بهینه سازی اقتصادی آب آبیاری و کود نیتروژن برای گندم در مقادیر مختلف بارندگی (در منطقه مراغه)

ابوالفضل عزیزیان[۱]، علیرضا سپاسخواه[۱]، علیرضا توکلی[۲] و منصور زیبایی[۳]

چکیده

کمبود آب آبیاری عمده‌ترین عامل بازدارنده در زراعت آبی محسوب می‌شود. بنابراین مصرف بهینه آب مخصوصاً در مناطقی که قیمت آن نیز زیاد باشد ضروری است و تحت تأثیر مقادیر بارندگی فصلی قرار می‌گیرد. نیتروژن خاک نیز نقشی کلیدی در تغذیه گیاهی دارد. در این پژوهش نقش باران فصل رشد در تابع تولید گندم که دو عامل آب آبیاری و نیتروژن را شامل می‌شود، وارد و سپس مقادیر بهینه این عوامل بر مبنای تحلیل اقتصادی منحنی‌های تولید یکسان تعیین شد. تابع تولید گندم شامل دو متغیر آب (مجموع آب آبیاری و باران فصل رشد) و نیتروژن (مجموع کود نیتروژن کاربردی و نیتروژن اولیه خاک) مصرفی با استفاده از نتایج یک طرح پژوهشی اجرا شده در مرکز تحقیقات دیم مراغه، تعیین و در این تحلیل به کار رفت. بیشینه محصول قابل دست‌یابی بر اساس تابع تولید به دست آمده، ۸/۱۲ تن در هکتار است که با مصرف ۱/۵۶ متر آب و ۱۹۳ کیلوگرم نیتروژن حاصل می‌شود. تعیین ترکیب بهینه عوامل تولید در شرایط محدودیت آب و زمین نشان داد که با وجود قیمت‌های پایین هر دو عامل، آب به دلیل نقش مؤثرتر در فرایند تولید در مقایسه با نیتروژن تغییرات بیشتری را نشان می‌دهد. طبق این تحلیل اگر عوامل تولید فراهم بوده و قدرت پرداخت هزینه برای آنها هم فراهم باشد، کاربرد ۱/۴۷ متر آب و ۱۹۰ کیلو گرم نیتروژن در هکتار منجر به کسب بیشترین سود در واحد سطح زیر کشت گندم خواهد شد. هم‌چنین مصرف ۰/۵۵۶ متر آب و ۱۹۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار سبب کسب بیشترین درامد بر واحد حجم آب مصرفی شده که نسبت به شرایط محصول بیشینه باعث صرفه‌جویی ۶۴/۴ درصدی مصرف آب و ۲/۸۱ برابر شدن سطح زیر کشت می‌شود. تفاوت کم مقادیر بهینه نیتروژن در سه حالت مذکور به خاطر نقش اندک این عامل در تولید و قیمت یارانه‌ای پایین آن است. هم‌چنین ترسیم مسیر توسعه، اتکای بیشتر فرایند تولید گندم بر عامل آب را به نمایش گذاشت.

واژه‌های کلیدی: آب، نیتروژن، گندم، بهینه سازی

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 بهینه

۱. به ترتیب دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استاد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات دیم مراغه

۳. استادیار اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]

سازی مصرف آب و کود، ترقی یابد. در رسیدن به دورنمای روش راهبری و بهره‌برداری پایدار از منابع آب و خاک، شاخص‌های چندی مؤثر است 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 (۱۹).

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 باغ‌های میوه اختصاص دارد. از سوی دیگر حدود ۹۶ درصد کل آب مصرفی کشور مربوط به بخش کشاورزی فاریاب است (۴).

کمبود آب آبیاری عمده‌ترین عامل بازدارنده در زراعت آبی محسوب می‌شود. به دلیل بحران فزاینده کمّیت و کیفیت منابع آبی، بهینه سازی مصرف آب شایان توجه است. در مناطقی که قیمت آب زیاد است نیز مصرف بهینه آن غیر قابل اجتناب می‌باشد. 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 اجتناب‌ناپذیر می‌باشد (۳).

نیتروژن نقش کلیدی در تغذیه گیاهی دارد و از عناصر غذایی ضروری برای گیاهان به شمار می‌آید و اگر مقدار آن در خاک بهینه نباشد باعث کاهش رشد گیاه می‌شود (۸، ۲۱ و ۲۳). نیتروژن در خاک پویاست 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 (۷). نیتروژن نیتراتی در آب بسیار محلول بوده و لذا قابلیت آب‌شویی و آلوده کردن محیط زیست را دارد. آبیاری بیش از اندازه می‌تواند منجر به آبشویی بیشتر نیتروژن شود (۵ و ۲۰). گرچه کمبود نیتروژن بیش از سایر عناصر غذایی مطرح می‌باشد (۶، ۱۳ و ۱۶) اما ارائه روش دقیق و مناسب جهت توصیه‌های کودهای نیتروژنی هنوز نیاز به تحقیقات بیشتری دارد (۱۳). در حال حاضر نیتروژن استفاده بسیار گسترده‌ای به عنوان ماده غذایی دارد و تقاضا برای آن در آینده نیز بیشتر خواهد شد (۱۱).

تحقیقات نشان می‌دهد که گندم عموماً به کود نیتروژن عکس‌العمل خوبی نشان می‌دهد (۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۷ و ۱۸). هم‌چنین این گیاه واکنش مناسبی به میزان کود نیتروژن و آب آبیاری بروز می‌دهد.

سپاسخواه و اکبری (۲۲) 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 بهینه‌سازی آب آبیاری و کود نیتروژن برای ذرت توسط زندپارسا و سپاسخواه (۲۴) انجام شده است.

