بهینه‌سازی اقتصادی مشخصه‌های طراحی آبیاری جویچه‌ای در شرایط کم آبیاری برای ذرت علوفه‌ای در شهرکرد

مسعود نادری[۱*]، محمد شایان‌نژاد[۱]، بیژن حقیقتی[۲]، سمانه کریمی[۳] و سجاد حیدری[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۶/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۲۲)

چکیده

با توجه به محدودیت منابع آب در ایران، اعمال تنش آبی یا کم آبیاری برروی بعضی از محصولات زراعی امری اجتناب ناپذیر است. با توجه به‌ضرورت کم آبیاری باید روش طراحی مناسب با آن ارائه شود. مدیریت آبیاری جویچه‌ای برای حصول بازده بالا دشوار است، از اینرو بررسی تغییرات میزان دبی ورودی، زمان قطع جریان و طول جویچه‌ها که برروی بازده و یکنواختی مؤثر است، از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از این تحقیق ارائه روشی برای تعیین عمق آب مصرفی بهینه و بهینه‌سازی مشخصه‌های طراحی آبیاری جویچه‌ای در شرایط کم آبیاری و در نهایت مقایسه مشخصه‌های طراحی در شرایط آبیاری کامل و کم آبیاری و مقایسه در بافت‌های مختلف خاک است. برای دستیابی به اهداف این تحقیق، آزمایش برروی ذرت علوفه‌ای در شهرکرد در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با ۷ تیمار سطوح مختلف آب آبیاری در ۳ تکرار انجام شد. برای بهینه کردن مشخصه‌های طراحی و عمق مصرفی با حداکثر کردن سود در حالت کم آبیاری از نرم‌افزار لینگو استفاده شد. نتایج نشان داد، بیشترین سود خالص از کاربرد ۵۳۵ میلی‌متر، ۸۵ متر، ۰/۳۹ لیتر بر ثانیه و ۲۱۰ دقیقه به‌ترتیب برای عمق خالص آبیاری (۷۹ درصد عمق خالص در آبیاری کامل)، طول جویچه، دبی ورودی و زمان قطع جریان حاصل شد. نتایج بهینه‌سازی مشخصه‌های طراحی جویچه برای گیاه، با بافت‌های مختلف نشان داد با افزایش میزان نفوذپذیری خاک مقادیر طول جویچه و زمان قطع جریان کاهش می‌یابد، در حالی که مقدار دبی ورودی به جویچه افزایش پیدا می‌کند و عمق آب مصرفی یا به‌عبارتی درصد کم آبیاری ثابت می‌ماند.

واژه‌های کلیدی: تابع تولید، تابع درآمد، عمق آب بهینه

۱.گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۲. مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهار محال و بختیاری
۳.گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز
*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: naderi7403@yahoo.com

مقدمه

کاهش کمی و کیفی منابع آب در سال‌های اخیر باعث ایجاد رقابت شدیدی بین مصرف کنندگان این ماده حیاتی شده است. بخش کشاورزی به‌عنوان پر مصرف‌ترین بخش، تحت بیشترین فشارها در این رقابت سخت قرار دارد. بنابراین باید کارائی مصرف آب را در کشاورزی به‌جهت جلوگیری از تشدید کمبود منابع آبی و به مخاطره افتادن بیشتر امنیت غذایی افزایش داد(۱۱). یکی از روش‌های افزایش کارایی و بهره‌وری مصرف آب، ارزیابی و طراحی بهینه سامانه‌های آبیاری و به‌ویژه سامانه‌های آبیاری سطحی به‌عنوان پرکاربردترین روش‌های آبیاری است. آبیاری جویچه‌ای سازگارترین نوع آبیاری سطحی با توسعه کشاورزی مکانیزه است. در این روش به‌جای غرقاب کردن تمام سطح مزرعه، فقط آب درون جویچه‌ها جریان می‌یابد که در واحد عرض سبب کاهش مصرف آب در مقایسه با آبیاری کرتی و نواری می‌شود (۴). مدیریت آبیاری جویچه‌ای برای به‌دست آوردن بازده و یکنواختی بالا بسیار سخت است، از اینرو بررسی تغییرات میزان دبی ورودی، زمان قطع جریان و طول جویچه‌ها که برروی بازده و یکنواختی مؤثر است، بسیار اهمیت دارد.

