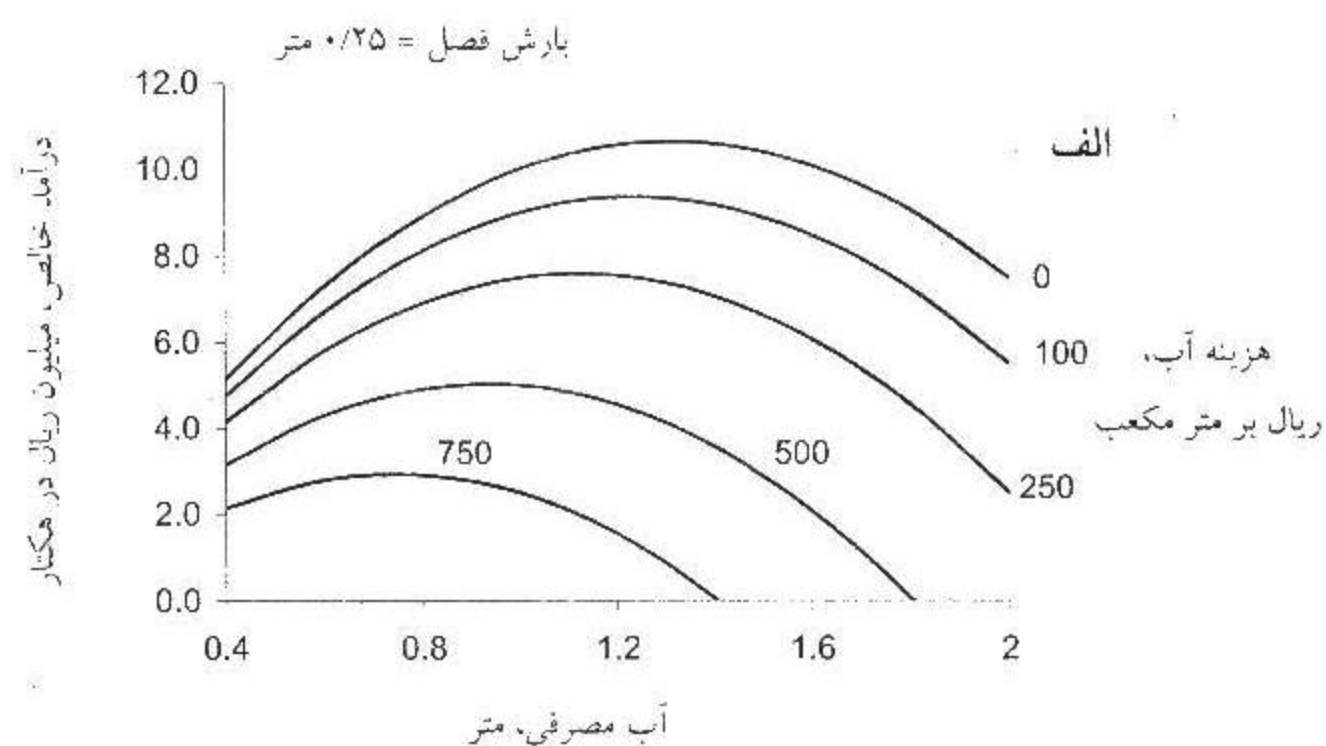
است. مقادیر بهینه آب کاربردی (W_w) در فصل رشد سال ۸۱-۱۳۸۰ صفر بود چون که مقدار بارش فصل رشد و کاربرد نیتروژن به گونه‌ای بود که مقدار پرانتز معادله (۱۱-۲۶) منفی شده و جوابی به دست نیامد. تحلیل‌های بیشتر نشان داد که با قیمت‌های فعلی آب و نیتروژن، مقدار بهینه آب کاربردی (W_w) با کاهش میزان بارش فصل رشد افزایش می‌یابد (شکل ۱۱-۳).

در شرایط محدودیت آب، بر اساس معادلات (۱۱-۲۰ الف) و (۱۱-۲۰ ب) مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی به قیمت نیتروژن وابسته‌اند ولی وابستگی N_w به قیمت نیتروژن قابل توجه نیست (شکل ۱۱-۲ ب). مقادیر بهینه آب کاربردی (W_w) به صورت تابعی از قیمت نیتروژن در مقادیر مختلف بارش فصل رشد، مقادیر N_w و N_r در شکل (۱۱-۴) ارائه شده است. در مقادیر معینی از N_w و N_r بارش فصل رشد، مقدار بهینه آب کاربردی با افزایش قیمت نیتروژن افزایش یافت و مقدار آن برای مقادیر زیاد N_w و کم N_r افزایش نشان داد. به هر حال، شدت افزایش مقدار W_w در شرایطی که بارش فصل رشد کم و در نتیجه مقدار W_w زیاد است قابل توجه نیست.

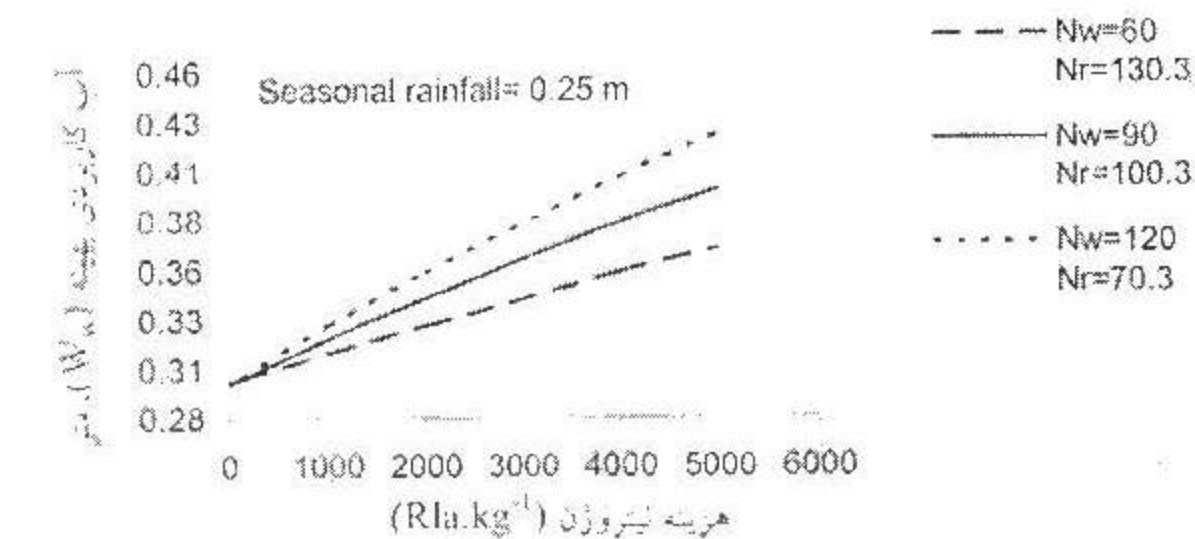
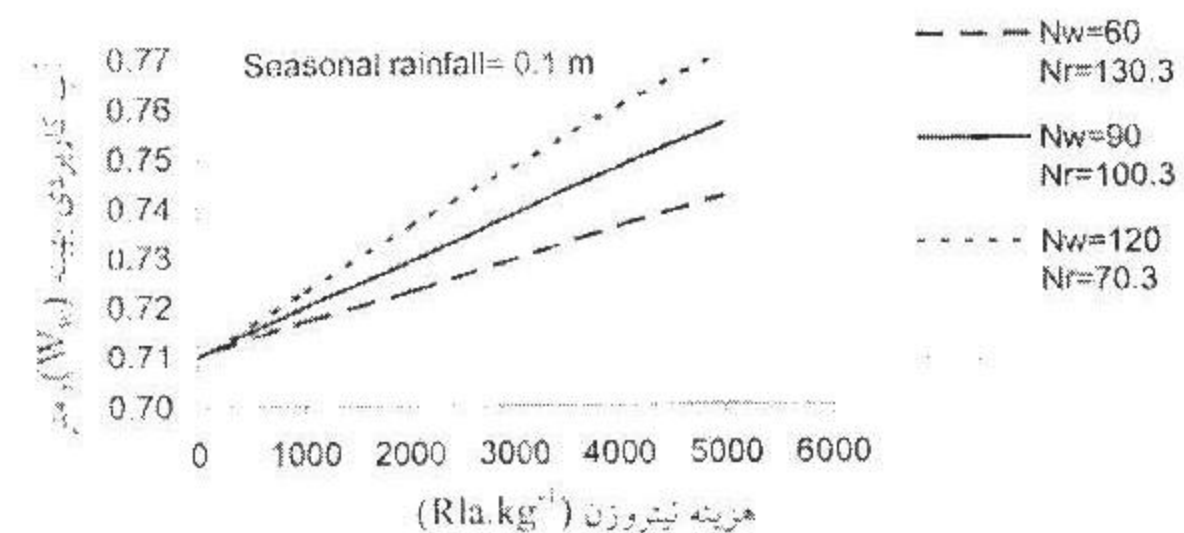
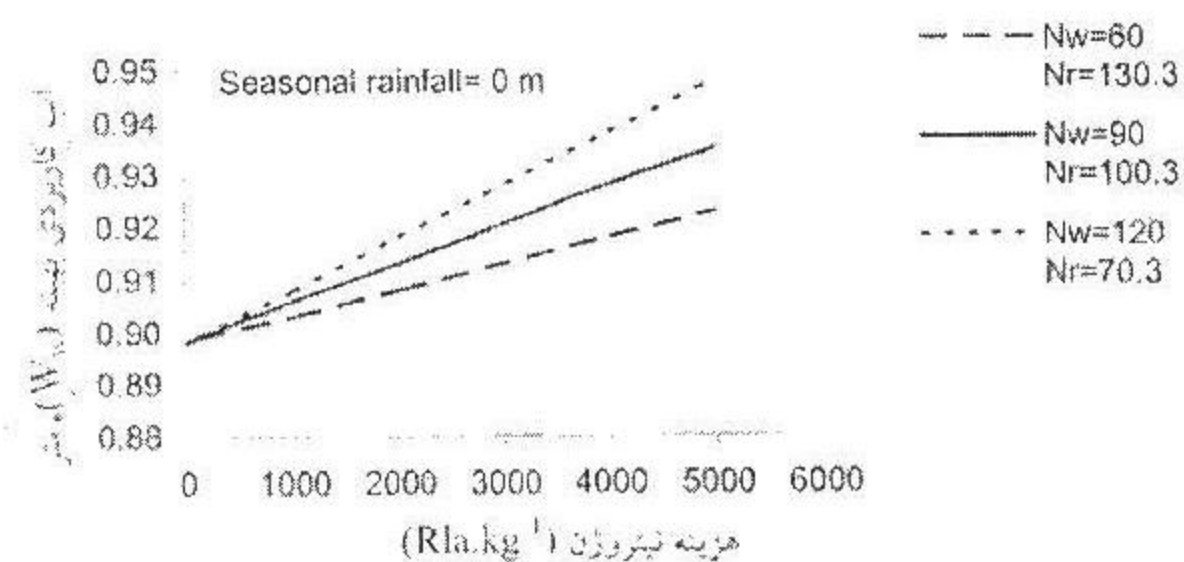
مقادیر بهینه آب و نیتروژن کاربردی و درآمد خالص برای تولید حداکثر محصول، در شرایط محدودیت زمین و آب و در مقدار نیتروژن معدنی خاک ۷۰ کیلوگرم در هکتار در جدول (۱۱-۴) ارائه شده است. درآمد خالص در شرایط محدودیت زمین و آب برای مقادیر بارش فصل رشد ۰/۲۵ متر، N_r و N_w یا N_w به ترتیب ۷۰/۳ و ۱۲۰ کیلوگرم بر هکتار در شکل (۱۱-۵) نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۳ رابطه بین آب مصرفی بهینه و بارش فصل تحت شرایط محدودیت آب و مقادیر مختلف نیتروژن کاربردی و نیتروژن معدنی



شکل ۵-۱۱ رابطه بین درآمد خالص و آب کاربردی در قیمت‌های مختلف آب و مقدار بارش ۰/۲۵ متر، N_r برابر ۷۰/۳ کیلوگرم در هکتار و N_w برابر ۱۲۰ کیلوگرم در هکتار: (الف) شرایط محدودیت زمین و (ب) شرایط محدودیت آب



شکل ۴-۱۱ رابطه بین آب مصرفی بهینه و هزینه نیتروژن تحت شرایط محدودیت آب و کاربرد مقادیر مختلف نیتروژن و نیتروژن معدنی و مقادیر مختلف بارش فصل

در شرایط محدودیت آب، مساحت نسبی اراضی فاریاب به صورت $\frac{W_m}{W_w}$ محاسبه شده و مقدار نسبی افزایش اراضی فاریاب به صورت $(\frac{W_m}{W_w} - 1)$ محاسبه گردید.

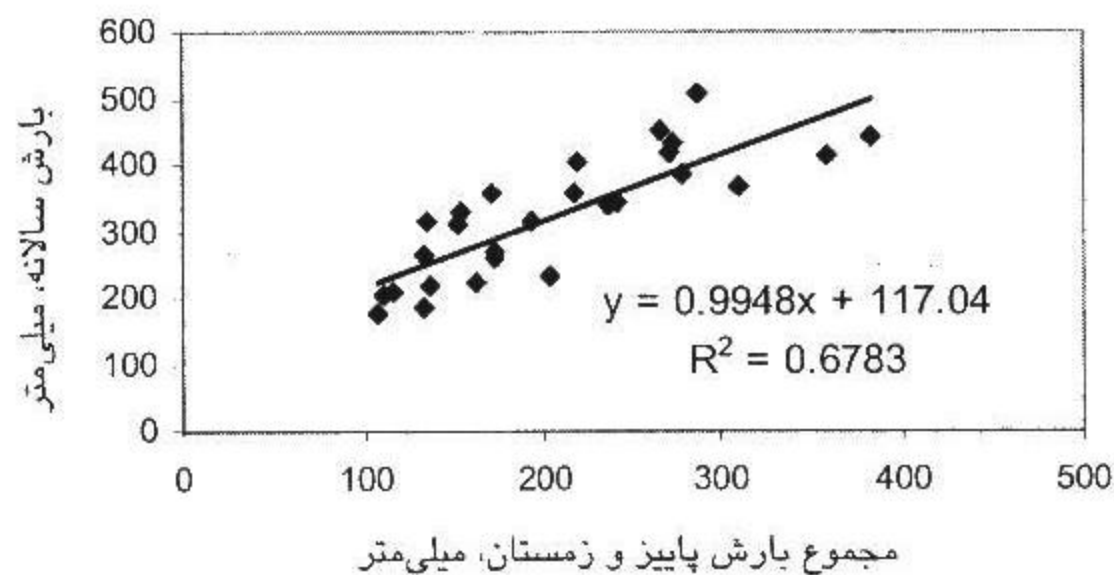
در شرایط محدودیت آب، حداکثر درآمد خالص در مقایسه با شرایط محدودیت زمین در مقادیر کمتر آب کاربردی حاصل شد (شکل‌های ۵-۱۱ ب و ۵-۱۱ الف). در شرایط محدودیت آب، درآمد خالص در واحد آب حداکثر شده است در حالی که در شرایط محدودیت زمین درآمد خالص در واحد زمین حداکثر می‌شود (جدول ۴-۱۱). محدودیت زمین و آب موجب کاهش مقادیر بهینه آب کاربردی در مقایسه با شرایط حداکثر تولید محصول می‌شود. این کاهش برای محدودیت آب بیشتر از شرایط محدودیت زمین است (جدول ۴-۱۱). در شرایط محدودیت آب، مساحت اراضی فاریاب در مقادیر بارش فصل رشد صفر، ۰/۱ و ۰/۲ متر به ترتیب ۷۲٪، ۱۰۲٪ و ۱۷۸٪ افزایش یافته است (جدول ۴-۱۱). درآمد در واحد سطح در شرایط محدودیت زمین خیلی کمتر افزایش یافته است ولی کاهش درآمد در واحد سطح برای شرایط محدودیت آب خیلی قابل توجه است. همچنین محاسبات در مقادیر مختلف نیتروژن معدنی خاک نشان می‌دهد که مقدار بهینه نیتروژن کاربردی عمدتاً تحت تأثیر مقدار نیتروژن معدنی خاک قرار گرفته است تا شرایط محدودیت زمین یا آب (داده‌ها نشان داده نشده‌اند).

۱۱-۵-۳ برنامه‌ریزی کم آبیاری گندم همراه با بارش فصل رشد

کاربرد معادله (۲۶-۱۱) به پیش‌بینی مقدار بارش فصل رشد گندم زمستانه قبل از شروع فصل رشد بستگی دارد و در غیر این صورت به کمک تحلیل احتمال وقوع، ممکن است که مقدار بهینه آب کاربردی در شرایط محدودیت آب تعیین شود. برای محل پژوهش رابطه بین بارش فصل رشد سالانه (R ، میلی‌متر) و مجموع بارش فصل‌های پاییز و زمستان (R_p ، میلی‌متر) در شکل (۶-۱۱) نشان داده شده و به صورت زیر است:

$$R = 0.995R_p + 117 \quad r^2 = 0.63 \quad p \leq 1.31 \times 10^{-7} \quad (27-11)$$

با استفاده از معادله (۲۷-۱۱) و مجموع بارش فصل‌های پاییز و زمستان، میزان بارش فصل رشد (سالانه) تخمین زده می‌شود. سپس به کمک آن و معادله (۲۶-۱۱) مقدار بهینه آب کاربردی محاسبه شد. با استفاده از این مقدار، میزان نیاز آبیاری سطح زیر کشت گندم در فصل‌های بهار و تابستان معین شده و بر اساس آن و میزان آب موجود سطح زیر کشت محصولات صیفی (تابستانه) مشخص گردید.

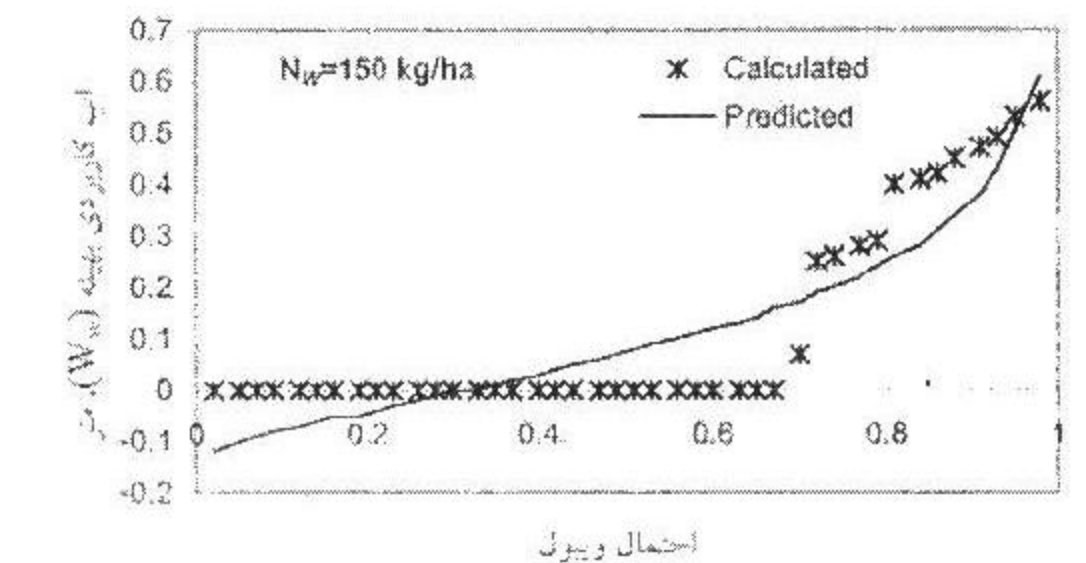
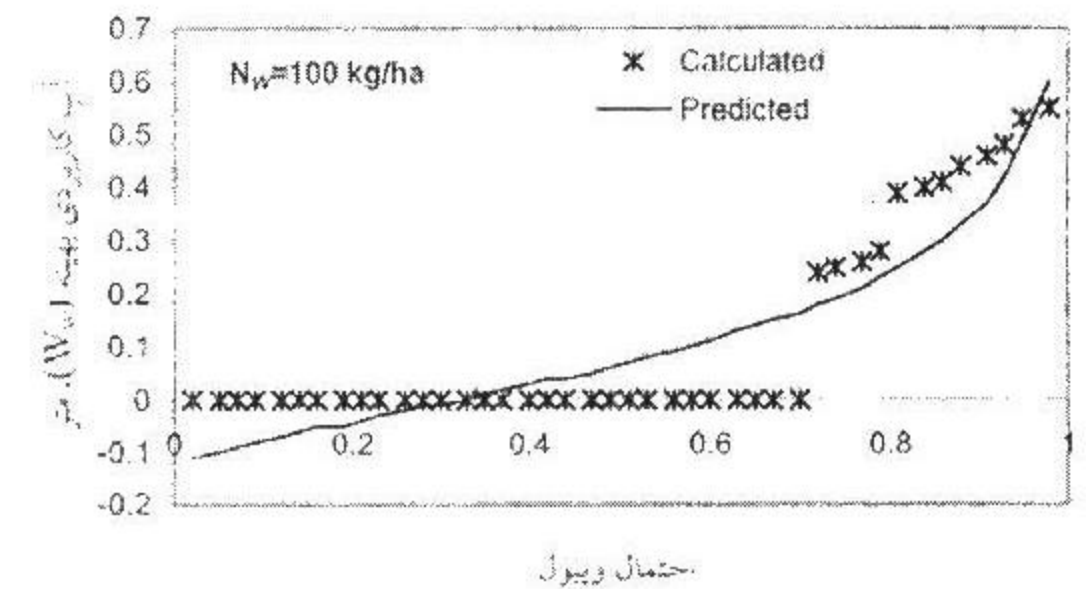
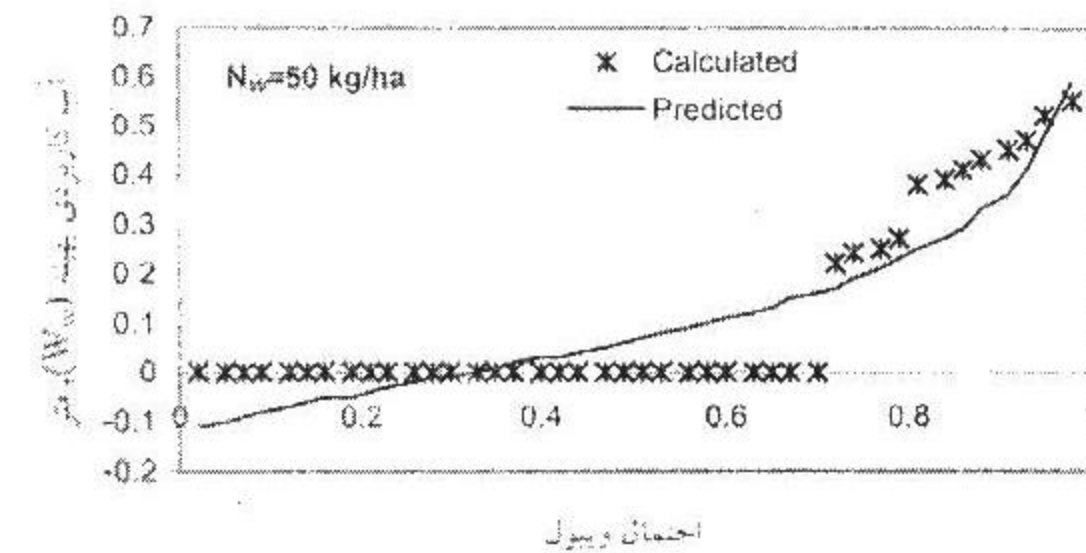


شکل ۱۱-۶ رابطه بین بارش سالانه و مجموع بارش پاییز و زمستان

با استفاده از مقادیر بارش فصل رشد سال‌های مختلف مقادیر W_w آنها محاسبه شد. سپس احتمال وقوع آنها با استفاده از معادله ویبول (Chow et al., 1988) به صورت زیر محاسبه گردید:

$$p = \frac{m}{n+1}$$

که در آن p احتمال وقوع بر حسب اعشار، m مرتبه مشاهدات و n تعداد مشاهدات می‌باشد. رابطه بین مقادیر و احتمال وقوع آنها در شکل (۷-۱۱) ارائه شد و مناسب‌ترین تابع توزیع برای این رابطه پیرسون تیپ III به دست آمده است. با این تابع توزیع، مقدار W_w با احتمال وقوع ۵۰ و ۸۰ درصد به ترتیب برابر صفر و ۰/۲۷۱ متر به دست آمد که می‌تواند در برنامه‌ریزی کم آبیاری گندم در منطقه پژوهش به کار رود.



شکل ۱۱-۷ رابطه بین آب بهینه کاربردی و احتمال و بیول در مقادیر مختلف کاربرد بهینه نیتروژن

۱۱-۶ نتیجه گیری

تابع تولید محصول گندم با وجود داده‌های پژوهشی برای سه سال متوالی با مقادیر مختلف بارش فصل رشد و میزان آب کاربردی با اطمینان بالاتری به دست آمده و ضرایب آن منطقی‌تر هستند. در شرایط محدودیت زمین، برای تابع تولید محصول معین و تابع هزینه تولید مشخص، مجموع مقادیر بهینه آب کاربردی و بارش فصل رشد و مجموع مقادیر بهینه نیتروژن کاربردی و نیتروژن معدنی موجود در خاک، مقدار ثابتی (به ترتیب ۱/۴۷ متر و ۱۹۰ کیلوگرم در هکتار) می‌باشد. همچنین در این شرایط مقادیر بهینه آب کاربردی و نیتروژن کاربردی به هم وابسته نیستند.

مقدار W_1 به دست آمده در منطقه مراغه به مراتب بیشتر از مقدار آب موجود برای زراعت گندم می‌باشد. در شرایط محدودیت آب، مقدار بهینه مجموع نیتروژن کاربردی (N_w) و نیتروژن معدنی موجود در خاک (N_r) ثابت و برابر شرایط محدودیت زمین است (۱۹۰ کیلوگرم در هکتار). $N_w + N_r = N_1 + N_r = N_1$ مقدار W_w به بارش فصل رشد، R و مقدار بهینه نیتروژن کاربردی، N_w وابسته است. برای بارش‌های فصل رشد بیشتر از ۳۰۰ میلی‌متر آب آبیاری لازم نیست ($W_w = 0$). در مقادیر معین N_r ، N_w و R مقادیر W_w با افزایش قیمت نیتروژن افزایش می‌یابد.

مقدار بهینه نیتروژن کاربردی عمدتاً متأثر از میزان نیتروژن معدنی موجود در خاک بوده و با شرایط محدودیت زمین یا آب ارتباطی ندارد. وقتی که میزان نیتروژن معدنی خاک ۷۰ کیلوگرم در هکتار است بیشترین کاهش مصرف آب در شرایط محدودیت آب به میزان ۴۲ و ۶۴ درصد به ترتیب برای بارش فصل رشد صفر و ۰/۲ متر به وقوع پیوست که موجب افزایش سطح زیر کشت به ترتیب به میزان ۷۲ و ۱۷۸ درصد شده است. بیشترین درآمد خالص در واحد آب کاربردی برای شرایط محدودیت آب حاصل شد و مقدار آن به میزان ۳۱ و ۵۶ درصد به ترتیب برای بارش‌های فصل رشد صفر و ۰/۲ متر نسبت به شرایط حداکثر تولید محصول

افزایش یافت. اما این افزایش برای شرایط محدودیت زمین ناچیز و حدود ۷-۸ درصد بود. بر اساس مجموع بارش فصل‌های پاییز و زمستان میزان بارش فصل رشد از روی معادله پیشنهاد شده تخمین زده شد و مقدار آن برای تخمین W_w به کار گرفته شد. هم‌چنین می‌توان مقدار W_w را بر اساس احتمال وقوع ۵۰ و ۸۰ درصد تخمین زد و بر اساس آن و مقدار آب آبیاری موجود، مقدار سطح زیر کشت گندم را مشخص نمود.

فصل ۱۲

بهینه‌سازی اقتصادی آب آبیاری و کود نیتروژن با روش ایزوکوانت در مقادیر مختلف بارندگی

۱۲-۱ مقدمه

محدودیت منابع آب، تزاید جمعیت و تلاش در راستای حذف و یا ترمیم کشاورزی کم بازده و تعالی کشاورزی نوین، سبب شده است تا ارزش نهاده‌های تولید و جایگاه تحقیقات بهینه‌سازی مصرف آب و کود ترقی کند. در رسیدن به دورنمای روش راهبری و بهره‌برداری پایدار از منابع آب و خاک چندین شاخص مؤثرند که از جمله مهم‌ترین آنها تدوین و تبیین الگوی بهینه مصرف آب و کود در کشاورزی است. هر گونه کمبود در مقدار آب یا نیتروژن سبب کاهش محصول می‌گردد (Pang and Letey, 1998; Tavakkoli and Oweis, 2004; Tavakoli et al., 2005).

از کل ۱۶ میلیون هکتار اراضی کشاورزی کشور، حدود ۵۶ درصد آن به کشت دیم (با آیش)، حدود ۳۷ درصد به کشت آبی (با آیش) و بقیه (۷ درصد) به باغات میوه اختصاص دارد. از سوی دیگر حدود ۹۳ درصد کل آب مصرفی کشور مربوط به بخش کشاورزی فاریاب است.

کمبود آب آبیاری عمده‌ترین عامل بازدارنده در زراعت آبی محسوب می‌شود. به دلیل بحران فزاینده کمیت و کیفیت منابع آب، بهینه‌سازی مصرف آب شایان توجه است. در مناطقی که قیمت آب زیاد است نیز مصرف بهینه آن غیر قابل اجتناب است. از این رو، تلاش برای بهینه کردن محصول تولیدی در ازای مصرف هر چه کمتر آب، منطقی جلوه کرده است. برای تعیین حد بهینه آب آبیاری استفاده از مدل‌ها و روابط

تجربی- ریاضی و توابع تغییرات مصرف آب- عملکرد امری اجتناب ناپذیر می باشد (قهرمان و سپاس خواه، ۱۳۷۵).

نیتروژن خاک هم یکی از عوامل مهم تولید محصول در کشاورزی است. نیتروژن نقش کلیدی در تغذیه گیاهی دارد و از عناصر غذایی ضروری برای گیاهان به شمار می آید (Dhanke and Vass, 1973; Salam and Subramanian, 1988). نیتروژن جزئی از پروتئین و اسید نوکلئیک بوده و اگر مقدار آن در خاک بهینه نباشد باعث کاهش رشد گیاه می شود (Weinhold et al., 1995). مقدار نیتروژن در گیاهان بعد از کربن و هیدروژن، بیش از سایر عناصر بوده و کمبود آن بیشتر از سایر عناصر غذایی گزارش شده است (Adeairan and Banjorko, 1995; Dhanke and Vass, 1973). نیتروژن در خاک پویا است و تلفات آن نه تنها از نظر اقتصادی نظیر عملکرد محصول، قیمت کود، انرژی و نیروی انسانی مهم است بلکه از نظر آلودگی محیط زیست هم نیاز به توجه دارد (Cerrato, and Blackmer, 1990). نیتروژن نیتراتی در آب بسیار محلول بوده و لذا قابلیت آبشویی و آلوده کردن محیط زیست را دارد. آبیاری بیش از اندازه می تواند منجر به آبشویی بیشتر نیتروژن شود (Artiola, 1991; Pirmoradian, et al., 2004). کود نیتروژن هم چنین می تواند از راه نیترات زدایی، به خصوص از خاک مرطوب (Pirmoradian et al., 2004)، از دسترس گیاه خارج شود. نیترات زدایی باعث کاهش بازده استفاده از نیتروژن شده و به خاطر نقش N_2O در تخریب ازن در لایه استراتوسفر جو حائز اهمیت است (Qian et al., 1997). مصرف مستمر کودهای نیتروژنی در کشاورزی سبب کاهش مواد آلی و اسیدیته (از طریق مصرف کودهای آمونیومی)، جمعیت و فعالیت گروهی از ریزجانداران خاک می گردد (Bair et al., 1990). گرچه کمبود نیتروژن بیش از سایر عناصر غذایی مطرح می باشد (Bair et al., 1990; Islam et al., 1998; Novoa and Loomis, 1981) اما ارائه روش دقیق و مناسب جهت توصیه های کودهای نیتروژنی هنوز به تحقیقات بیشتری نیاز دارد (Islam et al., 1998).

نیتروژن به عنوان یک ماده معدنی به مقدار زیاد برای غلات لازم است و به خاطر نقش حساس آن و همچنین کمبود عرضه آن، مدیریت منابع نیتروژن از نظر تولید محصولات کشاورزی بسیار مهم است (Novoa and Loomis, 1981). در حال حاضر نیتروژن استفاده بسیار گسترده ای به عنوان ماده غذایی دارد و تقاضا برای آن در آینده نیز بیشتر خواهد شد (Godwin and Jones, 1991).

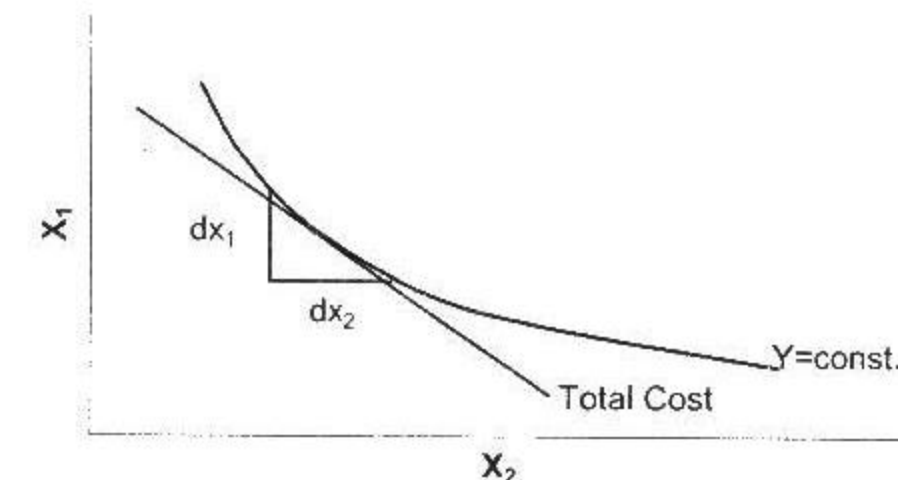
تحقیقات نشان می دهد که گندم عموماً به کود نیتروژن عکس العمل خوبی نشان می دهد (Harmsen et al., 1983; Krentons and Orphonos, 1979; Mossedque and Smith, 1994; Oweis et al., 1998; Pala et al., 1996; Tavakkoli and Oweis, 2004; Tavakoli et al., 2005). همچنین این گیاه واکنش مناسبی به میزان کود نیتروژن و آب آبیاری بروز می دهد.

سپاس خواه و اکبری (۲۰۰۵) اثر بارندگی بر تابع تولید عملکرد - آب مصرفی را بررسی و به بهینه سازی آب آبیاری برای محصولاتی مثل گندم و پنبه پرداختند. پژوهش آنها بر اساس تحلیل کم آبیاری بود. تحلیلی نیز بر همین اساس به منظور بهینه سازی آب آبیاری و کود نیتروژن برای ذرت توسط زندپارسا و سپاس خواه (۲۰۰۱) انجام شده است.

در این پژوهش که روی گندم صورت گرفته است (توکلی و همکاران، ۱۳۸۲) نقش باران فصل رشد در تابع تولید، که دو عامل آب و نیتروژن را شامل می شود، وارد و سپس مقادیر آب آبیاری و نیتروژن برای تولید محصول بهینه تعیین شده است. پس از آن با منحنی های تولید یکسان (Iso-Quant) نسبت به بهینه سازی مقادیر آب و نیتروژن مصرفی برای مقادیر مختلف تولید به منظور کمینه شدن هزینه در واحد سطح مبادرت شده است. همچنین درآمد بر واحد حجم آب مصرفی در مقادیر مختلف تولید تعیین و ترکیب بهینه آب و نیتروژن برای حصول آن مشخص گردید. این ضرورتی است که با توجه به فراوانی نسبی زمین و محدودیت منابع آب در ایران هدفی غیر قابل اجتناب است. در نهایت نیز مسیر توسعه تولید روی منحنی های تولید یکسان رسم شده است.

۱۲-۲ اصول نظری مسئله و کاربرد آن

«منحنی تولید یکسان» عبارت است از مکان هندسی نقاطی که از ترکیب‌های مختلف عوامل تولید، مقدار تولید ثابتی را به وجود می‌آورد. اگر این ترکیب‌ها بی‌نهایت باشند، منحنی را می‌توان به صورت پیوسته رسم کرد. این منحنی‌ها دارای دو خاصیت مهم می‌باشند. اولاً نزولی هستند و به همین دلیل امکان جایگزینی بین عوامل تولید وجود دارد. ثانیاً اگر پیوسته باشند جانشینی بین عوامل تولید به مقدار بسیار جزئی نیز امکان‌پذیر است. شکل (۱-۱۲) منحنی تولید یکسانی را برای تابعی که دو عامل تولید دارد $Y(X_1, X_2)$ نشان می‌دهد. قدر مطلق شیب این منحنی (dX_1/dX_2) را نرخ نهایی جانشینی عوامل تولید (MRTS) می‌نامند و عبارت از نسبت تغییراتی است که در یک عامل تولید به ازای تغییر در عامل دیگر در شرایط تولید ثابت به وجود می‌آید. نزولی بودن منحنی تولید یکسان نشان دهنده توانایی جانشینی یک عامل به جای عامل دیگر است.



شکل ۱-۱۲ منحنی تولید یکسان $(Y(X_1, X_2))$ وقتی دو عامل تولید وجود دارد

روش جبری به دست آوردن شیب منحنی یا MRTS به این صورت است که ابتدا مشتق کامل تابع تولید (که در این جا یک تابع دو متغیره است) تعیین می‌شود:

$$d[Y(X_1, X_2)] = Y_{X_1} dX_1 + Y_{X_2} dX_2 \quad (1-12)$$

چون روی منحنی تولید یکسان، مقدار تولید ثابت است، پس مشتق آن صفر بوده و در نتیجه:

$$MRTS = \frac{dX_1}{dX_2} = -\frac{Y_{X_1}}{Y_{X_2}} \quad (2-12)$$

اکنون برای تعیین مقدار بهینه عوامل تولید، تابع هزینه کل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$T.C. = P_{X_1}(X_1) + P_{X_2}(X_2) \quad (3-12)$$

که در آن P_{X_1} و P_{X_2} به ترتیب قیمت عوامل تولید X_1 و X_2 می‌باشد. در نتیجه معادله خط هزینه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$X_1 = \frac{T.C.}{P_{X_1}} - \frac{P_{X_2}}{P_{X_1}}(X_2) \quad (4-12)$$

شیب این خط همان نسبت قیمت یک واحد عوامل تولید است. به ازای مقادیر معینی برای هزینه کل (T.C.)، یک خط هزینه یکسان وجود خواهد داشت. مساوی شدن شیب منحنی تولید یکسان و خط هزینه یکسان (محل تماس خط هزینه با منحنی تولید یکسان در شکل ۱-۱۲)، مقادیر بهینه عوامل تولید (برای کمینه شدن هزینه) را به دست می‌دهد.

۱۲-۳ اطلاعات پژوهش

داده‌های سه ساله عملکرد دانه گندم سبزان مربوط به طرح پژوهشی اجرا شده در مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم کشور (توکلی و همکاران، ۱۳۸۲) که بر اساس تحقیق اویس و همکاران (Oweis et al., 1998) انجام شده است، تهیه و استفاده گردید. تیمارهای این آزمایش شامل چهار سطح آبیاری: آبیاری کامل (I3) بر اساس ۵۰ درصد تخلیه رطوبت قابل دسترس، ۶۶ درصد آبیاری کامل (I2)، ۳۳ درصد آبیاری کامل (I1) و بدون آبیاری (I0) (جدول ۱-۱۲) و پنج سطح کود

نیتروژن از منبع اوره (صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ کیلو گرم نیتروژن در هکتار) بود که به صورت کرت‌های خرد شده و بر اساس طرح بلوک‌های کامل تصادفی در مدت سه سال (۸۱-۱۳۷۸) اجرا شده است. نیمی از کود نیتروژن به همراه تمام کود فسفر (۳۰ کیلوگرم فسفر خالص در هکتار) در زمان کاشت و بقیه آن در مرحله پنجه‌زنی گیاه در بهار مصرف شد.