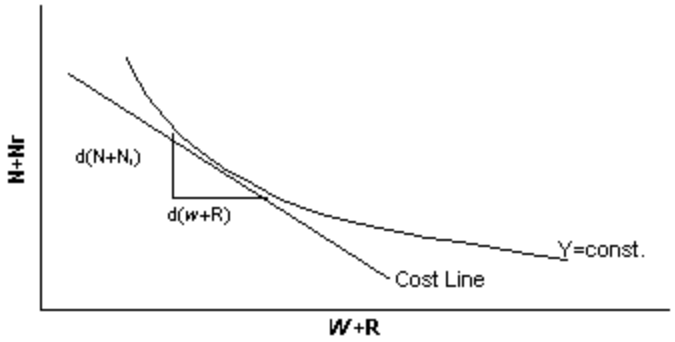
در این پژوهش که بر روی گندم صورت گرفته است نقش باران فصل رشد در تابع تولید، که دو عامل آب و نیتروژن را شامل می‌شود، وارد و سپس مقادیر آب آبیاری و نیتروژن برای تولید محصول بیشینه تعیین شده است. پس از آن با منحنی‌های تولید یکسان (Iso-Quant) نسبت به بهینه‌سازی مقادیر آب و نیتروژن مصرفی برای مقادیر مختلف تولید در شرایط محدودیت آب و زمین مبادرت شده است. هم‌چنین ترکیبی از عوامل تولید که منجر به کسب بیشینه درآمد در واحد سطح و نیز بر واحد حجم آب آبیاری می‌شود تعیین شده است. در نهایت نیز مسیر توسعه تولید روی منحنی‌های تولید یکسان رسم شده است.

اصول نظری

منحنی تولید یکسان عبارت است از مکان هندسی نقاطی که از ترکیب‌های مختلف عوامل تولید، مقدار تولید ثابتی از تولید را به وجود می‌آورد. اگر این ترکیب‌ها بی‌نهایت باشد، منحنی را به صورت پیوسته می‌توان رسم کرد. این منحنی‌ها دارای دو خاصیت مهم می‌باشد. اولاً نزولی هستند و به همین دلیل امکان

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]



شکل ۱. منحنی تولید یکسان برای تابع تولید محصول با دو عامل تولید آب و نیتروژن ($Y=f(w+R,N+N_r)$)

جایگزینی بین عوامل تولید وجود دارد. ثانیاً اگر پیوسته باشند جانشینی بین عوامل تولید به مقدار بسیار جزئی نیز امکان‌پذیر است (۱۰). شکل ۱ منحنی تولید یکسانی را برای تابع محصولی که دو عامل تولید شامل آب (مجوع آبیاری و بارندگی، w+R) و نیتروژن (مجموع نیتروژن اولیه و مصرفی، $N+N_r$) را دارد $\{Y(kg/ha)=f(w+R,N+N_r)\}$، نشان می‌دهد. قدر مطلق شیب این منحنی ($d(N+N_r)/d(w+R)$) را نرخ نهایی جانشینی عوامل تولید (MRTS) (Marginal Rate of Technical Substitution) 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. 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:

$$d[Y(w+R,N+N_r)] = Y_{w+R}\,d(w+R) + Y_{N+N_r}\,d(N+N_r) \qquad [۱]$$

چون روی منحنی تولید یکسان، مقدار تولید ثابت است، پس مشتق آن صفر بوده و در نتیجه:

$$MRTS = \frac{d(N+N_r)}{d(w+R)} = -\frac{\partial Y/\partial(w+R)}{\partial Y/\partial(N+N_r)} \qquad [۲]$$

که صورت و مخرج سمت راست این معادله به ترتیب مشتق تابع محصول نسبت به آب و نیتروژن است. تابع هزینه (Cost Line) نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C = P_{N+N_r}(N+N_r) + P_{w+R}(w+R) \qquad [۳]$$

که در آن C برابر هزینه در واحد سطح (Rls/ha) و P_{N+Nr} و P_{w+R} به ترتیب قیمت نیتروژن (Rls/kg) و آب (Rls/m-ha) می‌باشد. در نتیجه معادله خط هزینه به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$(N+N_r) = \frac{C}{P_{N+N_r}} - \frac{P_{w+R}}{P_{N+N_r}}(w+R) \qquad [۴]$$

شیب این خط همان نسبت قیمت یک واحد عوامل تولید است. به ازای مقادیر معینی هزینه (C)، یک خط هزینه یکسان وجود خواهد داشت. با مساوی شدن شیب منحنی تولید یکسان و خط هزینه یکسان (محل تماس خط هزینه با منحنی تولید یکسان، شکل ۱)، مقادیر بهینه عوامل تولید در آن سطح از تولید که منحنی نشان می‌دهد (از جهت کمینه شدن هزینه) به دست می‌آید. در این راستا و برای محاسبه مقادیر بهینه آب و نیتروژن در یک مقدار مشخص تولید محصول، شیب خط هزینه (معادله ۴) با شیب منحنی تولید یکسان تابع تولید محصول (معادله ۲) مساوی قرار داده می‌شود:

$$\frac{P_{w+R}}{P_{N+N_r}} = \frac{\partial Y/\partial(w+R)}{\partial Y/\partial(N+N_r)} \qquad [۵]$$

با استفاده از این معادله یکی از متغیرهای تابع تولید بر حسب متغیر دیگر محاسبه می‌گردد:

$$(w+R) = f(N+N_r) \qquad [۶]$$

و در نهایت معادله تابع تولید به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Y = f(w+R) \qquad [۷]$$

اکنون با این معادله و به ازای تولید معین (Y) مقداری که برای

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]