از طرفی، با توجه به محدودیت منابع آب در ایران، اعمال تنش آبی روی بعضی از محصولات زراعی امری اجتناب ناپذیر است. با توجه به ضرورت کم آبیاری بایستی روش طراحی مناسب با آن ارائه شود، لازم به‌ذکر است که تمامی روش‌های طراحی موجود برای حالت آبیاری کامل به‌کار می‌روند. در حالت کم آبیاری بایستی عمق آب مصرفی از طریق بهینه‌سازی به‌دست آید. یکی از محصولات مهم در شهرکرد، که به‌صورت جویچه‌ای آبیاری می‌شود ذرت‌علوفه‌ای می‌باشد.

طراحی بهینه نیازمند به یک معادله ریاضی برای محاسبه صریح زمان پیشروی جهت استفاده در تابع هدف می‌باشد. والیانتاز در سال ۲۰۰۱ معادله‌ای صریح برای محاسبه زمان پیشروی ارائه کرد، که آن را براساس نتایج مدل اینرسی صفر به‌دست آورده و از دقت بالایی برخوردار می‌باشد (۱۲)، همچنین این محقق، معادله‌ای برای محاسبه هزینهٔ کل در شرایط آبیاری کامل ارائه داد (۱۳). شایان نژاد در سال ۱۳۸۳ برای حالت آبیاری کامل پارامترهای طراحی آبیاری جویچه را با معادله‌ای شبیه معادله والیانتاز و با حداقل کردن تابع هزینه به‌دست آورد (۳). وی بیان کرد در تابع هدف علاوه بر متغیرهای طراحی، مشخصات خاک، جویچه و نیاز خالص آبیاری وجود دارد و بنابراین برای هر نوع خاک و گیاه مشخصی می‌توان متغیرهای طراحی وبه دنبال آن راندمان آبیاری را محاسبه نمود.

نوابیان و مسلمی در تحقیقی با استفاده از مفهوم شبیه‌سازی- بهینه‌یابی، روش جدیدی برای تعیین طول و دبی بهینه تحت سه روش جریان پیوسته،کاهشی و موجی ارائه دادند و با داده‌های صحرایی در خاک لوم رسی بررسی کردند. در این بافت برای روش کاهش جریان طول بهینهٔ جویچه بیشتر از دو روش دیگر بود. همچنین بررسی روند تغییرات طول بهینه و راندمان آبیاری نسبت به دبی نشان داد که در روش پیوسته با افزایش دبی جریان، راندمان آبیاری کاهش می‌یابد (۶). عامر (۲۰۱۰) اثر سطوح مختلف آبیاری را روی گیاه ذرت، در قالب طرح اسپلیت پلات تصادفی در ۵ سطح آبیاری ET ۰/۶، ET ۰/۸، ET۱، ET۱/۲، و ET ۱/۴ که نسبتی از تبخیر تعرق گیاه هستند در منوفیای مصر بررسی کرد. نتایج نشان داد که کمترین و بیشترین عملکرد به‌ترتیب متعلق به ET ۰/۶ و ET۱ بود (۷). دجامان (۲۰۱۱) در لینکالن نبرسکا، طی دو سال متوالی با اعمال کم آبیاری روی ذرت دانه‌ای و با درنظر گرفتن چهار تیمار ۱۰۰٪، ۷۵٪، ۶۰٪، ۵۰٪ نیاز آبی گیاه و یک تیمار بدون آبیاری، بیان کرد میزان تولید دانه در تیمار آبیاری کامل، تقریباً مشابه تیمار ۷۵٪ بوده ولی نسبت به دو تیمار ۶۰٪، ۵۰٪ و تیمار بدون آبیاری به‌طور معنی‌داری بیشتر بود (۸).

در این تحقیق روشی ارائه شده است، که پارامترهای طراحی آبیاری جویچه‌ای و همچنین عمق آب مصرفی بهینه را با به حداکثر رساندن سود بتوان محاسبه کرد. بهینه‌سازی یعنی حداکثر استفاده از منابع، در بهینه‌سازی بهترین جواب ممکن

برای یک مساله با توجه به هدف تعیین می‌شود، مساله بهینه دارای یک تابع هدف و احتمالاً چندین قید می‌باشد،که مجموعه خصوصیات سامانه را در بر می‌گیرد.