جدول ۱-۱۲ مقادیر آب آبیاری در تیمارها و سال‌های مختلف کشت

تیمار آبیاری	سال کشت	مقدار آب آبیاری (mm)
10	۱	۰
	۲	۰
	۳	۰
11	۱	۸۴
	۲	۱۱۲
	۳	۸۸
12	۱	۱۳۲
	۲	۱۸۴
	۳	۱۳۶
13	۱	۱۸۰
	۲	۲۵۶
	۳	۱۸۴

وضعیت بارش سالیانه، نیتروژن اولیه و چگالی ظاهری خاک منطقه نیز از ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم مراغه تهیه شد که در جداول (۲-۱۲) و (۳-۱۲) آمده است. مقدار $31/6$ میلی‌متر از بارندگی سال دوم (۸۰-۱۳۷۹) پس از رسیدن محصول باریده و لذا در تولید مؤثر نبوده است و در محاسبات وارد نشده است. در ضمن چون نیتروژن قابل استفاده گیاه به شکل معدنی بوده (نیترات و آمونیم) و تقریباً ۵ درصد از کل نیتروژن خاک شکل معدنی دارد

(Cerrato and Blackmer, 1990). لذا فقط همان $0/05$ از نیتروژن کل به عنوان نیتروژن اولیه خاک (اعداد جدول ۱۲-۳) وارد محاسبات شده است. دلیل این امر عدم دسترسی به تجزیه کامل خاک می‌باشد.

با استفاده از این داده‌ها و روش رگرسیون چند متغیره، تابع تولید محصول دانه گندم شامل دو متغیر آب (آبیاری w و بارندگی R) و نیتروژن (نیتروژن اولیه Nr و مصرفی N) استخراج شد. هزینه آب و نیتروژن با توجه به قیمت‌های رایج در بازار (۱۲۰ ریال بر متر مکعب برای آب آبیاری و ۴۲۰ ریال بر کیلوگرم برای اوره) منظور گردید. قیمت آب آبیاری بر اساس آمار سازمان جهاد کشاورزی انتخاب شد. قیمت خرید گندم نیز ۱۷۵۰ ریال برای هر کیلوگرم در نظر گرفته شد و تحلیل اقتصادی بر اساس اصول نظری تشریح شده صورت گرفت.

جدول ۲-۱۲ وضعیت بارش ایستگاه تحقیقات دیم مراغه

سال	بارش سالیانه (میلی‌متر)	بارش فصل رشد (میلی‌متر)
۱۳۷۸-۷۹	۲۶۳	۲۶۳
۱۳۷۹-۸۰	۲۳۴	۲۰۲/۴
۱۳۸۰-۸۱	۳۸۲	۳۸۲

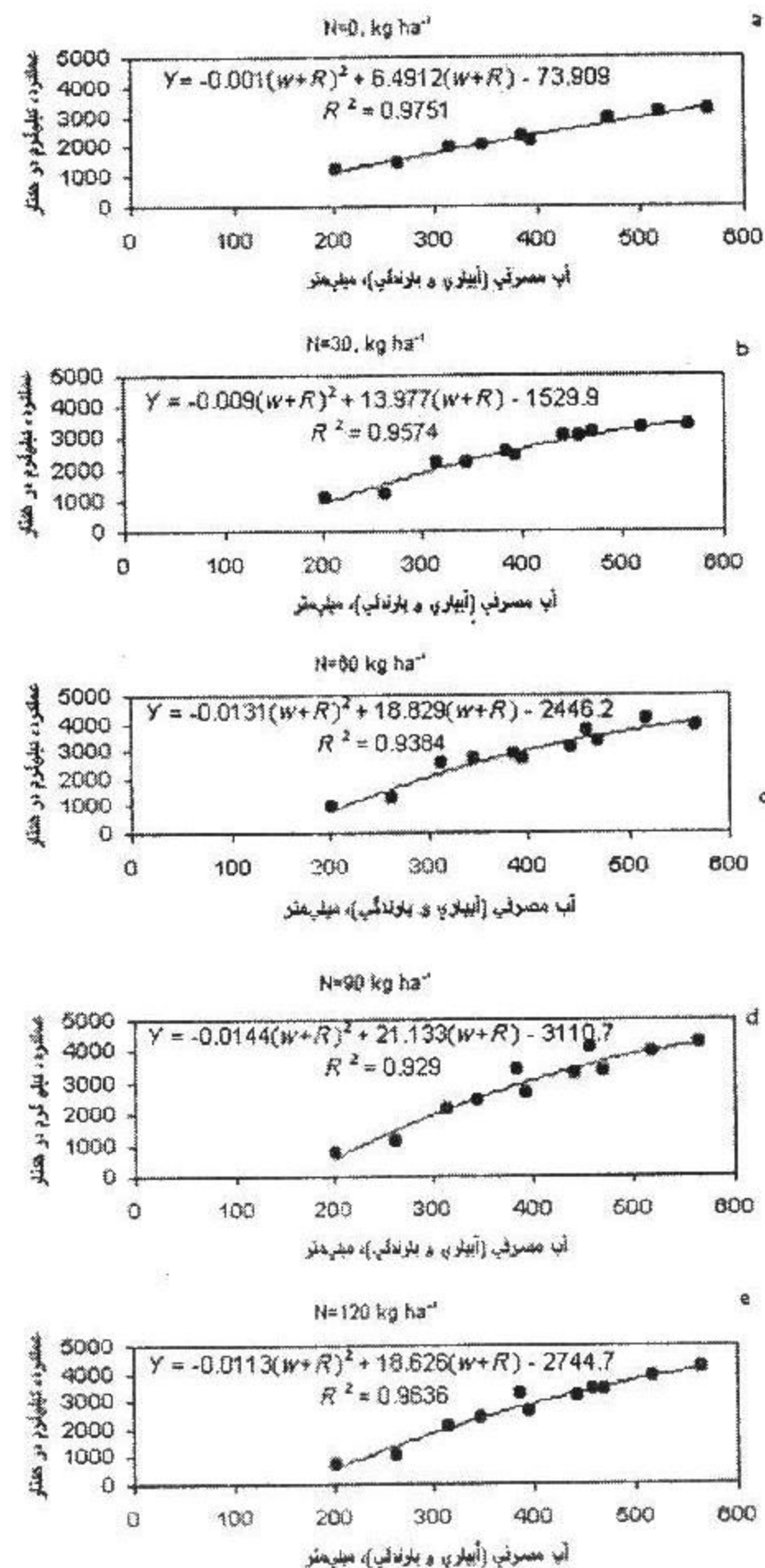
جدول ۳-۱۲ درصد نیتروژن کل و مقدار نیتروژن اولیه و چگالی ظاهری خاک ایستگاه تحقیقات دیم مراغه

سال زراعی	درصد ازت کل	مقدار ازت اولیه (N_i) خاک (kg/ha)	چگالی ظاهری (g/cm^3)
۱۳۷۸-۷۹	۰/۰۶۳	۱۱۱/۰	۱/۱۷۵
۱۳۷۹-۸۰	۰/۰۶۱	۱۰۷/۵	۱/۱۷۵
۱۳۸۰-۸۱	۰/۰۵۵	۹۶/۹	۱/۱۷۵

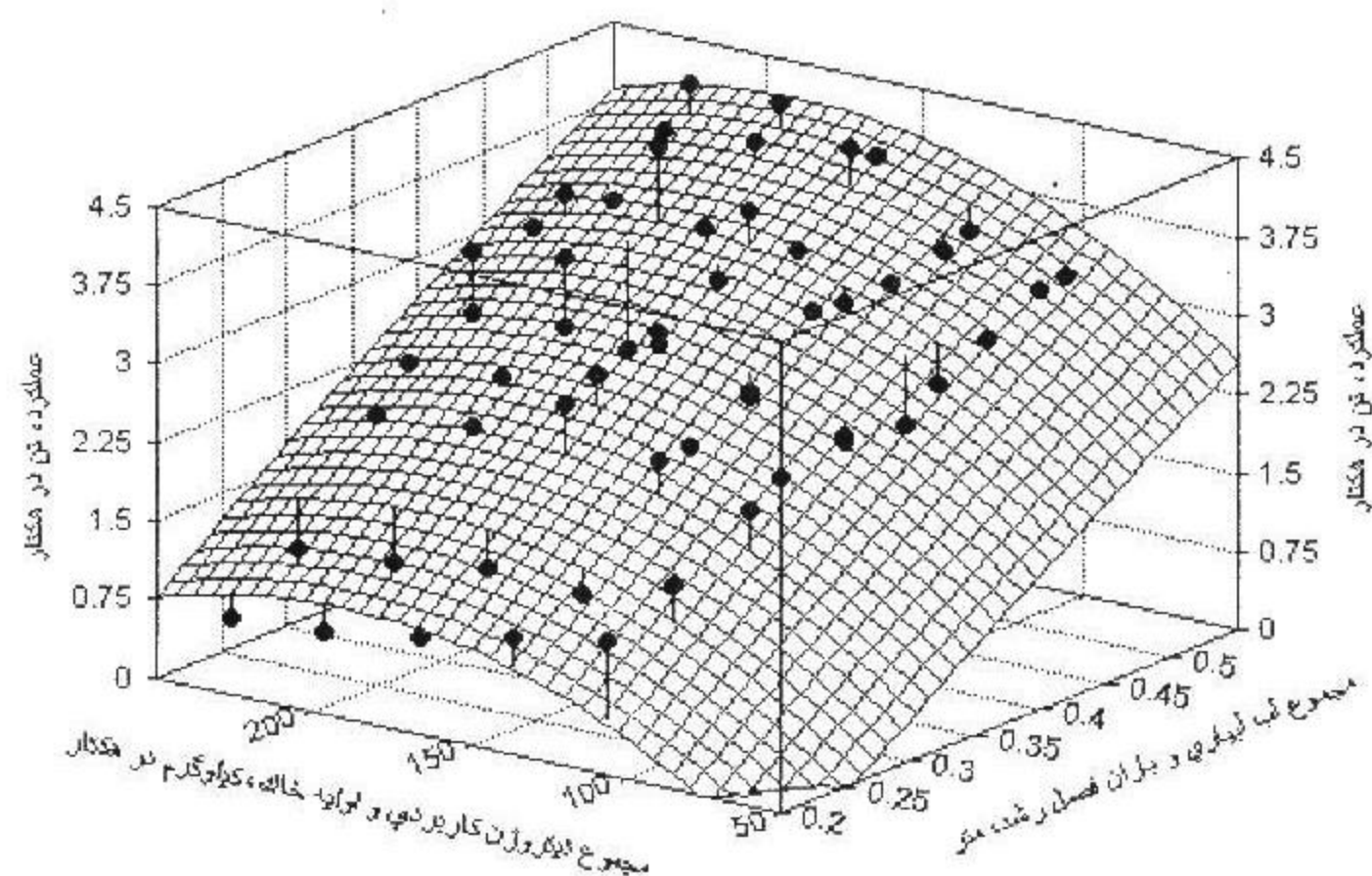
۱۲-۴ نتایج و بحث

بررسی داده‌های محصول نشان داد که عملکرد سال سوم در شرایط دیم تفاوت زیادی با دیگر داده‌ها دارد و به نظر می‌رسد از روند کلی داده‌ها خارج باشد. برای بررسی بیشتر این قضیه مقادیر عملکرد در برابر آب مصرفی به ازای سطوح نیتروژن مصرفی ترسیم گردید و مشاهده شد که عملکرد سال سوم در شرایط دیم از محدوده روند داده‌ها خارج است. بنابراین این داده برای دقت بیشتر در استخراج تابع تولید حذف شده است. شکل‌های (۱۲-۲۸) تا (۱۲-۲۹)، توابع تولید در مقادیر مختلف نیتروژن را که دارای یک متغیر آب مصرفی (آبیاری و بارندگی فصل رشد) هستند نشان می‌دهند. این توابع از نوع درجه دو و دارای یک بیشینه است و پس از آن تابع سیر نزولی به خود می‌گیرد؛ یعنی با افزایش آب مصرفی از میزان عملکرد کاسته می‌شود که با فیزیک توابع تولید آب-عملکرد تطابق دارد. در تمام این معادلات عرض از مبدأ منفی است که نشان می‌دهد مقداری از آب مصرفی برای تبخیر از سطح خاک و رشد سبزینه‌ای اولیه لازم است و در تولید نقشی نخواهد داشت.

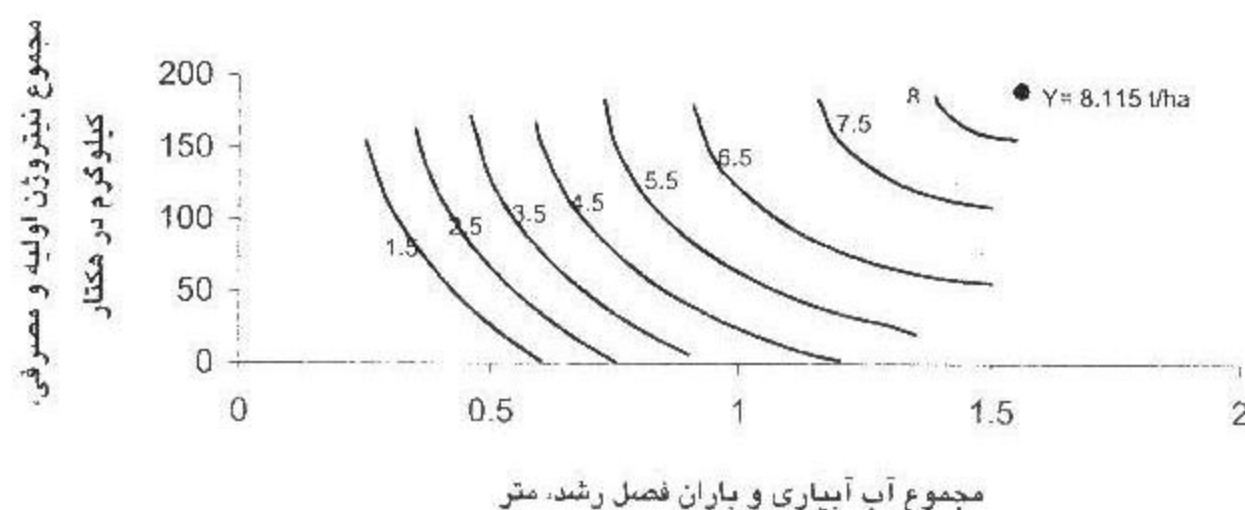
طبق این معادلات، با مصرف ۵۰۰ میلی‌متر آب، مقادیر عملکرد ۲۹۲۲، ۳۲۰۹، ۳۶۹۳، ۳۸۵۶ و ۳۷۴۳ به دست می‌آید (به ترتیب در نرخ‌های ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ کیلو گرم نیتروژن در هکتار) که بیشترین آن به مصرف ۹۰ کیلو گرم نیتروژن در هکتار مربوط است. در واقع برهمکنش آب و نیتروژن در این سطح کاربرد، تولید بیشتری در مقایسه با دیگر مقادیر کود به کار رفته در بر داشته است.



شکل ۱۲-۲ مقادیر مختلف عملکرد دانه گندم (Y) به ازای آب مصرفی (مجموع آبیاری و باران فصل رشد، w+R) در مقادیر مختلف کاربرد نیتروژن به همراه تابع تولید



شکل ۱۲-۳ مقادیر اندازه‌گیری شده (نقاط) و پیش‌بینی شده (رویه) عملکرد گندم در برابر آب آبیاری و باران فصل رشد و نیتروژن اولیه و مصرفی



شکل ۱۲-۴ منحنی‌های تولید یکسان حاصل از تابع تولید گندم (معادله ۱۲-۵)

برای تعیین تابع تولید دانه گندم به صورت یک تابع دو متغیره (شامل آب و نیتروژن) درجه دو داده‌های عملکرد در برابر آب (آبیاری و بارندگی) و نیتروژن (اولیه و کاربردی) مصرفی مرتب شد. بهترین برازش داده‌های آب و نیتروژن مصرفی - عملکرد مبین تابع تولید درجه دو به صورت زیر است:

(۱۲-۵)

$$Y(w, N) = a_0 + a_1(w + R) + a_2(w + R)^2 + a_3(N + N_r) + a_4(N + N_r)^2$$

که در آن w عمق آب آبیاری (m)، R مقدار بارندگی فصل رشد (m)، N و N_r به ترتیب نیتروژن مصرفی و اولیه خاک (kg/ha) است. a_0 تا a_4 هم ضرایب ثابت معادله هستند که به ترتیب عبارتند از: $-۴/۲۷۶$ ، $۱۱/۷۹۰$ ، $-۳/۷۷۷$ ، $۰/۰۳۳$ و $-۸/۵۳۵ \times ۱۰^{-۵}$. تعداد داده‌ها ۵۵ و r^2 در تعیین مدل $۰/۹۰$ بوده است. مقدار F در تعیین این تابع در سطح احتمال $۱/۵۵ \times ۱۰^{-۲۴}$ معنی‌دار است.

شکل (۱۲-۳) سطح تابع تولید (نمودار معادله ۱۲-۵) را که به نقاط اندازه‌گیری شده برازش شده به صورت سه بعدی نشان می‌دهد. بزرگی مقادیر a_1 و a_2 نسبت به a_3 و a_4 حاکی از غالب بودن عامل آب در تولید محصول نسبت به کود نیتروژن است. ضرایب معادله (۱۲-۵) نشان می‌دهد که افزایش آب و نیتروژن مصرف شده محصول را به بیشینه خود رساننده و سپس کاهش خواهند داد.

بیشینه محصول قابل دستیابی با این معادله تنها به ازای یک ترکیب خاص از آب و نیتروژن رخ می‌دهد که با مشتقات جزئی معادله (۵-۱۲) مشخص می‌شود:

$$\frac{\partial y(w, N)}{\partial w} = 0 \equiv w + R = 1.56 \text{ m}$$

$$\frac{\partial y(w, N)}{\partial (N)} = 0 \equiv N + N_r = 193 \text{ kg ha}^{-1}$$

با این مقادیر آب و نیتروژن، محصولی برابر با ۸/۱۲ تن در هکتار به دست می‌آید که در شکل (۴-۱۲) به صورت یک نقطه نمایش داده شده است. طبعاً منظور نمودن بارندگی و نیتروژن اولیه خاک باعث کاهش مصرف آب و نیتروژن در دستیابی به محصول بیشینه می‌شود.

در ادامه و برای تعیین مقادیر بهینه آب آبیاری و کود نیتروژن از معادله (۵-۱۲) مشتق کامل گرفته و شیب منحنی تولید یکسان مطابق با معادله (۶-۱۲) نوشته شد:

$$\frac{d(N + N_r)}{d(w + R)} = -\frac{a_1 + 2a_2(w + R)}{a_3 + 2a_4(N + N_r)} \quad (6-12)$$

معادله هزینه کل (شامل هزینه عوامل تولید یعنی آب و نیتروژن) هم به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$T.C. = c_1(w + R) + c_2(N + N_r)$$

و یا:

$$(N + N_r) = \frac{T.C.}{c_2} - \frac{c_1}{c_2}(w + R) \quad (7-12)$$

که در آن c_1 و c_2 به ترتیب قیمت آب (Rls/m-ha) و نیتروژن (Rls/kg) می‌باشد. با حل معادلات (۶-۱۲) و (۷-۱۲) خواهیم داشت:

$$(w + R) = \frac{-a_1 + \frac{c_1}{c_2}(a_3 + 2a_4 \frac{T.C.}{c_2})}{2(a_2 + (\frac{c_1}{c_2})^2 a_4)} \quad (8-12)$$

با معادله (۸-۱۲) مقدار بهینه آب (شامل آبیاری و بارندگی) و به کمک معادله (۷-۱۲) نیتروژن مصرفی بهینه (شامل نیتروژن مصرفی و اولیه خاک) محاسبه شد و سپس از روی تابع تولید مقدار عملکرد به دست آمد. از معادلات (۷-۱۲) و (۸-۱۲) پیداست که ازدیاد بارندگی و نیتروژن اولیه خاک سبب کاهش مقدار بهینه آب آبیاری و نیتروژن مصرفی و در نتیجه صرفه‌جویی در هزینه می‌شود. زارع می‌تواند این مقدار کاهش هزینه را با کاربرد بیشتر نهاده‌های تولید صرف افزایش سطح زیر کشت نماید. ضرایب موجود در معادلات (۷-۱۲) و (۸-۱۲) معلوم هستند و فقط مقدار معینی از هزینه که زارع می‌تواند برای نیتروژن و آب در نظر بگیرد (T.C.)، بایستی در معادلات به کار رود.

برای مقادیر مختلف تولید موجود در شکل (۴-۱۲) میزان بهینه آب و نیتروژن محاسبه شد. به این منظور و با توجه به معادلات (۶-۱۲) و (۷-۱۲)، شیب خط هزینه یکسان، که عبارت از نسبت قیمت یک واحد عوامل تولید است، مساوی شیب منحنی تولید یکسان قرار داده شد و یکی از عوامل تولید بر حسب دیگری محاسبه و در معادله تولید محصول (معادله ۵-۱۲) قرار داده شد. به ازای مقادیر مختلف تولید (منحنی‌های تولید یکسان در شکل ۴-۱۲) مقادیر هر یک از عوامل تولید به دست آمد. با توجه به شکل تابع تولید، کاربرد ترکیب‌های خاص از آب و نیتروژن منجر به کمینه شدن هزینه در واحد سطح زیر کشت گندم شد (جدول ۵-۱۲، شرایط محدودیت زمین). در واقع وقتی هدف زارع کسب سود بیشینه در واحد سطح باشد، مصرف این مقادیر از عوامل تولید نتیجه‌بخش خواهد بود. از این حالت به شرایط محدودیت زمین تعبیر می‌شود (معادله ۸-۱۲) و در مکان‌هایی که مقدار مشخصی از زمین زیر کشت

گندم قرار می‌گیرد و یا اساساً زمین عامل محدود کننده است، رخ می‌دهد. با توجه به جدول (۵-۱۲) مقدار بهینه آب و نیتروژن در شرایط محدودیت زمین نسبت به وضعیت محصول بیشینه به ترتیب تا ۸۳/۵ و ۲۳/۵ درصد (در عملکرد ۱/۵ تن در هکتار) تغییر می‌کند که نشان از اثر غالب آب در تولید گندم است. اگر عوامل تولید فراهم بوده و کشاورز نیز قادر به پرداخت هزینه آنها باشد، کاربرد ۱/۴۷ متر آب و ۱۹۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (معادل تولید ۸/۱ تن در هکتار) منجر به کسب بیشترین سود در واحد سطح خواهد شد (جدول ۵-۱۲). اما در شرایطی که کشاورز با محدودیت آب، به خاطر کمبود منابع (مانند بسیاری از مناطق نواحی خشک و نیمه خشک ایران) و یا قیمت زیاد آن مواجه باشد، هدف اساسی بیشینه شدن درآمد خالص به ازای واحد حجم آب مصرفی خواهد بود (معادله ۱۲-۸) که در هر مقدار تولید فقط کاربرد یک ترکیب از آب و نیتروژن موجب کسب بیشترین سود در واحد حجم آب مصرفی می‌شود (شرایط محدودیت آب، جدول ۵-۱۲). در این شرایط بیشینه سود در واحد حجم آب با کاربرد ۰/۵۵۶ متر آب و ۱۹۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (معادل تولید ۴/۳ تن در هکتار) عاید می‌شود. کاربرد این مقدار آب موجب صرفه‌جویی ۳۵/۶ درصدی شده (نسبت به شرایط محصول بیشینه) و افزایش ۱/۸۱ برابری سطح زیر کشت را در بر دارد که می‌تواند کمبود سود ناشی از تولید کمتر محصول (نسبت به شرایط محصول بیشینه) را تا ۹۹/۶ درصد جبران نماید. مقادیر نیتروژن در دو حالت سود بیشینه در واحد سطح و حجم آب مصرفی یکسان بوده و همچنین تفاوت کمی با حالت محصول بیشینه دارد که نشان دهنده تاثیر کمتر نیتروژن در تولید درآمد خالص به دلیل قیمت پایین کود نیتروژن و نقش کمتر آن نسبت به آب در تولید گندم است.

زندپارسا و سپاس‌خواه (۲۰۰۱) نتیجه مشابهی را برای ذرت گزارش کردند. ترکیبات مختلف آب و نیتروژن که در جدول (۵-۱۲) ارائه شده است به صورت مجموع آب آبیاری و بارش فصل رشد و نیز مجموع نیتروژن کاربردی و اولیه خاک

جدول ۵-۱۲ مقادیر بهینه آب (آبیاری و بارندگی) و نیتروژن (اولیه و کاربردی) مصرفی و سود در واحد سطح (شرایط محدودیت زمین) و حجم آب مصرفی (شرایط محدودیت آب) برای مقادیر مشخص تولید

شرایط محدودیت آب			شرایط محدودیت زمین			عملکرد (t/ha)
سود*	آب آبیاری و نیتروژن اولیه و مصرفی (kg/ha)	بارش فصل رشد (m)	سود*	نیتروژن اولیه و مصرفی (kg/ha)	بارش فصل رشد (m)	
۹۱۲	۱۸۵	۰/۲۳۸	۲۱۸۳۹۶۷	۱۴۸	۰/۲۵۵	۱/۵
۱۱۰۹	۱۸۶	۰/۳۴۲	۳۸۰۷۲۶۳	۱۵۱	۰/۳۵۸	۲/۵
۱۱۷۷	۱۷۲	۰/۴۶۰	۵۴۱۸۸۴۰	۱۵۶	۰/۴۷۰	۳/۵
۱۲۰۲	۱۹۰	۰/۵۵۶	۶۶۹۸۱۳۱	۱۵۸	۰/۵۷۰	۴/۳
۱۱۸۸	۱۶۸	۰/۵۹۰	۷۰۱۴۴۵۰	۱۵۹	۰/۵۹۶	۴/۵
۱۱۷۶	۱۸۹	۰/۷۲۹	۸۵۸۶۶۶۷	۱۶۵	۰/۷۴۰	۵/۵
۱۱۱۱	۱۸۰	۰/۹۱۰	۱۰۱۱۹۴۸۱	۱۷۰	۰/۹۱۷	۶/۵
۹۹۸	۱۸۹	۱/۱۵۸	۱۱۵۶۵۷۵۵	۱۸۱	۱/۱۶۲	۷/۵
۸۷۶	۱۹۱	۱/۳۸۷	۱۲۱۶۲۱۷۴	۱۸۷	۱/۳۸۹	۸
۸۳۰	۱۹۲	۱/۴۶۹	۱۲۲۰۷۵۰۶	۱۹۰	۱/۴۷۰	۸/۱
۷۷۸	۱۹۳	۱/۵۶۱	۱۲۱۵۱۵۶۷	۱۹۳	۱/۵۶۱	۸/۱۲**

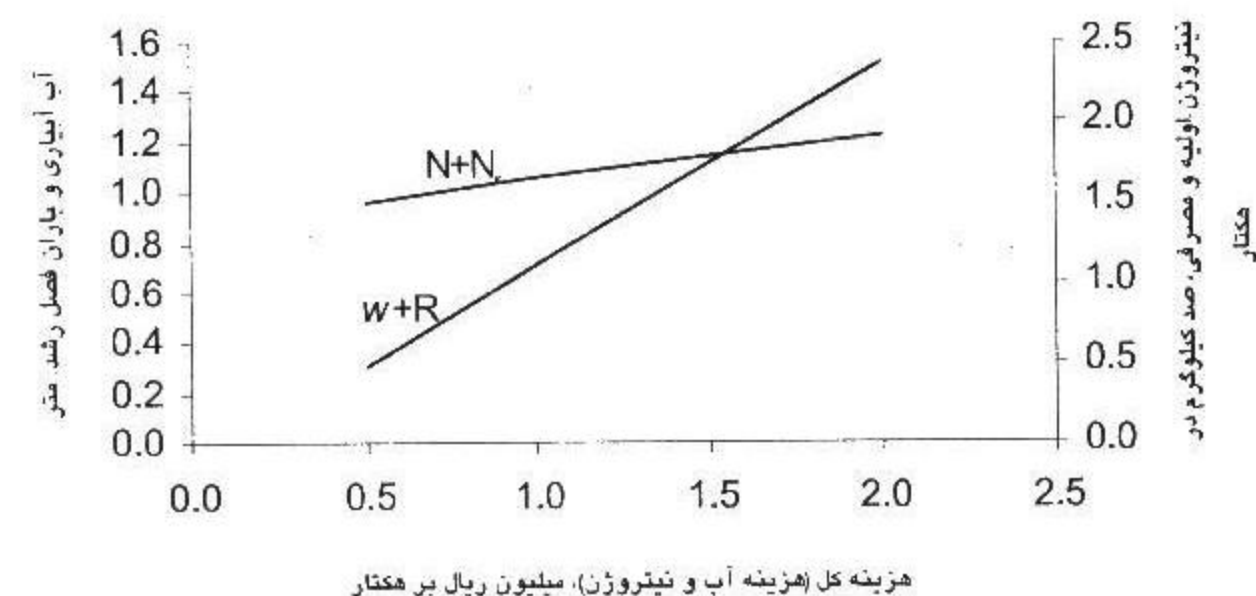
* قیمت خرید گندم هر کیلو ۱۷۵۰ ریال منظور شده است.

** تنها یک ترکیب از آب و نیتروژن این مقدار تولید عملکرد را به دست می‌دهد که لزوماً اقتصادی نیست، اما برای سهولت مقایسه آورده شده است.

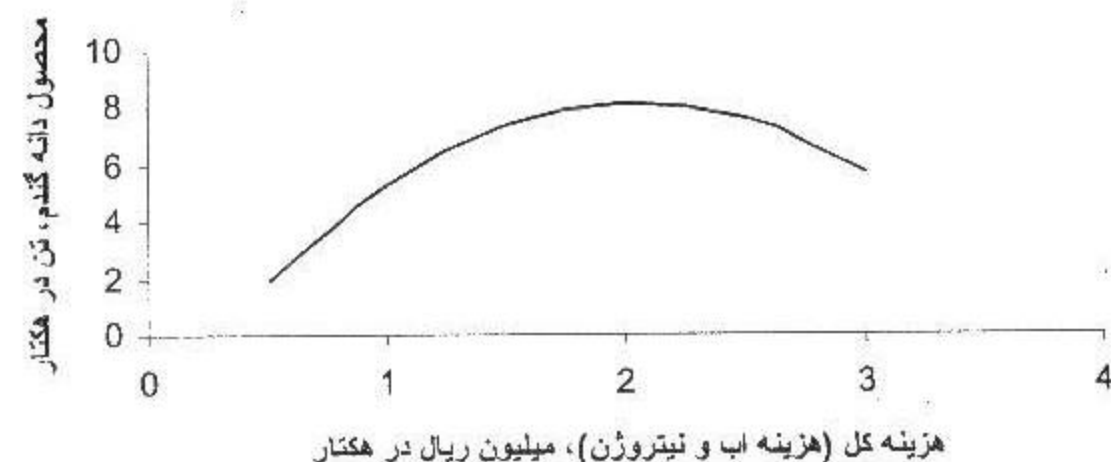
(به ترتیب) می‌باشد. وجود بارندگی و منظور کردن نیتروژن اولیه خاک می‌تواند سبب کاهش مصرف آب و کود نیتروژن گردد. این امر نیز با مدیریت کشاورز می‌تواند سبب افزایش سطح زیر کشت گردد.

شکل (۵-۱۲) تغییرات مقادیر بهینه آب (w+R) و نیتروژن (N+N_r) را برای مقادیر مختلف هزینه کل (هزینه آب و نیتروژن) مطابق با معادلات (۷-۱۲) و (۸-۱۲) برای شرایط محدودیت زمین نشان می‌دهد. طبق این شکل افزایش مقدار هزینه‌ای که

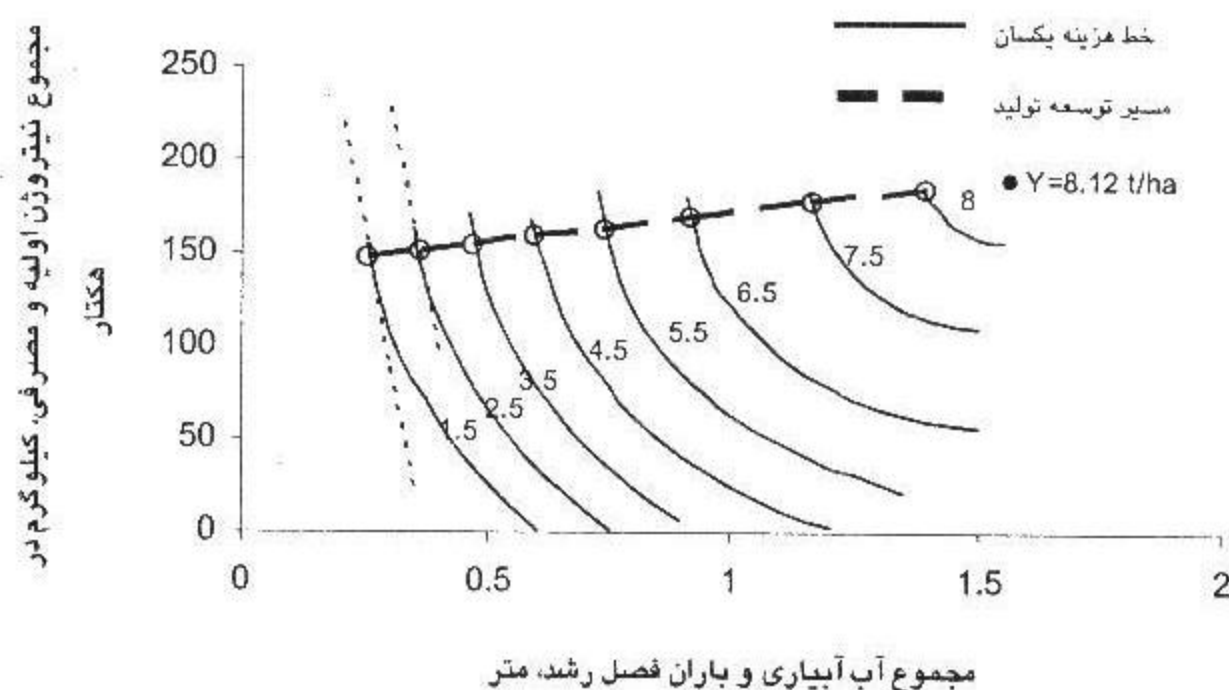
زارع قادر است برای آب و نیتروژن صرف کند، مقدار بهینه آب را با آهنگ بیشتری نسبت به نیتروژن افزایش می‌دهد که با توجه به ضرایب معادله (۵-۱۲)، به خاطر اثر بیشتر آب در تولید محصول است. ضمن این که نقش کمتر نیتروژن در فرایند تولید و قیمت یارانه‌ای پایین آن نیز در این روند موثر می‌باشد.



شکل ۵-۱۲ تغییرات مقادیر بهینه آب آبیاری ($w+R$) و نیتروژن مصرفی ($N+N_r$) در برابر هزینه کل (مجموع هزینه آب و نیتروژن) در شرایط محدودیت زمین



شکل ۶-۱۲ تغییرات عملکرد در برابر هزینه کل صرف شده برای آب و نیتروژن



شکل ۷-۱۲ مسیر توسعه تولید گندم حاصل از تماس خطوط هزینه یکسان و منحنی‌های تولید یکسان

شکل (۶-۱۲) تغییرات عملکرد را در برابر مجموع هزینه آب و نیتروژن (بدون هزینه‌های ثابت کاشت)، نشان می‌دهد. طبق این شکل صرف هزینه بیشتر (به عبارت دیگر کاربرد مقادیر بیشتر نهاده‌های تولید) تا حد معینی قادر به افزایش تولید محصول است. بیشینه عملکرد در شکل (۶-۱۲) همان بیشینه مذکور در ابتدای تحلیل یعنی ۸/۱۲ تن در هکتار است.

اکنون می‌توان روی منحنی‌های تولید یکسان، مسیر توسعه را رسم کرد. مسیر توسعه از به هم پیوستن نقاط تماس منحنی‌های تولید یکسان و خطوط هزینه یکسان (Iso-Cost) به وجود می‌آید و نقاط واقع بر این مسیر مقادیر بهینه عوامل تولید (بر اساس کمینه شدن هزینه تولید) را به ازای مقدار مشخص تولید به دست می‌دهد. این مقادیر مختصات نقاط تماس خطوط هزینه و منحنی‌های تولید یکسان است و در جدول (۵-۱۲) برای شرایط محدودیت زمین، ارائه شده است. در واقع با ترسیم معادله (۷-۱۲) به ازای مقادیر مختلف مجموع هزینه آب و نیتروژن (که نظیر مقدار ثابتی از تولید است) در کنار منحنی‌های تولید یکسان و اتصال نقاط تماس خطوط هزینه و منحنی‌های تولید، مسیر توسعه تولید مشخص می‌شود (شکل ۷-۱۲).

طبق این شکل مسیر توسعه دارای شیب اندکی بوده و به طرف عامل آب (مجموع آبیاری و بارش فصل رشد) تمایل دارد که نشان دهنده نقش غالب این عامل در روند و توسعه تولید می باشد. تمام نقاط واقع بر مسیر تولید ترکیب های بهینه آب و نیتروژن هستند و هر کدام نظیر مقدار خاصی از تولید می باشند که کشاورز برای کسب سود بیشینه در واحد سطح می تواند انتخاب نماید.

۱۲-۵ نتیجه گیری

عملکرد محصولات زراعی را می توان به صورت تابعی از آب (مجموع آبیاری و بارندگی) و نیتروژن مصرفی (شامل نیتروژن کاربردی و اولیه خاک) نوشت. وقتی تابع تولید به صورت معادله (۱۲-۵) بیان شود، میزان بهینه متغیرهای تابع (آب آبیاری و نیتروژن) را می توان تعیین نمود. طبق این تحلیل با داشتن مقدار هزینه ای که برای آب و نیتروژن اعمال می شود می توان ترکیب بهینه آنها را برای بیشینه کردن درآمد در واحد سطح انتخاب نمود. با توجه به مقادیر بهینه محاسبه شده عوامل تولید (جدول ۱۲-۵، شرایط محدودیت زمین)، نیتروژن بهینه به خاطر قیمت پایین آن که ناشی از حمایت های دولتی و نیز نقش کم آن در تولید محصول می باشد، تغییرات اندکی نشان داده است. در مقابل، مقادیر بهینه آب با وجود قیمت پایین آن، تغییرات زیادی نشان داد که به دلیل نقش مؤثرتر این عامل در فرایند تولید است. اختصاص هزینه بیشتر برای کاربرد آب و نیتروژن تا حد مشخصی افزایش محصول را در پی دارد که با فیزیک توابع تولید مطابقت دارد. در این تحلیل بیشینه سود در واحد سطح، که هدف اصلی در شرایط محدودیت زمین است، با کاربرد ۱/۴۷ متر آب (مجموع آب آبیاری و بارش فصل رشد) و ۱۹۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (شامل نیتروژن کاربردی و اولیه خاک) به دست می آید. اما وقتی آب عامل محدود کننده در تولید گندم باشد، بیشینه سود به ازای واحد حجم آب مصرفی مهم بوده و با مصرف ۰/۵۵۶ متر آب (مجموع آب آبیاری و بارش فصل رشد) و ۱۹۰ کیلوگرم نیتروژن در

هکتار (شامل نیتروژن کاربردی و اولیه خاک) حاصل می شود. یکسان شدن نیتروژن بهینه در دستیابی به بیشترین سود در واحد سطح زیر کشت و حجم آب مصرفی (به ترتیب شرایط محدودیت زمین و آب) و تفاوت اندک این مقدار با مقدار نیتروژن در حالت محصول بیشینه حاکی از نقش کمتر عامل نیتروژن در تولید درآمد خالص است. تمایل مسیر توسعه تولید به سمت عامل آب تأکید مجددی بر نقش غالب این عامل در تولید محصول دارد.