جدول۱. مقادیر آب آبیاری در تیمارها و سال‌های مختلف کشت

تیمار آبیاری	سال کشت	مقدار آب آبیاری (mm)
I0	۱	۰
	۲	۰
	۳	۰
I1	۱	۸۴
	۲	۱۱۲
	۳	۸۸
I2	۱	۱۳۲
	۲	۱۸۴
	۳	۱۳۶
I3	۱	۱۸۰
	۲	۲۵۶
	۳	۱۸۴

(w+R) محاسبه می‌شود مقدار بهینه است. به کمک تابع تولید ($Y=f(w+R,N+N_r)$) میزان بهینه ($N+N_r$) نیز به دست می‌آید. این دو مقدار آب و نیتروژن هزینه‌ای معادل (C) دارند که پس از تعیین آن، معادله ۴ مشخص شده و در کنار منحنی تولید یکسان ترسیم می‌گردد. با تکرار این روند ترکیب‌های بهینه عوامل تولید مشخص و مسیر توسعه تولید قابل رسم خواهد بود. با این روش هزینه تولید (هزینه آب و نیتروژن) در واحد سطح زیر کشت کمینه می‌شود که اصطلاحاً شرایط محدودیت زمین نامیده شده است (۹).

در شرایط محدودیت آب، کسب سود بیشتر به ازای یک واحد حجم آب مصرف شده مدنظر می‌باشد. بنابراین در هر مقدار مشخص تولید، ترکیبی از آب و نیتروژن که منجر به کسب بیشینه سود به ازای واحد حجم آب مصرف شده گردد، مقادیر بهینه آن عوامل در آن سطح از تولید می‌باشد که در شرایط محدودیت آب مهم است (۹) و در این تحقیق نیز محاسبه شده است.

مواد و روش‌ها

داده‌های سه ساله عملکرد دانه گندم سبلان مربوط به طرح پژوهشی اجرا شده در مرکز تحقیقات دیم مراغه (۱)، 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) و ۵ سطح کود نیتروژن از منبع اوره (صفر، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ کیلو گرم نیتروژن در هکتار) بود که به 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 پنجه زنی گیاه ، در بهار، مصرف شد.

وضعیت بارش سالانه، نیتروژن اولیه و چگالی ظاهری خاک منطقه نیز از ایستگاه تحقیقات کشاورزی دیم مراغه تهیه شد که در جداول (۲ و ۳) آمده است. مقدار ۳۱/۶ میلی‌متر از بارندگی سال دوم (۸۰-۱۳۷۹) پس از رسیدن محصول باریده و لذا در تولید مؤثر نبوده، بنابراین در محاسبات وارد نشده

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]

جدول ۲. وضعیت بارش ایستگاه تحقیقات دیم مراغه

سال	بارش سالانه (میلی‌متر)	بارش فصل رشد (میلی‌متر)
۱۳۷۸-۷۹	۲۶۳	۲۶۳
۱۳۷۹-۸۰	۲۳۴	۲۰۲/۴
۱۳۸۰-۸۱	۳۸۲	۳۸۲

جدول ۳. درصد نیتروژن کل و مقدار نیتروژن اولیه و چگالی ظاهری خاک ایستگاه تحقیقات دیم مراغه

سال زراعی	درصد ازت کل	مقدار ازت اولیه خاک (N_r) (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

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 (۷) بنابراین فقط همان ۰/۰۵ از نیتروژن کل به عنوان نیتروژن اولیه خاک (جدول 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 (نرم افزار Excel) تابع تولید محصول دانه گندم شامل دو متغیرآب (آبیاری (w) و بارندگی (R)) و نیتروژن (نیتروژن اولیه (N_r) و مصرفی (N)) استخراج شد. هزینه آب و نیتروژن با توجه به قیمت‌های رایج در بازار (۱۲۰ریال بر متر مکعب برای آب آبیاری و ۴۲۰ ریال بر کیلوگرم برای اوره) منظور گردید. قیمت آب آبیاری بر اساس آمار سازمان جهاد کشاورزی فارس انتخاب شد (۲). قیمت خرید گندم نیز ۱۷۵۰ ریال بر هر کیلوگرم در نظر گرفته شد و بر اساس اصول نظری تشریح شده تحلیل اقتصادی و بهینه‌سازی صورت گرفت.