اهداف کلی تحقیق شامل موارد زیر است:

۱- به‌دست آوردن توابع تولید، هزینه و سود (تابع تولید برای محصول ذرت علوفه‌ای در منطقه شهرکرد به‌دست می‌آید. توابع هزینه وسود تابعی از مشخصه‌های طراحی و عمق آب مصرفی هستند.)

۲- بهینه کردن مشخصه‌های طراحی (طول جویچه، دبی ورودی و زمان قطع جریان) و عمق آب مصرفی با حداکثر کردن سود و راندمان کاربرد در حالت کم آبیاری با کمک نرم‌افزار Lingo.

مواد و روش‌ها

این طرح به‌طور کلی در دو مرحله انجام گرفته است، یک مرحله در مزرعه و به‌منظور به‌دست آوردن تابع تولید برای محصول ذرت علوفه‌ای است و مرحله بعد مربوط به استفاده از تابع تولید و بهینه‌سازی اقتصادی پارامترهای طراحی آبیاری جویچه‌ای در شرایط کم آبیاری و به‌دست آوردن عمق آبیاری بهینهٔ متناسب با آن می‌باشد. عملیات مزرعه‌ای شامل کاشت، داشت، برداشت و همچنین اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز برای طراحی آبیاری جویچه‌ای می‌باشد.

این تحقیق در مزرعهٔ تحقیقاتی واقع در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی استان چهارمحال و بختیاری انجام گرفت. زمان اجرای آزمایشات مزرعه‌ای از خرداد ماه سال ۱۳۹۲ تا آبان ماه همان سال بود. در این طرح اثر سطوح مختلف آب آبیاری بر عملکرد محصول ذرت علوفه‌ای (رقم NS) مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی و با سه تکرار اجرا شد. هفت تیمار آبیاری شامل ۴۰، ۵۵، ۷۰، ۸۵، ۱۰۰، ۱۱۵و ۱۳۰ درصد کمبود رطوبت خاک اعمال شد، به‌طوری که۱۰۰ درصد کمبود رطوبت خاک معادل آبیاری کامل فرض شد. بعد از میخکوبی و طناب‌کشی مزرعه، مقدار۱/۲ کیلوگرم (حدود ۳۵ کیلوگرم در هکتار) بذر ذرت رقم NS به‌صورت دستی کاشته شد و مزرعه به‌وسیله نهرکن پلات‌بندی شد. طول هر پلات ۴ متر و عرض آن ۳ متر و در هر پلات ۴ ردیف ذرت کاشته شد. فاصله بین پشته‌ها ۶۰ سانتی‌متر بود. تیمارهای کم آبیاری مورد نظر یک ماه پس از کاشت بذر و در زمان سه برگی شدن اعمال شد. سایر امور داشت نظیر کودهی، سم پاشی و غیره مطابق توصیه‌های معمول ارائه شده، اعمال شد. برداشت محصول به‌صورت دستی و ۱۰۶ روز بعد از کاشت انجام شد. از پلات‌های مربوط به هر تیمار، قطعاتی به مساحت ۱/۵ مترمربع از دو ردیف وسط که نمایانگر عملکرد گیاه در شرایط واقعی مزرعه در کشت‌های وسیع هستند انتخاب و برداشت شد.

ضرائب شکل هندسی جویچه، ضرائب و نماهای معادلات پیشروی، ضرائب معادله نفوذ کوستیاکف، در جویچه‌ها نیز اندازه‌گیری شده و در جدول (۱) آورده شده‌اند. برای بهینه‌سازی عمق آب آبیاری ابتدا توابع هزینه، تولید و درآمد آبیاری جویچه‌ای به‌صورت زیر محاسبه گردید.

تابع هزینه

به‌منظور آبیاری یک قطعه زمین زراعی مشخص به‌روش جویچه‌ای بایستی آن را به تعدادی مجموعهٔ آبیاری تقسیم نمود. هر مجموعه آبیاری شامل تعدادی جویچه می‌باشد، که همزمان آبیاری می‌شوند. آرایش مجموعه‌های آبیاری در شکل (۱) ارائه شده است.