فصل ۱۳

برنامه‌ریزی کم‌آبیاری با تکیه بر سوابق تحقیقاتی

۱-۱۳ مقدمه

با نگاهی به سیر تکامل مهندسی آبیاری، با شیوه‌های مدیریتی مختلفی در بخش منابع آب مواجه می‌شویم که گاهی در مدیریت استحصال و تأمین آب (قنوات، سد، چاه، چشمه)، گاهی در مدیریت انتقال آب (پوشش انهار، سازه‌های آبی، انتقال آب با لوله)، گاهی در مدیریت تخصیص آب (گیاه مورد نظر، الگوی کشت) و نیز گاهی در مدیریت مصرف آب (تبدیل به احسن و اصلاح ساختارهای سیستم‌ها و روش‌های آبیاری، به کارگیری و تطابق سیستم‌های نوین آبیاری و استفاده از ماشین‌های آبیاری) تجلی پیدا کرده است، که جمگی درخور اهمیت و توجه بوده‌اند. در خصوص مدیریت مصرف آب، پس از انطباق آن با شرایط محیطی (اقلیم، خاک، منابع آب، محصول و سرمایه) وضعیت مطلوب‌تر (از لحاظ ابعاد زراعی و اقتصادی) انتخاب می‌شود و همه این مسائل برای بهبود و افزایش کارایی مصرف آب و بهره‌وری آب است، اگر چه یکی از مهم‌ترین موانع و محدودیت‌ها در مدیریت مصرف آب در مزرعه، مسئله فرهنگ بومی و سنتی زارعین و کمبود آبیاران آموزش دیده می‌باشد. کم‌آبیاری با هدف بهینه‌سازی مصرف آب با اتکاء بر تحلیل آماری، تحلیل اقتصادی و بر مبنای مسائل زراعی مورد توجه قرار گرفته و با توجه به حوزه وسیع کاربرد آن (ترجیحاً در شرایط محدودیت آب و نیز حتی در شرایط محدودیت زمین) اهمیت آن افزون‌تر می‌شود.

کم‌آبیاری، یک راهبرد بهینه و برتر برای تولید محصول تحت شرایط کمبود آب است. عمومی‌ترین و اولین پیامد آن کاهش محصول (در واحد سطح) است. کم‌آبیاری به نام‌ها و مفاهیم دیگری چون «آبیاری با کاهش آب مصرفی»، «آبیاری بخشی»،

«کم آبیاری تنظیم شده»، «آبیاری محدود» و «کمبود تبخیر - تعرق» نیز خوانده می شود (خیرابی و همکاران، ۱۳۷۵: English et al., 1990).

کم آبیاری در مناطقی از ایالات متحده آمریکا، شبه قاره هند، بخش هایی از آفریقا و دیگر مناطق جهان که با کمبود آب مواجه هستند، به اجرا در می آید. هدف اساسی در به کارگیری فن کم آبیاری، همانا افزایش کارایی مصرف آب، بهبود شاخص های بهره وری آب و افزایش راندمان کاربرد آبیاری است، چه از طریق کاهش میزان آب آبیاری در هر نوبت و یا حذف آبیاری هایی که کمترین بازدهی را داشته و یا در افزایش سود خالص نقشی ندارند. اگر منابع آب محدود باشد و یا هزینه های آب زیاد باشد، از بعد تحلیل اقتصادی، بیشترین سود خالص در حالت حداکثر عملکرد محصول (Y_{max}) در واحد سطح نخواهد بود. یعنی لزوماً حداکثر تولید (عملکرد) محصول منجر به دستیابی به حداکثر سود خالص نمی گردد. وقتی که مشکلات و محدودیت هایی از نظر تأمین سرمایه، انرژی، نیروی کارگر (ماهر و غیر ماهر) و دیگر منابع تولید وجود داشته باشد و یا هنگامی که هزینه های اینگونه منابع زیاد باشد، استفاده از فن کم آبیاری و روش های اجرایی آن در سیستم های آبیاری سطحی، بارانی، قطره ای و زیرزمینی می تواند به مدیریت مزرعه در افزایش سطح زیر کشت (در حالت عدم محدودیت زمین) و تعیین الگوی بهینه کشت (مدیریت تخصیص آب) کمک کند. اگرچه اعمال فن کم آبیاری کاری سهل و آسان نیست، اما به عنوان یک راهبرد سودمند اقتصادی در وضعیت بحران آب و با هدف حداکثر استفاده از واحد آب مصرفی، مطرح است.

۱۳-۲ جهت گیری های کم آبیاری

تحلیل مدیریت کم آبیاری و ارزیابی جنبه های مختلف آن مستلزم شناسایی پارامترها و میزان اثرگذاری و اثرپذیری برخی از آنها می باشد. این اجزا شامل عوامل زراعی (آب، خاک، الگوی کشت)، عوامل اقتصادی (تحلیل ریاضی و اقتصادی) و تحلیل های آماری است. لذا با توجه به اینکه کم آبیاری زیرمجموعه ای از مدیریت

آبیاری محسوب می شود، ضروری است که جایگاه آن مشخص شود. شکل (۱-۲) در فصل اول گویای این تقسیم بندی است.

کم آبیاری نیازمند مدیریتی منسجم، دقیق و کارآمد است که با مدیریت آبیاری کلاسیک کاملاً فرق دارد. مدیریت آبیاری بایستی تعیین نماید که چه درجه ای از کم آبیاری و چه نوعی از آن را اعمال نماید. همچنین الگوی بهینه کشت، ارزش اقتصادی، زمان کم آبیاری و فیزیولوژی گیاه و مورفولوژی خاک را کاملاً بررسی و مطالعه کرده باشد. به طور کلی می توان گفت که محاسن و مزیت های نسبی کم آبیاری از سه عامل «کاهش هزینه های تولید»، «افزایش راندمان (بازده) کاربرد آب آبیاری» و «کاهش هزینه های مربوط به آب آبیاری» نشأت می گیرد. درک اهمیت و نقش عوامل فوق در تابع هزینه بسیار اساسی است.

برخی از شیوه های اعمال کم آبیاری در مدیریت آبیاری و در قالب الگوی کشت به صورت زیر است: آبیاری موجی، آبیاری کابلی، سیستم دیم با آبیاری محدود (Limited irrigation dryland, LID)، استفاده مجدد از رواناب، کاهش سطح کفایت آبیاری، کوتاه کردن طول جویچه، نوار و کرت و بهینه سازی آن، آبیاری یک در میان جویچه ها و به صورت گردشی، کاهش عمق آب مصرفی از ابتدا تا انتهای دوره آبیاری، کاهش عمق آب مصرفی از ابتدای دوره آبیاری به استثنای مراحل حساس رشد، تلفیق سیستم های آبیاری سطحی و تحت فشار و کاهش یا حذف رواناب پایاب.

در بخش فنی کم آبیاری و در اصلاح ساختار نیاز آبی گیاهان، می توان به برنامه ریزی آبیاری بر اساس عمق واقعی توسعه ریشه (نه بر اساس آنچه که در برخی مقالات و کتاب های خارجی ذکر شده است)، تعیین ضرایب رطوبتی خاک (FC ، PWP ، p_b) در اعماق مختلف توسعه ریشه و دخالت دادن آنها، انتخاب ارقامی از گیاهان مورد نظر با خصوصیت پایداری عملکرد که با حداقل آب قابل تأمین عملکرد قابل قبولی را داشته باشند و همچنین به خصوصیات چگون مقاومت به خشکی، زودرسی (طول دوره رشد کوتاه تر) و گیاهانی با عمق توسعه ریشه بیشتر، توجه داشت.

برای محصولاتی که مجاز به کاهش آب مصرفی از ابتدا تا انتهای دوره آبیاری نباشیم، عملکرد گیاهان تحت تأثیر زمان اعمال کم آبیاری قرار می‌گیرد. اعمال به موقع و مناسب و صرفه‌جویی در مصرف آب سبب کاهش امراض و آفات گیاهی، به حداقل رسیدن آبشویی کودها و مواد مغذی خاک از منطقه توسعه ریشه و هم‌چنین بهبود تهویه خاک می‌گردد. بعضی از گیاهان ارزشمند و حساس، نسبت به کم آبیاری حساسیت زیادی از خود نشان می‌دهند که در آن صورت بایستی با در نظر گرفتن الگوی زراعی کشت، نیاز واقعی گیاهان (نه نیاز طرح) را در زمان حداکثر مصرف (و یا دوره‌های بحرانی رشد) تأمین نمود (توکلی، ۱۳۷۸)، و یا حداقل کمی محتاطانه عمل کرد.

کم آبیاری سبب بهتر شدن کیفیت برخی از محصولات می‌شود. کم آبیاری سبب افزایش پروتئین و کیفیت بذر گندم و میزان پروتئین محصولات دیگر می‌شود. در ضمن، سبب افزایش طول الیاف کتان، افزایش درصد قند چغندر قند، شیرۀ انگور و بهبود کیفی (به ویژه بهبود انبارداری و حمل و نقل) برخی محصولات می‌شود (سپاسخواه، ۱۳۷۵؛ توکلی و فرداد، ۱۳۷۸؛ Krieg, 1986; Musick and Walker, 1987). البته دستیابی به برخی از این نتایج با اعمال مدیریت تنش رطوبتی در آخر فصل حاصل می‌شود. کم آبیاری در آماده‌سازی گیاه برای خواب زمستانه نیز مؤثر است (خیرابی و همکاران، ۱۳۷۵؛ English et al., 1990).

کم آبیاری به طور علمی، از اوایل قرن نوزدهم به عنوان یک فن آبیاری به کار می‌رفته است. این کار در ابتدا به صورت تنش رطوبتی نمود پیدا کرد و هدف از آن بهبود کیفیت برخی محصولات مثل انگور، چغندر قند و نیشکر برای تجمع و ذخیره‌سازی میزان قند و کیفیت استحکام برخی از محصولات مثل الیاف کتان بوده است. البته وقوع تنش رطوبتی گاهی با توجه به مقتضیات طبیعی و کمبود آب صورت می‌گرفت و هدف از آن بهبود مصرف آب و یا صرفه‌جویی در مصرف آب نبود، چون اصولاً محدودیت منابع آب و زمین مثل امروزه فراگیر، بحرانی و مهم نبوده است (خیرابی و همکاران، ۱۳۷۵؛ English et al., 1990).

تعیین دقیق حد بهینه کاهش آب مصرفی (حد بهینه کم آبیاری) نیاز به تحقیقات محلی دارد. اما نتایج به دست آمده گویای این واقعیت است که کاهش ۲۰-۳۰ درصد آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل (آبیاری طرح) برای اکثر محصولات، بیشتر خاک‌ها و اقلیم‌ها، بدون بروز هیچ‌گونه مشکل یا محدودیتی قابل اجرا است (اکبری، ۱۳۷۷؛ توکلی، ۱۳۷۵، ۱۳۸۰، ۱۳۷۸؛ توکلی و فرداد، ۱۳۷۸؛ خیرابی و توکلی، ۱۳۷۶؛ سپاسخواه، ۱۳۷۵).

با توجه به مباحث کم آبیاری، یکسری نکات مهم و اساسی از زوایای مختلف مطرح می‌شود که اگر چه همه آنها به کم آبیاری اشاره دارند، اما به زبان و مفهوم متفاوتی بیان می‌شوند. برخی از این نکات شامل موارد زیر است:

الف) افزایش و بهبود کارایی مصرف آب، بهره‌وری آب و راندمان کاربرد آب آبیاری از طریق کاهش تلفات عمقی و تلفات رواناب پایاب.

ب) کاهش هزینه‌های تولید و هزینه‌های مربوط به آب و آبیاری در واحد سطح، از طریق تأمین یا پمپاژ کمتر آب، مصرف صحیح و بهینه آب و تکمیل سریع‌تر آبیاری (کاهش مدت آبیاری).

ج) اصلاح ساختار نیاز آبی گیاهان و جایگزینی عمق بهینه آب مصرفی به جای آب مورد نیاز گیاهان (که مبنای محاسباتی آن در بسیاری از موارد به طور محتاطانه و بر اساس منابع خارجی می‌باشد).

د) مبنایابی عمق توسعه ریشه گیاهان به صورت علمی و عملی در ذات کم آبیاری نهفته است. یکی از مسائل بسیار ضروری که به آن توجه کافی مبذول نشده است، تعیین عمق توسعه ریشه گیاهان است که متأسفانه مبنای کار، بیشتر منابع خارجی بوده است که با شرایط ایران کاملاً تطابق ندارد. این عامل سبب برآورد نیاز آبی بیش از حد مورد نیاز گردیده است و با کم آبیاری، نیاز واقعی گیاه (زراعی-اقتصادی) محاسبه و تأمین می‌شود.

ه) ضریب سهل‌الوصول نیز از اجزایی است که به نوعی از کم آبیاری تأثیر می‌پذیرد و بهبود می‌یابد. میزان «درصد تخلیه مجاز» به «درصد تخلیه بهینه» تغییر می‌کند.

و) با دقت در معادله تعیین نیاز خالص آب آبیاری که شامل ضرایب رطوبتی FC، PWP، چگالی ظاهری (ρ_b)، عمق توسعه ریشه گیاه (D) و ضریب سهل الوصول (درصد تخلیه مجاز) است با بهینه سازی کم آبیاری، عمق توسعه ریشه منظور شده، اصلاح و تعیین می شود و درصد تخلیه مجاز نیز بهینه می گردد.

البته پیرامون این مسائل، زمینه تحقیقات و پژوهش فراهم است و می تواند مورد توجه محققین و دانشجویان واقع شود و اسناد جامعی چون عمق بهینه آب مصرفی، درصد تخلیه بهینه و عمق واقعی توسعه ریشه گیاهان به دست آید.

۱۳-۳ سوابق تحقیقاتی

در این بخش، برای تفهیم مسئله و شرح اهمیت کم آبیاری، به خلاصه و نتایج برخی از تحقیقات کم آبیاری که در ایران و جهان اجرا و گزارش شده اشاره می شود. اویس و هاشم (Oweis and Hachum, 2003, 2004)، طی تحقیقی در مرکز تحقیقات کشاورزی در مناطق خشک، ایکاردا (ICARDA) در سوریه و روی گندم، گزارش کردند که تیمار دو سوم آبیاری کامل همراه با ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص دارای بالاترین میزان کارایی مصرف آب می باشد.

ژانگ (Zhang, 2003)، گزارش نمود که بهره وری آب در تولید گندم در شمال سوریه برای چهار تیمار آبیاری کامل، ۶۶ درصد آبیاری کامل، ۳۳ درصد آبیاری کامل و شرایط دیم به ترتیب ۹/۳، ۱۱/۹، ۹/۹ و ۹/۳ کیلوگرم بر میلی متر است. نتایج نشان دهنده برتری تیمار ۳۳ درصد کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل است. با ۲۵ درصد کاهش آب مصرفی (سطح کم آبیاری ۲۵ درصد) کارایی مصرف آب ۱/۲ برابر آنچه که تحت آبیاری نرمال (آبیاری کامل) به دست آمده بود افزایش یافت (Kirda, 2002).

طی تحقیقی در شمال عراق، بالاترین میزان کارایی مصرف آب در تیمارهای مختلف آبیاری گندم، از تیمار ۵۰ درصد آبیاری کامل به دست آمد (Adary et al., 2002).

ژانگ و اویس (Zhang and Oweis 1999)، طی تحقیقی روی گندم گزارش کردند که کاهش ۷۰ - ۴۰ درصد آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل، فقط ۱۳ درصد کاهش عملکرد به همراه دارد.

سعید و نادى (Saeed and Nadi, 1997)، طی مطالعاتی در سودان به بررسی دور آبیاری و اثر آن بر عملکرد یونجه پرداختند و گزارش کردند که چنانچه دور آبیاری از ۷ روز به ۱۴ روز برسد، میزان محصول فقط ۲۵ درصد کاهش می یابد. انگلیش و راجا (English and Raja, 1996)، طی تحقیقی در اورگان روی گندم، گزارش کردند که با ۳۹ درصد آب مصرفی گندم، علاوه بر اینکه بیشترین میزان سود خالص به ازای واحد آب مصرفی را به همراه داشته، سود خالص به میزان ۴۹ درصد بیش از آبیاری کامل بوده است.

انگلیش و راجا (English and Raja, 1996)، طی تحقیقی در کالیفرنیا روی پنبه گزارش کردند که با ۲۸ درصد آب مصرفی، سود خالص به ازای واحد آب مصرفی ۴۴ درصد بیش از آبیاری کامل بوده است.

اشنایدر و هاول (Schneider and Howell, 1996)، طی تحقیقی در تکزاس آمریکا نشان دادند که بهره وری آب در تولید دانه گندم برای چهار تیمار آبیاری کامل، ۶۶ درصد آبیاری کامل، ۳۳ درصد آبیاری کامل و شرایط دیم به ترتیب ۶/۴، ۸، ۷/۶ و ۶/۱ کیلوگرم بر میلی متر است.

طی تحقیقی در زیمبابوه روی ذرت، نشان داده شد که با ۵۹ درصد کاهش آب مصرفی ذرت، کل تولید در حالت افزایش سطح زیر کشت ۶۸ درصد بیش از آبیاری کامل بوده است (English and Raja, 1996).

استون و همکاران (Stone et al., 1979)، طی تحقیقی نشان دادند که آبیاری دو ردیف پنبه روی یک پشته پهن می تواند محصول قابل قبولی تولید کند و مقدار آب کمتری نسبت به آبیاری معمولی مصرف نماید.

ارگاز و همکاران (Orgaz et al., 1992)، طی تحقیقی روی پنبه نشان دادند که بیوماس و تعداد غوزه به طور خطی با میزان کاهش آب مصرفی، کاهش می یابد.

میزان بهینه کم آبیاری برای پنبه وابسته به طول فصل رشد و میزان آب موجود می باشد.

طی تحقیقی در دانشگاه کالیفرنیا روی گوجه فرنگی بدین نتیجه رسیدند که کم آبیاری، عملکرد و آب ذخیره شده گوجه فرنگی را کاهش داد اما در مقابل میزان مواد جامد، درصد قند، میزان اسید سیتریک و پتاسیم را افزایش داد (به نقل از خیرابی و همکاران، ۱۳۷۵).

تریمر (Trimmer, 1990)، طی تحقیقی نشان داد که در پاکستان به طور گسترده از کم آبیاری استفاده می گردد، به نحوی که کل آب مصرفی حدود ۲۵ درصد کمتر از نیاز آبی آبیاری کامل محصولات است.

انگلیش (English, 1990)، در حوضه کلمبیای ایالات متحده آمریکا، مزارع گندم را که به مدت ۹ سال با سیستم سنتریپوت آبیاری می شدند مورد بررسی کم آبیاری قرار داده و نتیجه گرفت که در کم آبیاری (در مقایسه با آبیاری کامل) سود خالص در واحد سطح، ۲۵ درصد کمتر و سود خالص به ازای واحد آب مصرفی ۱۴/۵ درصد بیشتر بوده است.

در کم آبیاری، گیاهان می توانند آب قابل جذب بیشتری را در مقایسه با آبیاری کامل از خاک استخراج کنند. مثلاً، هرچند که عمق ریشه دوانی گندم ۸۰-۶۰ سانتی متر در نظر گرفته می شود، ولی در کم آبیاری، گندم می تواند آب بیشتری را در منتهی الیه محدوده آب قابل دسترس استخراج نماید. در یک مطالعه موردی در دشت کلمبیا، انگلیش و همکاران (English et al., 1990) نشان دادند که در آبیاری کامل، گندم می تواند از عمق ۰/۶ تا ۲/۱ متری تنها ۱۶ میلی متر آب استخراج نماید در صورتی که در کم آبیاری، میزان آب استخراج شده تا ۱۰۰ میلی متر نیز بوده است.

هاجز و همکاران (Hodges et al., 1989)، طی تحقیقی نشان دادند که در آبیاری جویچه ای سورگوم با پشته های پهن به فاصله ۲/۸۴ متر و پشته های معمولی به فاصله ۱/۴۲ متر تغییر چندانی در محصول مشاهده نشد. در صورتی که مقدار آب مصرف شده در پشته های پهن حدود نصف مقدار آبی بود که در آبیاری جویچه ای معمولی مصرف شد.

هاول و همکاران (Howell et al., 1987)، طی مطالعاتی در کالیفرنیا روی چغندر قند و در خاک هایی عمیق، گزارش کردند که قطع آبیاری به مدت ۲ تا ۵ و یا حتی ۷ هفته قبل از برداشت با اینکه موجب کاهش ۵۰ درصدی تبخیر - تعرق آخر فصل شده و کل تبخیر - تعرق فصل رشد را نیز حدود ۱۵ درصد کم کرده، ولی باعث کاهش عیار قند چغندر قند نشده است.

آبیاری موجی (Surge flow irrigation) اولین بار توسط استرینگهام و کلر در سال ۱۹۸۷ در ایالات متحده آمریکا، پیشنهاد گردید. این کار تلاشی برای کاهش جریان ورودی به جویچه پس از مرحله پیشروی و تسریع در مرحله پیشروی و خودکار کردن آبیاری سطحی بوده است. از عوامل مؤثر این روش، میزان نفوذ پذیری، نوع خاک، میزان و نوع بقایای گیاهی، میزان دبی ورودی و شیب زمین (سهرابی و همکاران، ۱۳۷۵). در این روش آب در دوره زمانی مشخص (زمان قطع + زمان وصل) و نسبت زمان کارکرد، وارد جویچه می شود تا با جریان (دبی) و سرعت بیشتر، طول جویچه را طی نماید و میزان تلفات آب در ابتدای جویچه کاهش یافته و توزیع یکنواختی بالاتری ایجاد گردد.

نتایج تحقیقات صورت گرفته نشان داد که در شیاریهایی به طول ۱۸۰ متر و متوسط جریان کاربردی ۰/۶ لیتر در ثانیه، متوسط زمان پیشروی در جریان مداوم، بیش از ۴۰۰ دقیقه و در جریان موجی (متناوب) حدود ۱۳۰ دقیقه بوده است (به نقل از سهرابی و همکاران، ۱۳۷۵).

جریان (آبیاری) موجی خوب طراحی شده به آب کمتر نسبت به آبیاری پیوسته نیاز دارد که این میزان آب صرفه جویی شده، می تواند برای افزایش سطح زیر کشت به کار رود (به نقل از سهرابی و همکاران، ۱۳۷۵). این روش در واقع بیانگر افزایش راندمان کاربرد آبیاری و افزایش کارایی مصرف آب (عملکرد به ازای واحد آب مصرفی) می باشد که خود مفهوم کم آبیاری است.

طی تحقیقی در مورد مقایسه آبیاری موجی با تواتر زیاد (روزانه) و آبیاری قطره ای در باغ های گیلاس در واشنگتن طی سال های ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۶ این نتیجه گرفته شد که راندمان کاربرد آبیاری موجی بیش از ۸۰ درصد و برای آبیاری قطره ای ۹۵

درصد بوده است، در حالی که راندمان کاربرد آبیاری سنتی با جریان پیوسته کمتر از ۵۰ درصد بود. عملکرد گیلاس برای هر درخت در آبیاری موجی ۱۷۳ کیلوگرم و برای آبیاری قطره‌ای ۱۲۸ کیلوگرم و وزن هر دانه گیلاس در آبیاری موجی به طور متوسط ۷/۹ گرم و در آبیاری قطره‌ای به طور متوسط ۷/۲ گرم بوده است. محصول تحت شرایط آبیاری قطره‌ای کمی شیرین‌تر بود (به نقل از سهرابی و همکاران، ۱۳۷۵).

ونتگامودی و همکاران (Vanangamudi et al., 1984)، طی تحقیقی نشان دادند که انجام آبیاری ارزن در زمانی که مجموع تبخیر از تشت تبخیر کلاس A برابر ۸۳ میلی‌متر باشد، محصول را ۲۴ درصد نسبت به زمانی که مجموع تبخیر از تشت تبخیر ۵۶ میلی‌متر باشد، کاهش داده است. در صورتی که آبیاری در زمانی که مجموع تبخیر از تشت کلاس A برابر ۶۷ میلی‌متر باشد، با کاهش ۱۹ درصد آب آبیاری، مقدار محصول فقط ۱/۳ درصد کاهش نشان داده است.

مایرز و همکاران (Myers et al., 1984)، طی مطالعاتی روی چهار رقم سورگوم با چهار دور آبیاری ۷، ۱۴، ۲۸ و ۴۲ روز، پراکندگی ریشه و مقدار تبخیر را مورد بررسی قرار داده و نشان دادند که در آبیاری با دور کمتر، ریشه‌ها کم عمق بوده و جذب آب بیشتر از لایه سطحی خاک صورت می‌گرفت.

هانگ و میلر (Hang and Miller, 1983)، با کشت گندم در یک خاک شنی و کم عمق مشاهده کردند که با نقصان آب مصرفی، گندم دچار کاهش عملکرد شده است. اما گندمی که در خاک لومی کشت شده بود، با نقصان ۴۰ الی ۵۰ درصد کل تبخیر و تعرق، با کاهش عملکرد ناچیزی مواجه گردید.

طبق روش آبیاری محدود دیم (LID)، در سیستم آبیاری سطحی، در جویچه‌هایی به طول ۵۷۵ متر، نیمه اول آنها (نیمه اول جویچه‌ها) آبیاری کامل، ربع سوم آنها آبیاری توسط رواناب نیمه اول جویچه و ربع انتهایی نیز اصلاً آبیاری نشد و دیم باقی ماند (Stewart and Musick, 1982; Stewart et al., 1983). با توجه به بارندگی‌ها و رطوبت خاک، بخشی از نیاز آبی گیاه در این قسمت تأمین می‌شد. در

این تحقیق، گیاه سورگوم کشت گردید. البته در ربع سوم جویچه‌ها، بندها و موانعی ایجاد گردید تا رواناب در آن ذخیره شود. نتایج زیر به دست آمد:

در آبیاری کامل، یک واحد آب مصرفی، ۰/۹۲ واحد و در آبیاری محدود (کم آبیاری یا LID)، یک واحد آب مصرفی ۱/۳۵۶ واحد عملکرد داشت. آبیاری کامل نسبت به وضعیت دیم، ۴/۷۱ تن در هکتار عملکرد بیشتری داشته است. در روش LID، میزان مصرف آب ۴۵ درصد و میزان عملکرد ۷۸/۶ درصد آبیاری کامل بوده است. یعنی در ازای کاهش ۵۵ درصد آب مصرفی، میزان عملکرد تنها ۲۲ درصد کاهش یافته است.

نیمار	آب مصرفی (mm)	عملکرد (t/ha)	تبخیر - تعرق (mm)	کارایی مصرف آب نسبت به شرایط دیم
آبیاری کامل	۵۱۶	۷/۲۴	۶۱۹	۰/۹۲
LID	۲۳۳	۵/۶۹	۵۲۰	۱/۳۵۶
دیم	۰	۲/۵۳	۲۹۵	-

در آبیاری جویچه‌ای به صورت یک در میان و به حالت گردشی، کل آب مصرفی در طول فصل کاهش می‌یابد. استون و نفزیکر (Stone and Nofziger, 1993)، ۲۰ تا ۵۰ درصد کاهش آب مصرفی را با اعمال کم آبیاری و به صورت یک در میان گزارش نموده‌اند.

شیرر (Shearer, 1978)، با کشت گندم در خاکی یکنواخت با نیاز آبی خالص ۱۰ سانتی‌متر و یکنواختی توزیع ۸۵ درصد گزارش نمود که در سطح کفایت ۸۷/۵ درصد، مجموع تلفات نفوذ عمقی ۲۳ درصد آب مصرفی بود اما در سطح کفایت ۵۰ درصد، مجموع تلفات عمقی تنها ۸ درصد آب مصرفی بوده است.

با توجه به اینکه کم آبیاری سبب کاهش رواناب پایاب می‌شود، اشنایدر و همکاران (Schneider et al., 1976)، طی تحقیقی نشان دادند که تغییر مدت زمان جریان رواناب پایاب از ۲ الی ۴ ساعت به ۶ الی ۸ ساعت، تغییری در افزایش عملکرد نداشته است.

فیش‌باخ و مولینر (Fischbach and Mulliner, 1974)، کم آبیاری را در خاک با بافت متوسط (لوم رس سیلتی) و در جویچه‌هایی به فواصل ۰/۷۶ متر و با آبیاری جویچه‌ای یک در میان روی ذرت اعمال کرده و در هر آبیاری تا ۲۹ درصد کاهش مصرف آب را نشان داده‌اند. این در حالی است که در مقایسه با جویچه‌های متداول فقط ۴/۷ درصد عملکرد محصول کاهش یافت. اهمیت این روش در جایی که ارزش آب زیاد باشد، بسیار مشهود و قابل توجه است.

نیو (New, 1971)، طی تحقیقی نشان داد که در خاک لوم شنی، عملکرد سورگوم دانه‌ای در آبیاری جویچه‌ای یک در میان با مصرف ۶۷ درصد آب آبیاری، ۱۹۷۳ کیلوگرم در هکتار کاهش عملکرد را به دنبال داشته است. عواملی که در نتایج این‌گونه تحقیقات مؤثرند عبارتند از: وجود آب زیرزمینی (سطح ایستابی) نزدیک به سطح زمین، وجود بارندگی مؤثر در فصل رشد، نوع گیاه (تولید میوه، بذر، ریشه یا برگ)، دور آبیاری، شوری آب آبیاری و عکس‌العمل گیاهان به شوری و همچنین نوع و بافت خاک.

گریمز و همکاران (Grimes et al., 1968)، طی تحقیقی روی پنبه و با آبیاری یک در میان نشان دادند که با این روش آبیاری، حدود ۳۰ درصد در مصرف آب صرفه‌جویی می‌شود.

باکس و همکاران (Box et al., 1963)، با تحقیق روی سیب زمینی و با آبیاری جویچه‌ای یک در میان، حدود ۳۰ درصد صرفه‌جویی در مصرف آب را گزارش کردند.

توکلی (۱۳۸۵)، طی پژوهشی گزارش نمود که کاهش ۲۷/۳ درصد آب مصرفی گندم همراه با مصرف ۹۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص بالاترین میزان بهره‌وری آب را دارد و تنها ۱۹/۸ درصد افت عملکرد به وجود می‌آید.

فرداد و گلکار (۱۳۸۱)، طی تحقیقی در کرج نشان دادند که حداکثر سود با کاهش ۶۵ درصد آب مورد نیاز گندم و افزایش سطح تحت آبیاری به میزان سه برابر به دست می‌آید.

توکلی (۱۳۷۹)، طی تحلیلی برای داده‌های شمال خراسان، گزارش کرد که سطح بهینه کاهش آب مصرفی گندم، جو، ذرت، یونجه و چغندر قند به ترتیب ۳۰، ۲۵، ۳۰ و ۲۰ درصد نسبت به آبیاری کامل است و اعمال این میزان از سطوح بهینه کم آبیاری، به ترتیب باعث ۱۲، ۱۲، ۸، ۱۰ و ۷/۵ درصد کاهش عملکرد نسبت به حداکثر عملکرد تحت شرایط آبیاری کامل می‌شود.

ابراهیمی‌پاک (۱۳۷۹)، طی تحقیقی در شهر کرد روی یونجه همدانی، گزارش کرد که با ۶۱ درصد کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل، بالاترین میزان درآمد خالص به ازای واحد آب مصرفی به دست آمد، اگر چه ۲۵ درصد کاهش عملکرد را به همراه داشت. اما با ۲۰ درصد کاهش آب مصرفی (۱۲۴ سانتی‌متر) تنها ۵ درصد افت عملکرد ایجاد شد. سود خالص به ازای واحد آب مصرفی این عمق با سود خالص به ازای واحد آب مصرفی آبیاری کامل (۱۵۵ سانتی‌متر) برابر است و سبب ۳۰ درصد افزایش سطح زیر کشت نیز می‌گردد.

ضیغمی‌گل (۱۳۷۸)، طی تحقیقی در گرگان روی پنبه نشان داد که در شرایط محدودیت زمین با کاهش ۱۶ درصد آب مصرفی (۳۴۵ میلی‌متر) نسبت به آبیاری کامل (۴۱۰ میلی‌متر) سود خالص اینکار با سود خالص ناشی از آبیاری کامل برابر است و با کاهش ۵۱ درصد آب مصرفی (۱۹۹ میلی‌متر) نسبت به آبیاری کامل، سود به ازای واحد آب مصرفی با سود به ازای واحد آب مصرفی آبیاری کامل برابر است. حداکثر عملکرد پنبه با مصرف ۴۱۰ میلی‌متر آب به دست آمد که برابر آبیاری کامل است.

با تحلیل نتایج تحقیق صحرایی سهرابی مشک‌آبادی (۱۳۷۸) روی محصول پنبه و با به کارگیری مدل بهینه‌سازی سود خالص، نشان داده شد که ۲۱ درصد کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل فقط ۳/۲ درصد کاهش عملکرد را به دنبال داشته است.

اکبری (۱۳۷۷)، طی تحقیقی در اصفهان روی محصول چغندر قند، نشان داد که با کاهش ۳۰ درصد آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل، میزان عملکرد محصول فقط ۱۰

درصد کاهش پیدا کرد، ولی درصد قند افزایش یافت. با تحلیل این نتایج در مدل بهینه‌سازی سود خالص نشان داده شد که $21/2$ درصد کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل باعث افزایش 80 درصد سود خالص به ازای واحد آب مصرفی گردیده و تنها $6/9$ درصد کاهش عملکرد را نشان می‌دهد. در حالی که آب مصرفی آبیاری کامل $141/54$ سانتی‌متر و عملکرد حداکثر (عملکرد تحت شرایط آبیاری کامل) $52/311$ تن در هکتار بود. در حالت بهینه کم‌آبیاری، عمق آب مصرفی به $111/52$ سانتی‌متر و عملکرد آن به $48/705$ تن در هکتار رسید.

موسوی و همکاران (۱۳۷۷)، در بررسی مدیریت آبیاری نواری توسط زارعین در مزارع چغندر قند، گندم و یونجه شهرستان‌های بویراحمد و گچساران، نشان دادند که در اکثر موارد کم‌آبیاری و یا آبیاری تنشی انجام گرفته و متوسط بازده کاربرد آب در آبیاری‌های اول تا سوم چغندر قند، گندم و یونجه به ترتیب $40/8$ تا $52/2$ ، 100 تا $61/6$ و 100 درصد اندازه‌گیری شد.

قهرمان و سپاس‌خواه (۱۳۷۷)، طی مطالعه‌ای نشان دادند که احتساب نقش رطوبت اولیه خاک باعث بالا رفتن محصول نسبی در ازای مقادیر مختلفی از کاهش تأمین آب آبیاری می‌شود و نادیده گرفتن این نقش منجر به برآورد پائین تولید محصول نسبی در روش برنامه‌ریزی غیر خطی می‌گردد.

جانباز (۱۳۷۵)، طی تحقیقی در کرج گندم، گزارش کرد که از نظر اقتصادی در دور آبیاری ۷ روز، تیمار ۶۰ درصد تبخیر - تعرق بیشترین صرفه را به دنبال داشته و دور آبیاری ۷ روز بر ۱۴ روز تفوق دارد.

توکلی (۱۳۷۵ و ۱۳۷۹)، با تحلیل نتایج صحرایی تحقیق جانباز (۱۳۷۵)، در مدل بهینه‌سازی سود خالص، نشان داد که کاهش ۴۵ درصد آب مصرفی گندم نسبت به آبیاری کامل، علاوه بر اینکه حداکثر درآمد خالص نسبت به واحد آب مصرفی را به دنبال داشته، حدود ۳۶ درصد سود خالص بیشتر نسبت به آبیاری کامل در حالت محدودیت آب کسب کرده است.

خواجه‌عبداللهی و سپاس‌خواه (۱۳۷۵) و سپاس‌خواه و خواجه‌عبداللهی (۲۰۰۵)، طی تحقیقی در منطقه باجگاه و کوشک شیراز روی آبیاری جویچه‌ای ذرت با دوره‌های ۴، ۷ و ۱۰ روز معمولی و یک در میان و بررسی اقتصادی آنها، نشان دادند که آبیاری جویچه‌ای یک در میان با دور ۴ روز نسبت به تیمار آبیاری جویچه‌ای ۷ روز معمولی، آب کمتری مصرف می‌کند و در عملکرد محصول نیز کاهش چندانی رخ نمی‌دهد.

توکلی (۱۳۷۵ و ۱۳۷۹)، در تحقیق پیرامون کم‌آبیاری چغندر قند، نتایج عمومی زیر را به دست آورد که همسو با دیگر نتایج می‌باشد:

الف) عملکرد حداکثر متضمن حصول سود حداکثر نیست.

ب) در حالت محدودیت زمین و فراوانی نسبی آب نیز به دلیل اثر هزینه‌های مربوط به آب، آبیاری کامل منجر به کسب حداکثر سود خالص نمی‌گردد.

ج) عمق آب مصرفی کمتری وجود دارد که سود خالص ناشی از آن در واحد سطح برابر با سود خالص آبیاری کامل می‌گردد که به آن «عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت زمین» اطلاق می‌گردد. همچنین عمق آب مصرفی دیگری وجود دارد که سود خالص به ازای واحد آب مصرفی ناشی از آن برابر با سود خالص به ازای واحد آب مصرفی با عمق آب آبیاری کامل می‌گردد که به آن «عمق معادل آبیاری کامل در حالت محدودیت آب» گفته می‌شود.

د) قیمت یا ارزش نهایی محصول که بستگی به کیفیت آن دارد، عاملی مؤثر در بهینه‌سازی سود خالص است.

ه) در حالت محدودیت منابع آب یا زمین، کاربرد کمتر آب سبب کاهش هزینه‌های مرتبط با آب و آبیاری می‌گردد. این مهم به ویژه برای سیستم‌های آبیاری تحت فشار (هزینه سرمایه‌گذاری، نگهداری و بهره‌برداری) حائز اهمیت است.

و) ارزش اقتصادی محصول و بازارپسندی آن و مدیریت کم‌آبیاری، در ارزیابی و بهینه‌سازی آن مؤثر است.

سپاس‌خواه (۱۳۷۵) و سپاس‌خواه و کامگار حقیقی (۱۹۹۷)، طی تحقیقی در شیراز روی چغندر قند، گزارش کرد که مقدار محصول ریشه چغندر قند در آبیاری جویچه‌ای یک در میان با دور ۶ روزه با آنچه که از آبیاری جویچه‌ای معمولی با دور ۱۰ روزه به دست آمده برابری دارد، ضمن اینکه میزان آب آبیاری نیز ۲۳ درصد کاهش یافته است. در ضمن در این روش، آبیاری سریع‌تر انجام می‌شود و هزینه‌های دستمزد پایین می‌آید.

در باجگاه (استان فارس) آبیاری جویچه‌ای یک در میان در مراحل مختلف رشد ذرت دانه‌ای به استثنای مرحله رشد کاکل‌دهی که در آن یک‌بار آبیاری جویچه‌ای معمولی انجام شد محصولی برابر محصول آبیاری جویچه‌ای در سرتاسر فصل رشد تولید کرد ولی کاربرد آب آبیاری را ۲۹ درصد کاهش داد. هم‌چنین در کوشک (استان فارس) آبیاری جویچه‌ای یک در میان در مراحل مختلف رشد ذرت دانه‌ای به استثنای مرحله رشد ابریشم‌دهی که در آن دو مرتبه آبیاری جویچه‌ای معمولی انجام شد محصولی برابر محصول آبیاری جویچه‌ای در سرتاسر فصل رشد تولید کرد ولی کاربرد آب آبیاری را ۳۰ درصد کاهش داد. بازده مصرف آب در دو منطقه مذکور به ترتیب ۱/۰۴ و ۰/۹۷ کیلوگرم دانه بر متر مکعب آب به دست آمد (سپاس‌خواه و پرند، ۲۰۰۶).

در کوشک (استان فارس) آبیاری جویچه‌ای یک در میان در مراحل مختلف رشد لوبیا به استثنای مرحله رشد پر کردن غلاف که در آن آبیاری جویچه‌ای معمولی انجام شد محصولی برابر و حتی بیشتر از محصول آبیاری جویچه‌ای در سرتاسر فصل رشد تولید کرد و کاربرد آب آبیاری را ۱۵ درصد کاهش داد. (صمدی و سپاس‌خواه، ۱۹۸۴).

طی تحقیق کم آبیاری روی چغندر قند توسط توکلی (۱۳۷۵) در کرج، چنین گزارش شد که ۳۴ درصد کاهش آب مصرفی (۱۱۵/۷۶ سانتی‌متر) نسبت به آبیاری کامل (۱۷۵/۶۸ سانتی‌متر)، اگرچه منجر به ۱۶ درصد کاهش عملکرد در واحد سطح می‌شود، اما حداکثر سود خالص به ازای واحد آب مصرفی را نیز به همراه دارد. در

حالت محدودیت زمین، میزان درآمد خالص ۵۲ درصد بیشتر از آبیاری کامل خواهد بود و در حالت محدودیت آب، میزان درآمد خالص ۴۵ درصد بیشتر از آبیاری کامل می‌شود.