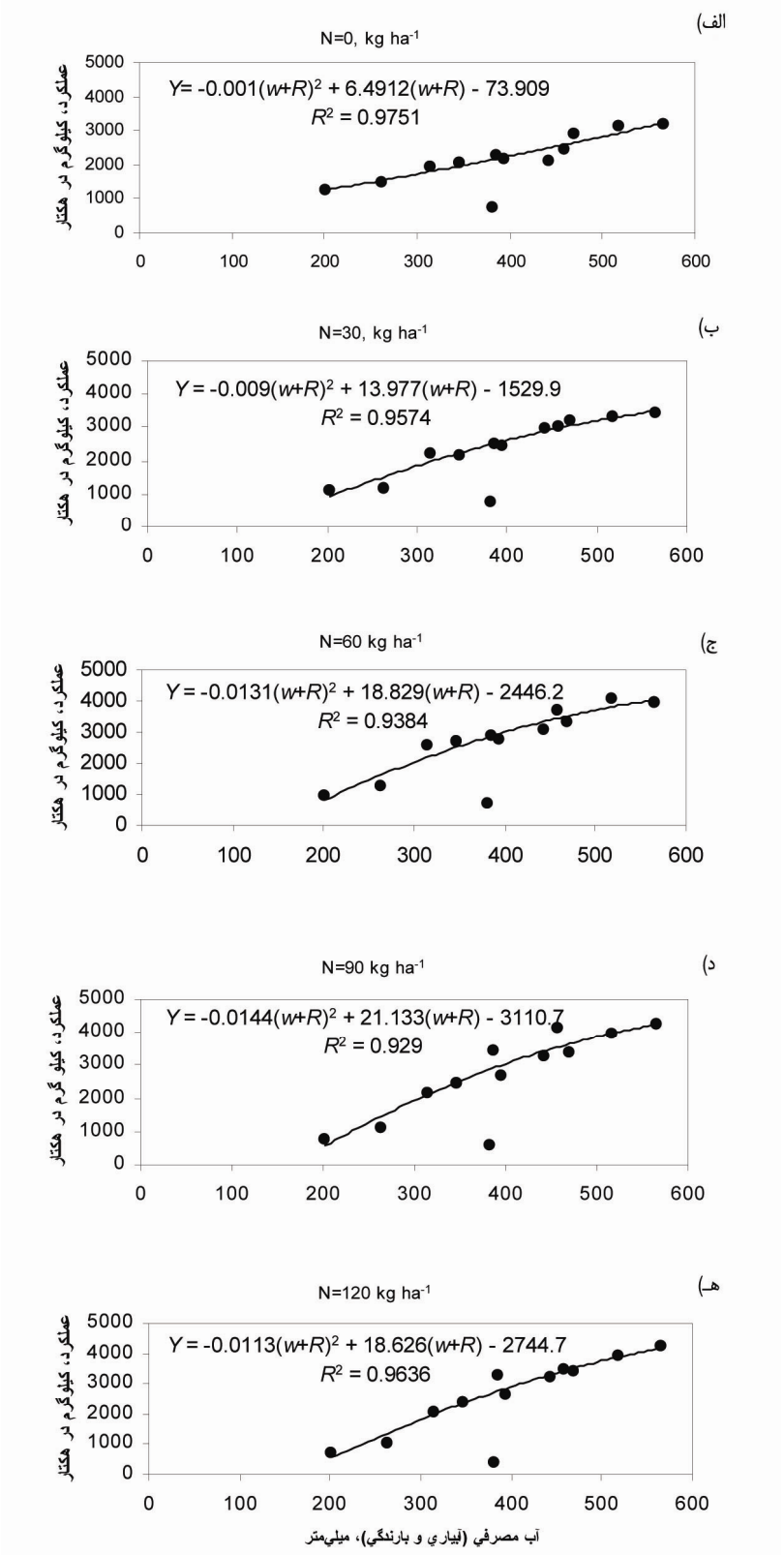
نتایج و بحث

الف) تابع تولید گندم

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 در هر شکل عملکرد سال سوم در شرایط دیم از محدوده روند داده‌ها خارج است (شکل۲ الف- ه). بنابراین این داده برای دقت بیشتر در استخراج تابع تولید حذف شده است. شکل‌های مذکور هم‌چنین توابع تولید در مقادیر مختلف نیتروژن که دارای یک متغیر آب مصرفی (آبیاری و بارندگی فصل رشد) بوده و در حالت عدم وجود داده پرت استخراج شده است را نشان می‌دهد. 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 بر همکنش آب و نیتروژن در این

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

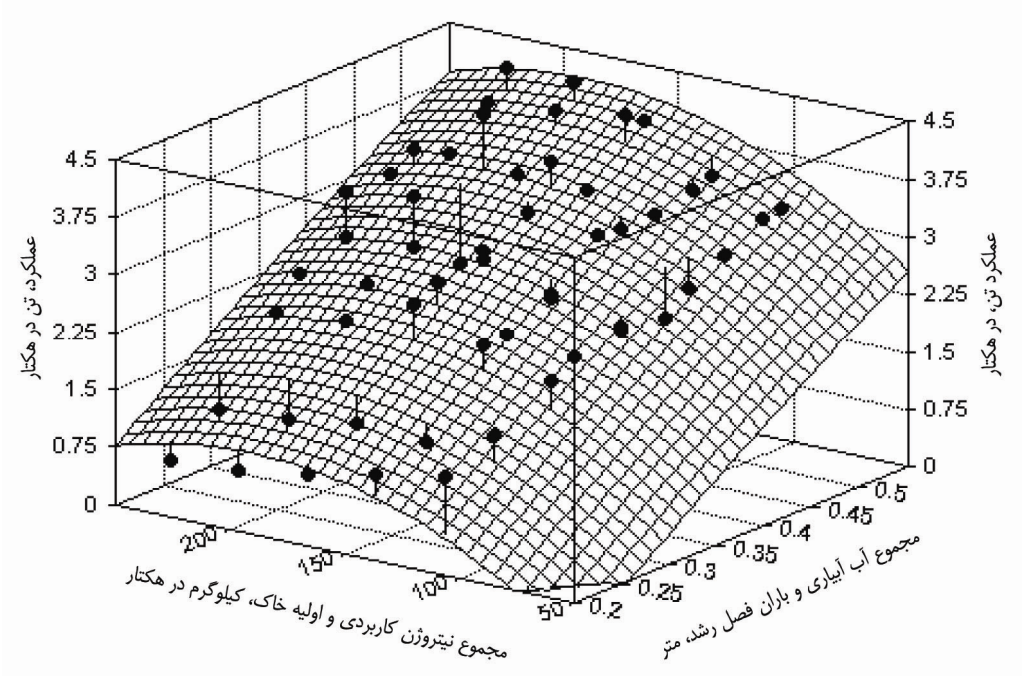
[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]



شکل ۲. مقـادیر مخـتلف عملکـرد دانه گندم (Y) با ازای آب مصرفی (مجموع آبیاری و باران فصل رشد، *w+R*) در مقادیر مختلف کاربرد نیتـروژن به همراه تابع تولید

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]



شکل ۳. مقادیر اندازه گیری شده (نقاط) و پیش بینی شده (رویه) عملکرد گندم در برابر آب آبیاری و باران فصل رشد و نیتروژن اولیه و مصرفی

سطح کاربرد، تولید بیشتری در مقایسه با دیگر مقادیر کود به کار رفته در بر داشته است.