۱. هزینه‌های آبیاری جویچه‌ای

با توجه به شکل (۱) علائم زیر تعریف می‌شود:

N_s = تعداد کل مجموعه‌های آبیاری

N_{sl} = تعداد مجموعه‌های آبیاری در راستای جویچه‌ها

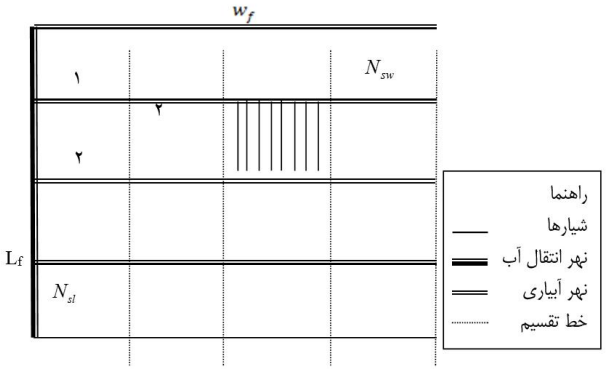
N_{sw} = تعداد مجموعه‌های آبیاری در راستای عمود بر جویچه‌ها

L_f = طول مزرعه برحسب متر (در راستای جویچه‌ها)

W_f = عرض مزرعه برحسب متر (در راستای عمود بر جویچه‌ها)

جدول ۱. پارامترهای استفاده شده در برنامه

نام پارامتر	نماد	مقدار
عمق خالص آب آبیاری (متر)	Zr	۰/۰۴۵
شیب جویچه‌ها (متر بر متر)	S۰	۰/۰۰۷
دبی آب موجود (می‌تواند دبی چاه باشد، مترمکعب بر دقیقه)	Q_t	۴/۴۸
ضریب معادله کوستیاکف	k	۰/۰۰۲۲
نمای معادله کوستیاکف	a	۰/۵۸۶
عرض جویچه (متر)	w	۰/۶
تعداد آبیاری	ni	۱۵
ضریب زبری مانینگ	n	۰/۰۴
فاکتور شکل جویچه ρ_1	r1	۲/۶۱۶
فاکتور شکل جویچه ρ_2	r۲	۰/۳۷۵۸
هزینه کار یک دقیقه کارگر (ریال)	cl	۱۰۰۰
هزینه حفر یک متر جویچه (ریال)	cf	۴۵۰
هزینه حفر یک متر نهر آبیاری (ریال)	cd	۲۲۰۰
هزینه یک متر مکعب آب آبیاری (ریال)	cw	۳۸۰
قیمت فروش یک کیلوگرم محصول (ریال)	cz	۵۸۰۰
هزینه ثابت کاشت، داشت و برداشت در یک هکتار (ریال)	C۰	۲۸۶۰۰۰۰۰



شکل ۱. آرایش مجموعه‌های آبیاری جویچه‌ای

Q_0 = دبی ورودی به هر جویچه برحسب متر مکعب بر دقیقه

Q_t = کل دبی موجود برحسب متر مکعب بر دقیقه

L = طول هر جویچه برحسب متر

N_{fs} = تعداد جویچه‌ها در هر مجموعه آبیاری

W = عرض هر جویچه برحسب متر

همچنین با توجه به شکل (۱) معادلات زیر برقرار می‌باشد:

$$N_{sl} = \frac{L_f}{L} \quad (۱)$$

$$N_{fs} = \frac{Q_t}{Q_0} \quad (۲)$$

$$N_{sw} = \frac{W_f}{W.N_{fs}} \quad (۳)$$

$$N_s = N_{sl}.N_{sw} \qquad (۴)$$

با جایگزینی معادلات (۱)، (۲) و (۳) در معادله (۴)، معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$N_s = \frac{W_f.L_f.Q_o}{L.W.Q_t} \qquad (۵)$$

هزینه‌های آبیاری جویچه‌ای به چهار قسمت تقسیم می‌شود، که در زیر روش محاسبه هر یک از آنها تشریح می‌شود (۳).