شیخ‌حسینی (۱۳۷۵)، در تحقیقی روی محصول جو در کرج بدین نتیجه رسید که دور آبیاری ۷ روز بر ۱۴ روز برتری دارد. در دور آبیاری ۷ روز، تیماری با مقدار آبیاری به میزان ۶۰ درصد نیاز آبی گیاه، اختلاف معنی‌داری با تیمار آبیاری کامل نداشته است.

توکلی (۱۳۷۵ و ۱۳۷۹)، با تحلیل نتایج صحرایی تحقیق شیخ‌حسینی، در مدل بهینه‌سازی سود خالص، نشان داد که کاهش ۳۸ درصد آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل، علاوه بر اینکه حداکثر درآمد خالص نسبت به واحد آب مصرفی را به دنبال داشته، حدود ۳۰ درصد سود خالص بیشتر در حالت محدودیت آب نسبت به آبیاری کامل نیز داشته است.

هنر و سپاس‌خواه (۱۳۷۵)، طی تحقیقی نشان دادند که با مقدار آب ۵ سانتی‌متر در هر آبیاری و دور آبیاری حدود ۶ روز در بخش قابل توجهی از فصل رشد (به استثنای اوایل دوره) مقدار محصول ذرت حدود ۰/۹۲ حداکثر تولید می‌گردد، در حالی که مقدار مصرف آب آبیاری از ۱۰۲/۳ سانتی‌متر به ۸۰ سانتی‌متر کاهش یافته است.

نیریزی و خیابانی (۱۳۷۴)، نشان دادند که به منظور حصول حجم بهینه، کاهش ۲۰ درصد از مصارف آبیاری در سال‌های خشک توصیه می‌گردد.

افلاطونی (۱۳۷۰)، طی تحقیقی روی محصول ذرت و در یک خاک شنی در ایالت داکوتای شمالی آمریکا، گزارش کرد که کمبود رطوبت معادل ۸۰ تا ۹۰ درصد در دوره رشد رویشی نسبت به مراحل دیگر، پر بازده‌ترین تیمار آبیاری (۳/۴۳ کیلوگرم بر متر مکعب آب مصرفی) بوده است.

کوچکی (۱۳۶۳)، طی تحقیقی در مشهد، فاصله آبیاری اسپرس را از ۱۰ روز به ۲۰ روز تغییر داد که منجر به کاهش ۲۰ درصد عملکرد محصول شد. در واقع با

کاهش ۵۰ درصد آب مصرفی (یا افزایش سطح تحت آبیاری به دو برابر)، عملکرد در واحد سطح تنها ۲۰ درصد کاهش یافته است.

عربزاده و توکلی (۱۳۸۴) به منظور بررسی اثرات کم آبیاری تنظیم شده در اراضی شالیزاری و بهبود بهره‌وری مصرف آب و حصول عملکرد مناسب در کشت نشایی برنج، طی پژوهشی بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی شامل هفت تیمار آبیاری روی برنج رقم طارم و به مدت دو سال (۱۳۷۹ و ۱۳۸۰) در مزرعه تحقیقاتی معاونت مؤسسه تحقیقات برنج کشور، مازندران (آمل) گزارش کردند که تیمار T_1 (تیمار دارای ارتفاع آب به عمق ۵ سانتی‌متر و غرقاب دائم در سرتاسر دوره رشد، تیمار شاهد) و T_7 (تیماری که در تمام مراحل رشد خاک در وضعیت اشباع است) به ترتیب با ۴۳۷۲ و ۳۹۴۲ کیلوگرم در هکتار بیشترین و کمترین عملکرد شلتوک را داشته‌اند، اما میزان بهره‌وری آب آبیاری (WP_i) و بهره‌وری از مجموع آب آبیاری و بارش (WP_{i+R}) تیمار T_7 در تولید شلتوک به ترتیب با ۷ و ۶/۱ کیلوگرم بر میلی‌متر بیشترین مقدار می‌باشد. در تیمار T_7 با ۴۲ درصد کاهش آب مصرفی نسبت به شاهد (T_1) تنها ۱۰ درصد کاهش عملکرد در واحد سطح ایجاد می‌شود، لذا بر اساس نتایج این تحقیق، در کشت نشایی نیازی به وجود ارتفاع آب در سطح شالیزارها نیست و اشباع دایم خاک کفایت می‌نماید.

اگرچه نتایج تحقیقات دیگری از کم آبیاری در ایران و جهان موجود است اما برای بیان اهمیت مسئله به همین مقدار کفایت می‌شود. امید است با ذکر این پژوهش‌ها، مزیت‌های نسبی به‌گزینی مدیریت کم آبیاری تبیین شده باشد.

۱۳-۴ جمع‌بندی نتایج

با توجه به تبیین کم آبیاری و مستندات تحقیقاتی، برخی نکات اساسی در کم آبیاری، به شرح زیر بیان می‌شود:

۱۳-۴-۱ اثرات و نتایج کم آبیاری

الف) میزان کاهش محصول در واحد سطح به عنوان اولین پیامد اعمال کم آبیاری به ویژه برای درختان میوه و گیاهانی که تولید مثل جنسی دارند، تابعی از زمان و میزان کم آبیاری است.

ب) کم آبیاری علاوه بر بهبود کارایی مصرف آب و شاخص‌های بهره‌وری آب و افزایش سود، باعث اصلاح و بهبود خاصیت انبارداری محصولات زراعی، کاهش آفات و بیماری‌ها، کاهش آبشویی مواد غذایی و عناصر کودی از منطقه ریشه و اصلاح تهویه خاک می‌گردد.

ج) بعضی از گیاهان به صورت مرحله‌ای یا به طور کلی به تنش رطوبتی حساس هستند. لذا بهتر است کم آبیاری در ترکیب کشت صورت پذیرد و طوری برنامه‌ریزی شود تا کمترین میزان افت عملکرد محصول اتفاق بیافتد. به نحوی که ممکن است نیاز باشد در برخی از مراحل حساس رشد آبیاری کافی صورت پذیرد.

د) در کم آبیاری توصیه می‌شود که اجزای عملکرد نیز یادداشت و ثبت شوند، زیرا برآورد عملکرد به وسیله برآورد اولیه تعداد سنبله در متر مربع و سپس تعداد دانه در سنبله و وزن هزار دانه ممکن می‌شود (James and Roger, 1991; CIMMYT, 1991).

ه) کم آبیاری باعث بهبود کیفیت محصولات زراعی و باغی می‌شود.

و) اعمال کم آبیاری در انتهای فصل رشد و هم‌زمان با کاهش دما، شرایط را برای خواب زمستانه برخی محصولات مهیا می‌کند.

ز) کاربرد مدیریت صحیح خاک و گیاه، بهره‌وری از آب آبیاری را به طور مؤثری افزایش می‌دهد. بهبود بهره‌وری از آب زمانی می‌تواند حاصل شود که گیاه استقرار پیدا کرده باشد، کود مناسب و مورد نیاز مصرف شده باشد، علف‌های هرز کنترل شوند و از تناوب زراعی صحیح استفاده شده باشد (Pala and Studer, 1999).

ح) پس از تعیین شیوه اعمال مدیریت کم آبیاری (که توصیه می‌شود مدیریت کسر آبیاری از ابتدای فصل زراعی تا آخر به کار برده شود و در صورت امکان، در

مراحل حساس رشد تعدیل لازم صورت گیرد)، کاهش ۲۰-۳۰ درصد آب مصرفی محصولاتی که در مجموعه مدیریتی کم آبیاری قرار می گیرند، سبب افزایش ۳۰-۵۰ درصد سطح زیر کشت می شود، ۱۵-۵ درصد کیفیت محصول را بهبود می بخشد، تولید کل به میزان ۱۵-۳۰ درصد افزایش پیدا می کند، کارایی مصرف آب (عملکرد به ازای واحد آب مصرفی)، به میزان ۱۵-۳۰ درصد بهبود می یابد و فقط ۷-۱۲ درصد از میزان عملکرد در واحد سطح کاسته می شود.

۱۳-۴-۲ انتخاب گیاه

چون محصولات زراعی و حتی واریته های مختلف یک محصول، نسبت به کسر آبیاری عکس العمل های متفاوتی نشان می دهند، لذا ارقام و محصولات مناسب بایستی دارای دوره رشد کوتاه تر و مقاوم به تنش های محیطی از جمله خشکی و شوری باشند (Stewart, 1977). نیمرخ گسترش ریشه ای در جذب رطوبت از لایه های زیرین و دارا بودن خصوصیات فیزیولوژیک و مورفولوژیک در کنترل و تعدیل تعرق نیز اهمیت فراوانی دارد. دورنباس و کاسام (Doorenbos and Kassam, 1979) اشاره می کنند که ارقام پر محصول به تنش رطوبتی بسیار حساس هستند. به طوری که ارقام پر محصول ذرت که تحت شرایط آبیاری کامل محصول زیادی تولید می کنند، در شرایط کم آبیاری، افت عملکرد آنها بیشتر از ارقام بومی است (Doorenbos and Kassam, 1979; Kirda, 2002).

گیاهان با گسترش نیمرخ ریشه ای برای استخراج آب بیشتر از نیمرخ خاک و کاهش طول دوره رشد، در برابر تنش رطوبتی مقاومت می کنند. گسترش نیمرخ ریشه ای در گیاهانی نظیر آفتابگردان، چغندر قند، انگور و یونجه بذری متداول است. گیاهان هم چنین با تغییرات فیزیولوژیک و مورفولوژیک از قبیل کاهش شاخص سطح برگ (Leaf area index)، تنظیم فشار اسمزی، پیچ خوردگی یا پژمردگی موقت برگ ها و جذب فعال املاح توسط سلول ها، میزان و شدت تعرق را محدود کرده و

بدین طریق با خشکی مقابله می کنند. لذا ارقام مقاوم به خشکی و شوری با پتانسیل تولید مناسب بایستی مد نظر پژوهشگران و محققان به نژادی قرار گیرد.

۱۳-۴-۳ انتخاب خاک

ظرفیت انباشت و نگهداری آب در خاک و میزان آب سهل الوصول در محدوده عمق توسعه ریشه که در واقع اشاره به بافت و خصوصیات فیزیکی خاک دارد، در برنامه ریزی کم آبیاری بسیار اهمیت دارد. در خاک های سبک، اثرات کسر آبیاری به سرعت و شدت توسعه یافته و ممکن است در شرایط عادی کسر آبیاری و یا به وجود آمدن حوادث غیر مترقبه ناشی از کاربرد سیستم یا فشار عوامل جوی، شدیداً به محصول آسیب برساند. در خاک های عمیق به خاطر ظرفیت ذخیره زیاد، رطوبت به آهستگی از دست می رود. این مسئله منجر به گسترش تدریجی تنش رطوبتی می شود و گیاهان قادر می شوند شیره سلولی خود را با تنش های وارده هماهنگ سازند. خاک های عمیق با ظرفیت انباشت رطوبتی زیاد این ویژگی را دارند که بارش های به وقوع پیوسته در دوره رشد را جذب و در نیمرخ ذخیره و به مصرف گیاه برسانند. با این کار بهره وری بارش (Rain water productivity = RWP) افزایش می یابد.

افت ناچیز عملکرد گندم در خاک عمیق و سنگین علیرغم کاهش ۵۰ درصدی آب مصرفی نسبت به خاک شنی در دشت کلمبیا توسط هانگ و میلر (Hang and Miller, 1983) گزارش شده است. لذا توصیه می شود مدیریت کم آبیاری در خاک های عمیق با بافت متوسط تا سنگین به اجرا درآید تا تنش رطوبتی به طور تدریجی اتفاق افتاده و گیاهان به طرق مختلف از جمله تحمل خشکی، گریز از خشکی و یا تنظیم فشار اسمزی، قادر به مقاومت در برابر خشکی گردند. ضمناً باید هم زمان با به کارگیری کود دامی و کود سبز، گیاه را قادر به تولید محصول بهینه نمود. اعمال مدیریت کم آبیاری در خاک های سبک و کم عمق، به ویژه در صورت فقدان دانش و

بینش کافی، دارای پیچیدگی‌هایی است که احتمال موفقیت آن در شرایط زارعین بسیار اندک است.

۱۳-۴-۴ عملیات زراعی

در سیستم مدیریتی کم آبیاری بایستی توجه شود که مصرف برخی نهاده‌ها مثل بذر (تراکم گیاهی)، کود، سموم شیمیایی و آفت‌کش‌ها، تعدیل یابد (یعنی کاهش داشته باشد). به کارگیری تناوب زراعی و مدیریت حفظ رطوبت نیز مورد توجه است. زودرس بودن ارقام و توجه جدی به الگوی کشت، علاوه بر توجه به تک تک محصولات، بسیار اساسی است زیرا آنچه که تخصیص آب را ترسیم و تعیین می‌کند الگوی کشت است نه محصول به طور انفرادی. اصلاح زمان کاشت نیز از مواردی است که در بهینه‌سازی مصرف آب نقش دارد. افزایش تولید محصول و بهبود بهره‌وری آب تنها از طریق آب آبیاری صورت نمی‌گیرد، بلکه تلفیق مدیریت‌های زراعی و بهینه‌سازی دیگر نهاده‌ها از جمله نیتروژن، به طور مؤثر در حصول اهداف آبیاری بهینه نقش دارند (Pala and Studer, 1999). عملیات زراعی دیگری که با اعمال کم آبیاری دچار تغییر می‌شوند عبارتند از: کاهش دوره رشد از طریق ارقامی که دوره رشد کوتاه دارند، استفاده از تناوب زراعی بهینه به منظور افزایش بهره‌وری آب و تغییر و بهینه‌سازی زمان کاشت برای استفاده بهتر و مفیدتر از نهاده‌ها و شرایط اقلیمی.

۱۳-۴-۵ برنامه‌ریزی آبیاری

برنامه‌ریزی کم آبیاری در مقایسه با آبیاری کامل نیاز به دقت و توجه بیشتری دارد زیرا مدیر آبیاری باید علاوه بر مشخص کردن مقدار آب ذخیره شده در منطقه ریشه در هر تناوب آبیاری، میزان تنش وارد شده به گیاهان در مراحل مختلف رشد و اثر آن بر عملکرد محصولات زراعی را نیز در نظر داشته باشد. کم آبیاری بر اساس تقویم آبیاری یا میزان آب قابل دسترس برنامه‌ریزی می‌شود (به فصل ۸

رجوع شود). برای برنامه‌ریزی زمان و میزان آب آبیاری مورد نیاز گیاهان زراعی، شاخص‌هایی مبتنی بر رطوبت خاک، پتانسیل آب خاک، پتانسیل آب برگ و دمای آسمانه گیاهی (کانوپی) به کار می‌رود. اگر چه طبق نظر انگلیش و همکاران (English et al., 1990) مطلوب‌ترین شاخص (نمیه) برای تنظیم تقویم آبیاری نمیه‌ای است که ضمن در نظر گرفتن حداکثر تخلیه مجاز و میزان تنش اعمال شده قادر باشد تحت تنش مشخص میزان محصول را پیش‌بینی نماید. اما به نظر می‌رسد که نمی‌توان هم حداکثر تخلیه مجاز را منظور کرد و هم انتظار بروز تنش رطوبتی را داشت. در واقع یکی از فواید کم آبیاری اصلاح و بهینه‌سازی اجزای مؤثر در برآورد میزان آب آبیاری (عمق توسعه ریشه و تخلیه مجاز) است و پیش‌بینی محصول تحت شرایط کم آبیاری برای برنامه‌ریزی آن بسیار اهمیت دارد. نتایج دقیق زمانی حاصل می‌شود که در شرایط تحقیقاتی شاخص‌های فوق به صورت تلفیقی به کار گرفته شوند.

اگر چه پتانسیل آب برگ ارتباط نزدیک‌تری با تنش رطوبتی گیاهان دارد اما به خاطر سهولت اندازه‌گیری در بیشتر موارد رطوبت خاک به کار گرفته می‌شود. یکی از معایب مربوط به اندازه‌گیری رطوبت خاک و مبنا قرار گرفتن آن به غیر یکنواختی و ناهمگونی خاک در قسمت‌ها و عمق‌های مختلف است. لذا توصیه می‌شود که سیستم‌های اندازه‌گیری رطوبت خاک، ضمن نصب دقیق در مکان‌هایی استقرار یابند که نماینده و بیانگر کل مزرعه باشند.

حداکثر میزان تنشی که محصولات زراعی بدون کاهش قابل توجه عملکرد یا حداقل کاهش قابل توجه می‌توانند تحمل کنند، از عوامل بسیار مهم در برنامه‌ریزی کم آبیاری محسوب می‌شود. جکسون و همکاران (Jackson et al., 1980) برای نشان دادن تنش رطوبتی استفاده از تبخیر - تعرق نسبی (Relative evapotranspiration, ET) را پیشنهاد کرده‌اند که به صورت نسبت تبخیر - تعرق واقعی به تبخیر - تعرق بالقوه تعریف می‌شود. میزان رطوبتی که در

منطقه ریشه ذخیره می‌شود به طور گسترده‌ای برای پی بردن به میزان آب قابل دسترس خاک (Available water, AW) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$P_a = \frac{(W_t - \theta_l R_z) \times 100}{(\theta_f - \theta_l) R_z} \quad (1-13)$$

که در آن:

P_a = درصد آب ذخیره شده در منطقه ریشه

R_z = عمق فعال منطقه ریشه (میلی‌متر)

W_t = کل آب موجود در خاک (میلی‌متر)

θ_l = میزان آب خارج شده از خاک (میلی‌متر بر میلی‌متر)

θ_f = حد بالایی آب خارج شدنی (میلی‌متر بر میلی‌متر)

با اینکه معادله (۱-۱۳) ساده است اما تعیین دقیق آن در عمل مشکل است. غیر یکنواختی خاک و تغییرات ظرفیت انباشت رطوبتی در نقاط مختلف مزرعه باعث بروز خطا می‌شود. تعیین دقیق حد بالایی آب خارج شدنی، میزان آب خروجی و محدوده رشد ریشه در عمل و در مزرعه مشکل است (Skaggs et al., 1980) و ممکن است منجر به برنامه‌ریزی نادرست گردد. لذا بهتر است کرت‌های تحقیقاتی در اندازه‌های قابل کنترل تعبیه شوند و برخی فرضیات را پذیرفت. ضمن اینکه در کم آبیاری گیاهان قادرند آب بیشتری را از اعماق جذب نمایند. به عنوان نمونه هر چند فعال‌ترین عمق ریشه دوانی گندم ۶۰ تا ۸۰ سانتی‌متر منظور می‌شود اما در کم آبیاری، گندم می‌تواند آب بیشتری را از منتهی‌الیه تحتانی آب قابل دسترس استخراج نمایند. انگلیش و همکاران (English et al., 1990) طی تحقیقی در دشت کلمبیا نشان دادند که با اعمال کم آبیاری میزان آب استخراج شده از ۱۶ میلی‌متر در آبیاری کامل به ۱۰۰ میلی‌متر بالغ گردید.

از نمایه‌های مرتبط با گیاه می‌توان به شاخص تنش رطوبتی گیاه (Crop water stress index = CWSI) و شاخص تنش روزانه (Stress day index = SDI) اشاره کرد. شاخص تنش رطوبتی گیاه که توسط

جکسون و همکاران (Jackson et al., 1980) ارائه شده، تابعی از تبخیر و تعرق واقعی و بالقوه است و اختلاف دمای گیاه و هوا را توسط توابع تولید به مقدار عملکرد قابل انتظار ارتباط می‌دهد. شاخص تنش روزانه یک مدل تجربی بین عملکرد و زمان اعمال تنش رطوبتی است و نسبت به تغییرات آب گیاه کاملاً حساس است (Hiler and Clark, 1971) و از داده‌های تجربی محاسبه می‌شود. شاخص تنش روزانه در حقیقت جمع جبری روزهایی است که گیاه تحت تنش رطوبتی قرار دارد.

برای بهبود کارایی مصرف آب و بهینه‌سازی کم آبیاری بهتر است در برنامه‌ریزی آبیاری احتمال وقوع بارش‌های مؤثر مد نظر قرار گیرد و شبکه آبیاری بر اساس کاهش کفایت آبیاری طراحی، اجرا، بهره‌برداری و مدیریت شود.

۱۳-۴-۶ حد بهینه کم آبیاری

یکی از جلوه‌های اصلی و کاربردی کم آبیاری، پاسخ به این پرسش است که «حد بهینه کم آبیاری برای محصولات مختلف چقدر است؟» همان‌طور که در متن پرسش ملحوظ شده، حد بهینه کم آبیاری در نگاه اول، کاملاً در ارتباط با نوع محصول است. برخی از محصولات بسیار حساس به کمبود آب (مانند لوبیا) ممکن است کلاً از شمول کم آبیاری حذف گردند و برنامه آبیاری کامل (طرح) برای آنها منظور شود. برخی از محصولات ممکن است در بخشی از مراحل رشد تحت مدیریت قطع آبیاری، کسر آبیاری و یا تنش رطوبتی واقع شوند و برخی دیگر از محصولات نیز از ابتدای فصل رشد تحت مدیریت کم آبیاری واقع شوند و محصول ضمن سازگاری و تطابق با چنین مدیریتی، عملکرد قابل قبول و مطمئنی را نیز تولید خواهد کرد.

از بعد افزایش سطح زیرکشت نیز در شرایطی که محدودیت اراضی وجود نداشته باشد یا در واقع فراوانی نسبی اراضی وجود دارد، می‌توان با ملاحظه مسائل حقوقی و در نظر گرفتن بازده کاربرد آب مزرعه، نسبت به افزایش سطح زیر کشت اقدام کرد. در مالکیت‌های بزرگ و یکپارچه و طرح‌های توسعه منابع آب، این افزایش به سهولت صورت می‌پذیرد.

فصل ۱۴

مسائل تحقیقاتی کم آبیاری

۱۴-۱ مقدمه

عوامل مؤثر در تحقیقات شامل نیروی انسانی، شیوه‌های تحقیق، خلاقیت‌های ذهنی، سازه‌های آموزشی و راهکارهای ترویجی می‌باشند که برای جمع‌بندی هدفمند این عوامل نیاز به یک ساختار پژوهشی منسجم، آگاهانه و پویا است. یکی از مشکلات موجود، منفک بودن اولویت‌ها و برنامه‌های پژوهشی از مجموعه آموزشی و ترویج است. روند انتقال نتایج پژوهش‌ها، به دلیل وجود چرخه غیر مستمر و کم آموزشی (از بالا دست و پایین دست) معمولاً کارآیی لازم را نداشته و گاهی به آزمون سعی و خطا شباهت بیشتری دارد تا راهکاری اساسی، جذاب و انگیزشی. لذا ضمن اینکه بایستی در ارتقای تمام عوامل مؤثر ناشی از آموزش به جد و تلاش فراوان کوشید، باید ارتباط منطقی، معنی‌دار و پویا بین مجموعه آموزش و ترویج به وجود آورد و در واقع نوعی ادغام صورت داد تا ضمن پاسخگو بودن به نیازها، راهبردهای نوین و کلان را نیز در برگیرد.

سیستم آموزشی بایستی به نحوی باشد که در سطح عالی به آموزش محققین پرداخته و در سطح خرد به زبان زارعین و مبتنی بر اصول علمی به اشاعه علوم و فنون جدید بپردازد.

آنچه که سبب می‌شود تا انسان به فکر تحول، پیشرفت و ایجاد تشکیلات جدید باشد، نیاز بشر و عدم پاسخگو بودن و کفایت لوازم، امکانات و تشکیلات موجود است. سیر تحول و تکامل تاریخ نیز چنین اصلی را نشان می‌دهد. اختراعات و اکتشافات صنعتی، پزشکی، اداری، آموزشی و غیره همه بر اساس نیاز انسان شکل

براساس «جامعه آماری مستندات تحقیقاتی» کاهش تا ۳۰ درصد آب مصرفی گندم و جو، کاهش تا ۲۰ درصد آب مصرفی چغندر قند، کاهش تا ۳۰ درصد آب مصرفی یونجه، کاهش تا ۲۰ درصد آب مصرفی پنبه و کاهش تا ۲۵ درصد آب مصرفی ذرت پیشنهاد و توصیه می‌شود و یا از نگاهی دیگر، به استثنای برخی از محصولات حساس به کمبود آب، کاهش ۲۰-۳۰ درصد آب مصرفی اکثر محصولات کشاورزی، بدون بروز هیچ‌گونه مشکلی، قابل توصیه و کاربرد است.

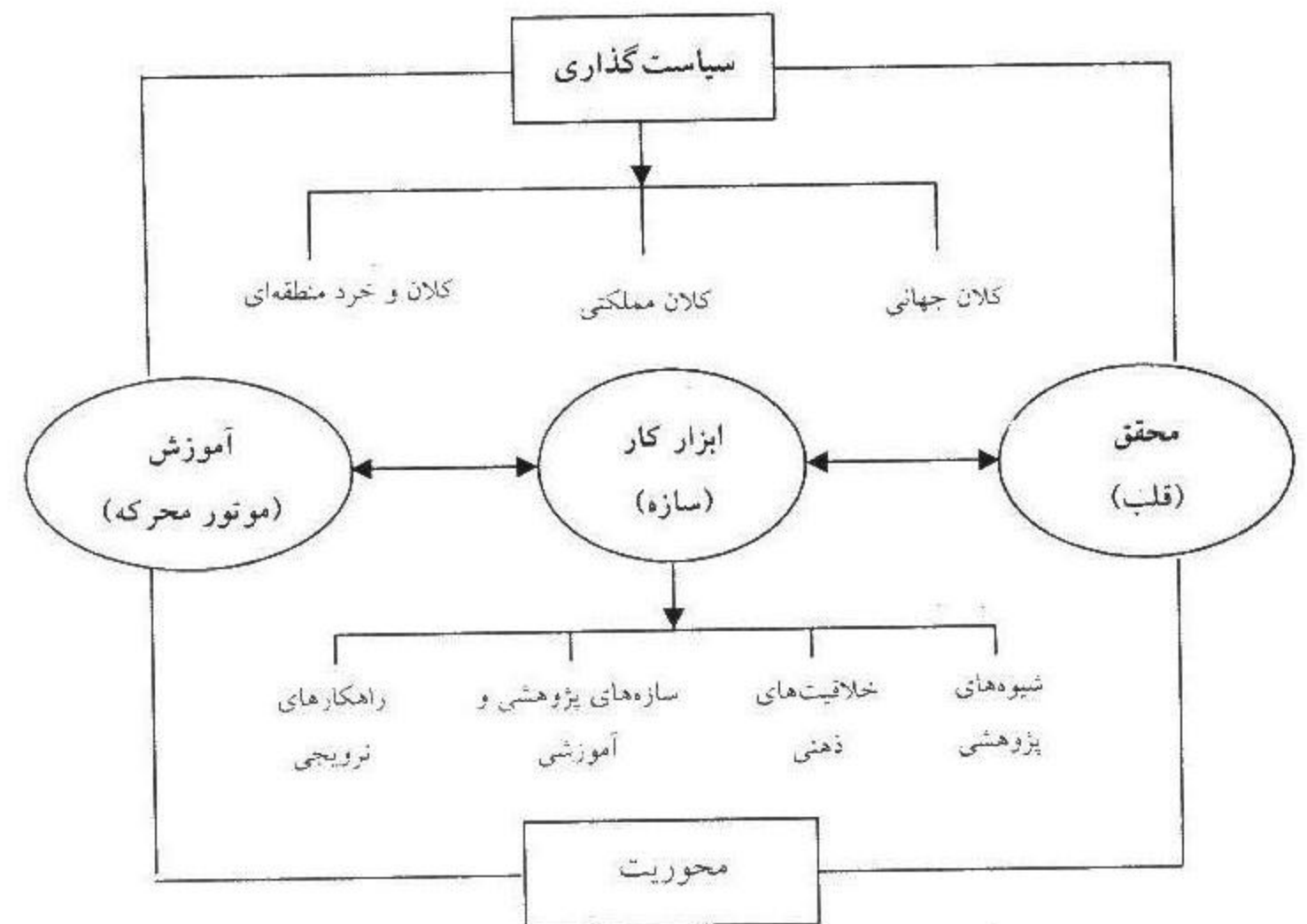
۱۳-۴-۷ توجه جدی

اگرچه اصلاح سیستم‌های آبیاری و به کارگیری سیستم‌های نوین آبیاری در کاهش تلفات آب مصرفی و یکنواختی توزیع آب مؤثر هستند، اما بایستی توجه کرد که مدیریت سیستم‌هایی که بر اساس کم آبیاری طراحی و اجرا شده‌اند هم نیاز به دانش و بینش بیشتری دارد و هم حساس‌تر و مهم‌تر از سیستم‌های آبیاری کامل است. اگرچه تحقیقات گسترده کم آبیاری، سبب دستیابی به یک دستورالعمل فنی و جامع به عنوان سند ملی در مورد حد بهینه آب مصرفی محصولات مختلف در کشور و در نتیجه دستیابی به نقشه هم‌عمق بهینه می‌شود و در درون خود مزیت‌های نسبی فراوانی را به دنبال دارد، اما از ریسک و خطرپذیری سیستم‌های تحت مدیریت کم آبیاری و توجه بیشتر در بهره‌برداری و ارزیابی آنها هرگز نباید غفلت ورزید.

گرفته است. قوانین و تشکیلات یا توانستند خود مبنای تفکر و تحول جدید باشند یا اینکه به انقراض کشانیده شده و به فراموشی سپرده شدند. لذا راهبردهایی که پیرامون تشکیلات جدید شکل گرفته و افرادی که متولی امر بوده‌اند، در توفیق، رکود یا شکست آن سهمیم بوده‌اند.

۱۴-۲ اجزا و ابعاد ساختار پژوهشی

سه شاخص اصلی یک ساختار پژوهشی - آموزشی و ابعاد آن در شکل (۱۴-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱۴-۱ شاخص‌های اصلی یک ساختار پژوهشی - آموزشی

الف) جزء اول: آموزش به عنوان موتور محرکه ساختار آموزشی و پژوهشی پویایی و جامعیت پژوهش، سطح دانش و بینش پژوهشگران و اینکه پژوهشگران ضمن پژوهش، خود آموزگار و معلم خوبی نیز باشند، از عوامل اصلی پیشرفت، ترقی و نوآوری در بخش‌های دیگر است. اگر این شرایط مهیا شود و مدیری آگاه، مدبر، محقق و سالم که شایستگی و توانایی ایجاد محیطی پر شور و نشاط و سالم را داشته باشد، بر پژوهش نظارت و مدیریت داشته باشد، می‌تواند علیرغم سطح متفاوت اطلاعات و دانش در کشور و وجود شرایط متفاوت و گاه متناقض، محققین را حول اهداف عالی هسته پژوهشی و زارعین را حول محور نتایج پژوهشی گرد آورد. در آن صورت است که برآیند نیروها، به سوی پیشرفت، ترقی، رو به تکامل و رشد خواهد بود و زارعین به همراه محققین مهیا کننده صفر پژوهش (احساس نیاز به پژوهش) خواهند شد.

ب) جزء دوم: ابزار کار (سازه)

از مهم‌ترین ضروریات اساسی برای یک محقق بعد از فراهم شدن محیطی آرام و بدون دغدغه، ابزار کار در چارچوب سیاست‌گذاری‌ها است. هر قدر از ابزار کار گسترده‌تر و فهمیده‌تر استفاده شود، بازده کمی و کیفی پژوهش افزایش خواهد یافت. ابزار کار شامل سازه‌های آموزشی، شیوه‌های پژوهشی، خلاقیت‌های ذهنی پویا و علاقمند و راهکارهای ترویجی است. خلاقیت‌های ذهنی شامل دانش و بینش محقق و ذهن تشنه و علاقمند زارع می‌باشد. مهیا نشدن هر کدام از این عوامل یا قصور در آنها، نتیجه مطلوب را به دنبال نخواهد داشت. سرعت فناوری در جهان به نحوی است که مجهز نشدن به ابزار نو، سبب به کارگیری برخی شیوه‌های کهنه و غلط در هر سه سیستم آموزشی، پژوهشی و ترویج خواهد شد. لذا بدیع سازی و به‌هنگام سازی برای هر سه جزء ضرورت دارد. در غیر این صورت، علاوه بر اتلاف سرمایه‌های فکری و انرژی، مشمول گذر زمان نیز می‌شود و این کار یعنی عقب افتادن لحظه‌ای و مستمر از قافله تمدن جهانی.

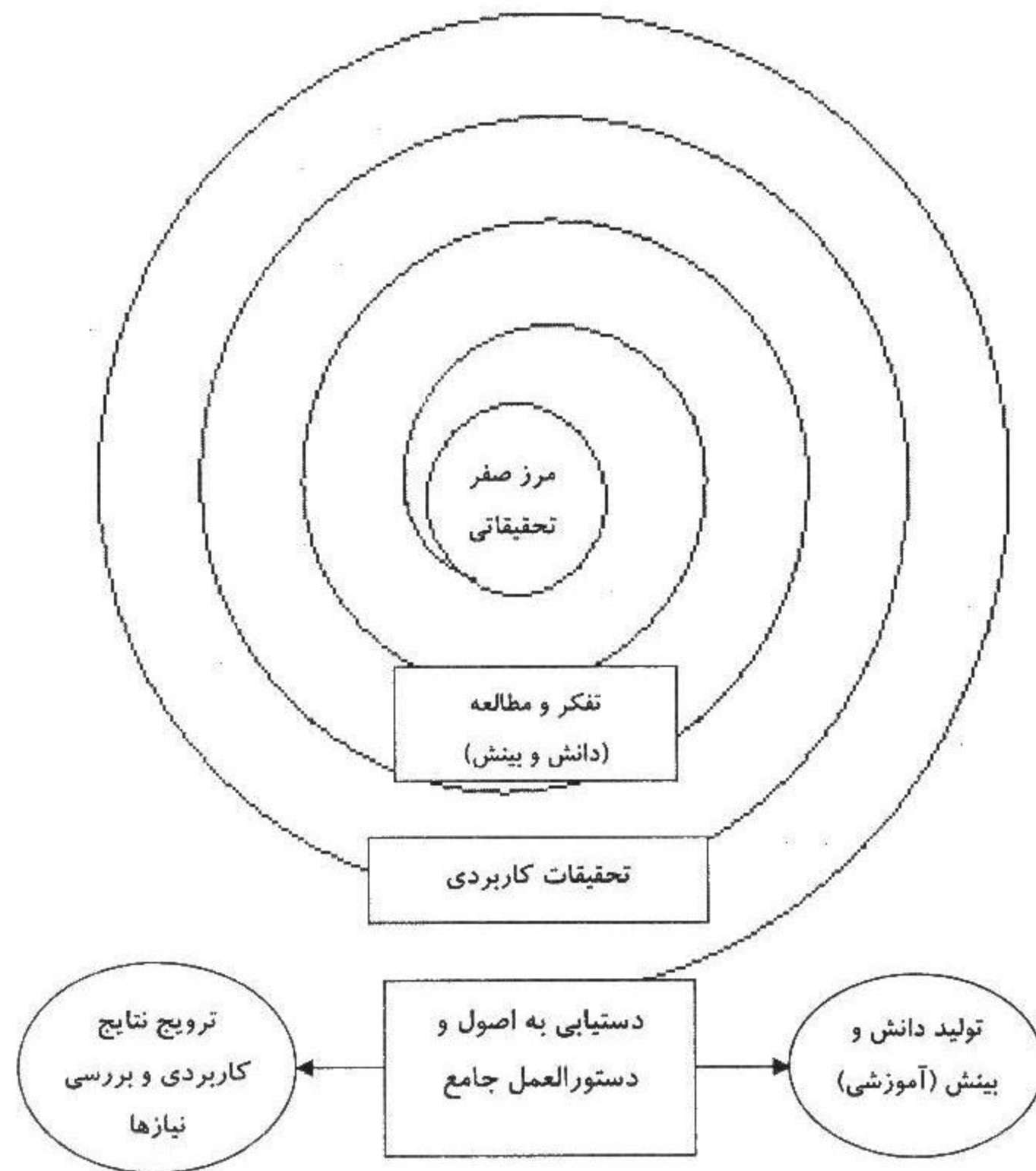
ج) جزء سوم: محقق (قلب ساختار پژوهشی)

پژوهش و بدیع سازی بدون تبیین جایگاه محقق، مفهوم و معنی پیدا نمی‌کند. لذا به نظر می‌رسد که بایستی محور اصلی، محقق باشد. یعنی در واقع تفکر «محقق محوری» حاکم باشد نه «عنوان محوری». بدین مفهوم که در چارچوب سیاست‌ها، قوانین و اولویت‌های آموزشی و ترویجی و برنامه‌های آموزشی، آموزش و ابزار کار در خدمت محقق و محقق در خدمت پرورش، تحلیل، بررسی و آموزش صحیح باشد. ضمن اینکه نبایستی از جایگاه والا و حساس زارعین در این چرخه ترکیبی غافل ماند.

۱۴-۳ تئوری صفر پژوهش

اولین تپش‌های احساس نیاز و نبض خواستن در تئوری صفر پدیدار می‌شود. از همین احساس ظریف و پویا بوده که انسان پا به اعصار حجر، آتش، ماشین و رایانه گذاشته و تمدن خویش را تکامل بخشیده یا به اضمحلال کشانیده است. استمرار جریان صفر پژوهشی (تحقیقات)، تفکر و مطالعه (مبتنی بر دانش موجود)، بررسی موضوعات، بررسی شیوه‌ها، اجرای شیوه‌ها، تحلیل، ادغام و مقیاسی کردن نتایج، نهایتاً منجر به دستیابی به اصول و تدوین دستورالعمل‌های جامع می‌شود که یا به عنوان تولید دانش و بینش، مبانی آموزشی را تشکیل خواهد داد و یا به عنوان نتایج کاربردی برای برخی نیازهای آموزشی و ترویج اشاعه می‌یابد. این روند در شکل (۱۴-۲) نشان داده شده است.

هدایت جریان فوق و رسیدن به مرز صفر پژوهش، آغاز یک تحول نو است که کم آبیاری به عنوان یک فن کاربردی و بنیادی، مراحل فوق را هنوز طی نکرده است و این کتاب به بررسی راهکارهایی برای حصول نتایج جریان فوق می‌پردازد.



شکل ۱۴-۲ استمرار جریان صفر پژوهش

۱۴-۴ برنامه پژوهش‌های آب

بهینه‌سازی مصرف آب و تعیین حد بهینه آن مستلزم انجام تحقیقات مزرعه‌ای و منطبق بر عرف و شکل استفاده از آب در هر منطقه است. گام نخست برای دستیابی

به چنین هدفی جمع آوری و تحلیل مطالعات و تحقیقات پراکنده‌ای است که در چارچوب اهداف کم آبیاری و حتی با مفاهیمی دیگر انجام شده است. همسو با پرداختن به گردآوری نتایج پراکنده، برای تدوین دستورالعمل‌های جامع پیرامون کم آبیاری، تحقیقات مزرعه‌ای انجام می‌شود. با توجه به شرایط و ویژگی‌های اقلیمی کشور و فراوانی نسبی اراضی نسبت به آب و نیز کم بودن کارایی مصرف آب در تولید محصولات کشاورزی، دو برنامه پژوهشی منطبق بر شیوه مدیریت توزیع آب (شبکه و حقابه) منظور می‌شود. برای شرایط حقابه (سنتی) یک وضعیت «کسر آب آبیاری مرسوم از ابتدا تا انتهای فصل آبیاری» و برای شرایط شبکه (مدرن) نیز دو وضعیت «کسر آب آبیاری از ابتدا تا انتهای فصل آبیاری» و «کسر آب مصرفی از ابتدا تا انتهای فصل آبیاری به استثنای مراحل حساس رشد که مقدار آب مصرفی در مراحل حساس رشد برابر آبیاری کامل یا ۱۰۰٪ است» در نظر گرفته می‌شود. تیمارهای تحقیقاتی شامل سه برنامه مدیریتی فوق‌الذکر، سطوح مختلف آبیاری (مقدار و زمان) و مقادیر مختلف نیتروژن است که در نقاط مختلف کشور و بسته به محصولات غالب هر منطقه روی ارقام مختلف محصولاتی مانند چغندر قند، ذرت، یونجه، پنبه، کلزا، گندم و جو به اجرا در می‌آید. طرح‌های آماری بر پایه بلوک‌های کامل تصادفی و به صورت اسپلیت پلات (کرت‌های خرد شده) و یا هر قالب صحیح آماری دیگر خواهد بود. طبیعی است که موضوعات تحقیقاتی دیگر مثل رقم، تاریخ کاشت و دیگر مدیریت‌های زراعی نیز در برنامه‌های بلند مدت تحقیقاتی کشور منظور خواهد شد.