برای تعیین تابع تولید دانه گندم به صورت یک تابع دو متغیره (شامل آب و نیتروژن) 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 از درجه دو به صورت زیر است:

$$Y(w+R, N+N_r) = a_0 + a_1(w+R) + a_2(w+R)^2 + a_3(N+N_r) + a_4(N+N_r)^2 \quad [8]$$

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. شکل معلوم این معادله عبارت است از:

$$Y(w+R, N+N_r) = -4/276 + 11/790(w+R) - 3/777(w+R)^2 + 0/033(N+N_r) - 8/353\times10^{-5}(N+N_r)^2 \quad [9]$$

تعداد داده‌ها ۵۵ و r^2 در تعیین معادله ۰/۹۰ و SE برابر ۰/۳۱۱۲ بوده است. مقدار F در تعیین این تابع در سطح احتمال $1/55\times10^{-24}$ معنی‌دار بوده است.

شکل ۳ نیز سطح تابع تولید (نمودار معادله ۹) را که به نقاط اندازه‌گیری شده برازش شده به صورت سه بعدی نشان می‌دهد. ضرایب معادله ۹ نشان می‌دهد که افزایش آب و نیتروژن مصرف شده محصول را به بیشینه خود رسانده و سپس کاهش خواهند داد. در شکل ۴ مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده محصول نسبت به خط یک به یک مقایسه شده است. شیب نزدیک به یک خط برازش شده به داده‌ها به دلیل استفاده از تمام داده‌ها می‌باشد.

بیشینه محصول قابل دست‌یابی با این معادله با مشتقات جزئی معادله ۹ مشخص می‌شود:

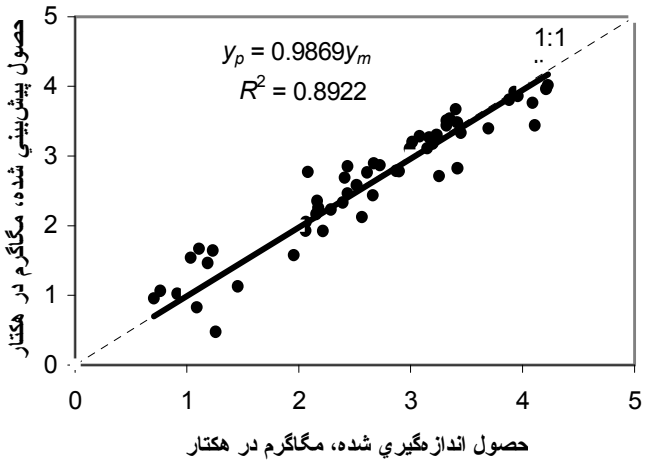
$$\frac{\partial Y}{\partial(w+R)} = 0 \equiv w + R = 1/56 \text{ m}$$

$$\frac{\partial Y}{\partial(N+N_r)} = 0 \equiv N + N_r = 193 \text{ kg ha}^{-1}$$

با این مقادیر آب و نیتروژن محصولی برابر با ۸/۱۲ تن در هکتار به دست می‌آید. طبعاً منظور نمودن بارندگی و نیتروژن

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]



شکل ٤. مقادیر اندازه‌گیری شده (y_m) و پیش بینی شده (y_p) عملکرد گندم در برابر آب آبیاری و باران فصل رشد و نیتروژن اولیه و مصرفی

اولیه خاک باعث کاهش مصرف آب و نیتروژن در دست‌یابی به محصول بیشینه می‌شود.

ب) منحنی‌های تولید یکسان تابع تولید

تابع تولید به دست آمده (معادله ۹) دارای دو متغیر و درجه دو است. به ازای مقادیر ثابت تولید، تغییرات متغیر نیتروژن ($N+N_r$) بر حسب متغیر آب (w+R) در مقادیر ثابتی از عملکرد (Y) حساب شد و نمودار تابع حاصل برای مقادیر مختلف تولید (۱/۵ تا ۸/۱۲ تن در هکتار) رسم گردید (شکل ۵). طبق این شکل هر کدام از عوامل تولید (آب و نیتروژن) می‌تواند جایگزین یکدیگر شود، به گونه‌ای که برای رسیدن به مقدار ثابت تولید ترکیب‌های مختلفی از آنها را می‌توان به کار برد. بیشینه محصول در شکل ۵ به صورت یک نقطه نمایش داده شده است که نشان می‌دهد این مقدار تولید تنها با یک ترکیب از عوامل تولید حاصل می‌شود.

ج) بهینه سازی عوامل تولید با منحنی‌های تولید یکسان (شرایط محدودیت زمین)

برای تعیین مقادیر بهینه آب آبیاری و کود نیتروژن، ترکیب معادله۲ و ۹ منجر به معادله زیر شد:

$$\frac{d(N+N_r)}{d(w+R)} = -\frac{a_1 + 2a_2(w+R)}{a_3 + 2a_4(N+N_r)} \qquad [10]$$

با جایگذاری ضرایب معادله۹ شیب منحنی تولید یکسان به صورت زیر درامد:

$$\frac{d(N+N_r)}{d(w+R)} = -\frac{11/790 - 7/554(w+R)}{0/033 - 1/707\times10^{-4}(N+N_r)} \qquad [11]$$