۱- محاسبه هزینه آب مورد نیاز برای یک بار آبیاری کل مزرعه

هزینه آب از حاصل ضرب حجم آب مورد نیاز در قیمت یک متر مکعب آن به‌صورت زیر قابل محاسبه است:

$$C_{tw} = Q_t.T_{co}.N_s.C_w \qquad (۶)$$

در رابطه فوق،

C_{tw} = هزینه آب مورد نیاز برای یک‌بار آبیاری کل مزرعه برحسب ریال

C_w = قیمت واحد حجم آب برحسب ریال در متر مکعب

T_{co} = زمان قطع جریان یا مدت زمان آبیاری برحسب دقیقه

با جایگزینی معادله (۵) در معادله (۶)، معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$C_{tw} = \frac{C_w.W_f.L_f.Q_o.T_{co}}{W.L} \qquad (۷)$$

۲- محاسبه هزینه کارگر برای یک بار آبیاری کل مزرعه

هزینه کارگر مورد نیاز جهت آبیاری مزرعه از حاصل ضرب زمان مورد نیاز برای آبیاری کل مزرعه در هزینه کارگر در واحد زمان به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$C_{tl} = T_{co}.N_s.C_l \qquad (۸)$$

در رابطه فوق،

C_{tl} = هزینه کارگر مورد نیاز برای یک بار آبیاری کل مزرعه برحسب ریال

C_l = هزینه کارگر در واحد زمان برحسب ریال در دقیقه

با جایگزینی معادله (۵) در معادله (۸) ، معادله زیر به‌دست می‌آید.

$$C_{tl} = \frac{C_l.W_f.L_f.Q_o.T_{co}}{W.L.Q_t} \qquad (۹)$$

۳- محاسبه هزینه حفر جویچه برای یک بار آبیاری کل مزرعه

هزینه حفر جویچه از حاصل ضرب طول کل جویچه‌ها در هزینهٔ حفر واحد طول آنها به‌دست می‌آید، که این مربوط به کل دوره زراعی می‌باشد. بنابراین برای یک بار آبیاری باید آن را بر تعداد دفعات آبیاری تقسیم نمود.

$$C_{tf} = \frac{L_f.W_f.C_f}{N_i.W} \qquad (۱۰)$$

در رابطه فوق،

C_{tf} = هزینه حفر جویچه برای یکبار آبیاری کل مزرعه برحسب ریال

C_f = هزینه حفر واحد طول جویچه برحسب ریال در متر

N_i = تعداد دفعات آبیاری در طول فصل زراعی

ملاحظه می‌شود که هزینه مذکور تابعی از متغیرهای طراحی مانند دبی ورودی به جویچه و طول جویچه نیست. بنابراین مقدار آن ثابت است و در محاسبات بهینه‌سازی نقشی ندارد و فقط در محاسبه هزینه ها دخالت دارد.

۴- محاسبه هزینه حفر نهرهای آبیاری برای یکبار آبیاری کل مزرعه

مطابق شکل (۱) برای چند مجموعه آبیاری، یک نهر آبیاری در ابتدای آنها حفر می‌شود، که جویچه‌ها از آن آبگیری می‌کنند. هزینه این نهرها از حاصل‌ضرب طول کل آنها در هزینه حفر واحد طول‌شان محاسبه می‌شود. شبیه قسمت قبلی این هزینه نیز بایستی بر تعداد دفعات آبیاری تقسیم شود.

$$C_{td} = \frac{W_f.N_{sl}.C_d}{N_i} \qquad (۱۱)$$

در رابطه فوق:

C_{td} = هزینه حفر نهرهای آبیاری برای یکبار آبیاری کل مزرعه برحسب ریال

C_d = هزینه حفر واحد طول نهر برحسب ریال در متر

با جایگزینی معادله (۱) درمعادله (۱۱)، معادله زیر به‌دست می‌آید:

$$C_{td} = \frac{W_f.L_f.C_d}{L.N_i} \qquad (۱۲)$$

هزینه کل جهت یکبار آبیاری مزرعه با جمع هزینه‌های

چهارگانه فوق به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (۳):

$$C_t = \frac{W_f.L_f.Q_\circ.T_{co}}{W.L}\left(C_w + \frac{C_l}{Q_t}\right) + \frac{W_f.L_f}{N_i}\left(\frac{C_f}{W} + \frac{C_d}{L}\right) \quad (۱۳)$$