پس از انجام تحقیق، ضمن تعیین توابع تولید و هزینه، حد بهینه آب مصرفی محصولات مختلف در شرایط شبکه و حقابه تعیین می‌شود. مقایسه میانگین عملکردها و اجزای زراعی با استفاده از آزمون‌های مناسب آماری (مانند آزمون دانکن) انجام و پس از پایان تحقیق و تجزیه مرکب روی نتایج سال‌های آزمایشی (توصیه ۲-۴ سال) انجام خواهد شد و مناسب‌ترین تیمار و برنامه مدیریتی کم آبیاری از نقطه نظر زراعی، آماری و اقتصادی تعیین و توصیه خواهد شد.

۱۴-۵ اهداف

اهداف اساسی چنین پروژه‌ای که منطبق بر بهبود کارایی مصرف آب (WUE)، افزایش بهره‌وری آب (WP) و بهینه‌سازی عمق آب آبیاری است، شامل موارد زیر می‌شود:

- ♦ بهبود امنیت غذایی (Enhancing food security)
- ♦ افزایش و پایداری درآمد زارعین
- ♦ انتخاب و توصیه مدیریت مناسب آبیاری در شرایط حقابه و شبکه
- ♦ تعیین حد بهینه آب مصرفی محصولات مختلف در هر منطقه
- ♦ بررسی اثرات کم آبیاری بر اجزای عملکرد محصولات مختلف
- ♦ بررسی و بهبود جنبه‌های کیفی و غنی‌سازی محصولات
- ♦ تعیین حد بهینه نیتروژن با تکیه بر سیاست‌های کاهش کود و سموم شیمیایی
- ♦ تعیین توابع تولید، هزینه و درآمد و تحلیل اقتصادی پروژه
- ♦ تعیین شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی بر اساس توابع تولید و هزینه
- ♦ تحلیل زراعی - آماری و اقتصادی مدیریت‌های مختلف کم آبیاری
- ♦ بررسی و افزایش میزان تولید به ازای واحد آب مصرفی (شاخص‌های WUE و WP) در مزرعه
- ♦ مدل‌سازی (Modeling) نتایج تحقیقات برای تعمیم آن در سطوح ملی و بین‌المللی
- ♦ تهیه برنامه بهینه آبیاری الگوی کشت با توجه به حد بهینه تک‌آبیاری هر کدام از محصولات در الگوی کشت
- ♦ بررسی و افزایش بهره‌وری از آب از مرحله استحصال تا مصرف در سیستم‌های مختلف آبیاری
- ♦ بررسی تأثیر کم آبیاری بر بخش استحصال آب و بهینه‌سازی حجم منبع تأمین آب
- ♦ بررسی تأثیر کم آبیاری بر بخش انتقال آب و بهینه‌سازی حجم سازه‌ای انتقال آب

- ♦ مبنایابی، شیوه‌سازی و مدل‌سازی برای بسیاری از تحقیقات از جمله تعیین مراحل حساس رشد محصولات مختلف در شرایط ایران (و یا حداقل تدقیق و تناسب این مراحل بر اساس جداولی که در منابع وجود دارد)، تعیین عمق توسعه رشد ریشه گیاهان و اصلاحات لازم، تعیین و ارزیابی شاخص‌های حرارتی، گیاهی و محیطی برای برنامه‌ریزی آبیاری
- ♦ بررسی ضرایب همبستگی صفات (Correlation coefficient) و تجزیه علیت (Path analysis) در تحلیل نتایج زراعی تحقیقات کم آبیاری
- ♦ تلفیق نگرش خرد و کلان به کم آبیاری برای برنامه‌ریزی در سطح مزرعه و بخش منابع آب

۱۴-۶ اهمیت و ضرورت اجرای پروژه‌های کم آبیاری

بهینه‌سازی عمق آب مصرفی محصولات در هر منطقه مستلزم وجود اطلاعات مزرعه‌ای مانند عملکرد محصول، سطوح مختلف آبیاری و مدیریت‌های آبیاری است. اصولاً، همواره این گونه نیست که افت عملکرد دقیقاً متناظر با کاهش آب مصرفی باشد. بدین مفهوم که ۱۰ درصد کاهش در مصرف آب به میزان ۱۰ درصد افت عملکرد ایجاد کند. بلکه این روند عموماً غیر خطی است و نتایج تحقیقات نشانگر این است که میزان افت عملکرد بسیار کمتر از میزان کاهش آب مصرفی است. از سوی دیگر به کارگیری شیوه‌ای از کم آبیاری که کاربرد آن در سطح زارعین و مناطق امکان‌پذیر باشد، بسیار با اهمیت است. همچنین جهت دادن و تطابق تحقیقات با شرایط حاکم بر منطقه و مدیریت آبیاری (شبکه یا حقابه) در نتیجه‌گیری معقول و بهینه مؤثر است که در این کتاب به این مورد توجه شده است.

یکی دیگر از عوامل مؤثر در زراعت، میزان مصرف نیتروژن است. اصولاً عکس‌العمل محصولات نسبت به نیتروژن بستگی به میزان رطوبت خاک دارد. نیتروژن به تنهایی نمی‌تواند عامل مؤثری به شمار آید. اما تلفیق آبیاری و نیتروژن سبب می‌شود که محصولات تحت شرایط مختلف رطوبتی، عکس‌العمل‌های متفاوتی به نیتروژن نشان دهند که در این مبحث به این روند نیز پرداخته شده است. با توجه

به کمبود اطلاعات پیرامون «آب مصرفی - عملکرد» و نیز وجود مدیریت‌های مختلف کم آبیاری و با هدف دستیابی به یک دستورالعمل جامع، فنی و کاربردی پیرامون عمق بهینه آب مصرفی به عنوان سند ملی و تهیه نقشه هم‌عمق بهینه، اجرای پروژه کم آبیاری در گستره ایران و روی محصولات غالب هر منطقه، ضرورت پیدا می‌کند و نتایج آن با توجه به نگرش کلان و کاربردی بودن، می‌تواند در بهبود کارایی مصرف آب، بهره‌وری آب، افزایش بازده کاربرد آبیاری و افزایش سطح زیر کشت و نهایتاً افزایش تولید، مؤثر و مفید باشد. البته از طریق به کارگیری مدل‌های رایانه‌ای واسنجی شده برای پیش‌بینی رشد گیاه و محصول‌دهی آن نیز می‌توان رابطه بین آب و عملکرد را در مناطق مختلف به دست آورد و از این نتایج در تعیین عمق بهینه آب مصرفی نیز بهره گرفت.

۱۴-۷ سابقه تحقیق

برای مطالعه سابقه تحقیقاتی کم آبیاری به فصل سیزده این کتاب مراجعه شود.

۱۴-۸ اجزا و ابعاد مسئله

برای تبیین نتایج کم آبیاری، تحقیقات در مناطق مختلف و برای کشت‌های غالب هر منطقه به نحوی تدوین می‌گردد که امکان اجرای هم‌زمان آن در سایت‌های کنترل شده تحقیقاتی و مزارع زارعین (On - Farm) برای تسریع در حصول نتایج و انتقال یافته‌های تحقیقاتی وجود داشته باشد. لذا محل اجرا باید الگو و نماینده شرایط حاکم در آن منطقه باشد و دارای ویژگی‌های خاص نباشد. آزمایش‌ها در اراضی آبی شامل ارزیابی پارامترهایی چون مزیت‌های کم آبیاری نسبت به آبیاری کامل، برنامه‌ریزی و تقویم آبیاری، بهبود سیستم‌های آبیاری، کاربرد صحیح آبیاری، الگوی کشت و ارقام جدید محصولات مختلف می‌باشد.

برای فرهنگ‌سازی و تهیه الگو، علاوه بر داده‌ها و یافته‌های تحقیقاتی در ایستگاه‌های تحقیقاتی و مزارع زارعین با تهیه و تکمیل پرسشنامه‌های ویژه، اطلاعاتی

از روش زارعین و فشارها و مشکلاتی که ممکن است با آنها روبرو باشند، گردآوری می‌شود. نتایج به دست آمده در تیم‌های فنی مرکب در تخصص‌های مختلف از جمله مهندسی آبیاری، مجموعه گرایش‌های کشاورزی، زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی (و احتمالاً سیاسی) و حتی مذهبی ارزیابی و تحلیل می‌گردد.

به منظور یافتن بهترین و مناسب‌ترین مدیریت کم آبیاری در مناطق مختلف کشور پروژه کم آبیاری در نقاط مختلف و روی محصولات زراعی غالب و سازگار هر منطقه شامل چغندر قند، ذرت، یونجه، پنبه، کلزا، گندم و جو (که بسته به هر منطقه این محصولات غالب متفاوت است) و نیز محصولات باغی سازگار در قالب طرح آماری مناسب و با سه برنامه مدیریتی کم آبیاری و حداقل چهار سطح مختلف آبیاری و مقادیر مختلف نیتروژن و به مدت ۲-۴ سال زراعی به اجرا گذاشته می‌شود.

قبل از شرح برنامه‌های مدیریتی و تیمارهای مختلف، برخی نکات مهم و ضروری یادآوری می‌شود:

♦ لازم است که انگیزه نگارندگان از گنجاندن این بخش در کتاب بازگو شود. علاوه بر آنچه که از مطالب این بخش به طور مستقیم به دست می‌آید، یکی از مشکلات اساسی کارشناسان درگیر در بخش‌های مختلف (تحقیقات، آموزش، ترویج، اجرا و نظارت) این است که قادر به استفاده از کلیه داده‌های به دست آمده از تحقیقات میدانی یا مزرعه‌ای نیستند و یا ثبت برخی اطلاعات را غیر ضروری دانسته یا در حیطه تخصص‌های دیگر می‌دانند. اما بسیار مهم است که کارشناس آبیاری، و به ویژه محقق، توانایی این را داشته باشد که حاصل تحقیقات خویش را از جنبه‌های مختلف تحلیل نماید. به عنوان نمونه، در یک تحقیق کم آبیاری زمانی ما می‌توانیم رابطه کم آبیاری را با اجزا و صفات زراعی بررسی نماییم که اطلاعات مربوط به آن را داشته باشیم. یا اگر می‌خواهیم از طریق ضرایب همبستگی و تجزیه علیت بفهمیم که تحت شرایط کم آبیاری کدام صفت یا اجزای زراعی بر عملکرد اثر بیشتری داشته، باید داده‌های مزرعه‌ای را در اختیار داشته باشیم (توکلی، ۱۳۸۲ و ۱۳۸۳). هم‌چنان که برای تعیین کارایی

مصرف آب نیاز به اطلاعاتی چون رطوبت خاک در زمان‌ها و مراحل مختلف، مقادیر آب آبیاری، میزان رواناب و تلفات نفوذ عمقی است.

♦ سیستم آبیاری از یکنواختی توزیع و راندمان کاربرد بالایی برخوردار باشد. این شرط بیشتر در روش‌های آبیاری تحت فشار وجود دارد.

♦ برای تحلیل و بررسی خطاهای آزمایشی بایستی شیوه‌ای را برگزید که خطاها در طول اجرای آزمایش در یک جهت باشند نه به صورتی که به علت وجود جهات مختلف خطاها، هم‌دیگر را خنثی یا کم اثر (یا مستتر) نمایند، در حالی که واقعاً خطاهای آزمایشی قابل توجهی وجود داشته است. از جمله موارد مهم می‌توان به شیب و حاصلخیزی زمین، کیفیت آب، ارقام محصول، زمان و نوع مدیریت زراعی، سطح امکانات تحقیقاتی و آزمایشگاهی، سطح مهارت و دانش محققین منطقه‌ای و بومی و نیز شرایط جغرافیایی و اقلیمی اشاره کرد. به عنوان نمونه، در صورت وجود باد، به کارگیری روش‌هایی مانند آبیاری بارانی برای بررسی سطوح مختلف آب مصرفی در دو سوی یک خط لوله، به خاطر تغییر جهت باد در طول اجرای آزمایش، روش مناسب و منطقی به شمار نمی‌رود، مگر اینکه باد عامل محدود کننده نباشد یا تمهیدات خاصی از این نظر منظور شده باشد. بایستی توجه داشت که اگر زارعی در زمین خود چند محصول کشت کرد و با اعمال تنش به یک محصول، آب را در اختیار محصول حساس‌تر یا با ارزش‌تر قرار داد، اگر چه نمادی کامل از کم آبیاری به حساب نمی‌آید، اما در قالب افزایش کارایی مصرف آب (حداکثر استفاده از آب موجود) و اعمال تنش رطوبتی بوده که گاهی بسیار ارزشمند نیز هست. این یک نمونه از مدیریت تخصیص آب به شمار می‌رود و جا دارد که تحقیقات با آزمون عملی و فراگیر، بهترین مدیریت تخصیص آب را با هدف اعمال کم‌ترین تنش به الگوی کشت و حصول بیشترین سود تعیین نماید.

♦ این تحقیق در زمین‌هایی اجرا شود که محدودیت‌هایی خاص از جمله عمق خاک، شوری و قلیائیت، مشکل زهکشی و غیره نداشته باشند.

♦ یکی از ویژگی‌های این پروژه، انعطاف‌پذیری آن است و به دلیل اینکه اصلاح فرهنگ عمومی در بخش آب و آبیاری، مستلزم یکسری پیش زمینه‌ها و ایجاد انگیزه است. لذا از سهل‌ترین و مهم‌ترین روش‌ها این است که برای زارع یا مدیر آبیاری ثابت شود که به کارگیری شیوه پیشنهادی برتر تحقیقاتی، سود بیشتری را عاید خواهد کرد، هرچند که میزان خطرپذیری و ریسک اندکی بیشتر شود.

♦ این پروژه منتج به یک دستورالعمل فنی و جامع در بخش آب می‌شود و با آینده و سرنوشت منابع آب و کشاورزی مرتبط است. لذا اگر به خوبی و با درایت و نظارت فنی مستمر اجرا شود می‌تواند نسخه‌ای مفید و راهبردی سالم در بهبود مسائل آب کشور (در بخش کشاورزی) باشد و اگر دچار ضعف اجرا نظارت و حتی تحلیل نتایج شود، خسارات فراوانی را به همراه خواهد داشت. یادآوری این نکته نیز ضروری است که هم اکنون بیش از ۹۰ درصد منابع آب کشور در بخش کشاورزی مصرف می‌شود.

با توجه به توضیحات فوق، اساس و اجزای مسئله به صورت زیر بیان می‌شود.

۱۴-۹ برنامه‌های پژوهشی مدیریت کم آبیاری

۱۴-۹-۱ شرایط شبکه (مدرن)

شرایط شبکه به وضعیت‌هایی اطلاق می‌شود که تأمین آب تابع سنت حقایق نیست بلکه شبکه‌های انتقال و توزیع آب، این هدف را تأمین می‌کنند. یا تأمین آب از طریق چاه صورت می‌گیرد که حق برداشت مجاز از آن (بر اساس پروانه بهره‌برداری) به دست زارع یا مدیر آبیاری است. به زبانی دیگر، تقویم و زمان‌بندی آبیاری در این شرایط به دست زارع یا مدیر آبیاری است. لذا برنامه‌ریزی کم آبیاری در این شرایط به خاطر وجود فرهنگی مجزا از فرهنگ سنتی (که گاهی بسیار تاریخی و ارزشمند نیز هست) ساده‌تر و کاربردی‌تر است. این بحث در مورد شبکه‌های مدرن آبیاری و استحصال آب از چاه‌ها صدق می‌کند. در شرایط شبکه، آبیاری براساس تخلیه

رطوبتی در تیمار آبیاری کامل صورت گرفته و به نحوی است که زمان‌های آبیاری و مراحل رشد فیزیولوژیک گیاه منطبق با آن ثبت می‌گردد. اجزای این برنامه به صورت زیر است:

✓ کم آبیاری با کسر آب مصرفی از ابتدا تا انتهای فصل آبیاری

✓ کم آبیاری با کسر آب مصرفی از ابتدا تا انتهای فصل آبیاری، به استثنای مراحل حساس رشد که مقدار آب آبیاری تمام تیمارها برابر تیمار آبیاری کامل است.

تیمارهای آبیاری فوق شامل موارد زیر است:

الف) آبیاری کامل

ب) تأمین آب به میزان ۸۵ درصد آبیاری کامل

ح) تأمین آب به میزان ۷۰ درصد آبیاری کامل

د) تأمین آب به میزان ۵۵ درصد آبیاری کامل که بیشتر با روش آبیاری تحت فشار با یکنواختی پخش قابل قبول عملی است.

البته در آبیاری سطحی می‌توان از روش جویچه‌ای یک در میان نیز استفاده کرد.

۱۴-۹-۲ شرایط حقابه (سنتی)

در این وضعیت، آبیاری براساس دور از پیش تعیین شده یا برنامه محلی صورت می‌گیرد. عموماً مدیر آبیاری نقشی در تعیین دور آبیاری ندارد و تابع شرایط تعیین شده محلی می‌باشد. این وضعیت برای اراضی زیر دست رودخانه‌ها، قنات‌ها و شبکه‌های سنتی آبیاری صدق می‌کند. شرایط تحقیق در حالت حقابه (سنتی) شامل یک حالت عمومی می‌باشد:

✓ کم آبیاری با کسر آب مصرفی بر مبنای آبیاری مرسوم در شرایط حقابه و از

ابتدا تا انتهای فصل آبیاری

این حالت برای تحلیل نتایج و تعمیم آن برای کلیه محصولات زراعی مورد تحقیق و تحت سیستم‌های مختلف آبیاری بارانی می‌باشد.

۱۴-۱۰ مقادیر مختلف نیتروژن

یکی از عوامل مؤثر در زراعت، میزان مصرف نیتروژن است. اصولاً عکس العمل محصولات نسبت به نیتروژن بستگی به میزان رطوبت خاک دارد و نیتروژن به تنهایی نمی تواند عامل مؤثری به شمار آید. اما تلفیق آبیاری - نیتروژن سبب می شود که محصولات تحت شرایط مختلف رطوبتی، عکس العمل های متفاوتی نشان دهند که در این شیوه تحقیقاتی به این روند یعنی بهینه سازی مصرف کود و آب، توأماً پرداخته می شود. بر این اساس، سطوح مختلف نیتروژن به صورت زیر تعیین و پیشنهاد می شود:

الف) مصرف نیتروژن به میزان توصیه شده برای آبیاری کامل

ب) مصرف نیتروژن به میزان ۸۰ درصد توصیه شده برای آبیاری کامل

ج) مصرف نیتروژن به میزان ۶۰ درصد توصیه شده برای آبیاری کامل

د) مصرف نیتروژن به اندازه ۱/۲ برابر نیاز آبیاری کامل و یا بیشتر

۱۴-۱۱ محصولات تحت مدیریت کم آبیاری

این پروژه بنیادین، برای محصولاتی به اجرا در می آید که کشت غالب مناطق مورد تحقیق باشند و حساسیت شدید به کمبود آب نداشته باشند (مثل لوبیا که گیاهی حساس به کمبود آب است). لذا چغندر قند، ذرت، یونجه، پنبه، کلزا، گندم و جو محصولاتی هستند که در برنامه تحقیقات کم آبیاری قرار می گیرند و با توجه به شرایط هر منطقه انتخاب می گردند. البته میزان تولید محصول در شرایط اقلیمی مختلف فقط به آبیاری و نیتروژن بستگی ندارد بلکه رقم مورد استفاده در تحقیق نیز بسیار مؤثر است (Aggarwal and Karla, 1994; Anderson, 1985; Guy, et al., 1995). (توکلی، ۱۳۸۴).

۱۴-۱۲ تحلیل آماری

پس از حصول نتایج مزرعه ای در دو سایت تحقیقات در ایستگاه های تحقیقاتی و مزارع زارعین، تحلیل آماری در قالب آزمون مناسب و سطوح آماری مورد قبول صورت می گیرد و گزینه برتر و مطلوب تر انتخاب می شود.

۱۴-۱۳ تحلیل اجتماعی و اقتصادی

بر اساس داده های مربوط به نهاده های مصرفی و از جمله مهم ترین و مؤثرترین آنها یعنی آب و ستاده های مطالعه، برای دو سایت تحقیقات در ایستگاه های تحقیقاتی و مزارع زارعین، تحلیل اجتماعی - اقتصادی صورت می گیرد.

۱۴-۱۴ برگزاری دوره های آموزشی (Training and Workshop)

برنامه ریزی برای اجرای برنامه «روز مزرعه» و «هفته انتقال یافته ها» در سطح منطقه ای و ملی برای زارعین و مروجین، برنامه ریزی برای بازدید دانشجویان و محققین و برگزاری جلسات بحث و گفتگو سبب می شود که اطلاع رسانی شفاف و مستمر صورت پذیرد.

۱۴-۱۵ سیستم آبیاری پیشنهادی

سیستم آبیاری پیشنهادی در این پروژه تحقیقاتی، آبیاری شبه بارانی است و انتقال با لوله پلی اتیلن و استفاده از کنتور حجمی و توزیع با لوله سوراخ دار به اندازه عرض کرت و حرکت تدریجی در طول کرت (متحرک دستی) صورت می گیرد. اما اگر امکانات و لوازم سیستم ها و روش های دیگر آبیاری موجود باشد (و یا در استفاده از یک سیستم محدودیت های خاصی وجود داشت) در این طرح ها می توان با حفظ همان سطوح آبیاری پیش بینی شده (و یا حتی افزایش تعداد این سطوح) از سیستم ها و

روش‌های دیگر آبیاری (بارانی، قطره‌ای، سطحی) استفاده نمود. بدیهی است که در آن صورت برخی از اجزای مواد و روش‌ها شامل ابعاد کرت‌های آزمایشی، سطح زیر کشت و برخی نمونه‌گیری‌ها، تفاوت خواهند کرد. به عنوان نمونه با توجه به ارتفاع ذرت که حتی به بیش از دو متر نیز می‌رسد، سیستم آبیاری مطلوب برای اعمال سطوح مختلف، آبیاری بارانی یا قطره‌ای خواهد بود. توجه به این‌گونه مسائل در اجرای صحیح طرح‌های تحقیقاتی کم آبیاری بسیار مهم است.

اندازه‌گیری دقیق آب مصرفی و شیوه آبیاری بسیار مهم است. بدیهی است هر چقدر بتوان راندمان انتقال، توزیع و مصرف آب را افزایش داد، از بروز اشتباهات احتمالی جلوگیری می‌شود. همان‌طور که بسیاری از محققین در مراکز علمی و تحقیقاتی معتبر جهان در پژوهش‌های بهینه‌سازی آب آبیاری از روش آبیاری قطره‌ای استفاده می‌کنند، لذا در تحقیقات کم آبیاری نیز بایستی میزان دقیق آب (به ویژه از طریق کنتور حجمی) اندازه‌گیری شود و این مسئله هیچ تناقضی در کاربردی کردن نتایج به وجود نمی‌آورد. استفاده از روش‌هایی مثل فلوم، سیفون، دریچه، روزنه و نظیر اینها به دلیل خطاها و اشتباهات احتمالی (انسانی، سازه‌ای) توصیه نمی‌شود.

۱۴-۱۶ بررسی مراحل بحرانی و حساس رشد

یکی از موارد ابهام‌انگیز در مبحث کم آبیاری، وجود مراحل بحرانی و حساس رشد در محصولات زراعی است. مدیر آبیاری نیاز دارد که بداند سطح مجاز کاهش تعرق بدون کاهش معنی‌دار عملکرد محصول چقدر است (Kirda, 2002). لذا در ابتدا بایستی عکس‌العمل عملکرد محصول در برابر تنش آبی بر اساس مراحل رشد یا در طول دوره رشد معلوم شود (Kirda and Kanber, 1999). زیرا در هر حال تنش رطوبتی در هر مرحله از رشد باعث کاهش عملکرد محصول می‌شود (Day and Intalap, 1970; Ehlig and LeMert, 1976). در این خصوص دو ایده مجزا مطرح می‌شود که دارای نقاط ضعف و قوت مربوط به خود می‌باشند که به شرح زیر بیان می‌گردد:

۱۴-۱۶-۱ در نظر گرفتن مراحل بحرانی و حساس رشد در مدیریت کم آبیاری

برترین مزیت این ایده این است که افت عملکرد بسیار ناچیز می‌باشد و مقداری آب نیز صرفه‌جویی می‌شود. این روش در یک الگوی کشت و وجود یک مدیریت برجسته و کارآ می‌تواند مفید باشد. البته معایب و محدودیت‌هایی نیز دارد که از آن جمله می‌توان به عدم شناسایی و تعیین مراحل حساس رشد محصولات زراعی در ایران و یا حداقل تطابق جداول موجود با شرایط ایران، وجود مشکلات فراوان در اجرای چنین مدیریتی که در ارتباط مستقیم با رطوبت خاک است، مسائل مربوط به تعیین رطوبت خاک توسط زارع یا مدیر آبیاری، تعیین مراحل فیزیولوژیک رشد گیاه، برنامه‌ریزی مصرف آب صرفه‌جویی شده در مراحل غیر حساس رشد گیاه و برنامه‌ریزی در شرایط حقابه، اشاره کرد. ضمناً استفاده از جداول پیشنهادی منابع خارجی، به دلیل عدم تطابق و سازگاری با شرایط ایران از یک سو و تناقض یا تفاوت این جداول با یکدیگر، عملاً جواب مطلوبی نمی‌دهد. به عنوان مثال، در شرایط ایران و زراعت جو آبی، حداکثر ۳ تا ۴ مرتبه آبیاری صورت می‌گیرد که حتی کمتر از تعداد مراحل حساس رشد این گیاه طبق جداول راهنما (۴ مرحله) می‌باشد. لذا در صورتی که مقرر باشد طبق این جدول مدیریت کم آبیاری برای جو صورت بگیرد کلاً منتفی خواهد بود. در حالی که نتایج کم آبیاری روی جو خلاف این مسئله را ثابت کرده است. قابل ذکر است که اغلب جداول راهنما برای گیاهان نظیر گندم و جو برای کشت بهاره ارائه شده است نه کشت زمستانه. بنابراین عدم تطابق نتایج قابل انتظار است.

۱۴-۱۶-۲ اعمال کم آبیاری به شیوه کاهش میزان مصرف آب از ابتدا تا انتهای

فصل رشد

در این شیوه، اگر چه افت عملکرد ایجاد شده ناچیز نیست، اما در مقابل افزایش مطمئن سطح زیر کشت و سهولت برنامه‌ریزی در مدیریت مصرف آب توسط زارع یا مدیر آبیاری، از برتری‌های محسوسه برخوردار است.

در شرایط ایران، چون هنوز مقاطع حساس رشد گیاهان در همه مناطق و اقلیم‌ها به طور کامل تعیین نشده و ضمناً استفاده از جداول راهنمای منابع خارجی بدون

تطابق آنها با شرایط ایران منطقی به نظر نمی‌رسد، لذا مدیریت کم آبیاری به صورت کاهش میزان مصرف آب از ابتدا تا انتهای فصل رشد به کار می‌رود که خود سبب می‌شود که اولاً گیاه خود را با چنین وضعیتی سازش دهد. ثانیاً، به خاطر کاهش یکسان آب مصرفی، تلاش گیاه برای جذب آب سبب توسعه ریشه‌ها می‌شود. ثالثاً، چون از ابتدا میزان آب صرفه‌جویی شده مشخص است به سهولت می‌توان برای این حجم آب صرفه‌جویی شده برنامه‌ریزی مطمئنی برای افزایش سطح زیر کشت ارائه نمود.

در مرحله تحقیقاتی برای دستیابی به نتایج چنین مدیریتی، مراحل رشد گیاه با وضعیت رطوبت خاک در اعمال آبیاری تطابق داده می‌شود و مراحل حساس رشد (به دلیل تعیین نشدن آنها) نادیده گرفته می‌شود و به جای اینکه گیاه مدیریت آبیاری را دیکته نماید، شرایط مدیریتی کم آبیاری بر آن اعمال می‌شود.

این نوع مدیریت، پس از حصول حد بهینه عمق آب مصرفی به راحتی توسط زارع یا مدیر آبیاری در سطوح خرد و کلان قابل استفاده و کاربرد است و در صورت در دسترس بودن آب مازاد می‌توان در مراحل حساس رشد آن را به کار گرفت تا افت عملکرد کمتر شود. این وضعیت در یک الگوی کشت قابل اجرا است.

با توجه به استدلال‌های فوق، در شرایط فعلی گزینه دوم به خاطر قابلیت‌هایی که دارد پذیرفته می‌شود. اما در صورت تعیین شدن مراحل حساس رشد گیاهان در شرایط ایران، مطمئناً گزینه اول توصیه خواهد شد و بررسی اثرات کم آبیاری در مراحل حساس رشد بسیار حائز اهمیت می‌باشد. جداول (۱-۱۴) و (۲-۱۴) بیانگر مراحل حساس رشد محصولات مختلف می‌باشند.

زمانی که محصول اصلی از شیره گیاه (مانند شکر یا روغن) و یا از قسمت‌های زایشی و تولید مثل آن (مثل دانه و میوه) به دست می‌آید، مراحل حساس رشد و دوره‌های بحرانی، در مقایسه با گیاهان علوفه‌ای، مشهودتر می‌باشد (به نقل از خیرابی و همکاران، ۱۳۷۵).

گیاهان مقاوم به خشکی که تحت مدیریت کم آبیاری قرار می‌گیرند در مقایسه با گیاهان حساس به کم آبیاری، در مراحل بحرانی از خود حساسیت کمتری نشان

می‌دهند. از نظر حساسیت به خشکی، دوران رویشی شامل سه دوره مختلف می‌باشد که هر یک از این دوره‌ها حدود یک سوم طول دوران رویشی را در بر می‌گیرد. این دوره‌ها عبارتند از:

جدول ۱-۱۴ مراحل بحرانی و حساس رشد نباتات زراعی

(Salter and Goode, 1967)

گندم: ساقه رفتن (رشد طولی میان گره‌ها)، ظهور سنبله (خارج شدن سنبله از غلاف)

ذرت: گل‌دهی، ابتدای شکل‌گیری دانه

جو: ساقه رفتن، ظهور سنبله

بولاف: خوشه رفتن، گل‌دهی

چاودار: گل‌دهی، ابتدای شکل‌گیری دانه

سورگوم: تشکیل غلاف خوشه (انتهای مرحله ساقه رفتن، درست قبل از خارج شدن خوشه)، خوشه رفتن

برنج: خوشه رفتن، گل‌دهی

مجموعه غلات: به نظر می‌رسد که مهم‌ترین اثر کمبود آب در مراحل بحرانی که اساساً بر تعداد دانه‌ها تأثیر می‌گذارد و همچنین تا حدودی بر اجرای عملکرد مانند تعداد پنجه و وزن دانه‌ها نیز تأثیر خواهد گذاشت.

انواع نخود: گل‌دهی، پر شدن غلاف

سویا و انواع لوبیا: گل‌دهی، تشکیل غلاف

بادام زمینی: گل‌دهی، رشد و توسعه دانه

مجموعه حبوبات یک‌ساله: نتایج متفاوتی گزارش شده است. اما عموماً حاکی از این است که گل‌دهی و رشد و توسعه غلاف، مهم‌ترین مراحل حساس رشد هستند.

گوجه فرنگی، فلفل و خیار: از ابتدای مرحله‌ای که میوه‌ها تشکیل می‌شوند.

مجموعه گیاهان میوه‌ای یک‌ساله: اساساً، تمام گیاهان میوه‌ای یک‌ساله در شروع رشد و توسعه اولین میوه‌ها به کمبود آب حساس هستند.

پنبه: گل‌دهی، رشد و توسعه غوزه‌ها

کتان: مرحله رشد رویشی (برای تولید فیبر)، گل‌دهی (برای تولید دانه)

گلرنگ: مرحله روزت، پر شدن دانه

آفتابگردان: ظهور طبق، پر شدن دانه

مجموعه گیاهان دانه‌ای و فیبری: اساساً مشابه غلات هستند. این گیاهان نشان داده‌اند که مراحل حساس رشد در آنها، نزدیک به مرحله گل‌دهی بیشتر می‌شود.

چغندر قند: مرحله حساس رشد ندارد (تولید ریشه یا غده)، مرحله گل‌دهی (تولید بذر)

هویج: مرحله حساس رشد ندارد.

شلغم: مرحله رشد گیاهچه‌ای (تولید برگ و ریشه)، قبل از برداشت (تولید ریشه)

کلم: شکل‌گیری قسمت خوراکی

گل کلم، کلم بروکلی: تمام مراحل (تولید دلمه)

مجموعه گیاهان دو ساله: اساساً، مراحل حساس رشد گیاهان دو ساله نزدیک به زمانی است که اندام‌های ذخیره‌ای شروع به رشد می‌کنند.

سیب‌زمینی: ابتدای مرحله تشکیل غده، در طول مرحله بلوغ

پیاز: گل‌دهی (تولید بذر)

جدول ۱۴-۲ مراحل بحرانی و حساس رشد نباتات زراعی

(Doorenbos and Pruitt, 1977)

یونجه: دو مرحله، شامل بعد از برداشت (چین) برای یونجه علوفه‌ای و شروع گل‌دهی برای یونجه بذری

جو: چهار مرحله و به ترتیب حساسیت شامل به ساقه رفتن، خمیری شدن دانه، پنجه زدن و مرحله سفت شدن دانه

لوبیا: سه مرحله و به ترتیب شامل زمان گل‌دهی، تشکیل غلاف و قبل از رسیدن (در صورتی که قبل از مرحله رسیدن تنش آبی اعمال نشود، این مرحله حساس‌تر است)

کلم بروکلی: شامل مرحله شکل گرفتن کلم و رشد آن

کلم پیچ: مرحله تشکیل گل کلم و رشد آن

کرچک: در دوره رشد کامل به رطوبت نسبتاً بالایی نیاز دارد.

گل کلم: در تمام دوران رشد از کاشت تا برداشت به تعداد آبیاری زیادی نیاز دارد.

گیلاس: مرحله رشد سریع میوه تا مرحله بلوغ میوه

مرکبات: مراحل گل‌دهی و تشکیل میوه

پنبه: چهار مرحله به ترتیب شامل گل‌دهی، رشد بذر، رشد اولیه و بعد از تشکیل غوزه

بادام زمینی: به ترتیب حساسیت شامل مراحل گل‌دهی، رشد بذر، در فاصله بین جوانه‌زنی و ادامه گل‌دهی و انتهای فصل رشد

کاهو: احتیاج به خاک مرطوب به ویژه در مرحله قبل از برداشت دارد.

ذرت: چهار مرحله شامل گرده افشانی، کاکل دهی تا دانه دهی، قبل از کاکل‌دهی، پر شدن دانه‌ها.

در صورتی که قبل از مرحله گرده افشانی تنش آبی اعمال نشود، این مرحله بسیار بحرانی است.

یولاف: ظهور سنبله تا خوشه‌دهی

زیتون: قبل از گل‌دهی، مرحله رشد میوه

نخود: شامل مراحل شروع گل‌دهی و زمانی که غلاف‌ها متورم می‌شوند

هلو: شامل مرحله رشد سریع میوه تا بلوغ

سیب‌زمینی: دو مرحله شامل بعد از تشکیل غده‌ها که نیاز به رطوبت زیاد خاک دارد و مرحله گل‌دهی تا برداشت

تریچه: مرحله رشد ریشه

آفتابگردان: مراحل محتمل شامل گل‌دهی و رشد دانه‌ها

غلات دانه ریز: مرحله ساقه دهی تا خوشه رفتن

سورگوم: شش مرحله شامل ریشه دهی ثانویه، ساقه دهی، تشکیل سنبله، گل‌دهی، شکل گرفتن دانه، پر شدن دانه

سویا: شامل مراحل گل‌دهی، میوه دهی، احتمالاً مرحله حداکثر رشد رویشی

توت‌فرنگی: مرحله رشد میوه تا رسیدن

چغندر قند: ۳ الی ۴ هفته بعد از جوانه زنی

نیشکر: مرحله حداکثر رشد رویشی

گوجه‌فرنگی: شامل مرحله‌ای که گل‌ها و میوه‌ها تشکیل می‌شوند و مرحله‌ای که رشد میوه‌ها سریع است

شلغم: مرحله‌ای که قسمت خوراکی ریشه رشد سریع دارد تا هنگام برداشت

هندوانه: از مرحله گل‌دهی تا برداشت

گندم: سه مرحله شامل ساقه رفتن، تشکیل سنبله و دو هفته قبل از گرده افشانی

زردآلو: دوره گل‌دهی و رشد غنچه

مرحله ۱: از رویش گیاه تا ابتدای گل‌دهی، که در آن رشد برگ‌های جدید متوقف شده و تاج به تدریج گسترش می‌یابد.

مرحله ۲: شامل رشد و نمو شاخ و برگ و گسترش تاج که با تراکم ماده خشک همراه است. افزایش پوشش گیاهی و سایه انداز، افزایش پتانسیل میوه‌دهی و تولید را به همراه دارد.

مرحله ۳: شامل دوره میوه‌دهی و بذردهی تا مرحله بلوغ که در این دوره وزن بذر مشخص می‌گردد. این مرحله با کاهش سطح برگ‌ها و فتوسنتز همراه است (در گندم، بلوغ از نظر فیزیولوژیک همراه با از دست دادن رنگ سبز گیاه و کاهش در میزان تنفس می‌باشد).

در مطالعه مراحل مختلف رشد فیزیولوژیک در دانه‌ها، مرحله اول نسبت به مرحله دوم که در آنها دانه‌ها پر می‌شوند، کمتر بحرانی است. در اوایل مرحله اول با توجه به اینکه پوشش گیاهی کمتری در سطح خاک وجود دارد، لذا هر گونه اعمال تنش رطوبتی منجر به کاهش تبخیر از سطح خاک لخت می‌گردد تا تعرق، و این سبب می‌شود که حساسیت گیاه نسبت به کمبود ET کمتر شود. در نتیجه کم‌آبیاری اول فصل را می‌توان بدون اثر منفی زیاد در دستور کار قرار داد. در مرحله دوم، هم‌زمان با رشد و نمو گیاه حساسیت به تنش آبی نیز بیشتر می‌شود. با افزایش جوانه‌زنی، تعداد سنبله و تعداد دانه در واحد سطح افزایش می‌یابد. تعداد دانه در سنبله حساسیت بیشتری نسبت به وزن دانه در مقابل تنش آبی دارد. لذا بایستی دقت شود که کم‌آبیاری اول فصل سبب کاهش شدید تعداد جوانه در واحد سطح نگردد. قطع آبیاری آخر فصل، اگر چه برای برخی محصولات بسیار مفید است و سبب بهبود کیفیت محصول و رسیدگی سریع‌تر آن می‌شود اما مدیر آبیاری باید طوری

برنامه‌ریزی نماید که حتی‌المقدور برنامه قطع آبیاری در طول دوره رشد گنجانیده نشود و بهتر است به جای قطع آبیاری مدیریت حداقل آبیاری را منظور نماید.

چنانکه مشخص شده، میزان تعرق کمتر در طول مرحله ۱ (به خصوص اوایل آن) و توسعه ریشه در درون خاک مرطوب زیرین در اواخر این مرحله سبب کاهش اثرات کم‌آبی در طول این مرحله می‌گردد.

در شرایط عدم پوشش کامل اراضی، از دست رفتن آب بیشتر به علت تبخیر از سطح خاک می‌باشد. لذا کاهش تبخیر از سطح خاک در اوایل دوره رشد از طریق مدیریت‌های خاک‌ورزی، خاک‌پوش (خاکی، گیاهی یا شیمیایی)، اصلاح مدیریت زراعی (زمان کاشت، تراکم بذر و نوع رقم) می‌تواند مد نظر قرار گیرد. اعمال کم‌آبیاری در مرحله ۲ سبب کاهش دوره رشد رویشی و ورود زودتر محصول به مرحله زایشی می‌شود.

بسته به نوع محصول و هدف زارع ممکن است این تغییر مفید یا مضر محسوب شود. برای یونجه و علوفه که هدف تولید ماده خشک بیشتر است کاهش ماده خشک مطلوب نیست، اما مثلاً برای یونجه بذری و غلات که هدف تولید دانه است نه بیوماس، کاهش ماده خشک تا حد قابل قبولی که منجر به کاهش شدید میزان دانه نشود مطلوب است. البته طبیعی است که وجود بیوماس بیشتر دانه بیشتری را نیز به همراه خواهد داشت.