با استفاده از معادله ۴ تابع هزینه (شامل هزینه عوامل تولید یعنی آب و نیتروژن) هم به صورت زیر در نظر گرفته شد:

$$(N+N_r) = \frac{C}{913} - \frac{1200000}{913}(w+R) \qquad [12]$$

با حل معادله‌های ۱۱ و ۱۲ با استفاده ازمعادله ۵، معادله ۶ به صورت زیر نوشته شد:

$$(w+R) = -4/181 + 0/030(N+N_r) \qquad [13]$$

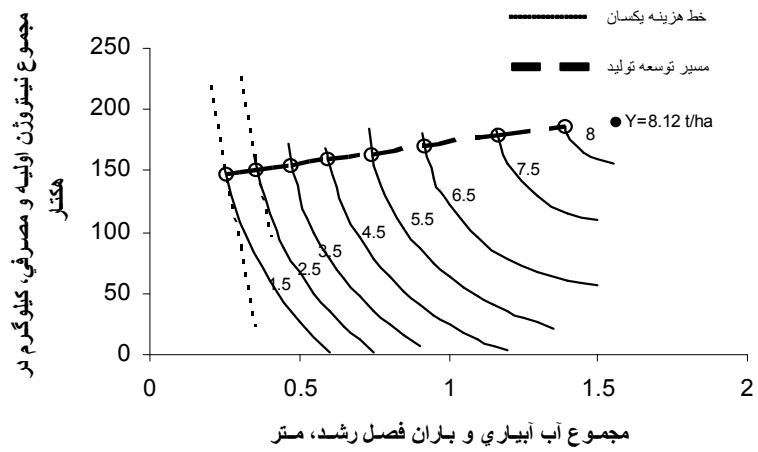
یعنی برای تولید بهینه رابطه بین نیتروژن و آب به صورت معادله ۱۳ می‌باشد که در آن با افزایش نیتروژن و به تبع آن آب، محصول بهینه نیز افزایش می‌یابد. در نهایت تابع تولید محصول مطابق معادله ۷ به صورت زیر نوشته شد:

$$Y = -119/595 + 1/334(N+N_r) - 3/484\times10^{-3}(N+N_r)^2 \qquad [14]$$

با معادله ۱۴ مقدار بهینه نیتروژن (شامل نیتروژن مصرفی و اولیه خاک) در سطوح تولید شکل ۵ و به کمک معادله ۹، آب مصرفی بهینه (شامل آب آبیاری و باران فصل رشد) محاسبه شد

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]



شکل۵. منحنی‌های تولید یکسان حاصل از تابع تولید گندم (معادله ۸) و مسیر توسعه تولید گندم حاصل از تماس خطوط هزینه یکسان و منحنی‌های تولید یکسان

که در جدول ۵، شرایط محدودیت زمین ارائه شده است. پیداست که منظور نمودن بارندگی فصل رشد و نیتروژن اولیه خاک سبب کاهش مقدار بهینه آب آبیاری و نیتروژن مصرفی (اعداد جدول ۵، شرایط محدودیت زمین) شده و نتیجه این صرفه جویی با مدیریت زارع می‌تواند در جهت افزایش سطح زیر کشت نمایان شود. چنانکه ذکر شد 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 (۹) و در مکان‌هایی که مقدار مشخصی از زمین زیر کشت گندم قرار می‌گیرد (مانند شبکه‌های آبیاری که دارای الگوی کشت باشند) و یا اساساً زمین عامل محدود کننده است، رخ می‌دهد. با توجه به جدول ۵ 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 تغییرات بیشتر آب نشان از اثر غالب آن 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 کیلو گرم نیتروژن در هکتار منجر به کسب بیشترین سود در واحد سطح خواهد شد (جدول ۵). به عبارت دیگر در بین همه ترکیبات بهینه آب و نیتروژن تنها یک ترکیب بیشترین سود در واحد سطح را به دست می‌دهد که معادل تولید ۸/۱ تن در هکتار است (جدول ۵، شرایط محدودیت زمین). وجود ۲۸۲ میلی‌متر (میانگین سه ساله مذکور) بارش فصل رشد ۱۹ درصد صرفه جویی در مقدار آب لازم (۱/۴۷ متر) را به همراه دارد.

د) ترکیب بهینه عوامل تولید در شرایط محدودیت آب

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 (۹) که در هر مقدار تولید فقط کاربرد یک ترکیب از آب و نیتروژن این مهم را نتیجه می‌دهد. برای سطوح تولید موجود در شکل ۵ این مقادیر با نرم افزار Excel محاسبه و ارائه گردید (شرایط محدودیت آب، جدول۵). در این شرایط نیز بیشینه سود در واحد حجم آب مصرفی با کاربرد ۰/۵۵۶ متر آب و ۱۹۰ کیلوگرم نیتروژن در هکتار (معادل تولید ۴/۳ تن در هکتار) عاید می‌شود که در بین ترکیبات بهینه آب و نیتروژن در شرایط محدودیت آب، منحصر به فرد است. کاربرد این مقدار آب موجب صرفه‌جویی ۶۴/۴ درصدی شده (نسبت به شرایط محصول بیشینه) و می‌تواند باعث افزایش ۱۸۱ درصدی سطح

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]