در معادله فوق،

C_t = کل هزینه های آبیاری جهت یکبار آبیاری مزرعه برحسب ریال

اگر حجم آب موجود در طول فصل زراعی مشخص باشد و بخواهیم طراحی را بر مبنای آن انجام دهیم، می‌توان معادلات زیر را نوشت:

$$V_t = Q_t.T \times ۲۴ \times ۶۰ \quad (۱۴)$$

$$A = \frac{۱۰۰۰.V_t}{w_g} \quad (۱۵)$$

در معادله فوق،

V_t = حجم آب موجود در طول فصل زراعی به مترمکعب

T = طول فصل زراعی به روز

w_g = عمق ناخالص آب آبیاری به میلی‌متر

A= سطح زیر کشت به متر مربع

از طرفی معادله (۱۵) به شکل زیر برقرار است:

$$A = W_f.L_f = \frac{۱۰۰۰.V_t}{w_g} \quad (۱۶)$$

با جایگزینی معادله (۱۵) در معادله (۱۲) داریم.

$$C_t = \frac{۱۰۰۰.V_t.Q_\circ.T_{co}}{w_g.W.L}\left(C_w + \frac{C_l}{Q_t}\right) + \frac{۱۰۰۰.V_t}{w_g.N_i}\left(\frac{C_f}{W} + \frac{C_d}{L}\right) \quad (۱۷)$$

در سال ۲۰۰۱ معادله‌ای شبیه به معادله فوق توسط والیانتاز ارائه شده است (۱۳)، اما روش حلی که ایشان به‌کاربرده با روش استفاده شده در این طرح متفاوت است. معادله (۱۶) نشان می‌دهد که هزینه کل تابعی از سه متغیر $L, T_{co}, Q_\circ$ می‌باشد که متغیر T_{co} را می‌توان به‌صورت تابعی از دو متغیر دیگر نوشت. برای این کار ابتدا رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$T_{co} = T_l + T_r \quad (۱۸)$$

در معادله فوق،

T_l = زمان پیشروی آب به انتهای جویچه برحسب دقیقه

T_r = زمان نفوذ به اندازه نیاز خالص آبیاری برحسب دقیقه

برای محاسبه T_r از هر معادله نفوذی می‌توان استفاده نمود. برای معادله نفوذ کوستیاکف به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (۱۲):

$$Z = K.T^{\alpha} \quad (۱۹)$$

$$T_r = \left(\frac{Z_r}{K}\right)^{۱/\alpha} \quad (۲۰)$$

در معادلات فوق،

Z = عمق آب نفوذیافته برحسب متر

T = زمان نفوذ برحسب دقیقه

Z_r = نیاز خالص آبیاری برحسب متر

K, α = ضرائب نفوذ معادله کوستیاکف

برای محاسبه T_l بایستی از یک معادله صریح و دقیق استفاده شود تا بتوان بهینه‌سازی معادله (۱۶) را انجام داد. برای این منظور از معادله ارائه شده توسط والیانتاز (۲۰۰۱) استفاده می‌شود (۱۲).

$$T_l = (۱+۰/۱۵\alpha).L.A_\circ / Q_\circ + (\sigma_z.K.L/Q_\circ)^{۱/(۱-\alpha)} \quad (۲۱)$$

در معادله فوق،

$A_\circ$ = سطح مقطع جریان در ابتدای جویچه برحسب متر مربع

σ_z = ضریب شکل جریان زیر سطحی. این ضریب از معادله زیر محاسبه می‌شود (۱۲).

$$\sigma_z = \frac{\alpha.\pi.(۱-\alpha)}{Sin(\alpha.\pi)} \quad (۲۲)$$

مقدار $A_\circ$ با استفاده از معادله مانینگ و ضرائب شکل جویچه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (۱۲):

$$A_\circ = \left(\frac{N^۲Q_\circ^{۲}}{۳۶۰۰S_\circ.\rho_۱}\right)^{۱/\rho_۲} \quad (۲۳)$$

در رابطه فوق،

N = ضریب زبری مانینگ

$S_\circ$ = شیب کف جویچه (به‌صورت اعشاری)