کاهش دوره رشد رویشی و ورود زودتر محصول به مرحله زایشی یکی از ویژگی‌های محصولات در زراعت دیم محسوب می‌شود که انتظار می‌رود محصول قبل از بروز خشکی آخر فصل به تکمیل مرحله زایشی خود بپردازد. یکی از مدیریت‌های مؤثر برای رسیدن به این هدف در زراعت دیم، مدیریت تک‌آبیاری زمان کاشت است. تک‌آبیاری زمان کاشت با ایجاد سبز کامل پاییزه، گیاه را قادر می‌سازد بخشی از دوره رشد رویشی (تا پنجه زنی) را در پاییز که در حالت طبیعی ممکن نیست، تکمیل نماید و در بهار از شرایط مساعد طبیعی (بارش و دما) استفاده کند و سریع‌تر وارد مرحله زایشی و رسیدن شود.

در مرحله ۲، صدمات وارده به محصول گندم و سورگوم دانه‌ای در رابطه با کم آبیاری مرحله ۱ جبران می‌شود و عملکرد به حد مطلوب می‌رسد (که توسعه جوانه‌ها نشانگر آن است). مرحله دوم، مرحله‌ای از رشد است که حساسیت به کم آبیاری با رشد و توسعه گیاه افزایش می‌یابد.

علیرغم اهمیت مباحث فوق و به خاطر وجود پیچیدگی‌های موجود در آن، در صورتی که قرار باشد کم آبیاری توسط زارعی که دارای بینش و دانش مربوط به این فن نیست اجرا شود، مدیریت آن را مشکل و تا حدودی غیر ممکن می‌سازد. اما در هر حال بررسی این مراحل در جای خود و در نظر گرفتن آنها در مدیریت کم آبیاری، اهمیت دارد.

۱۴-۱۷ بحث و نتیجه گیری

از اجرای چنین پروژه‌ای می‌توان موارد زیر را انتظار داشت:

- ♦ تهیه و تدوین راهنما و دستورالعمل جامع، هوشمند و هدف‌دار آبیاری برای حداکثر کردن بهره‌وری از آب
- ♦ توصیه‌هایی در انتخاب سیستم‌های مناسب آبیاری
- ♦ ارائه فنون مفید در مدیریت آبیاری
- ♦ ارائه راهبردهای بهینه برای به کارگیری کم آبیاری
- ♦ تدوین و اصلاح الگوی کشت بر مبنای بهره‌وری از آب و شاخص کارایی مصرف آب
- ♦ توصیه‌های محلی برای بهره‌برداری پایدار از منابع آب در اراضی زارعین
- ♦ تدوین دستورالعمل برای عمق بهینه آب مصرفی
- ♦ تهیه و ارائه مقالات علمی - پژوهشی، مقالات و نشریات ترویجی و راهنماها و بروشورهای ترویجی

♦ تهیه و تدوین نشریات فنی و تحلیلی پیرامون بهینه‌سازی مصرف آب و کم آبیاری

همان‌طور که در متن بیان شد برای حصول نتایجی مطمئن و کاربردی بایستی به سه بعد اجرای چنین پروژه‌ای یعنی اجرای صحیح، نظارت فنی دقیق و مستمر و تحلیل جامع و کاربردی عنایت و توجه کافی به عمل آورد. ضعف و کاستی در هر یک از این مراحل منجر به نتایجی ضعیف یا انحرافی خواهد شد.

برای آنکه یک موضوع ذهنی به یک اصل عینی تبدیل شود، گاهی بایستی راهی طولانی را طی نمود. یعنی در واقع: گذار از مراحل صفر تحقیقاتی و تحلیل آن، اجرای آن در یک مقیاس کوچک و محیط کنترل شده و تحلیل نتایج در مقیاس کوچک و انتخاب گزینه برتر (بخش تحقیقاتی در سایت‌های کنترل شده دانشگاه‌ها و مؤسسات، مراکز و ایستگاه‌های تحقیقاتی)، اجرای گزینه برتر در یک مقیاس بزرگ و تحلیل نتایج آن (مرحله تحقیقی - تطبیقی و تحقیقی - ترویجی)، تبدیل موضوع به یک اصل (تولید دانش) و تدوین دستورالعمل فنی، جامع و کاربردی پیرامون آن (دستورالعمل ملی ترویجی). این روند برای بیشتر رشته‌ها و فنون صادق است و در خصوص کم آبیاری نیز بخشی از این روند طی شده است، ولی هنوز زمان، سرمایه‌گذاری تحقیقاتی و نتایج کافی می‌خواهد تا منجر به یک دستورالعمل جامع شود.

یکی دیگر از نکات مهم در تحقیقات (و به ویژه تحقیقات کشاورزی) این است که از استخراج و به کارگیری مستقیم نتایج تحقیقات دیگر کشورها احتراز شود و تنها از آنها به عنوان راهنما استفاده گردد.

پس از اینکه نتایج مزرعه‌ای تحقیقات کم آبیاری و به طور اختصار روابط «آب مصرفی - عملکرد» به دست آمد، براساس مدل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی (با بهینه‌سازی سود خالص) و با توجه به تحلیل زراعی، آماری و اقتصادی، شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی و حد بهینه عمق آب مصرفی هر محصول در هر منطقه، تعیین و به دست خواهد آمد.

چون ضرورت اجرای چنین پروژه‌ای در کل سطح کشور احساس می‌شود، پس از اینکه این پروژه روی محصولات مختلف به اجرا درآمد و اثر سال نیز در آن ملحوظ شد (با اجرای حداقل ۳ تا ۴ سال) و نتایج مستخرج گردید (نتیجه خاص)، می‌توان با تحلیل نتایج، اقدام به تهیه دستورالعمل برای تعیین عمق بهینه آب مصرفی محصولات مختلف در کشور نمود (نتیجه عام) و بر اساس اطلاعات پایه (آب، خاک، گیاه و آمار هواشناسی) با مدل‌سازی برای مناطقی که این تحقیق مزرعه‌ای صورت نگرفته، نتایج را تعمیم داد. این کار مبنایی، اصل اساسی در مدیریت آبیاری، احداث شبکه‌ها و ایجاد منابع آب (سدها و بندها) خواهد شد.

فصل ۱۵

کم آبیاری و هیدرومدول آبیاری

۱-۱۵ کم آبیاری و مدیریت تأمین و استحصال آب

پس از طی مراحل مطالعاتی و اولیه پروژه‌های آبیاری، اگر نگرش به این پروژه‌ها منحصر از یک بعد صورت گیرد، نمی‌توانند پروژه‌ای موفق باشند. بنابراین نگرش جامع به ابعاد پروژه از جنبه‌های مطالعه، طراحی، اجرا، جنبه‌های زیست محیطی، اقتصادی و حتی اجتماعی و فرهنگی و انتخاب گزینه برتر، ما را در حصول نتایج مطلوب مساعدت خواهد کرد.

آنچه که در این مقوله به آن پرداخته می‌شود، اثر و نقش بهینه‌سازی مصرف آب بر هیدرومدول آبیاری است که اگر چه به ظاهر با یکدیگر تفاوت دارند، اما با توجه به جامعیت مدیریت کم آبیاری، این بحث به نتایج درخور توجهی منجر می‌شود. البته زوایای مختلف کم آبیاری در مقالات و نشریات مختلف و نیز فصل‌های قبلی این مجموعه بیان شده است.

اولین نگاه در یک طرح توسعه منابع آب، تأمین و استحصال آب است که عموماً از طریق احداث بندها و سدهای کوچک و بزرگ و شبکه انتقال و توزیع صورت می‌پذیرد. در این فصل، موضوع از دیدگاه «کنترل از بالا» و «کنترل از پایین» کاوش و بررسی می‌شود.

۱۵-۱-۱ منظر کنترل از پایین

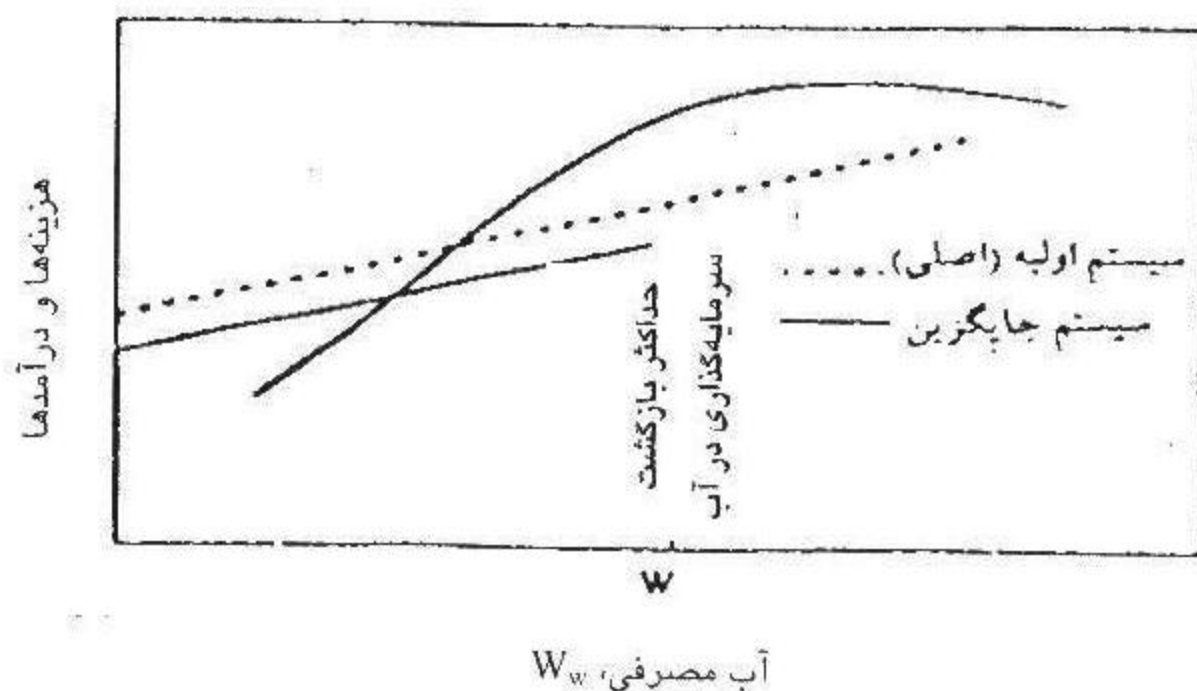
منظر «کنترل از پایین» بدین مفهوم است که سطح زیر کشت مشخص و معینی موجود است. هدف، احداث سد و شبکه‌ای برای تأمین آب این سطح مورد نظر است. حال اگر شرایط آبیاری کامل در طراحی پروژه مد نظر قرار گیرد، سد و شبکه‌ای که احداث می‌شود تا نیاز آبی زراعت با آبیاری کامل را تأمین کند، بزرگ‌تر و پرهزینه‌تر از زمانی است که شرایط کم آبیاری بر مسئله حاکم می‌شود. در واقع در حالت حاکم شدن کم آبیاری بهینه، سد و شبکه کوچک‌تری نیاز خواهد بود. ضمن اینکه اعمال کم آبیاری در افزایش کیفیت محصول، کاهش تلفات مواد مغذی، کاهش خطرات و مسائل زهکشی و افزایش راندمان مصرف آب نیز مؤثر است. البته همه اینها به شرطی درست است که میزان آب موجود برای تأمین نیاز حتی با کم آبیاری نیز کافی باشد وگرنه همه اراضی را نمی‌توان زیر کشت برد.

در این شرایط، با به کارگیری سیستم جایگزین به جای سیستم اولیه (اصلی)، یک سیستم آبیاری با ظرفیت کمتر همراه با کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای، مورد استفاده قرار می‌گیرد. چنین سیستمی می‌تواند با لوله‌های اصلی کوچک‌تری طراحی شده و از لوله‌های فرعی کمتری نیز استفاده نماید و از تعداد کمتری چاه و پمپ استفاده به عمل آید (English et al., 1990) و یا سد و شبکه‌ای متناسب و مورد نیاز آن طرح و احداث شود. شکل (۱۵-۱) که بیانگر یک سیستم اولیه و سیستم جایگزین است به چگونگی کاهش هزینه‌های متغیر و هزینه‌های آب و آبیاری و استفاده حداکثر از واحد آب مصرفی اشاره می‌کند.

پتانسیل افزایش سود با محاسبه تفاوت بین تابع هزینه‌های مربوط به سیستم‌های اولیه و جایگزین به دست می‌آید. تأکید می‌شود که تابع هزینه فقط شامل هزینه‌های متغیر آب و آبیاری نمی‌شود، بلکه هزینه‌های ثابت آبیاری و کشت آبی، همانند هزینه‌های مربوط به کود و سم و برداشت و دیگر هزینه‌های تولید که با نوع

۱- البته در تحلیل اینکه کدام یک از شرایط فوق در کشور ما وجود دارد بایستی گفت که در شرایط ایران عموماً محدودیت اراضی وجود ندارد و آنچه که باید مورد توجه قرار گیرد حداکثر استفاده از آب موجود است.

محصول تغییر می‌یابد، نیز جزو فاکتورهای مهم در مبحث کم آبیاری می‌باشد. انگلیش و ناس (English and Nuss, 1982) میزان پتانسیل کاهش هزینه‌ها را برای ۲۴ درصد کاهش آب مصرفی گندم زمستانه در حوزه کلمبیا بررسی نمودند. کاهش هزینه‌های تخمین زده شده عبارت است از: ۱- کاهش هزینه‌های آبیاری (انرژی، نیروی کارگری، تعمیرات و نگهداری) برابر ۲۷ درصد کل صرفه‌جویی، ۲- کاهش هزینه‌های ثابت (هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه) برابر ۳۶ درصد کل صرفه‌جویی و ۳- کاهش دیگر هزینه‌های تولید (مدیریت زراعی، کاربرد کود و مواد شیمیایی، برداشت و سایر هزینه‌ها) برابر با ۲۷ درصد کل صرفه‌جویی. این مقادیر با مشاهدات تجربی و کشت محصولات با کم آبیاری در منطقه مورد تأیید قرار گرفت.



شکل ۱۵-۱ اثر سیستم‌های اولیه و جایگزین بر تابع هزینه

به طور کلی در حالت محدودیت زمین، بهینه‌سازی کم آبیاری و تعیین حد بهینه هیدرومدول آبیاری سبب کاهش حجم عملیات احداث کانال‌های انتقال آب، کاهش ساعات کار پمپ و پمپاژ، کاهش حجم لوازم و ادوات آبیاری و همچنین کاهش اثرات و تبعات مصرف زیاد آب (زهکشی) و بهبود کیفیت محصول می‌شود.

۱۵-۱-۲ منظر کنترل از بالا

منظر «کنترل از بالا» بدین مفهوم است که سد و شبکه‌ای احداث شده و موجود است، یا سدی با مشخصات معلوم (از جمله حجم ذخیره آب) در برنامه ساخت قرار دارد و هدف، بهره‌برداری حجم معینی از آب سد برای بخش کشاورزی است. حال اگر شرایط آبیاری کامل بر مسئله حاکم باشد، سطح زیر کشت ثابت و معلوم است. ولی با توجه به عدم محدودیت نسبی اراضی در ایران، بخشی از اراضی یا تحت کشت دیم قرار می‌گیرند یا بلا استفاده می‌مانند. در واقع شاخص بهره‌وری از زمین کم است. در صورتی که می‌توان با حاکم کردن شرایط کم آبیاری بهینه و تدوین الگوی بهینه کشت، سطح بیشتری را به زیر کشت برد. در این حالت، سطح زیر کشت افزایش می‌یابد (۲۰-۴۰ درصد)، تولید کل محصولات افزایش می‌یابد (۱۵-۴۰ درصد)، کارآیی مصرف آب (تولید به ازای واحد آب مصرفی) اضافه می‌گردد (۱۵-۳۰ درصد)، اگرچه میزان عملکرد محصولات در واحد سطح، اندکی کاهش می‌یابد (۱۶-۳ درصد). ولی بایستی توجه داشت که عملکرد در واحد سطح، شاخص مقایسه‌ای کامل و جامعی به شمار نمی‌رود و بایستی به تولید به ازای واحد نهاده‌ها (و از مهم‌ترین آنها یعنی آب) و سود خالص به ازای واحد نهاده‌ها، توجه و عنایت بیشتری مبذول کرد.

پس در منظر کنترل از بالا، حجم آب ثابتی مفروض و یا موجود است و مهندس آبیاری باید تعیین کند که الگوی بهینه کشت که منطبق بر بهینه‌سازی مصرف آب با کم آبیاری است، چگونه باشد.

۱۵-۲ هیدرومدول آبیاری

پس از اینکه ترکیب کشت منطقه مشخص شد و با روش یا شبکه‌های مناسب محاسبهٔ تبخیر - تعرق، نیاز آبی واقعی محصولات تعیین شد، بر اساس میزان آب تخصیص یافته از سد (و یا هر منبع تأمین آب دیگر) میزان سطح زیر کشت محصولات تعیین می‌شود.

یکی از پارامترهای اساسی در طراحی سیستم‌های آبیاری، طراحی کانال، طراحی زهکش‌ها و تحلیل اقتصادی پروژه‌های آبیاری و زهکشی، هیدرومدول آبیاری است که برآورد صحیح و بهینه آن می‌تواند منافع فراوانی را به دنبال داشته باشد. در واقع در شرایط کم آبیاری با همان دبی کانال در حالت آبیاری کامل، حداکثر استفاده در سطح بهینه‌ای از اراضی، وضعیت کانال، سیستم آبیاری و ادوات و لوازم آبیاری می‌شود.

از این واقعیت نیز نباید چشم پوشید که با افزایش سطح زیر کشت، یک سری هزینه‌های جدید ظاهر می‌شود که شامل هزینه‌های آماده‌سازی زمین، هزینه‌های کاشت و داشت و برداشت محصول، کانال‌های انتقال (عموماً درجه ۳ و ۴)، سیستم آبیاری، کارگری و غیره می‌باشد. ولی باید گفت که:

۱- به خاطر اعمال کم آبیاری در مقایسه با آبیاری کامل، هزینه‌های فوق کاهشی کلی داشته و مثلاً به خاطر کاهش ساعت کار سیستم آبیاری (و تکمیل سریع‌تر آبیاری در واحد سطح)، این سیستم می‌تواند در سطوح اضافه شده نیز به کار گرفته شود.

۲- هزینه کل به ازای واحد سطح در اراضی اضافه شده فقط شامل هزینه‌های آماده‌سازی زمین، کاشت و داشت محصول، کانال‌های انتقال (درجه ۳ و ۴)، سیستم آبیاری و کارگری بوده و هزینه‌های منبع تأمین آب (سد) و شبکه کانال‌های اصلی (۱ و ۲) و تأسیسات و سازه‌های کنترلی را شامل نمی‌شود. در واقع هزینه برای واحد سطح اراضی اضافه شده بسیار کمتر از اراضی دیگر است.

۳- در مقیاس کل اراضی، در شرایط کم آبیاری (سطح مربوط به شرایط آبیاری کامل + سطح اضافه شده) نیز هزینه به ازای واحد سطح اراضی کمتر از هزینه به ازای واحد سطح اراضی آبیاری کامل است.

هیدرومدول آبیاری یکی از اجزای نهفته در طراحی و اجرای سیستم‌های آبیاری است که با اعمال مدیریت کم آبیاری، بدون تغییر در ساختار و میزان آن (در حالت عدم محدودیت زمین)، سطح زیر کشت اضافه می‌شود و در حالت محدودیت اراضی

نیز با کاهش مقدار آن هزینه‌های مربوط به شبکه تأمین، کنترل و انتقال آب کاهش می‌یابد.

۱۵-۳ کم آبیاری و هیدرومدول آبیاری

برای بررسی این موضوع که با اعمال کم آبیاری در سطوح ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد چه تغییراتی در الگوی کشت به وجود می‌آید، به ارائه مثالی پرداخته می‌شود. اما ضرورتاً بیان می‌شود که اعمال ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد کم آبیاری به طور یکسان برای کلیه محصولات در ترکیب کشت ممکن است صحیح و معقول به نظر نرسد. بلکه بایستی سطح بهینه کم آبیاری را در الگوی کشت در نظر گرفت. مثلاً ممکن است سطح بهینه کم آبیاری برای ترکیب کشت مورد نظر یعنی یونجه، ذرت، پنبه و گندم به ترتیب ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۰ درصد باشد. بنابراین در این کتاب به هر دو وضعیت با همدیگر نگریسته می‌شود و متذکر می‌گردد که انتخاب مدیریت کم آبیاری بر اساس سطح بهینه عمق آب مصرفی هر محصول ارجحیت و برتری دارد.

روحانی (۱۳۷۸) در مقاله‌ای با ذکر مثالی به چگونگی تعیین هیدرومدول آبیاری و کاربرد آن در طراحی کانال‌های آبیاری اشاره می‌کند. این کتاب، براساس همان داده‌ها به بررسی چهار وضعیت از کم آبیاری (کاهش ۲۰ درصد آب مصرفی به طور یکسان برای کلیه محصولات، کاهش ۲۵ درصد آب مصرفی به طور یکسان برای کلیه محصولات، کاهش ۳۰ درصد آب مصرفی به طور یکسان برای کلیه محصولات و کاهش ۳۰، ۲۵، ۲۰ و ۳۰ درصد آب مصرفی به ترتیب برای یونجه، ذرت، پنبه و گندم) و مقایسه آنها با آبیاری کامل می‌پردازد. نیاز آبی گیاهان گندم، یونجه، ذرت و پنبه بر حسب میلی‌متر با نگرش آبیاری کامل و کم آبیاری در جدول (۱-۱۵) نشان داده شده است (توکلی، ۱۳۷۹). تخصیص آب برای اراضی این منطقه یک متر مکعب در ثانیه است و با این مقدار آب، با توجه به عدم محدودیت نسبی زمین، ۲۰ درصد اراضی به یونجه، ۳۰ درصد به ذرت علوفه‌ای و ۵۰ درصد به کشت پنبه اختصاص می‌یابد و با آب اضافی گندم کشت می‌گردد. با توجه به این وضعیت، سطح زیر کشت

محصولات و هیدرومدول آبیاری در حالت آبیاری کامل (آبیاری طرح یا تأمین کل نیاز آبی گیاهان) و سطوح کم آبیاری به دست می‌آید.

جدول ۱-۱۵ نیاز آبی گیاهان بر حسب میلی‌متر، تحت مدیریت آبیاری کامل و سطوح مختلف کم آبیاری

گیاه	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	جمع
*۱	۵۱/۸	۲۰۷/۴	۲۸۵/۱	-	-	-	-	-	۵۴۴/۳
۲	۴۱/۴	۱۶۵/۹	۲۲۸/۱	-	-	-	-	-	۴۳۵/۴
۳	۳۸/۸	۱۵۵/۶	۲۱۳/۸	-	-	-	-	-	۴۰۸/۲
۴	۳۶/۳	۱۴۵/۲	۱۹۹/۶	-	-	-	-	-	۳۸۱/۱
۱	-	۷۷/۸	۲۸۵/۱	۳۶۲/۹	۴۵۳/۶	۴۴۰/۶	۳۶۲/۹	۲۰۷/۴	۲۱۹۰/۳
۲	-	۶۲/۲	۲۲۸/۱	۲۹۰/۳	۳۶۲/۹	۳۵۲/۵	۲۹۰/۳	۱۶۵/۹	۱۷۵۲/۲
۳	-	۵۸/۴	۲۱۳/۸	۲۷۲/۲	۳۴۰/۲	۳۳۰/۵	۲۷۲/۲	۱۵۵/۶	۱۶۴۲/۷
۴	-	۵۴/۵	۱۹۹/۶	۲۵۴	۳۱۷/۵	۳۰۸/۴	۲۵۴	۱۴۵/۲	۱۵۳۳/۲
۱	-	-	-	۲۰۷/۴	۴۱۴/۷	۳۸۸/۸	۲۳۳/۳	-	۱۲۴۴/۲
۲	-	-	-	۱۶۵/۹	۳۳۱/۸	۳۱۱	۱۸۶/۶	-	۹۹۵/۴
۳	-	-	-	۱۵۵/۶	۳۱۱	۲۹۱/۶	۱۷۵	-	۹۳۳/۲
۴	-	-	-	۱۴۵/۲	۲۹۰/۳	۲۷۲/۲	۱۶۳/۳	-	۸۷۰/۹
۱	-	-	۱۰۳/۷	۲۳۳/۳	۴۰۴/۳	۴۱۴/۷	۲۸۵/۱	۱۰۳/۷	۱۵۴۴/۸
۲	-	-	۸۳	۱۸۶/۶	۳۲۳/۴	۳۳۱/۸	۲۲۸/۱	۸۳	۱۲۳۵/۸
۳	-	-	۷۷/۸	۱۷۵	۳۰۳/۲	۳۱۱	۲۱۳/۸	۷۷/۸	۱۱۵۸/۶
۴	-	-	۷۲/۶	۱۶۳/۳	۲۸۳	۲۹۰/۳	۱۹۹/۶	۷۲/۶	۱۰۸۱/۴

* ۱- نیاز آبی گیاهان بر حسب میلی‌متر در ماه‌های مختلف، تحت آبیاری کامل و ۲، ۳ و ۴- نیاز آبی گیاهان با ملحوظ کردن به ترتیب ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد به عنوان سطح کم آبیاری

با توجه به نیاز آبی محصولات مختلف، هیدرومدول محصولات بر حسب دبی در واحد سطح (لیتر در ثانیه در هکتار) به دست می‌آید. به عنوان مثال برای یونجه در تیر ماه (۳۱ روز) در حالت آبیاری کامل به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{453/6 \times 10 \times 1000}{31 \times 24 \times 3600} = 1/7 \quad \text{لیتر در ثانیه در هکتار}$$

البته لازم به یادآوری است که هر میلی متر ارتفاع آب برابر ۱۰ متر مکعب در هکتار حجم آب است و بدین ترتیب جدول (۱۵-۲) که بیانگر هیدرومدول آبیاری ماهیانه محصولات در چهار راهکار آبیاری است تعیین می شود.

جدول ۱۵-۲ هیدرومدول اصلاح شده محصولات بر اساس ترکیب کشت، تحت

مدیریت آبیاری کامل و سطوح مختلف کم آبیاری

گیاه	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر
گندم	*۱	۰/۱۱	۰/۸	۱/۱	-	-	-	-
	۲	۰/۱۶۸	۰/۶۴	۰/۸۸	-	-	-	-
	۳	۰/۱۶	۰/۶	۰/۵۶	-	-	-	-
	۴	۰/۱۴۷	۰/۵۶	۰/۷۷	-	-	-	-
ذرت	۱	-	۰/۳	۱/۱	۱/۴	۱/۷	۱/۴	۰/۸
	۲	-	۰/۲۴	۰/۸۸	۱/۱۲	۱/۳۶	۱/۱۲	۰/۶۴
	۳	-	۰/۲۳	۰/۸۳	۱/۰۵	۱/۲۷	۱/۰۵	۰/۶
	۴	-	۰/۲۱	۰/۷۷	۰/۹۸	۱/۱۹	۱/۱۲	۰/۵۶
پنبه	۱	-	-	-	۰/۸	۱/۵۵	۱/۵	۰/۹
	۲	-	-	-	۰/۶۴	۱/۲۴	۱/۲	۰/۷۲
	۳	-	-	-	۰/۶	۱/۱۶	۱/۱۳	۰/۶۷
	۴	-	-	-	۰/۵۶	۱/۰۸	۱/۰۵	۰/۶۳
پنجه	۱	-	-	۰/۴	۰/۹	۱/۵۵	۱/۱	۰/۴
	۲	-	-	۰/۳۲	۰/۷۲	۱/۲۱	۱/۲۴	۰/۸۸
	۳	-	-	۰/۳	۰/۶۷	۱/۱۳	۱/۱۶	۰/۸۳
	۴	-	-	۰/۲۱	۰/۶۳	۱/۰۶	۱/۰۸	۰/۷۷

* ۱- هیدرومدول آبی محصولات بر حسب لیتر در ثانیه در هکتار در ماه های مختلف، تحت آبیاری کامل و ۲، ۳ و ۴- هیدرومدول محصولات با ملحوظ کردن به ترتیب ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد به عنوان سطح کم آبیاری

با تعیین هیدرومدول بر اساس ترکیب کشت پیشنهادی محصولات اساسی (۲۰ درصد یونجه، ۳۰ درصد ذرت و ۵۰ درصد پنبه)، مقادیر هیدرومدول اصلاح شده به دست می آید. مثلاً برای تیر ماه، در حالت آبیاری کامل، این مقادیر به صورت زیر محاسبه می گردد:

یونجه: لیتر در ثانیه در هکتار $1/7 \times 20\% = 0/4$

ذرت: لیتر در ثانیه در هکتار $1/55 \times 30\% = 0/47$

پنبه: لیتر در ثانیه در هکتار $1/51 \times 50\% = 0/76$

و به همین طریق برای بقیه ماه ها و دیگر سطوح آبیاری، مقادیر هیدرومدول اصلاح شده به دست می آید. این نتایج در جدول (۱۵-۳) درج گردیده است. یکی از نکات اساسی در این جدول، ملحوظ شدن ردیف آخر (با شماره ۵) است که در آن به جای اینکه میزان یکسانی از کم آبیاری (۲۰، ۲۵ یا ۳۰ درصد) برای کلیه محصولات اساسی (یونجه، ذرت، پنبه) در نظر گرفته شود،

مقادیر متفاوتی از کم آبیاری بر اساس نوع محصول (با در نظر داشتن مقدار افت عملکرد با کاهش آب مصرفی) و ارزش اقتصادی محصول، منظور گردیده است که مدیریتی درخور توجه است. در واقع بر اساس سطوح بهینه کم آبیاری برای هر یک از محصولات، الگوی بهینه کشت و هیدرومدول آبیاری شکل می گیرد.

یکی از نکات اساسی در محاسبه هیدرومدول این است که هیدرومدول آبیاری بر اساس نیاز ناخالص (یعنی ملحوظ کردن راندمان آبیاری و ضریب آبشویی در نیاز خالص آب آبیاری) به دست می آید و اعدادی که در جدول (۱۵-۱) نشان داده شده است نیاز ناخالص (یا نیاز آبیاری) است که البته با دقت در ستون آخر (مجموع نیاز آبی) این مطلب به وضوح دیده می شود.

با توجه به جدول (۱۵-۳) و بر اساس مجموع هیدرومدول محصولات در ماه های مختلف، مشخص است که ماه تیر به عنوان ماه بحرانی است و بر این اساس سطح زیر کشت محصولات یونجه، ذرت و پنبه در راهکارهای مختلف آبیاری تعیین

می‌شود. البته کل آب تخصیص یافته برابر یک متر مکعب در ثانیه یا ۱۰۰۰ لیتر در ثانیه است.

جدول ۳-۱۵ هیدرومدول محصولات (لیتر در ثانیه در هکتار) بر اساس ترکیب

کشت و راهکارهای آبیاری

گیاه	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر
گندم	ماه بحرانی							
*۱	-	۰/۰۶	۰/۲۲	۰/۲۸	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۲۸	۰/۱۶
۲	-	۰/۰۴۸	۰/۱۷۶	۰/۲۲۴	۰/۲۷۲	۰/۲۵۶	۰/۲۲۴	۰/۱۲۸
۳	-	۰/۰۴۶	۰/۱۶۵	۰/۲۱	۰/۲۵۵	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۱۲
۴	-	۰/۰۴۲	۰/۱۵۴	۰/۱۹۶	۰/۲۳۸	۰/۲۲۴	۰/۱۹۶	۰/۱۱۲
۱	-	-	-	۰/۲۴	۰/۴۷	۰/۴۵	۰/۲۷	-
۲	-	-	-	۰/۱۹۲	۰/۳۷۶	۰/۳۶	۰/۲۱۶	-
۳	-	-	-	۰/۱۸	۰/۳۵۳	۰/۳۳۸	۰/۲۰۳	-
۴	-	-	-	۰/۱۶۸	۰/۳۲۹	۰/۳۱۵	۰/۱۸۹	-
۱	-	-	۰/۲	۰/۴۵	۰/۷۶	۰/۷۸	۰/۵۵	۰/۲
۲	-	-	۰/۱۶	۰/۳۶	۰/۶۱	۰/۶۲	۰/۴۴	۰/۱۶
۳	-	-	۰/۱۵	۰/۳۳۸	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۴۱	۰/۱۵
۴	-	-	۰/۱۴	۰/۳۱۵	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۳۸۵	۰/۱۴
۱	-	۰/۰۶	۰/۲۲	۰/۹۷	۱/۵۷	۱/۵۵	۱/۱	۰/۳۶
۲	-	۰/۰۴۸	۰/۳۳۶	۰/۷۷۶	۱/۲۵۶	۱/۲۴	۰/۸۸	۰/۲۸۸
۳	-	۰/۰۴۶	۰/۳۱۵	۰/۷۲۸	۱/۱۷۸	۱/۱۶۳	۰/۸۲۵	۰/۲۷
۴	-	۰/۰۴۲	۰/۲۹۴	۰/۶۷۹	۱/۰۹۹	۱/۰۸۵	۰/۷۷	۰/۲۵۲
۵	-	۰/۰۴۲	۰/۳۱۴	۰/۶۹۱	۱/۲۰۱	۱/۱۸۱	۰/۸۳۹	۰/۲۷۲

* ۱- هیدرومدول آبی محصولات تحت آبیاری کامل، ۲، ۳ و ۴- هیدرومدول محصولات با ملحوظ کردن به ترتیب ۲۵، ۲۰ و ۲۰ درصد به عنوان سطح کم آبیاری و ۵- هیدرومدول محصولات بر اساس ترکیب کشت، با ملحوظ کردن به ترتیب ۲۵، ۲۰ و ۲۰ درصد سطح کم آبیاری به ترتیب برای یونجه، ذرت و پنبه

محاسبه سطح زیر کشت محصولات بر اساس کل آب تخصیص یافته، مجموع هیدرومدول آبی محصولات (جدول ۳-۱۵) و ترکیب کشت صورت می‌گیرد. مثلاً برای آبیاری کامل با هیدرومدول ۱/۵۷ لیتر در ثانیه به صورت زیر است:

$$\frac{1000}{1/57} * 20\% = 127 \text{ هکتار} \quad \text{سطح زیر کشت یونجه}$$

$$\frac{1000}{1/57} * 30\% = 191 \text{ هکتار} \quad \text{سطح زیر کشت ذرت}$$

$$\frac{1000}{1/57} * 50\% = 318 \text{ هکتار} \quad \text{سطح زیر کشت پنبه}$$

بنابراین سطح کل زیر کشت سه محصول در حالت آبیاری کامل برابر است با:

$$127 + 191 + 318 = 636 \text{ هکتار}$$

با توجه به اینکه حداکثر نیاز آبی گندم (طبق جدول ۱-۱۵) در اردیبهشت ماه اتفاق می‌افتد، در این ماه محصولات دیگر به آب کمتری نیاز دارند و فقط یونجه و پنبه هستند که در اردیبهشت ماه به آب و آبیاری احتیاج دارند و مازاد آب در این ماه به گندم اختصاص می‌یابد. بر این اساس، ابتدا با توجه به سطح زیر کشت یونجه و پنبه و هیدرومدول این محصولات در اردیبهشت ماه (جدول ۳-۱۵)، میزان آب تخصیص یافته به آنها (بر حسب لیتر در ثانیه) و میزان آب مازاد (برای تخصیص دادن به گندم در این ماه) به دست می‌آید:

آب تخصیص یافته به یونجه در اردیبهشت ماه در حالت آبیاری کامل:

$$127 \text{ لیتر در ثانیه} \quad 127 * 1/1 = 127/7$$

آب تخصیص یافته به پنبه در اردیبهشت ماه در حالت آبیاری کامل:

$$191 \text{ لیتر در ثانیه} \quad 191 * 0/4 = 127/2$$

جمع کل آب تخصیص یافته به یونجه و پنبه در اردیبهشت ماه در حالت آبیاری کامل:

$$127/7 + 127/2 = 269/9 \text{ لیتر در ثانیه}$$

جدول ۱۵-۵ هیدرومدول آبیاری (لیتر در ثانیه در هکتار) با در نظر گرفتن سطح زیر کشت در ترکیب کشت کامل

گیاه	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر
گندم	۰/۱۱	۰/۴۱	۰/۵۶	-	-	-	-	-
	۰/۰۸۸	۰/۳۲۸	۰/۴۴۸	-	-	-	-	-
	۰/۰۸۳	۰/۳۰۷	۰/۴۲	-	-	-	-	-
	۰/۰۷۷	۰/۲۸۷	۰/۳۹۳	-	-	-	-	-
ذرت	-	۰/۰۳	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۸
	-	۰/۰۲۴	۰/۰۸۸	۰/۱۱۲	۰/۱۳۶	۰/۱۲۸	۰/۱۱۲	۰/۰۶۴
	-	۰/۰۲۳	۰/۰۸۳	۰/۱۰۵	۰/۱۲۷	۰/۱۲	۰/۱۰۵	۰/۰۶
	-	۰/۰۲۱	۰/۰۷۷	۰/۰۹۸	۰/۱۱۹	۰/۱۱۲	۰/۰۹۸	۰/۰۵۶
پنبه	-	-	-	۰/۱۲	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۱۴	-
	-	-	ماه	۰/۰۹۶	۰/۱۸۴	۰/۱۷۶	۰/۱۱۲	-
	-	-	بحرانی	۰/۰۹	۰/۱۷۲	۰/۱۶۵	۰/۱۰۵	-
	-	-	-	۰/۰۸۴	۰/۱۶۱	۰/۱۵۴	۰/۰۹۸	-
پنبه	-	-	۰/۱	۰/۲۲	۰/۳۶	۰/۳۷	۰/۲۶	۰/۱
	-	-	۰/۰۸	۰/۱۷۶	۰/۲۸۸	۰/۲۹۹	۰/۲۰۸	۰/۰۸
	-	-	۰/۰۷۵	۰/۱۶۵	۰/۲۷	۰/۲۷۷	۰/۱۹۵	۰/۰۷۵
	-	-	۰/۰۷	۰/۱۵۴	۰/۲۵۲	۰/۲۵۹	۰/۱۸۲	۰/۰۷
پنبه	۰/۱۱	۰/۴۴	۰/۷۷	۰/۴۸	۰/۷۶	۰/۷۵	۰/۵۴	۰/۱۸
	۰/۰۸۸	۰/۳۵۲	۰/۶۱۶	۰/۳۸۴	۰/۶۰۸	۰/۶	۰/۴۳۲	۰/۱۴۴
	۰/۰۸۳	۰/۳۳	۰/۵۷۸	۰/۳۶	۰/۵۷	۰/۵۶۲	۰/۴۰۵	۰/۱۳۵
	۰/۰۷۷	۰/۳۰۸	۰/۵۳۹	۰/۳۳۶	۰/۵۳۲	۰/۵۲۵	۰/۳۷۸	۰/۱۲۶
	۰/۰۷۷	۰/۳۰۸	۰/۵۵	۰/۳۶۴	۰/۵۷۹	۰/۵۷۳	۰/۴۱۱	۰/۱۳۶

* ۱- هیدرومدول آبی محصولات تحت آبیاری کامل، ۲، ۳ و ۴- هیدرومدول محصولات با ملحوظ کردن به ترتیب ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد به عنوان سطح کم آبیاری و ۵- هیدرومدول محصولات بر اساس ترکیب کشت، با ملحوظ کردن به ترتیب ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد سطح کم آبیاری به ترتیب برای یونجه، ذرت و پنبه

آب اضافی برای کشت گندم برابر است با:

$$\text{لیتر در ثانیه} = ۷۳۳/۱ = ۲۶۹/۹ - ۱۰۰۰$$

و سطح زیر کشت گندم نیز در حالت آبیاری کامل به دست می آید:

$$\text{هکتار} = ۶۶۶ = ۷۳۳/۱ \div ۱/۱$$

و به همین ترتیب، ترکیب کشت و نسبت های مختلف آن برای محصولات مختلف به دست می آید که در جدول (۴-۱۵) خلاصه گردیده است.