جدول ۵. 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

عملکرد (t/ha)	شرایط محدودیت زمین			شرایط محدودیت آب		
	آب آبیاری و بارش فصل رشد(m)	نیتروژن اولیه و مصرفی (kg/ha)	سود* ریال در هکتار	آب آبیاری و بارش فصل رشد(m)	نیتروژن اولیه و مصرفی (Kg/ha)	سود* ریال بر متر مکعب آب
۱/۵	۰/۲۵۵	۱۴۸	۲۱۸۳۹۶۷	۰/۲۳۸	۱۸۵	۹۱۲
۲/۵	۰/۳۵۸	۱۵۱	۳۸۰۷۲۶۳	۰/۳۴۲	۱۸۶	۱۱۰۹
۳/۵	۰/۴۷۰	۱۵۶	۵۴۱۸۸۴۰	۰/۴۶۰	۱۷۲	۱۱۷۷
۴/۳	۰/۵۷۰	۱۵۸	۶۶۹۸۱۳۱	۰/۵۵۶	۱۹۰	۱۲۰۲
۴/۵	۰/۵۹۶	۱۵۹	۷۰۱۴۴۵۰	۰/۵۹۰	۱۶۸	۱۱۸۸
۵/۵	۰/۷۴۰	۱۶۵	۸۵۸۶۶۶۷	۰/۷۲۹	۱۸۹	۱۱۷۶
۶/۵	۰/۹۱۷	۱۷۰	۱۰۱۱۹۴۸۱	۰/۹۱۰	۱۸۰	۱۱۱۱
۷/۵	۱/۱۶۲	۱۸۱	۱۱۵۶۵۷۵۵	۱/۱۵۸	۱۸۹	۹۹۸
۸	۱/۳۸۹	۱۸۷	۱۲۱۶۲۱۷۴	۱/۳۸۷	۱۹۱	۸۷۶
۸/۱	۱/۴۷۰	۱۹۰	۱۲۲۰۷۵۰۶	۱/۴۶۹	۱۹۲	۸۳۰
۸/۱۲**	۱/۵۶۱	۱۹۳	۱۲۱۵۱۵۶۷	۱/۵۶۱	۱۹۳	۷۷۸

* : 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.

زیر کشت شود. اعداد جدول ۵ در شرایط محدودیت آب نیز باران فصل رشد و نیتروژن اولیه خاک را در بر دارد که در نظر گرفتن آنها، مانند شرایط محدودیت زمین، باعث صرفه جویی در مصرف عوامل تولید شده و با مدیریت کشاورز می‌تواند منجر به افزایش سطح زیر کشت گردد. اگر بارشی معادل ۲۸۲ میلی‌متر (میانگین آمار سه ساله مذکور) در فصل رشد وجود داشته باشد حدود ۵۱ درصد در آب مورد نیاز در این شرایط (۰/۵۵۶ متر) صرفه‌جویی می‌تواند صورت گیرد.

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 تأثیر 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 (۲۴) نتیجه مشابهی را برای ذرت گزارش کردند.

ه) تغییرات محصول و مقادیر بهینه آب و نیتروژن در برابر هزینه عوامل تولید (در شرایط محدودیت زمین)

اگر کشاورز بخواهد برای کاربرد بیشتر عوامل تولید (آب و نیتروژن)، در شرایط محدودیت زمین، هزینه صرف کند تغییرات عوامل تولید، مطابق معادلات زیر و مانند آنچه در شکل ۶ نشان داده شده خواهد بود که از معادلات ۱۲ و ۱۳ به دست آمده است:

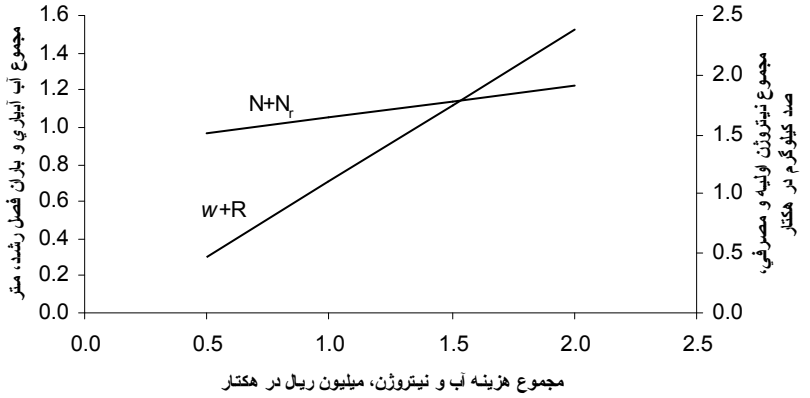
$$w + R = \frac{C}{۱۲۳۰۴۱۹/۶۶۷} - ۰/۱۰۳ \qquad [۱۵]$$

$$N + N_r = \frac{C}{۳۶۹۱۲/۵۹۰} + ۱۳۵/۹۲۱ \qquad [۱۶]$$

طبق این شکل افزایش مقدار هزینه‌ای که زارع قادر است برای

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]



شکل ۶. 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

آب و نیتروژن صرف کند، مقدار بهینه آب را با آهنگ بیشتری نسبت به نیتروژن افزایش می‌دهد که 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 مؤثر می‌باشد.

شکل ۷ 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 ۷ همان بیشینه محصول به دست آمده از تابع تولید است.

و) مسیر توسعه تولید

مسیر توسعه از به‌هم پیوستن نقاط تماس منحنی‌های تولید یکسان و خطوط هزینه یکسان به‌وجود می‌آید و نقاط واقع بر این مسیر مقادیر بهینه آب و نیتروژن (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 برای شرایط محدودیت زمین، نمایش داده شده است. با مقادیر مذکور معادله ۴ مشخص و در کنار منحنی‌های تولید یکسان رسم گردید (شکل ۵). 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 می‌باشد. تمام نقاط واقع بر مسیر تولید ترکیب‌های بهینه آب و نیتروژن هستند و هر کدام نظیر مقدار خاصی از تولید می‌باشند که کشاورز برای کسب سود بیشینه در واحد سطح می‌تواند انتخاب نماید.