جدول ۴-۱۵ سطح زیر کشت محصولات با مدیریت آبیاری کامل و سطوح کم آبیاری بر حسب هکتار

محصولات	یونجه	ذرت	پنبه	گندم	جمع	درصد افزایش سطح زیر کشت
آبیاری کامل	۱۲۷	۱۹۱	۳۱۸	۶۶۶	۱۳۰۲	-
کاهش ۲۰٪	۱۵۹	۲۳۹	۳۹۸	۸۳۳	۱۶۲۹	۲۵٪
کاهش ۲۵٪	۱۷۰	۲۵۵	۴۲۴	۸۸۲	۱۷۳۱	۳۳٪
کاهش ۳۰٪	۱۸۲	۲۷۳	۴۵۵	۹۹۳	۱۹۰۳	۴۶/۲٪
کاهش ۳۰، ۲۵، ۲۰ و ۳۰ درصد به ترتیب برای یونجه، ذرت، پنبه و گندم	۱۶۶	۲۵۰	۴۱۶	۹۶۰	۱۷۹۲	۳۷/۶٪
درصد کشت	۱۰	۱۵	۲۴	۵۱	۱۰۰	-

جدول (۴-۱۵) نشان می دهد که کاهش ۲۰ درصد آب مصرفی باعث افزایش ۲۵ درصد سطح زیر کشت، کاهش ۲۵ درصد آب مصرفی باعث افزایش ۳۳ درصد سطح زیر کشت و کاهش ۳۰ درصد آب مصرفی باعث افزایش ۴۶/۲ درصد سطح زیر کشت می شود. انتخاب راهکار کاهش بهینه برای محصولات مختلف باعث افزایش ۳۷/۶ درصد سطح زیر کشت می شود. البته لازم به ذکر است که حجم آب مصرفی ثابت است. در واقع در شرایط محدودیت منابع آب، حداکثر استفاده از آن به عمل آمده که به صورت افزایش سطح زیر کشت (با توجه به عدم محدودیت نسبی اراضی در ایران) نمود پیدا کرده است.

با توجه به اینکه ترکیب کشت یونجه، ذرت و پنبه (بدون در نظر گرفتن گندم) همان نسبت‌های پیش‌بینی شده (به ترتیب ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درصد) باقی می‌ماند، اما این ترکیب در کشت نهایی با منظور نمودن گندم، برای محصولات یونجه، ذرت، پنبه و گندم به ترتیب تقریباً به صورت ۱۰، ۱۵، ۲۴ و ۵۱ درصد تغییر می‌یابد ولی باز هم همان نسبت‌های پیش‌بینی شده بین یونجه، ذرت و پنبه محفوظ می‌ماند. براین اساس، هیدرومدول آبیاری با در نظر گرفتن سطح زیر کشت نهایی و درصد آن در ترکیب کشت نهایی (۱۰، ۱۵، ۲۴ و ۵۱ درصد) طبق جدول (۵-۱۵) تغییر می‌یابد.

شیوه کار بدین صورت است که بر اساس جدول (۲-۱۵) و درصد زیر کشت محصول، تغییر ایجاد می‌شود. مثلاً برای یونجه در تیر ماه با آبیاری کامل به صورت:

$$\text{لیتر در ثانیه در هکتار} = ۱۷ / ۱۰\% \times (\text{از جدول ۹-۲}) = ۱/۷$$

یا برای گندم در اردیبهشت ماه با کم آبیاری به میزان ۳۰ درصد به صورت:

$$\text{لیتر در ثانیه در هکتار} = ۳۹۳ / ۵۱\% \times (\text{از جدول ۹-۲}) = ۰/۷۷$$

در می‌آید که نتایج در جدول (۵-۱۵) آمده است.

۱۵-۴ نتیجه‌گیری

براساس آنچه که در این بخش به طور موردی بحث شد و شیوه عمل قابل تعمیم به دیگر مناطق و دشت‌ها در طرح‌های توسعه منابع آب می‌باشد، در هر دو حالت «منظر کنترل از بالا» یا «منظر کنترل از پایین» با اعمال مدیریت بهینه کم آبیاری می‌توان برای این دو حالت افزایش سطح زیر کشت را به دنبال داشت و یا سیستم جایگزین را به جای سیستم اولیه به کار گرفت که در هر دو حالت از بعد اقتصادی قابل توجیه است.

به جای به کارگیری سطوح یکسانی از کم آبیاری برای کلیه محصولات در الگوی کشت، می‌توان و بایستی سطوح بهینه کم آبیاری هر یک از محصولات را برای هر

کدام جداگانه به کار برد. یعنی در واقع، ابتدا سطح بهینه کم آبیاری تک تک محصولات (آبیاری کامل یا کاهش ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد و بیشتر) را بر اساس «مدل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی» و «جامعه آماری مستندات تحقیقاتی» تعیین نموده و سپس این سطوح بهینه را در الگوی کشت به کار گرفت. اگر داده‌ها و نتایج تحقیقاتی محلی «آب مصرفی - عملکرد» هریک از محصولات الگوی کشت برای تعیین سطح بهینه کم آبیاری در دسترس باشد، به راحتی بر اساس مدل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی، سطح بهینه به دست می‌آید. اما اگر چنین داده‌ها و نتایج تحقیقات محلی وجود نداشته باشد، بر اساس «جامعه آماری مستندات تحقیقاتی» و «مدل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی» و به طریقه «شبیه‌سازی اقلیمی»، می‌توان با ملحوظ داشتن احتیاط لازم، به سطح معقولی از کم آبیاری دست یافت.

در مطالعه حاضر، حجم آب مصرفی (در دسترس) ثابت است و در واقع شرایط محدودیت منابع آب حاکم است و نتیجه اعمال کم آبیاری به صورت افزایش سطح زیر کشت نمود پیدا کرده است.

بر اساس نتایج به دست آمده، کاهش ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درصد آب مصرفی (یکسان برای کلیه محصولات) باعث افزایش به ترتیب ۲۵، ۳۲ و ۴۶/۳ درصد سطح زیر کشت گردیده است. با توجه به اینکه کاهش یکسان آب مصرفی برای کلیه محصولات الگوی مناسبی در تعیین حد بهینه کم آبیاری به شمار نمی‌رود، با انتخاب راهبرد برتر کاهش‌های بهینه برای محصولات مختلف (کاهش ۳۰، ۲۵، ۲۰ و ۳۰ درصد آب مصرفی به ترتیب برای یونجه، ذرت، پنبه و گندم) باعث افزایش ۳۷/۶ درصد سطح زیر کشت می‌شود.

علیرغم وجود تمام مزیت‌های نسبی کم آبیاری، ضرورت ارتقای دانش و بینش مدیریتی در اعمال کم آبیاری یادآوری می‌شود و هرگز نباید از ریسک و خطرپذیری سیستم‌های تحت مدیریت کم آبیاری و توجه جدی و بیشتر در مراحل بهره‌برداری و ارزیابی آن غفلت ورزید.

فصل ۱۶

بحث کلی کم آبیاری

از اصول نوین مهندسی آبیاری، حصول سود بیشتر (و در صورت بهینه‌سازی، کسب حداکثر سود) و استفاده بیشتر و بهتر از واحد آب مصرفی، پذیرش ریسک قابل قبول، انعطاف‌پذیری سیستم‌های آبیاری و تعیین توابع تولید بر اساس آب مصرفی است که همه اینها در بهینه‌سازی کم آبیاری متجلی می‌شود.

شاید تا زمانی که محدودیت آب به حد فعلی بروز پیدا نکرده بود، بهینه‌سازی مصرف آب نیز چندان مورد توجه واقع نمی‌شد. همان‌طوری که در مقدمه این کتاب بیان شد عموماً بیشتر طراحی‌ها بر مبنای اصول آبیاری کامل صورت می‌گرفته و هنوز هم می‌گیرد و بسیاری از پارامترها، از جمله عمق توسعه ریشه گیاهان، برگرفته از منابع خارجی است که در شرایط ایران نمی‌تواند کاملاً صحیح باشد. بسیار جالب است که محققین، مشاورین و مروجین حتی در شرایط فراوانی آب نیز به ناکارآمدی آبیاری کامل پی برده‌اند، طراحی بر اساس اطمینان ۵۰ درصد را پیشنهاد می‌کنند و تحقیقات بهینه‌سازی مصرف آب را در برنامه‌های پژوهشی خود قرار داده‌اند.

برای تعیین عمق بهینه آب مصرفی و رابطه آب مصرفی - عملکرد محصولات، عموماً بایستی مستندات تحقیقاتی در منطقه موجود باشد که در آن صورت به راحتی با استفاده از مدل بهینه‌سازی عمق آب مصرفی، شاخص‌های آستانه‌ای عمق آب مصرفی (مشابه آنچه که در نمونه‌های کاربردی فصل‌های ۲ تا ۱۲ ذکر شد) به دست می‌آید و بر اساس شرایط حاکم بر مسئله (محدودیت آب و یا محدودیت زمین)^۱ وضعیت مطلوب تعیین و توصیه می‌گردد. اگر مستندات کافی موجود نباشد می‌توان با شبیه‌سازی و پردازش داده‌ها، بر اساس شرایط و عوامل موجود در منطقه، به برآوردی از سطوح بهینه آب مصرفی رسید. بایستی دقت کرد که استفاده مستقیم و

۱- در شرایط ایران، عموماً محدودیت منابع آب و فراوانی نسبی اراضی وجود دارد.

بدون مطالعه و تبعیت غیر محققانه دستورالعمل‌های محققان بین‌المللی صحیح نمی‌باشد و میزان تطابق آنها با شرایط ایران باید بررسی شود. زیرا نگرش حاکم بر این دستورالعمل‌ها یک نگرش کلی و تلفیقی است و بیشتر به عنوان یک راهنما و قرائت علمی محسوب می‌شود تا یک روش و قرائت عملی. لذا ضمن اینکه از تجربیات و سوابق و شیوه‌های تحقیقاتی - پژوهشی دیگران بهره‌برداری می‌شود، بایستی به مستندات تحقیقاتی در کشور و واقعیت‌های عملی در سطح زارعین نیز تکیه کرد.

آبیاری کامل (طرح)، اگر چه حداکثر عملکرد در واحد سطح را به دنبال دارد اما نمی‌تواند حداکثر تولید و سود خالص را داشته باشد. با به کارگیری حد بهینه کم آبیاری می‌توان کیفیت محصول را به میزان ۱۵-۵ درصد بهبود بخشید، تولید کل را به میزان ۴۰-۱۵ درصد افزایش داد، سطح زیر کشت را به میزان ۴۰-۲۰ درصد افزایش داد و کارایی تولید به ازای واحد آب مصرفی را به میزان ۳۰-۱۵ درصد افزایش داد، اگر چه عملکرد در واحد سطح به میزان ۱۶-۳ درصد کاهش می‌یابد. ولی باید توجه داشت که عملکرد در واحد سطح، شاخص مقایسه‌ای کامل و جامعی به شمار نمی‌رود و باید به تولید به ازای واحد آب مصرفی و سود خالص به ازای واحد آب مصرفی و حداکثر استفاده از حجم معین آب توجه بیشتری مبذول کرد.

همان‌طور که از متن کتاب مشخص است رابطه بین کاهش آب مصرفی و کاهش (افت) عملکرد خطی نیست و در مراحل اولیه کاهش آب مصرفی شیب کاهش (افت) عملکرد ناچیز است. اما با افزایش روند کاهش آب مصرفی، شیب افت عملکرد شدید می‌شود.

مصرف صحیح و مدیریت کارآ و پویا می‌تواند سود بیشتر را از واحد آب مصرفی عاید کند. از طرف دیگر با مدیریت غلط و مصرف نادرست آب سیستمی ناکارآمد، غیر اقتصادی و بی‌بهره به وجود می‌آید.

یکی از نکات اساسی در الگوی کشت و بهینه‌سازی مصرف آب، انتخاب سطوح بهینه کم آبیاری برای محصولات مختلف است، زیرا عکس‌العمل و تقابل آنها با شرایط کمبود رطوبتی فرق می‌کند. در ابتدا بایستی عکس‌العمل عملکرد محصول در مقابل تنش آبی بر اساس مراحل رشد یا در طول دوره رشد معلوم شود

(Kirda and Kanber, 1999). مدیر آبیاری نیاز دارد که بداند سطح مجاز کاهش تعرق بدون کاهش معنی‌دار عملکرد چقدر است (Kirda, 2002). کاهش ۲۰-۳۰ درصد آب مصرفی محصولات مختلف که در پرتو اصول طراحی آبیاری کامل قرار دارند (در صورت عدم محدودیت از نظر کیفیت آب و داشتن خاکی با بافت متوسط تا سنگین) بدون بروز هیچ‌گونه مشکلی قابل توصیه است.

یکی از فواید و محسنات کم آبیاری، افزایش سطح زیر کشت در پروژه‌های توسعه منابع آب است که سبب ایجاد اشتغال مولد می‌گردد و در شرایط فعلی مملکت حائز اهمیت است. طبیعی است که با به زیر کشت بردن اراضی بیشتر، درآمد خالص نهایی بیشتر خواهد شد (English et al., 1990; English and Orlob, 1978; Hoffman et al., 1990).

در طراحی بر اساس کم آبیاری، بایستی به انعطاف‌پذیری سیستم نیز توجه شود تا در صورت بروز شرایط نامساعد و اضطراری بتوان اثرات این شرایط را تعدیل کرد. در انتخاب سطح بهینه کم آبیاری باید ضمن توجه به تحلیل اقتصادی، به تفسیر فنی و زراعی نیز توجه و عنایت داشت تا خطرات احتمالی کاربرد کم آبیاری به حداقل کاهش یابد.

در این کتاب، کم آبیاری به عنوان راهکاری فنی - اقتصادی در مدیریت آبیاری زراعت آبی مورد کنکاش قرار گرفت و تا حدودی جنبه‌های علمی، عملی و کاربردی آن تبیین شد. اما به صورت خلاصه باید به مدیریت آبیاری در زراعت دیم نیز اشاره کرد. آبیاری تکمیلی (Supplemental irrigation) و تک آبیاری (Single irrigation) از فنون تثبیت کننده تولید در زراعت دیم (اعم از زراعی و باغی) و نیز استحصال و جمع‌آوری آب باران (Water harvesting) از مواردی هستند که بایستی مورد توجه و پژوهش بیشتری قرار گیرند. نتایج تحقیقات آبیاری تکمیلی و تک آبیاری حاکی از افزایش قابل ملاحظه عملکرد و تثبیت آن در شرایط و سال‌های مختلف است (توکل و همکاران، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۲، توکل، ۱۳۸۲، Adary et al., 2002; Caliandro, 1992; Oweis and Zhang, 1996; Oweis and Boari, 1992; Orgaz et al., 1992; Oweis et al., 1998, 1999, 2001, 2004a & 2004b; Oweis et al., 1998, 1999, 2001, 2004a & 2004b).

2004b; Oweis, 1997; Perrier and Salkini, 1991; Zhang and Oweis, 1999; Zhang *et al.*, 1998, 1999 & 2000; Zhang, 2003.

اساسی‌ترین تفاوت و تمایز کم آبیاری در زراعت آبی و آبیاری تکمیلی و تک آبیاری در زراعت دیم این است که «کم آبیاری به بهینه‌سازی مصرف آب از طریق کاهش آب مصرفی نسبت به آبیاری کامل» و «آبیاری تکمیلی و تک آبیاری به بهینه‌سازی مصرف آب از طریق تأمین حداقل آب مصرفی نسبت به شرایط دیم برای جبران کمبود بارش» می‌پردازند. در واقع نگرش کم آبیاری، بهینه‌سازی مصرف آب از بالا (آبیاری کامل) و نگرش آبیاری تکمیلی و تک آبیاری، بهینه‌سازی تأمین حداقل آب از پایین (شرایط دیم) است. تعیین و تبیین مزیت‌های نسبی این مدیریت‌ها و تلفیق این دو نوع مدیریت آبیاری منتج به پدید آمدن زراعت نیمه آبی و در راستای مدیریت تلفیقی آبیاری تکمیلی و تک آبیاری و یا «حداقل آبیاری» می‌شود. نقاط اشتراک و افتراق کم آبیاری با آبیاری تکمیلی و تک آبیاری در جدول (۱-۱۶) نشان داده شده است.

توصیه به کاربرد مقدماتی مدیریت کم آبیاری می‌تواند مقدمه اجرای پروژه ملی کم آبیاری در کشور باشد تا ضمن دستیابی به دستورالعمل جامع، نرم‌افزاری هوشمند و کارآ برای محصولات، مناطق و دشت‌های مختلف کشور تهیه شود.

به دلیل اینکه اعمال مدیریت کم آبیاری، میزان ریسک و خطرپذیری سیستم زراعی را به ویژه در شرایط خشکسالی افزایش می‌دهد. لذا بایستی جنبه‌های پیش‌آگاهی آن ملحوظ شده، انعطاف‌پذیری مجموعه سیستم در آن گنجانیده شود و دانش و بینش مروجین و زارعین در برخورد مناسب با شرایط حاد توسعه و ارتقاء یابد.

در زراعت آبی به نقش بارش و سیستم‌های حفظ رطوبت کمتر توجه می‌شود. لذا لازم است در طراحی، اجرا، بهره‌برداری و مدیریت سیستم‌های زراعی^۱، شیوه‌های حفظ رطوبت (اصلاح، تاریخ کاشت، کاربرد مالچ‌های خاکی، گیاهی و مصنوعی،

سیستم‌های کم‌خاک‌ورزی^۱ و بی‌خاک‌ورزی^۲، تناوب زراعی^۳، مدیریت بهینه مصرف کود^۴ و کشت مخلوط) مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۱-۱۶ نقاط اشتراک و افتراق کم آبیاری با آبیاری تکمیلی و تک آبیاری

کم آبیاری	آبیاری تکمیلی و تک آبیاری
سیستم استحصال آب تأمین شده و موجود است.	نیاز به تأمین و تهیه سیستم استحصال آب است.
از میزان آب مصرفی در شرایط طرح (آبیاری کامل) کاسته می‌شود.	به میزان آب مصرفی طبیعی (بارش) به طور مصنوعی (آبیاری) مقداری آب اضافه می‌شود.
با اعمال کم آبیاری، عملکرد در واحد سطح اندکی کاهش می‌یابد.	با اعمال آبیاری تکمیلی و تک آبیاری، عملکرد در واحد سطح نسبت به شرایط دیم، افزایش فوق‌العاده‌ای می‌یابد.
سیستم‌های مصرف آب، پیاده شده و به کارگیری آنها سهل و آسان است.	پیاده کردن و به کارگیری سیستم‌های مصرف آب به خاطر عدم تسطیح و داشتن شرایط طبیعی نیاز به مطالعه و انتخاب سیستم‌های مناسب دارد.
سبب افزایش کارایی مصرف آب می‌گردد.	سبب افزایش کارایی مصرف آب می‌گردند.
سبب افزایش بهره‌وری از آب مصرفی می‌گردد.	سبب افزایش بهره‌وری از آب مصرفی (بارش + آبیاری) می‌شوند.
از سه بعد زراعی، آماری و اقتصادی توجیه‌پذیر است.	از سه بعد زراعی، آماری و اقتصادی توجیه‌پذیر هستند.
نیازمند مدیریتی منسجم، آگاهانه و نظارتی است.	نیازمند مدیریتی منسجم، آگاهانه و نظارتی هستند.

میزان مصرف کودهای شیمیایی که تأثیر فزاینده‌ای بر افزایش رشد رویشی و متعاقب آن افزایش تبخیر - تعرق گیاهان دارد در مدیریت کم آبیاری اصلاح و بهینه

می‌گردد. تا حصول نتایج جامع، کاهش ۳۰-۲۰ درصد مصرف کودهای شیمیایی (به ویژه کودهای نیتروژن‌دار) پیشنهاد می‌گردد، که منطبق بر سیاست کاهش مصرف کودهای شیمیایی نیز هست.

در تهیه بسته نرم‌افزاری ترویج کم آبیاری و تدوین دستورالعمل جامع و هوشمند کم آبیاری بایستی نگرش، دیدگاه‌ها و نظرات سه سویه محقق، مروج و زارع با تکیه بر شرایط محیطی مورد توجه قرار گیرد، زیرا خلأ هر کدام و یا عدم انسجام بین این عوامل، نتایج واقعی را به دنبال نخواهد داشت.

انتقال یافته‌های تحقیقاتی از طریق برگزاری روز مزرعه در حین تحقیق، برگزاری هفته انتقال یافته‌ها و نیز اجرای تحقیقات خاتمه یافته در سایت‌های تحقیقاتی به صورت پایلوت در مزارع زارعین و در سطوح گسترده، با مشارکت معاونت ترویج و نظام‌های بهره‌برداری، بهترین شیوه برای انتقال نتایج در سطوح منطقه‌ای، استانی و ملی است. هم‌چنین نبایستی از نقش و تأثیر سامانه‌های اطلاعاتی جمعی (رادیو و تلویزیون و رسانه‌های مکتوب) غافل ماند.

هر کاهش آب مصرفی یا قطع آبیاری، در مقوله علمی کم آبیاری نمی‌گنجد. کاهش آب مصرفی در کم آبیاری آگاهانه، علمی و هدفمند صورت گرفته و برای آب صرفه‌جویی شده در سیستم زراعی پیش‌بینی‌های لازم صورت می‌گیرد.

مدیریت مصرف آب در هر منطقه بسیار اهمیت دارد. حاکم بودن شرایط حقایق یا شبکه بر منابع آب (انهار سنتی و پوشش شده، رودخانه‌ها، چاه، قنات، چشمه) در هر منطقه منحصر به فرد است. لذا بسته‌های نرم‌افزاری ترویج کم آبیاری به صورت منطقه‌ای تهیه اما به صورت ملی و کلان تحلیل، ارزیابی و مدیریت می‌گردد.

باور به نتایج تحقیقات کم آبیاری و اعمال هوشمندانه، جامع و علمی آن، سبب بهره‌برداری پایدار از منابع تولید (آب، خاک و محصول) می‌شود.

در پایان، ضمن اذعان به وجود تمام مزایا و محسّنات کم آبیاری و توصیه مؤکد به اجرای مدیریت کم آبیاری در سطح پروژه‌های بزرگ توسعه منابع آب و ایمان به کارآمد بودن و سودمندی آن در زراعت آبی، هرگز نباید از محدودیت‌ها و خطرات احتمالی و ریسک‌پذیری کم آبیاری چشم پوشید.

منابع مورد استفاده

۱. ابراهیمی‌پاک، ن. ۱۳۷۹. بهینه‌سازی کم آبیاری براساس تابع مصرف آب- عملکرد محصول یونجه همدانی در شهرکرد. دهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، صفحات ۲۸۸-۲۷۹.
۲. افلاطونی، م. ۱۳۷۰. اثر کمبود آب روی عملکرد دانه ذرت و تعیین تابع تولید. مجله علوم کشاورزی ایران ۲۲(۲۱): ۲۰-۱۱.
۳. اکبری، م. ۱۳۷۷. تأثیر کم آبیاری بر عملکرد چغندر قند. مجموعه مقالات نهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، صفحات ۱۸۹-۱۷۷.
۴. بای‌بوردی، ا.، م. ج. ملکوتی و م. اسلام‌زاده. ۱۳۸۰. نقش مصرف بهینه کود در افزایش عملکرد، بهبود کیفیت و کاهش نسبت مولی اسید فیتیک به روی (Pa/Zn) در مزارع گندم میانه. مجله خاک و آب ۱۲(۱۴): ۱۶-۱۰.
۵. بلسون، و. ۱۳۷۲. بررسی اثر میزان و زمان مصرف ازت روی عملکرد گندم دیم سرداری در مزرعه تحقیقاتی حیدرلوی ارومیه. مرکز تحقیقات کشاورزی آذربایجان غربی، شماره ۷۲/۱۸۲.
۶. بلسون، و. ۱۳۷۸. بررسی تأثیر آبیاری تکمیلی و مقادیر مصرف ازت در افزایش عملکرد ارقام گندم دیم. گزارش نهایی طرح تحقیقاتی مرکز تحقیقات کشاورزی آذربایجان غربی، شماره ۷۷/۷۸، ۱۹ ص.
۷. بی‌نام. ۱۳۷۸. آمار نامه کشاورزی اداره کل آمار و اطلاعات کشاورزی. معاونت برنامه‌ریزی و بودجه وزارت کشاورزی.
۸. بی‌نام. ۱۳۸۲. آمار نامه کشاورزی، جلد اول: محصولات زراعی و باغی. معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، دفتر آمار و فناوری اطلاعات، وزارت جهاد کشاورزی.
۹. پیکانی، غ. ر. ۱۳۸۱. مدل برنامه‌ریزی غیر خطی بسط داده شده جهت تخمین پارامترهای تابع تولید و بهینه‌سازی به طور هم‌زمان (ENLPM). مجله علوم کشاورزی ایران ۲۳(۲): ۲۳۲-۲۲۳.

۱۰. توشیح، و. ۱۳۷۳. بررسی اثر زمان و میزان مصرف کود اوره معمولی و اوره با پوشش گوگردی بر روی عملکرد گندم آبی. مرکز تحقیقات کشاورزی کردستان، شماره ۴۹/۷۴.
۱۱. توکلی، ع. ر. ۱۳۷۵. بررسی اثرات کم آبیاری روی چغندر قند و تعیین تابع تولید. پایان نامه کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران، ۱۰۸ ص.
۱۲. توکلی، ع. ر. ۱۳۷۵. بهینه سازی کم آبیاری بر اساس توابع تولید و هزینه با هدف بهره برداری پایدار از منابع آب کشاورزی. کنفرانس منابع آب، تبریز، صفحات ۲۵۳-۲۶۵.
۱۳. توکلی، ع. ر. ۱۳۷۸. ارائه برخی توصیه های تحقیقاتی - کاربردی پیرامون کم آبیاری. هفتمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان، صفحات ۱۸۹-۱۹۶.
۱۴. توکلی، ع. ر. ۱۳۷۹. بررسی نقش کم آبیاری بر هیدرومدول آبیاری. مجله آب، خاک، ماشین ۵۵: ۳۹-۴۳.
۱۵. توکلی، ع. ر. ۱۳۷۹. به گزینی مدیریت کم آبیاری بر مبنای الگوی کشت در طرح توسعه منابع آب. اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با کم آبی و خشکسالی، کرمان، صفحات ۲۰۵-۲۱۰.
۱۶. توکلی، ع. ر. ۱۳۷۹. کم آبیاری. نشریه ترویجی، معاونت ترویج، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی.
۱۷. توکلی، ع. ر. ۱۳۸۰. گام اول در کم آبیاری. نشریه زیتون، وزارت جهاد کشاورزی، صفحات ۴۱-۴۴.
۱۸. توکلی، ع. ر. ۱۳۸۲. اثر مقادیر مختلف آبیاری تکمیلی و نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم رقم سبلان. مجله نهال و بذر، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر ۱۹(۳): ۳۸۱-۳۶۷.
۱۹. توکلی، ع. ر. ۱۳۸۲. اثرات کم آبیاری و نیتروژن بر عملکرد و اجزای عملکرد گندم. مجله علمی کشاورزی ۲۶ (۲): ۷۵-۸۸.

۲۰. توکلی، ع. ر. ۱۳۸۳. افزایش بهره وری از آب مصرفی همراه با جنبه های زراعی و اقتصادی آن در تولید گندم. معادل رساله دکتری، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۵ ص.
۲۱. توکلی، ع. ر. ۱۳۸۳. به گزینی مدیریت آبیاری تکمیلی و بهینه سازی نیتروژن برای گندم دیم. مجله پژوهش و سازندگی، سازمان تحقیقات و آموزش کشاورزی، ویژه زراعت و باغبانی، ۱۷ (۱): ۴۲-۳۵.
۲۲. توکلی، ع. ر. ۱۳۸۴. بررسی و تعیین بهترین میزان تک آبیاری و تاریخ کاشت برای پنج رقم گندم در شرایط دیم. مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم، شماره ۱۲۳، ۸۴/۴۱۲ ص.
۲۳. توکلی، ع. ر. ۱۳۸۵. مدیریت کم آبیاری و بهینه سازی مصرف نیتروژن در تولید گندم الموت. مجله دانش کشاورزی، جلد ۱۶ شماره ۱ (پذیرفته شده برای چاپ).
۲۴. توکلی، ع. ر. و ح. فرداد. ۱۳۷۸. ارزیابی اقتصادی کم آبیاری روی محصول چغندر قند جهت بهینه سازی مصرف آب. مجله علوم کشاورزی ایران ۳۰ (۳): ۵۸۴-۵۷۵.
۲۵. توکلی، ع. ر. و. بلسون و ف. فری. ۱۳۷۹. بررسی اثرات آبیاری تکمیلی روی ارقام پیشرفته گندم دیم. مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم، شماره ۷۹/۷۲۹، ۵۰ ص.
۲۶. توکلی، ع. ر. و. بلسون، ر. رضوی و ف. فری. ۱۳۸۲. بررسی عکس العمل گندم دیم نسبت به سطوح مختلف آبیاری تکمیلی و نیتروژن. گزارش نهایی مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم، شماره ۳۱۵/۸۲، ۱۱۴ ص.
۲۷. جام جم، ع. ۱۳۷۵. تعیین میزان و زمان مصرف کود ازته در زراعت گندم دیم منطقه کرمانشاه. مرکز تحقیقات کشاورزی کرمانشاه، شماره ۷۵/۲۲۰.
۲۸. جانباز، ح. ر. ۱۳۷۵. مطالعه اثر تنش آبی و دور آبیاری بر عملکرد محصول گندم در منطقه کرج. پایان نامه کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

۲۹. حقیقتی ملکی، ا. ۱۳۷۷. بررسی و تعیین نیاز غذایی گندم دیم رقم سرداری. مؤسسه تحقیقات کشاورزی دیم، شماره ۷۷/۴۲۱.
۳۰. خلج، م. ع. ج. سیفی و م. مستشاری. ۱۳۸۰. بررسی و مقایسه اثرات استفاده از منابع کود ازته، زمان و میزان مصرف آنها بر روی گندم رقم C70-30. هفتمین کنگره علوم خاک ایران، شهرکرد، صفحات ۵۵۷-۵۵۸.
۳۱. خواجه عبدالله، م. ح. و ع. ر. سپاسخواه. ۱۳۷۵. بررسی اقتصادی آبیاری جویچه‌ای یک در میان با دوره‌های مختلف برای ذرت. مجله آب و توسعه، سال چهارم، صفحات ۵۴-۶۰.
۳۲. خیرابی، ج. و ع. ر. توکلی. ۱۳۷۶. بحث نظری و کاربردی در باره مدل‌های بهینه‌سازی کم آبیاری. مجله آب، خاک و ماشین ۲۷: ۴۰-۵۰ و ۲۸: ۳۳-۴۵.
۳۳. خیرابی، ج. و ع. ر. توکلی، م. ر. انتصاری و ع. ر. سلامت. ۱۳۷۵. دستورالعمل‌های کم آبیاری. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۲۱۸ ص.
۳۴. روحانی، ع. ۱۳۷۸. تعیین هیدرومدول آبیاری و رسم منحنی و کاربرد آن جهت طراحی کانال‌های آبیاری. ماهنامه آب، خاک، ماشین شماره ۴۷.
۳۵. سپاسخواه، ع. ر. ۱۳۷۵. کم آبیاری به روش جویچه‌ای یک در میان. هشتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران، صفحات ۲۹۱-۳۰۶.
۳۶. سهرابی مشک‌آبادی، ب. ۱۳۷۸. بررسی کم آبیاری به روش بارانی بر روی خواص کمی و کیفی پنبه. گزارش پژوهشی مؤسسه تحقیقات پنبه کشور.
۳۷. سهرابی، ت. ن. حیدری، ع. ر. توکلی و س. نیریزی. ۱۳۷۵. آبیاری موجی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۱۴۵ ص.
۳۸. سیاوشی، ک. ۱۳۷۶. تعیین نیاز غذایی دو رقم گندم (سرداری و چناب) در شرایط دیم (مناسب‌ترین مقدار ازت و فسفر). مرکز تحقیقات کشاورزی ایلام.
۳۹. شیخ حسینی، م. ۱۳۷۵. اثرات تنش آبی و دور آبیاری بر عملکرد محصول جو در منطقه کرج. پایان‌نامه کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

۴۰. ضیغمی گل، ر. ۱۳۷۸. بررسی اثرات کم آبیاری روی محصول پنبه و تعیین تابع تولید در منطقه گرگان. هفتمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان، صفحات ۲۱۶-۲۰۶.
۴۱. طلیعی، ع. ا. و ر. حق پرست. ۱۳۷۸. تأثیر سطوح مختلف ازت بر عملکرد و جذب عناصر K، P، N در ارقام امیدبخش گندم دیم. مجله نهال و بذر ۱۵(۲): ۱۶۹-۱۵۶.
۴۲. عطاری، ا. ع. و ع. اکبری. ۱۳۷۵. الموت، رقم جدید گندم زمستانه معرفی شده برای مناطق سردسیر کشور. مجله نهال و بذر ۱۲(۲): ۱۸-۱۰.
۴۳. عرب‌زاده، ب. و ع. ر. توکلی. ۱۳۸۴. به‌گزینی مدیریت کم آبیاری تنظیم شده در کشت نشایی برنج. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، جلد ۱۲ شماره ۴ (پذیرفته شده).
۴۴. علیزاده، ن. ۱۳۷۵. بررسی تأثیر میزان، زمان مصرف و منابع مختلف کودهای ازته شیمیایی در تولید گندم دیم. مرکز تحقیقات کشاورزی آذربایجان غربی.
۴۵. فردادج. و ح. ر. گلکار. ۱۳۸۱. تحلیل اقتصادی کم آبیاری گندم در شرایط کرج. مجله علوم کشاورزی ایران ۳۳(۲): ۳۱۲-۳۰۵.
۴۶. قهرمان، ب. و ع. ر. سپاسخواه. ۱۳۷۵. حداکثر عملکرد نسبی محصولات زراعی: چشم اندازی جدید در کم آبیاری. آب و توسعه ۱۴: ۲۵-۳۳.
۴۷. قهرمان، ب. و ع. ر. سپاسخواه. ۱۳۷۷. کم آبیاری بهینه تحت شرایط مختلف مقدار اولیه آب در نیمرخ خاک. نهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران، صفحات ۱۴۶-۱۳۵.
۴۸. کوچکی، ع. ۱۳۶۳. اثر دور آبیاری بر عملکرد و بعضی خصوصیات زراعی اسپرس. مجله علوم کشاورزی ایران ۱۵(۱ تا ۴): ۲۳-۱۵.
۴۹. ملکوتی، م. ج. م. نفیسی، ب. متشرع زاده، ک. خاوری، م. ح. مسیح‌آبادی، ح. رضایی و ک. بازرگان. ۱۳۸۰. تولید و مصرف بهینه کود در کشور، گامی ارزنده به سوی امنیت غذایی و دستیابی به کشاورزی پایدار. (یادداشت فنی) مجله خاک و آب ۱۲(۱۴): ۷-۱.

59. Anderson, W.K. 1985. Differences in response of winter cereal varieties to applied nitrogen in the field. I. Some factors affecting the variability of response between sites and seasons. *Field Crops Research* 11: 363-367.
60. Arkley, R.J. 1963. Relationship between plant growth and transpiration. *Hilgardia* 34: 559-584.
61. Artiola, J.F. 1991. Nonuniform leaching of nitrate and other solutes in a furrow irrigation sludge-amended field. *Commun. Soil Sci. and Plant Anal.* 22: 1013-1030.
62. Bair, W., Mogahen, J.H. and Agress, J.E. 1990. Effect of time and rate of N sidedress application on northern corn leaf blight severity and the associated yield loss. *J. Prod. Agric.* 3: 44-49.
63. Bhatti, M.A. and Kijne, J.W. 1992. Irrigation management potential of paddy/rice production in Punjab of Pakistan. PP. 355-366. In: Murty, V.V.N. and Koga, K. (Eds.), *Soil and Water Engineering for Paddy Field Management, Proceeding of the International Workshop on Soil and Water Engineering for Paddy Field Management, 28-30 Jan. 1992, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.*
64. Bhuiyan, S.I., Sattar, M.A. and Khan, M.A.K. 1995. Improving water use efficiency in rice irrigation through wet-seeding. *Irrigation Science* 16(1): 1-8.
65. Bock, B.R. 1984. Efficient use of nitrogen in cropping systems. PP. 273-294. In: *Nitrogen in Crop Production*. ASA, CSSA and SSSA, Inc., Madison, WI, USA.
66. Bouman, B.A.M. and Tuong, T.P. 2001. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated rice. *Agricultural Water Management* 49(1): 11-30.
67. Bounyolo, A., Muniyinda, K. and Karamanos, R.E. 1985. The effects of water and nitrogen on wheat yield on a Zambian soil. II. Evaluation of irrigation schedules. *Commun. Soil Sci. and Plant Anal.* 16: 43-53.
68. Box, J.E., Slettion, W.H., Kyle, J.H. and Pope, A. 1963. Effects of soil moisture, temperature and fertility on yield and quality of irrigation potatoes in Southern Plains. *Agron. J.* 55: 492-494.

۵۰. موسوی، س. ف.، ب. مصطفی زاده و ش. آبسالان. ۱۳۷۷. ارزیابی بازده سیستم آبیاری نواری در برخی مزارع استان کهگیلویه و بویراحمد. *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی* ۲(۴): ۱-۱۴.
۵۱. نوشاد، م. و آ. رونقی. ۱۳۷۸. افزایش بازده مصرف نیتروژن برای ذرت از طریق تجزیه نیترات خاک. *ششمین کنگره علوم خاک ایران، مشهد.*
۵۲. نیریزی، س. و ح. خیابانی. ۱۳۷۴. اثرات کاهش آب آبیاری و تغییرات آبدهی رودخانه‌ها در انتخاب حجم بهینه سدهای مخزنی. *کنفرانس منطقه‌ای مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، صفحات ۳۴۹-۳۳۹.*
۵۳. هنر، ت. و ع. ر. سپاسخواه. ۱۳۷۵. اصلاح و کاربرد مدل CRPSM برای مدیریت آبیاری ذرت. *هشتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، تهران، صفحات ۳۰-۱۷.*
54. Adary, A., Hachum, A., Oweis, T. and Pala, M. 2002. Wheat Productivity under Supplemental Irrigation in Northern Iraq. On-Farm Water Husbandry Research Report Series, No. 2, International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA), Aleppo, Syria.
55. Adeairan, J.A. and Banjorko, V.A. 1995. Response of maize to nitrogen, phosphorous and potassium fertilizer in the Savana zones of Nigeria. *Commun. Soil Sci. and Plant Anal.* 26: 593-606.
56. Aggarwal, P.K., and Karla, N. 1994. Analyzing the limitations set by climatic factors, genotype, and water and nitrogen availability on productivity of water. II. Climatically potential yields and optimal management strategies. *Field Crops Res.* 38: 93-103.
57. Aggarwal, P.K., Singh, A.K., Chaurvedi, G.S. and Sinha, S.K. 1986. Performance of wheat and critical cultivars in a variable soil - water environment. *Field Crops Res.* 13: 301-315.
58. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. *Irrigation and Drainage Paper, No. 56, FAO, 300 p.*

79. **Cooper, P.J.M.** and Gregory, P.J. 1987. Soil water management in the rainfed farming systems of the Mediterranean region. *Soil Use Manage.* 3(2): 57-62.
80. **Cooper, P.J.M.**, Gregory, P.J., Tully, D. and Harris, H.C. 1987. Improving water use efficiency of annual crops in rainfed farming systems of West Asia and North Africa. *Exp. Agric.* 23: 113-158.
81. **Day, A.D.** and Intalap, S. 1970. Some effects of soil moisture on the grown of wheat. *Agron. J.* 62: 27-29.
82. **De Wit, C.T.** 1958. Transpiration and crop yields. *Institute voor biologisch en scheikundig onderzoek van land' bouwgewassen, versel.* Landbouwkd, Onderz, 64.6 Wageningen, The Netherlands.
83. **Deju, Z.** and Jingwen, L. 1993. The water use efficiency of winter wheat and maize on a salt affected soil in the Huang Huai river plain of China. *Agric. Water Manage.* 23: 67-82.
84. **Dhanke, W.G.** and Vass, E. 1973. Testing soil for nitrogen. PP. 97-144. In: Walsh, L.M. and Beaton, J. (Eds.), *Soil Testing and Plant Analysis*, Revised Edition, Soil Sci. Soc. Am. Inc., Madison, WI.
85. **Donald, C.M.** and Hamblin, J. 1976. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. *Adv. Agron.* 28: 361-405.
86. **Doorenbos, J.** and Kassam, A.H. 1979. Yield response to water. *Irrigation and Drainage Paper No.33*, FAO, Rome.
87. **Doorenbos, J.** and Pruitt, W.O. 1977. Crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper No.24*, FAO, Rome.
88. **Draper, N.** and Smith, H. 1981. *Applied regression analysis*. Second Edition, Wiley and Sons, Inc., New York.
89. **Ehlig, C.F.** and LeMert, R.D. 1976. Water use and productivity of wheat under five irrigation treatments and canopy temperature of wheat as affected by drought. *Agron. J.* 70: 999-1004.
90. **English, M.** and Raja, S.N. 1996. Perspective on deficit irrigation. *Agric. Water Manage.* 32: 1-14.

69. **Brown, L.R.** 2001. *Eco-economy: building an economy for the earth.* Chapter 2. Signs of stress: climate and water. Earth Policy Institute, Washington, D.C.
70. **Cabangon, R.**, Tuong, T.P., Tiak, E.B. and Abdullah, N.B. 2002. Increasing water productivity in rice cultivation: Impact of large scale adoption of direct seeding in the Muda irrigation system. PP. 299-313. In: *Direct Seeding in Asian Rice Systems: Strategic Research Issues and Opportunities.* Proceeding of an International Workshop on Direct Seeding in Asia, Bangkok, Thailand, 25-28 Jan. 2000, IRRI, Makati City, Philippines.
71. **Caliandro, A.** and Boari, F. 1992. Supplementary irrigation in arid and semi-arid regions. In: *International Conference on Supplementary Irrigation and Drought Water Management.* Volume 1, Sep. 27-Oct. 2, 1992, Bari, Italy.
72. **Campbell, C.A.**, Selliers, F., Zentner, R.P. and McConkey, B.G. 1993. Available water and nitrogen effects on yield components and grain nitrogen of zero-till spring wheat. *Agron. J.* 85: 114-120.
73. **Cassel, D.K.** and Edwards, E.C. 1985. Effects of sub-soiling and irrigation on corn production. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 996-1001.
74. **Cerrato, M.E.** and Blackmer, A.M. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agron. J.* 82: 138-143.
75. **Chow, V.T.**, Maidment, D.R. and Mays, L.W. 1988. *Handbook of applied hydrology.* McGraw-Hill, New York, 527 p.
76. **CIMMYT.** 1991. Diagnosing factors limiting productivity in wheat production, the wheat plants system.
77. **Cole, J.S.** and Mathews, O.R. 1923. Use of water by spring wheat in the Great Plains under limited rainfall. USDA, Bur. Plant Ind. Dull, 1004.
78. **Cooper, J.L.** 1980. The effects of nitrogen fertilizer and irrigation frequency on semi-dwarf wheat in southeast Australia. 1. Growth and yield. 2. Water use. *Aust. J. Exp. Agric. Husb.* 20: 359-369.

- Modeling Plant and Soil System. Soil Sci. Soc. Am., Vol. 31, Madison, WI., USA.
104. Gorantiwar, S.D. and Smout, I.K. 2003. Allocation of scarce water resources using deficit irrigation in rotational systems. ASCE, J. Irrig. and Drain. Eng. 129(3): 155-163.
 105. Gregory, P.J. 1991. Concepts of water use efficiency. PP. 539-547. In: Harris, H.C., Cooper, P.J.M. and Pala, M. (Eds.), Soil and Crop Management for Improved Water Use Efficiency in Rainfed Areas. Proceeding of an International Workshop, Ankara, Turkey, 1989, ICARDA, Aleppo, Syria.
 106. Grimes, D.W., Welhood, V.T. and Dicknes, W.I. 1968. Alternate furrow irrigation for San-Joaquin Valley cotton. Calif. Agric. 22: 4-6.
 107. Gujarati, D. 1978. Basic econometrics. McGraw-Hill Higher Education, New York.
 108. Guy, S.O., Tablas-Romero, H. and Heikkinen, M.K. 1995. Agronomic responses of winter wheat cultivars to management systems. J. of Prod. Agric. 8: 529-535.
 109. Hang, A.N. and Miller, D.E. 1983. Wheat development as effected by deficit high frequency sprinkler irrigation. Agron. J. 75: 234-239.
 110. Hanks, R.J. 1974. Model for predicting plant yield as influenced by water use. Agron. J. 66: 660-665.
 111. Hanks, R.J. and Rasmussen, V.P. 1982. Predicting crop production as related to plant water stress. Adv. Agron. 35: 193-215.
 112. Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. 1984. Economic consideration of deficit irrigation. ASCE, J. Irrig. and Drain. Div. 110(4): 343-358.
 113. Harmsen, K., Shepherd, K.D. and Allan, A.Y. 1983. Crop response to nitrogen and phosphorus in rain-fed agriculture. PP. 223-248. In: Nutrient Balances and the Need for Fertilizers in Semi Arid and Arid Regions. International Potash Institute, Bern, Switzerland.

91. English, M.J. 1990. Deficit irrigation: Analytic framework. ASCE, J. Irrig. and Drain. Eng. 116(3): 399-412.
92. English, M.J. and James, L. 1990. Deficit irrigation. II: Observation in Colombia basin. ASCE, J. Irrig. and Drain. Eng. 116: 413-426.
93. English, M.J. and Nuss, G.S. 1982. Designing for deficit irrigation. ASCE, J. Irrig. and Drain. Eng. 108(2): 91-106.
94. English, M.J. and Orlob, G.T. 1978. Decision theory applications and irrigation optimization. California Water Resources Center Contribution, No. 174, University of California, Davis, CA.
95. English, M.J., Musick, J.T. and Murty, V.N. 1990. Deficit irrigation. PP. 631-663. In: Hoffman, G.J., Howell, T.A. and Solomon, K.H. (Eds.), Management of Farm Irrigation Systems, ASAE, St. Joseph, Michigan.
96. FAO. 1988. World agriculture toward 2000: An FAO study, Belhaven Press, London.
97. FAO. 1992. CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management. Irrigation and Drainage Paper No. 26, Rome.
98. FAO. 2002. Deficit irrigation practices. Water Report No. 22, Rome, 102 p.
99. Fischbach, P.E. and Mulliner, H.R. 1974. Every other furrow irrigation of corn. Trans. of the ASAE 17(3): 426-428.
100. Fischer, R.A. 1970. The effects of water stress at various stages of development on yield processes in wheat. Proc. Symp. Plant Response to Climatic Factors, Uppsala, Sweden, 15-20 Sept.
101. Fisher, W.D. 1961. A note on curve fitting with minimum deviations by linear programming. J. American Statistical Association 56: 359-362.
102. Gahreman, B., Zand-Parsa, Sh. and Sepaskhah, A.R. 2001. Deficit irrigation for corn: A comparison of two methods. Iran Agric. Res. 20: 1-16.
103. Godwin, D.C. and Jones, C.A. 1991. Nitrogen dynamics in plant system. PP. 287-321. In: Hanks, J. and Ritchie, J.T. (Eds.),

125. Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J. and Pinter, P.J. 1980. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Res.* 17(4): 1133-1138.
126. James, R.C. and Roger J.V. 1991. Wheat health management. APS Press, The American Psychopathological Experimentation Design and Analysis, John Wiley and Sons.
127. Jensen, M.E. 1968. Water consumption by agricultural plants. In: *Water Deficits in Plant Growth*. Kolowski, T.T. (Ed.), 1: 1-22, Academic Press, N.Y.
128. Jensen, M.E. 1987. New technology related to water policy-engineering. PP. 43-49. In: Jordan, W.R. (Ed.), *Proc. Water and Water Policy in World Food Supplies Conf.*, College Station. TX, 26-30 May, Texas A&M Univ. Press, College Station.
129. Jensen, M.E., Rangeley, W.R. and Dieleman, P.J. 1990. Irrigation trends in world agriculture. PP. 31-67. In: Stewart, B.A. and Nielsen, D.R. (Eds.), *Irrigation of Agricultural Crops*. Agronomy Monograph No. 30, ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA.
130. Johnson, J. 1972. *Econometric methods*. Second Edition, McGraw-Hill, New York.
131. Judge, G., Griffiths, W.E., Caterhill, R. and Lee, T. 1980. *The theory and practice of econometrics*. J. Wiley and Sons, Inc., New York.
132. Kijne, J.W., Barker, R. and Molden, D. 2003. Improving water productivity in agriculture, editor's overview. In: Kijne, J.W., Barker, R. and Molden, D. (Eds.), *Water Productivity in Agriculture, Limits and Opportunities for Improvement*. International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka.
133. Kirda, C. and Kanber, R. 1999. Water, no longer a plentiful resource, should be used sparingly in irrigated agriculture. In: Kirda, C., Moutonnet, P., Hera, C. and Nielsen, D.R. (Eds.), *Crop Yield Response to Deficit Irrigation*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.

114. Heady, E.O. and Dillon, J.L. 1988. *Agricultural production functions*. Kalyani Publishers, New Delhi, Ludhiana, 667 p.
115. Hiler, E.A. and Clark, R.N. 1971. Stress day index to characterize effects of water stress on crop yields. *Trans. of the ASAE* 14: 757-761.
116. Hodges, M.E., Stone, J.F. and Reeves, H.E. 1989. Yield variability and water use in wide-spaced furrow irrigation. *Agric. Water Manage.* 16: 5-13.
117. Hoffman, G.J., Howell, T.A. and Solomon, K.H. 1990. *Management of farm irrigation systems*. ASAE, Michigan.
118. Howard, S., Hanson, J.D. and Benjamin, J.G. 1999. Nitrogen uptake and partitioning under alternate and every furrow irrigation. *Plant and Soil* 210: 11-20.
119. Howell, T.A. 1990. Relationships between crop production and transpiration, evapotranspiration and irrigation. PP. 391-434. In: Stewart, B.A. and Nielsen, D.R. (Eds.), *Irrigation of Agricultural Crops*. Agronomy Monograph No. 30, ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, USA.
120. Howell, T.A., Ziska, L.H., McCormick, R.L., Burtch, L.M. and Fischer, B.B. 1987. Response of sugarbeet to irrigation frequency and cut-off on a clay loam soil. *Irrig. Sci.* 8: 1-11.
121. Hussain, G.H. and Al-Jaloud, A. 1998. Effect of irrigation and nitrogen on yield, yield components and water use efficiency of barley in Saudi Arabia. *Agric. Water Manage.* 36: 55-70.
122. IAEA. 1996. *Nuclear techniques to assess irrigation schedules for field crops*. IAEA-TECDOC - 888, Vienna.
123. Islam, M.M., Iyamuremye, F. and Dick, R.P. 1998. Effect of organic residue amendment on mineralization of nitrogen in flooded rice soil under laboratory condition. *Commun. Soil Sci. and Plant Anal.* 29(7/8): 971-981.
124. Jackson, R.D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. In: *Advances in Irrigation*. Hillel, D. (Ed.), 1:43-85, Academic Press, N.Y.

146. Mossdaq, F. and Smith, D.H. 1994. Timing nitrogen application to enhance spring wheat yield in a Mediterranean climate. *Agron. J.* 86: 221-226.
147. Moutonnet, P. 2002. Yield response factors to field crops to deficit irrigation. PP. 11-15. In: Kirda, C., Moutonnet, P., Hera, C. and Nielsen, D.R. (Eds.), *Crop Yield Response to Deficit Irrigation*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.
148. Musick, J.T and Walker, J.D. 1987. Irrigation practices for reduced water application- Texas High Plains. *Appl. Eng. Agric.* 3(2): 190-195.
149. Musick, J.T. and Porter, K.B. 1990. Wheat. In: Steward, B.A. and Nielsen, D.R. (Eds.), *Irrigation of Agricultural Crops*, Agronomy Series No. 30, Madison, Wisconsin.
150. Myers, R.J.K., Foale, M.A. and Done, A.A. 1984. Responses of grain sorghum to varying irrigation frequency in the Ord irrigation area. II. Evapotranspiration, water use efficiency and root distribution of different cultivars. *Aus. J. Agric. Res.* 35(1): 31-42.
151. New, L. 1971. Influence of alternate furrow irrigation and time of application on grain sorghum production. *Tex. Agric. Exp. Prog. RPT. No. 2953*, pp. 26-32.
152. Novoa, R. and Loomis, R.S. 1981. Nitrogen and plant production. *Plant Soil* 58: 177-204.
153. Orgaz, F., Mateos, L. and Fereres, E. 1992. Season length and cultivar determine the optimum evapotranspiration deficit in cotton. *Agron. J.* 84: 700-706.
154. Oweis, T. 1997. Supplemental irrigation: a highly efficient water use practice. ICARDA, Aleppo, Syria, 16 p.
155. Oweis, T. and Hachum, A. 2003. Improving water productivity in the dry areas of West Asia and North Africa. PP. 179-198. In: Kijne, J.W., Barker, R. and Molden, D. (Eds.), *Water Productivity in Agriculture, Limits and Opportunities for Improvement*, International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka.

134. Kirda, C. 2002. Deficit irrigation scheduling based on plant growth stages showing water stress tolerance. PP. 3-10. In: FAO, *Water Report No. 22, Deficit Irrigation Practices*.
135. Kitamura, Y. 1990. Management of an irrigation system for double cropping culture in the tropical monsoon area. *Technical Bulletin 27, Tropical Agricultural Research Center, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, Tsukuba, Ibaraki, Japan*.
136. Kmenta, J. 1971. *Elements of econometrics*. McMillan, New York.
137. Krentons, U.D. and Orphonos, P.J. 1979. Nitrogen and phosphorous fertilizers for wheat and barley in a semi arid and arid region. *J. Agric. Sci.* 93: 711-717.
138. Krieg, D.R. 1986. Cotton growth and development. In: *Proc. Drip Irrigation Cotton. Symp. Exl. Ser., Midland, TX*.
139. Lal, R.B. 1985. Irrigation requirement of dwarf durum and *aestivum* wheat varieties. *Indian J. Agron.* 30: 207-213.
140. Liao, C.F.H. and Bartholomew, W.V. 1974. Relation between nitrate absorption and water transpiration by corn. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38: 472-479.
141. Maas, E.V. 1986. Salt tolerance of plants. *Appl. Agric. Res.* 1: 12-26.
142. Maas, E.V. and Hoffman, G.J. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *ASCE, J. Irrig. and Drain. Div.* 103(2): 115-134.
143. Mathews, O.R. and Brown, L.A. 1938. Winter wheat and sorghum productions in the southern Great Plains under limited rainfall. *USDA Circ. 477*, U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C.
144. Minhas, B.S., Parikh, K.S. and Srinivasan, T.N. 1974. Toward the structure of a production function for wheat yields with dated inputs of irrigation water. *Water Resources Res.* 10: 383-393.
145. Misra, R.D. 1973. Responses of corn to different sequences of water stress as measured by evapotranspiration deficits. *Ph.D Dissertation, Univ. of California, Davis*.

165. Pang, X.P. and Letey, J. 1998. Development and evaluation of ENVIRO-GRO, an integrated water salinity and nitrogen model. Soil Sci. Soc. Am. J. 62: 1418-1427.
166. Perrier, E.R. and Salkini, A.B. 1991. Supplemental irrigation in the Near East and North Africa. ICARDA, Aleppo, Syria.
167. Perry, C.J. and Narayanamurthy, S.G. 1998. Farmer response to rationed and uncertain irrigation supplies. IWMI, Research Report Series No.24, Colombo, Sri Lanka.
168. Pirmoradian, N., Sepaskhah, A.R. and Maftoun, M. 2004. Deficit irrigation and nitrogen effects on nitrogen-use efficiency and grain protein of rice. Agronomy for Sustainable Development 24: 143-153.
169. Pirmoradian, N., Sepaskhah, A.R. and Maftoun, M. 2004. Effects of water saving irrigation and nitrogen fertilization on yield and yield components of rice (*Oryza sativa* L.). Plant Prod. Sci. 7(3): 336-345.
170. Qian, J.H., Doran, J.W., Weier, K.L., Mosier, A.R., Peterson, T.A. and Power, J.F. 1997. Soil denitrification and nitrous losses under corn irrigated with high-nitrate ground water. J. Environ. Qual. 26: 360-378.
171. Ragab, R. 1996. Constraints and applicability of irrigation scheduling under limited water resources, variable rainfall and saline conditions. In: Irrigation Scheduling: From Theory to Practice. Proc. ICID/FAO Workshop on Irrigation Scheduling, 12-13 Sept., 1995, Rome, Italy.
172. Rao, Y.G. and Bhardwaj, R.B.L. 1981. Consumptive use of water, growth and yield of aestivum and durum wheat varieties at varying levels of nitrogen under limited and adequate irrigation situations. Indian J. Agron. 26: 243-250.
173. Raun, W.R. and Johnson, G.V. 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. Agron. J. 91: 357-363.
174. Rockstorm, J., Barron, J. and Fox, P. 2003. Water productivity in rainfed agriculture: Challenges and opportunities for smallholder farmers in drought prone tropical agro ecosystems. In: Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for

156. Oweis, T. and Hachum, A. 2004. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. 4th International Crop Science Congress, 26th Sep. to 1st Oct. 2004, Queensland, Australia.
157. Oweis, T. and Zhang, H. 1996. Water use efficiency: Index for optimizing supplemental irrigation of wheat in water scarce areas. J. of Applied Irrig. Sci. Vol. 33, No. 2.
158. Oweis, T., Hachum, A. and Kijne, J. 1999. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water use efficiency in dry areas. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, SWIM Paper No. 7, 38 p.
159. Oweis, T., Hachum, A. and Pala, M. 2004a. Water use efficiency of winter-sown chickpea under supplemental irrigation in a Mediterranean environment. Agric. Water Manage. 66: 163-179.
160. Oweis, T., Hachum, A. and Pala, M. 2004b. Lentil production under supplemental irrigation in a Mediterranean environment. Agric. Water Manage. 68: 251-256.
161. Oweis, T., Pala, M. and Ryan, J. 1998. Stabilizing rainfed wheat yields with supplemental irrigation and nitrogen in a Mediterranean climate. Agron. J. 90: 672-681.
162. Oweis, T., Salkini, A., Zhang, H., Ilbeyi, A., Ilustun, H., Dernek, Z. and Erdem, G. 2001. Supplemental irrigation potential for wheat in the central Anatolian plateau of Turkey. ICARDA.
163. Pala, M. and Studer, C. 1999. Cropping systems management for improved water use efficiency in dryland agriculture. International Conference on Water Resources Conversation and Management in Dry Areas, 3-6 December 1999, Amman, Jordan.
164. Pala, M., Mater, A. and Mazid, A. 1996. Assessment of the effects of environmental factors on the response of wheat to fertilizer in on-farm trials in northern Syria. Exp. Agric. 32(3): 339-349.

185. Sepaskhah, A.R., and M.H. Khajehabdollahi. 2005. Alternate furrow irrigation with different irrigation intervals for maize (*Zea mays L.*). Plant Prod. Sci. 8(5): 594-602.
186. Sepaskhah, A.R., Gahreman, B., Zand-Parsa, Sh. and Ghasemi, S.S. 2005. Deficit irrigation for sorghum: A comparison of two methods. Iran Water Resources Res. (Submitted).
187. Sharma, D.K., Kumar, A. and Singh, K.N. 1990. Effect of irrigation scheduling on growth, yield and evapotranspiration of wheat in sodic soils. Agric. Water Manage. 18: 267-276.
188. Shearer, M.N. 1978. Comparative efficiency of irrigation systems. Proc. Annual Tech. Conf., pp. 183-188. The Irrigation Association.
189. Shimshi, D. and Kafkafi, U. 1978. The effects of supplemental irrigation and nitrogen fertilization on wheat (*Triticum aestivum L.*). Irrig. Sci. 1: 27-38.
190. Singh, N.P. and Dastane, N.G. 1971. Effects of moisture regimes and nitrogen levels on growth and yield of dwarf wheat varieties. Indian J. Agric. Sci. 41: 952-958.
191. Skaggs, R.W., Miller, D.E. and Brooks, R.H. 1980. Soil water properties. In: Design and Operation of Farm Irrigation Systems. ASAE Monograph No. 3, St. Joseph, MI.
192. Smith, M. and Kivumbi, D. 2002. Use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies. PP. 17-28. In: Kirda, C., Moutonnet, P., Hera, C. and Nielsen, D.R. (Eds.), Crop Yield Response to Deficit Irrigation, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands.
193. Stenitzer, E. 1996. Irrigation scheduling with gypsum blocks in Austria. In: Irrigation Scheduling: From Theory to Practice, Proc. ICID/FAO Workshop, 1995, Water Reports No. 8, FAO, Rome.
194. Stewart, B.A. and Musick, J.T. 1982. Conjunction use of irrigation and rainfall in semi arid regions. Advan. in Agron. 1: 1-23.
195. Stewart, B.A. and Nielsen, D.R. 1990. Irrigation of agricultural crops. Agronomy Monograph No. 30. USA, 1218 p.

- Improvement, International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka, pp. 145-162.
175. Saeed, L.A. and Nadi, M.A. 1997. Irrigation effects on the growth yield and water use efficiency of alfalfa. Irrig. Sci. 17: 63-68.
176. Salam, A.M. and Subramanian, S. 1988. Influence of zinc, nitrogen and their interaction on the yield and nutrient uptake of "IR20" rice (*Oryza sativa L.*) in different seasons. Indian J. Agric. Sci. 58: 190-193.
177. Salter, P.J. and Goode, J.E. 1967. Crop response to water at different stages of growth. Common. Bur. Hortic. Plant Crops (G.B), Res. Rev. 2, Farnham Royal, G.B.
178. Samadi, A., and A.R. Sepaskhah. 1984. Effects of alternate furrow irrigation on yield and water use efficiency of dry beans. Iran Agric. Res. 3(2): 95-115.
179. Sankhayan, P.L. 1988. Introduction to the economics of agricultural production. Prentice Hall International, Inc., India.
180. Schneider, A.D. and Howell, T.A. 1996. Methods, amounts and timing of sprinkler irrigation for winter wheat. Trans. of the ASAE 40: 137-142.
181. Schneider, A.D., New, L.L. and Musick, J.T. 1976. Reducing tail water runoff for deficit irrigation water use. Trans. of the ASAE 19(6): 1093-1097.
182. Sepaskhah, A.R. and Akbari, D. 2005. Deficit irrigation planning under variable seasonal rainfall. Biosys. Eng. 92(1): 97-106.
183. Sepaskhah, A.R., and A.A. Kamgar-Haghighi. 1997. Water use and yield of sugarbeet grown under every other furrow irrigation with different irrigation intervals. Agric. Water Manage. 34: 71-79.
184. Sepaskhah, A.R., and A.R. Parand. 2006. Alternate furrow irrigation with supplemental every furrow irrigation at different growth stage of maize (*Zea mays L.*). Plant Prod. Sci. (Pending for publication).

206. Theil, H. 1978. Introduction to econometrics. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
207. Trimmer, W.L. 1990. Partial irrigation in Pakistan. ASCE, J. Irrig. and Drain. Eng, 116(3): 342-353.
208. Tuong, T.P. 1999. Methods for increasing rice water use efficiency. PP. 45-46. In: Rice Water Use Efficiency Workshop Proceeding, CRC for Sustainable Rice Production, Lenton.
209. Tuong, T.P. and Bouman, B.A.M. 2003. Rice production in water scarce environments. In: Kijne, J.W., Barker, R. and Molden, D. (Eds.), Water Productivity in Agriculture, Limits and Opportunities for Improvement, International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka.
210. Turner, N.C. 1997. Further progress in crop water relations. Advan. in Agron. 58: 293-338.
211. Vanangamudi, K.K., Selvaraj, V. and Kulandaivelu, R. 1984. Influence of irrigation on the yield quality of finger millet. Seed Sci. Tech. 18: 383-286.
212. Vaux, H.J. and Pruitt, W.O. 1983. Crop water production functions. PP. 61-97. In: Hillel, D. (Ed.), Advances in Irrigation, Vol. 2, Academic Press, New York.
213. Viets, F.G., Jr. 1962. Fertilizers and the efficient use of water. Advan. in Agron. 14: 223-264.
214. Wagner, H.M. 1959. Linear programming and regression analysis. J. American Statistical Association 54: 206-212.
215. Wannacott, R. and Wannacott, T. 1979. Econometrics. Second Edition, Wiley and Sons, New York.
216. Weinhold, B.J., Todd, P.T. and Richman, G.A. 1995. Yield and nitrogen efficiency of irrigated corn in north Great Plains. Agron. J. 87: 842-846.
217. Wilson, H. 1978. Least square versus minimum absolute deviations estimation in linear models. Decision Science 9: 322-335.
218. Zand-Parsa, Sh. and Sepaskhah A.R. 2001. Optimal applied water and nitrogen for corn. Agric. Water Manage. 52: 73-85.

196. Stewart, B.A., Musick, J.T. and Dusek, D.A. 1983. Yield and water use efficiency of grain sorghum in a limited irrigation dryland farming system. Agron. J. 75: 629-634.
197. Stewart, G.I., Cuenca, R.H., Pruitt, W.O., Hagan, R.M. and Tosso, J. 1977. Determination and utilization of water production functions for principal California crops. W-67 Calif. Contrib. Proj. Rep., Univ. of California, Davis.
198. Stewart, J.I. 1977. Research based strategy for conservation irrigation of field crops-preplant planning. Dept. of Land, Air and Water Resources, University of California, Davis.
199. Stewart, J.I., Hagan, R.M., Pruitt, W.O., Hanks, R.J., Riley, J.P., Danielson, R.E., Franklin, W.T. and Jackson, E.B. 1977. Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. Utah Water Res. Lab. Publ. PRWG, 151-10.
200. Stone, J.F. and Nofzigar, D.L. 1993. Water use and yield of cotton grown under wide-spaced furrow irrigation. Agric. Water Manage. 24: 27-38.
201. Stone, J.F., Garton, J.E., Webb, B.B. and Keflemariam, J. 1979. Irrigation water conservation using wide-spaced furrows. Soil Sci. Soc. Am. J. 43: 407-411.
202. Sundquist, B. 2003. The earth's carrying capacity: Some literature reviews. Available at: WWW.home.alltel.net/bsundquist1/ir6c.html.
203. Tanner, C.B. and Sinclair, T.R. 1983. Efficient water use in crop production: Research or re-search? PP. 1-27. In: H.M. Taylor et al., (Eds.), Limitations of Efficient Water Use in Crop Production, ASA and SSSA, Madison, WI.
204. Tavakkoli, A.R. and Oweis, T. 2004. The role of supplemental irrigation and nitrogen in producing bread wheat in the highlands of Iran. Agric. Water Manage. 65: 225-236.
205. Tavakoli, A.R., Oweis, T., Ferri, F., Haghighati, A., Belson, V., Pala, M., Siadat, H. and Ketata, H. 2005. Supplemental Irrigation in Iran: Increasing and Stabilizing Wheat Yield in Rainfed Highlands. On-Farm Water Husbandry Research Report Series No. 5, 46 p, ICARDA, Aleppo, Syria.

لیست انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران

شماره	نام کتاب
۱	فرهنگ فنی آبیاری و زهکشی
۲	تحلیلی بر رانده‌مانهای آبیاری
۳	سالنامه سال ۱۳۷۳
۴	سالنامه سال ۱۳۷۴
۵	دستورالعمل‌های کم آبیاری
۶	مجموعه مقالات ششمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
۷	مجموعه مقالات هفتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
۸	مجموعه مقالات هشتمین سمینار کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
۹	ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری و زهکشی و عوامل مؤثر در آن
۱۰	آبیاری موجی
۱۱	آشنایی با آبیاری کابلی
۱۲	مدیریت محلی سیستم‌های آبیاری و زهکشی
۱۳	راهنمای ارزیابی اثرات زیست محیطی طرح‌های آبیاری و زهکشی
۱۴	مجموعه مقالات اولین کارگاه فنی ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری و زهکشی
۱۵	راهنمای احداث زهکش‌های زیرزمینی
۱۶	معرفی جهات نظری و کاربردی روش پمن - مانیتس
۱۷	Water and Irrigation Techines in Ancient IRAN
۱۸	تلاش ایرانیان در تأمین و مدیریت توزیع آب
۱۹	تحلیلی بر ارزیابی اثرات زیست محیطی طرح‌های آبیاری و زهکشی
۲۰	تجارب جهانی مشارکت کشاورزان در مدیریت آبیاری
۲۱	مجموعه مقالات نهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
۲۲	مفاهیم زهکشی و شوری آب و خاک
۲۳	مجموعه مقالات کارگاه مسائل و مشکلات اجرای شبکه‌های زهکشی
۲۴	معیارهای انتخاب سیستم‌های آبیاری

219. Zhang, H. 2003. Improving water productivity through deficit irrigation: Examples from Syria, the North China plain and Oregon, USA. PP. 301-309. In: Kijne, J.W., Barker, R. and Molden, D. (Eds.), Water Productivity in Agriculture, Limits and Opportunities for Improvement, International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka.
220. Zhang, H. and Oweis, T. 1999. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. Agric. Water Manage. 38: 195-211.
221. Zhang, H., Oweis, T., Garabet, T.S. and Pala, M. 1998. Water use efficiency and transpiration efficiency of wheat under rainfed conditions and supplemental irrigation in a Mediterranean type environment. Plant and Soil 201: 295-305.
222. Zhang, H., Pala, M., Oweis, T. and Harris, H. 2000. Water use and water use efficiency of chickpea and lentil in a Mediterranean environment. Aus. J. of Agric. Res. 51: 295-304.
223. Zhang, H., Wang, X., You, M. and Liu, C. 1999. Water-yield relations and water use efficiency of winter wheat in North China Plain. Irrig. Sci. 19: 37-45.

۲۵	فن سنجش از دور در آبیاری و زهکشی
۲۶	استفاده از آب‌های شور و لب شور برای آبیاری
۲۷	مجموعه مقالات همایش مشارکت کشاورزان در مدیریت شبکه‌های آبیاری
۲۸	مجموعه مقالات همایش جنبه‌های زیست محیطی استفاده از پساب‌ها در آبیاری
۲۹	فرهنگ آب و آبیاری سنتی
۳۰	مجموعه مقالات دومین کارگاه فنی ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری و زهکشی
۳۱	چاره آب در تاریخ فارس
۳۲	مجموعه مقالات کارگاه آموزشی مدیریت استفاده از آب‌های شور
۳۳	جنبه‌های مالی مدیریت آب
۳۴	عرضه و تقاضای آب در جهان از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۵ «سناریوها و مسائل»
۳۵	تدارک برای انجام پروژه‌های کوچک آبیاری
۳۶	خلاصه مقالات کارگاه فنی - آموزشی کم آبیاری
۳۷	مجموعه مقالات کارگاه فنی - آموزشی آبیاری میکرو
۳۸	مجموعه مقالات دهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
۳۹	مجموعه کارگاه فنی ساخت کانال‌های آبیاری، محدودیت‌ها و راه حل‌ها
۴۰	راهنمای روش‌های غیرسازه‌ای مدیریت سیلاب
۴۱	مجموعه مقالات کارگاه فنی روش‌های غیرسازه‌ای مدیریت سیلاب
۴۲	مجموعه مقالات دومین کارگاه فنی زهکشی
۴۳	مدیریت کیفیت زه‌آب‌های کشاورزی
۴۴	نرم‌افزارهای مرتبط با آبیاری و زهکشی (جلد اول)
۴۵	انسان و آب
۴۶	چاره آب در تاریخ فارس (جلد دوم)
۴۷	استفاده از فاضلاب‌های تصفیه شده در کشاورزی
۴۸	CD کتاب‌ها و نشریات مؤسسات بین‌المللی
۴۹	راهنمای مقابله با خشکسالی
۵۰	مجموعه مقالات کارگاه آموزشی کاربرد اینترنت در آبیاری
۵۱	مجموعه مقالات همایش تاریخ آب و آبیاری کشور

۵۲	سومین کارگاه فنی ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری و زهکشی
۵۳	مجموعه مقالات همایش اثرات زیست محیطی پساب‌های کشاورزی بر آب‌های سطحی و زیرزمینی
۵۴	لوح فشرده فرهنگ فنی آبیاری و زهکشی (انگلیسی - فرانسه)
۵۵	رهنمودهای انتقال مدیریت خدمات آبیاری
۵۶	راهنمای پایش و ارزشیابی انتقال مدیریت آبیاری
۵۷	زهکشی: کمیت و کیفیت جریان برگشتی
۵۸	واکنش گیاهان به شوری
۵۹	نگرشی بر مسائل و مشکلات مطالعات و اجرای زهکشی زیرزمینی در ایران
۶۰	برنامه‌ریزی مدیریت بهره‌برداری و نگهداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۶۱	بررسی و مقایسه تطبیقی روش پنمن - مانتیس با روش‌های فائو ۲۴ در ایران
۶۲	لوح فشرده نرم‌افزارهای مرتبط با آبیاری و زهکشی (نسخه شماره ۲)
۶۳	مدیریت آب در کشاورزی: پیامدهای اقتصادی - اجتماعی
۶۴	قیمت‌گذاری آب آبیاری: بررسی ادبیات موضوع
۶۵	دانشنامه مشاهیر فنون آب و آبیاری و سازه‌های آبی
۶۶	لوح فشرده مجموعه مقالات کنفرانس‌های بین‌المللی
۶۷	لوح فشرده مجموعه مقالات کارگاه تخصصی مدیریت بهره‌برداری و نگهداری از شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۶۸	استاندارد ادوات و تجهیزات آبیاری تحت فشار
۶۹	استفاده از آب‌های شور در کشاورزی پایدار
۷۰	نظریه‌ها و مدل‌های زهکشی
۷۱	مدیریت نوین آبیاری و تأثیر آن بر عملکرد شبکه‌های آبیاری
۷۲	آبیاری در مقیاس کوچک برای مناطق خشک، اصول و روش‌ها
۷۳	نگرشی بر روند توسعه و چشم‌انداز آبیاری تحت فشار در ایران
۷۴	مهار آلودگی آب ناشی از فعالیت‌های کشاورزی
۷۵	استفاده از لوله‌های کم فشار در آبیاری سطحی
۷۶	مدیریت آب آبیاری در مزرعه

۷۷	ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری تحت فشار بر مبنای تقاضا
۷۸	تاریخ آب و آبیاری استان کرمان
۷۹	لوح فشرده مجموعه مقالات راهکارهای مدیریت خشکسالی (Workshop on Drought Management Strategies)
۸۰	دانشنامه مشاهیر فنون آب و آبیاری و سازه‌های آبی (جلد دوم)
۸۱	مواد و مصالح سامانه‌های زهکشی زیرزمینی
۸۲	بهره‌وری آب کشاورزی
۸۳	مجموعه مقالات یازدهمین همایش کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران
۸۴	تحلیلی بر مسائل و مشکلات ساخت کانال‌های آبیاری در ایران
۸۵	اصول انتخاب روش‌های آبیاری در کشاورزی
۸۶	ارزیابی شوری خاک
۸۷	لوح فشرده کتاب‌ها و نشریات مؤسسات بین‌المللی (جلد سوم)
۸۸	مدیریت آبیاری در سامانه‌های روباز آبیاری
۸۹	مجموعه مقالات سومین کارگاه فنی زهکشی
۹۰	راهنمای ارزیابی مقایسه‌ای و کاربرد آن در شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۹۱	مجموعه مقالات چهارمین کارگاه فنی ارزیابی عملکرد سیستم‌های آبیاری
۹۲	مجموعه مقالات کاربرد سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور در آبیاری و زهکشی
۹۳	مجموعه مقالات کارگاه سیستم زهکشی زیر پوشش کانال‌ها
۹۴	نظام آبیاری سنتی در نائین
۹۵	نرم‌افزارهای مرتبط با آبیاری و زهکشی (جلد سوم)
۹۶	فرآیند ارزیابی سریع و کاربرد آن در شبکه‌های آبیاری و زهکشی
۹۷	مجموعه مقالات کارگاه فنی آبیاری بارانی «توانمندی‌ها و چالش‌ها»
۹۸	مجموعه مقالات کارگاه فنی آبیاری سطحی مکانیزه
۹۹	مجموعه مقالات کارگاه آموزشی مدلسازی در آبیاری و زهکشی
۱۰۰	اصول و کاربرد کم آبیاری
۱۰۱	مجموعه مقالات چهارمین کارگاه فنی مشارکت کشاورزان در مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی (اصول و روش‌های کاربردی)

۶۲۶/۸۱

۶۲۶/۸۱

س ۲۹۲

۱۳

ن ۱

نویسنده: علیرضا سپاسخواه
عنوان: اصول و کاربرد کم آبیاری

تاریخ برگشت

Pr

ons

Iranian

ation and

کتابفرازه - تلفن: ۶۴۶۸۳۳۱-۶۴۹۸۲۲۹

By:

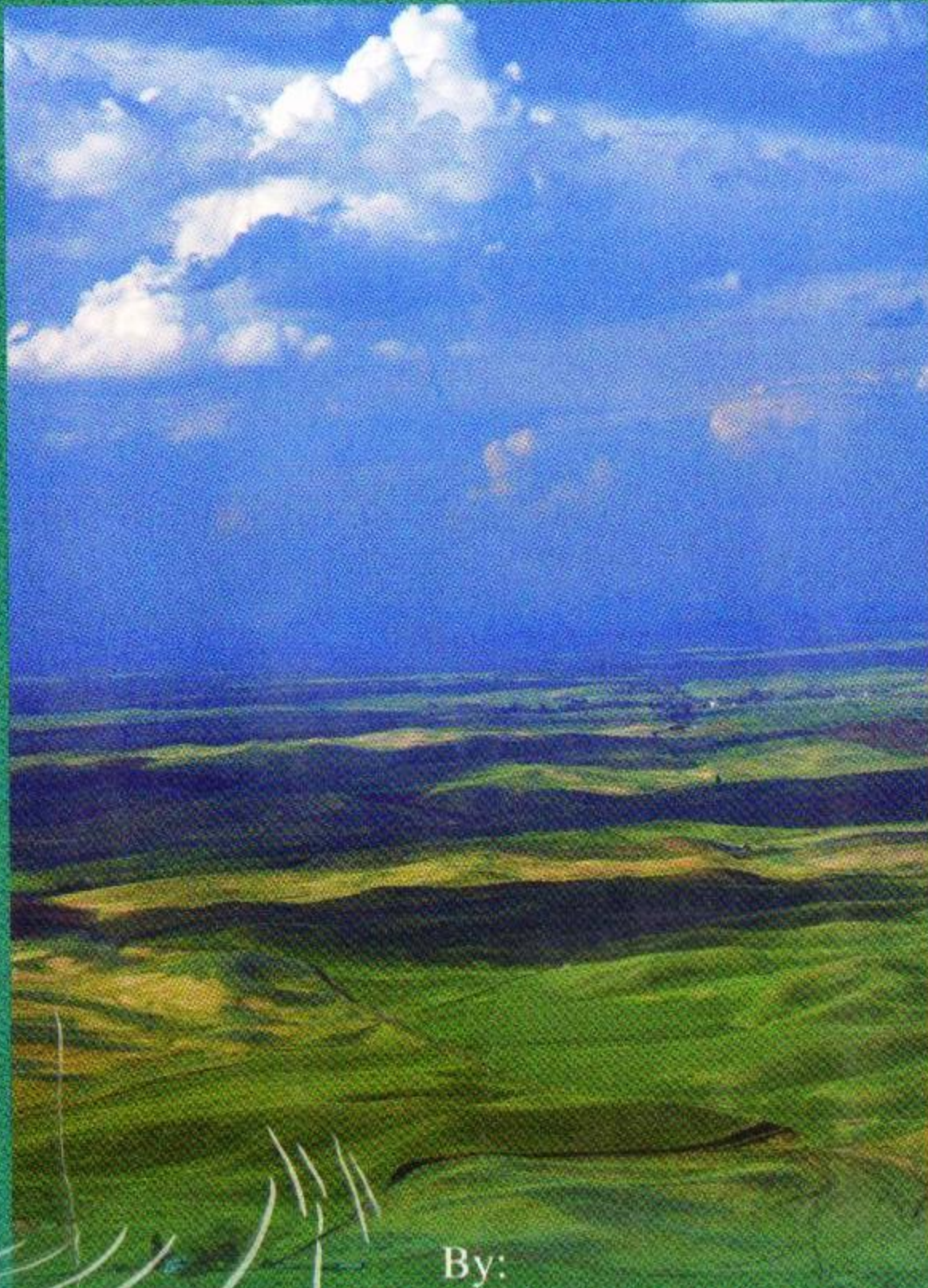
A. R. Sepaskhah

A. R. Tavakoli

S. F. Mousavi



Principles and Applications of Deficit Irrigation



By:
Iranian National Committee on Irrigation and
Drainage (IRNCID)

Issue No. 100
2006



ICID • CIID

ISBN: 964-6668-48-8

۹۶۴-۶۶۶۸-۴۸-۸