نتیجه‌گیری

عملکرد محصولات زراعی را می‌توان 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 ۹ بیان شود، میزان بهینه متغیرهای تابع (آب آبیاری و نیتروژن) را می‌توان تعیین نمود. طبق این تحلیل با داشتن مقدار هزینه‌ای که برای آب و نیتروژن اعمال می‌شود می‌توان ترکیب بهینه آنها را برای کمینه کردن هزینه در واحد سطح انتخاب نمود. با توجه به مقادیر بهینه محاسبه شده عوامل تولید (جدول ۵، شرایط محدودیت زمین)، نیتروژن بهینه به خاطر قیمت پایین آن که ناشی از حمایت‌های دولتی و نیز نقش کم آن در تولید محصول می‌باشد، 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.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]

شکل ۷. تغییرات عملکرد در برابر هزینه کل صرف شده برای آب و نیتروژن

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 می‌آید. 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 می‌شود. 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.

منابع مورد استفاده

۱. توکلی، ع. ۱۳۸۱. به‌گزینی مدیریت آبیاری تکمیلی و بهینه‌سازی مصرف کود نیتروژن برای گندم. گزارش طرح پژوهشی اجرا شده در مرکز تحقیقات دیم مراغه، ۱۴ صفحه.

۲. سازمان جهاد کشاورزی استان فارس. ۱۳۸۳. هزینه تولید یک هکتار گندم آبی در سال زراعی ۱۳۸۲-۸۳. مدیریت طرح و برنامه، اداره آمار و فناوری اطلاعات، سازمان جهاد کشاورزی، استان فارس.

۳. قهرمان، ب. و ع. سپاسخواه. ۱۳۷۵. حداکثر عملکرد نسبی محصولات زراعی: چشم اندازی جدید در کم آبیاری. آب و توسعه ۱۴: ۲۵-۳۳.

۴. وزارت جهاد کشاورزی. ۱۳۸۲. *آمار نامه کشاورزی*. جلد اول: محصولات زراعی و باغی. معاونت برنامه‌ریزی و اقتصادی، دفتر آمار و فناوری اطلاعات، وزارت جهاد کشاورزی، تهران.

5. Artiola, J.F. 1991. Nonuniform leaching of nitrate and other solutes in a furrow irrigation sludge-amended field. Com. Soil Sci. Plant Anal. 22: 1013-1030.
6. Bair, W., J.H. Mogahen and J.E. Agress. 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.
7. Cerrato, M.E. and A.M. Blackmer. 1990. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. Agron. J. 82: 138-143.

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]

8. Dhanke, W.G. and E. Vass. 1973. Testing soil for nitrogen. pp: 97-144. *In:* L.M. Walsh and J. Beaton. (Eds.), Soil Testing and Plant Analysis. Revised Ed., Soil Sci. Soc. Amer. J. Inc., Madison, WI.
9. English, M. and S.N. Raja. 1996. Perspective on deficit irrigation. Agric. Water Manag. 32: 1-14.
10. Ferguson, C.E. and J.P. Gould. 1975. Microeconomic theory. Richard D. IRWIN, Inc. USA.
11. Godwin, D.C. and C.A. Jones. 1991. Nitrogen dynamics in plant sysytem. PP. 287-321. *In*: J. Hanks and J.T. Ritchie. (Eds.), Modeling Plant and Soil System. Agronomy. Vol. 31. Madison, WI. USA,
12. Harmsen, K., K.D. Shepherd and A.Y. Allan. 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.
13. Islam, M.M., F. Iyamuremye and R.P. Dick. 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.
14. Krentons, U.D. and P. J. Orphonos. 1979. Nitrogen and phosphorus fertilizers for wheat and barley in a semi arid and arid region. J. Agric. Sci. 93: 711-717.
15. Mossedque, F. and D.H. Smith. 1994. Timming nitrogen application to enhance spring wheat yield in a Mediterranean climate. Agron. J. 86: 221-226.
16. Novoa, R. and R.S. Loomis. 1981. Nitrogen and plant production. Plant Soil 58: 177-204.
17. Oweis, T., M. Pala and J. Ryan. 1998. Stabilization rainfed wheat yields with supplemental irrigation and nitrogen in a Mediteranean climate. Agron. J. 90:672-681.
18. Pala, M., A. Mater and A. Mazid. 1996. Assessment of the effects of environmental factors on the response of wheat to fertilizer in on- farm trails in northern Syria. Exp. Agric. 32(3): 339-349.
19. Pang, X.P. and J. Letey. 1998. Development and evaluation of ENVIRO-GRO, an integrated water salinity and nitrogen model. Soil Sci. Soc. Amer. J. 62: 1418-1427.
20. Pirmoradian, N., A.R. Sepaskhah, and M. Maftoun. 2004. Deficit irrigation and nitrogen effects on nitrogen-use efficiency and grain protein of rice. Agronomie 24: 143-153.
21. Salam, A.M. and S. Subramanian. 1988. Influence of zinc, nitrogen and their interaction on the yield and nutrient uptake of "IR20" rice (*Oryza sativa* L.) in different season. Indian J. Agric. Sci. 58: 190-193.
22. Sepaskhah, A.R. and D. Akbari. 2005. Deficit irrigation planning under variable seasonal rainfall. Biosys. Eng. 92(1): 97-106.
23. Weinhold, B.J., P.T. Todd and G.A. Richman. 1995. Yield and nitrogen efficiency of irrigated corn in north great plains. Agron. J. 87:842-846.
24. Zand-Parsa, Sh. and A.R. Sepaskhah. 2001. Optimal applied water and nitrogen for corn. Agric. Water Manag. 52: 73-85

[Downloaded from jcpp.iut.ac.ir on 2026-03-19]

[DOR: 20.1001.1.22518517.1385.10.4.4.0]