$\rho_۲, \rho_۱$ = ضرائب شکل جویچه. این ضرائب با توجه به معادله مانینگ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (۱۲):

$$A.R^{۴/۳} = \rho_۱ A^{\rho_۲} \quad (۲۴)$$

در معادله فوق،

A= سطح مقطع جریان برحسب متر مربع

R = شعاع هیدرولیکی برحسب متر

نهایتاً با جایگزینی معادلات (۱۷)، (۱۹) و (۲۰) در معادله (۱۶)، معادله‌ای به‌دست می‌آید، که نشان می‌دهد C_t تابعی از دو متغیر Q_o و L می‌باشد. معادله مذکور را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$C_t = f(Q_o, L) \qquad (۲۴)$$

برای محاسبه این دو متغیر بایستی معادله (۲۴) بهینه‌سازی شود. علت استفاده از روش بهینه‌سازی این است که اولاً با مشتق‌گیری از معادله (۲۴)، جواب‌های صریح برای متغیرهای آن به‌دست نمی‌آید. ثانیاً روش بهینه‌سازی امکان استفاده از روش‌های حل عددی و خودکارسازی طراحی توسط رایانه را فراهم می‌سازد. در این تحقیق بهینه‌سازی به‌کمک نرم‌افزار لینگو انجام شد. نرم‌افزار لینگو یکی از قدرتمندترین و شناخته شده‌ترین نرم‌افزارها در حوزه تحقیق در عملیات است که در بین کاربران رشته‌های مختلف جایگاه ویژه‌ای دارد. امروزه بسیاری از مدل‌های بهینه‌سازی تحقیق در عملیات اعم از مدل‌های خطی، غیرخطی و یا عدد صحیح به‌کمک نرم‌افزار لینگو به سادگی قابل تجزیه و تحلیل می‌باشند (۱۰).

هزینه‌های کاشت، داشت و برداشت

مقدار هزینه‌های کاشت، داشت و برداشت با مراجعه حضوری از سازمان جهاد کشاورزی استان چهارمحال و بختیاری برای سال ۱۳۹۲ جمع آوری شد. این هزینه‌ها شامل هزینه‌های آبیاری جویچه‌ای که در بند قبل ذکر گردید، نمی‌باشد.

تابع تولید و تابع درآمد

در این طرح از رسم مقادیر مختلف آب آبیاری در مقابل میزان عملکرد کل (یا همان کل محصول قابل فروش) تابع تولید به‌دست می‌آید و سپس معادله آن با کمک نرم‌افزار Excel محاسبه می‌شود. تابع درآمد از ضرب قیمت فروش یک کیلوگرم محصول، در سطح زیر کشت آن، در معادله تابع تولید به‌دست می‌آید. با داشتن این معادله می‌توان میزان درآمد به‌ازای مصرف سطوح مختلف آب آبیاری را حساب کرد.

بهینه‌سازی تابع هدف

در حالت کلی تابع هدف که همان تابع سود است، به شکل زیر به‌دست آمد:

$$B = y_w.cz.A - C_t.N_i - C_o.A \qquad (۲۵)$$

که y_w در آن، تابع تولید محصول (کیلوگرم در هکتار) می‌باشد. با جایگذاری معادله (۱۶) در معادله (۲۵) معادله سود در حالت کلی به شکل معادله (۲۶) حاصل شد:

$$B = y_w.C_z.A - \{\frac{۱۰۰۰.V_t.Q_o.T_{co}}{w_g.W.L}\left(C_w + \frac{C_l}{Q_t}\right) + \frac{۱۰۰۰.V_t}{w_g.N_i}\left(\frac{C_f}{W} + \frac{C_d}{L}\right)\}.N_i - C_o.A \qquad (۲۶)$$

$$B = (-.۰۵۹w_n^۲ + ۹۲/۴۵۸w_n - ۱۰۵۱۹).C_z.\frac{^{o}/_{۱}V_t}{w_g} - \{\frac{۱۰۰۰.V_t.Q_o.T_{co}}{w_g.W.L}\left(C_w + \frac{C_l}{Q_t}\right) + \frac{۱۰۰۰.V_t}{w_g.N_i}\left(\frac{C_f}{W} + \frac{C_d}{L}\right)\}.N_i - C_o.\frac{^{o}/_{۱}V_t}{w_g} \qquad (۲۷)$$

محدودیت‌ها

قیود یا محدودیت‌های برنامه لینگو شامل موارد زیر می‌باشد:

۱- تفاضل زمان قطع جریان از فرصت زمان لازم برای نفوذ به علاوه فرصت زمان لازم برای پیشروی آب تا انتهای جویچه برابر صفر است.

$$t_{co} - t_l - t_r = ۰ \qquad (۲۸)$$

۲- رابطه زیر بین عمق خالص آبیاری و عمق ناخالص آبیاری برقرار است.

$$w_g = \frac{w_n}{E_a} \qquad (۲۹)$$

۳- مقدار یا ضریب کم آبیاری بهینه، برابر با عمق خالص آبیاری در شرایط بهینه تقسیم بر عمق خالص آبیاری در حالت آبیاری کامل است.

$$\text{ضریب کم آبیاری} = \frac{w_n}{zr.Ni.۱۰۰۰} \qquad (۳۰)$$

۴- مقادیر دبی ورودی به جویچه، طول جویچه و زمان قطع جریان باید همواره عددی مثبت باشند.

جدول ۲. مقادیر آب کاربردی در طول فصل رشد و عملکرد تر وخشک در هر تیمار

سطوح آبیاری	٪۴۰ آبیاری کامل	٪۵۵ آبیاری کامل	٪۷۰ آبیاری کامل	٪۸۵ آبیاری کامل	٪۱۰۰ آبیاری کامل	٪۱۱۵ آبیاری کامل	٪۱۳۰ آبیاری کامل
مقدار آب کاربردی (mm)	۲۶۹	۳۷۰	۴۷۰	۵۷۱	۶۷۲	۷۷۳	۸۷۳
عملکرد تر(Kg/ha)	۴۳۱۱۱	۵۹۷۷۸	۷۳۷۷۸	۷۹۵۵۶	۸۷۳۳۳	۸۶۸۸۹	۸۸۱۵۶
عملکرد خشک (Kg/ha)	۱۰۳۹۴	۱۵۲۹۷	۱۹۹۵۰	۲۲۱۷۲	۲۵۹۰۳	۲۶۰۶۷	۲۴۸۱۶

جدول ۳. تجزیه واریانس میانگین مربعات عملکرد تر و خشک

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات	
		عملکرد تر	عملکرد خشک
سطوح آبیاری	۶	۸۶۵۷۷۹۹۹۳**	۷۵۵۰۷۰۴۲**
خطا	۱۲	۴۵۳۰۷۷۵	۳۴۰۴۷۶۱
ضریب تغییرات		۲/۸۷	۱/۴

* و ** به‌ترتیب بیانگر اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال ۵٪ و ۱٪ و ns بیانگر عدم اختلاف معنی‌دار می‌باشد

$$Q_s > 0, L > 0, t_{co} > 0 \quad (۳۱)$$

۵- دبی ورودی به جویچه باید از حداکثر دبی فرسایشی کمتر باشد.

$$Q_s \le \frac{0/00036}{s_s} \quad (۳۲)$$

پارامترهای مورد نیاز برنامه

پارامترهای مورد نیاز و مقادیر آنها، برای حل مسئله توسط برنامه لینگودر جدول (۱) آورده شده است.

نتایج و بحث

عملکرد و تابع تولید محصول

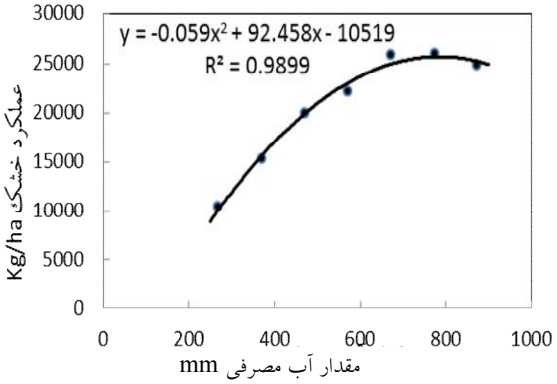
مقادیر آب کاربردی برای هر تیمار در طول فصل رشد برای ذرت علوفه‌ای در جدول (۲) ارائه شده است. مقدار آب کاربردی در تیمار آبیاری کامل برابر با ۶۷۲ میلی‌متر شد. اثر سطوح مختلف آب آبیاری بر میزان عملکرد تر ذرت علوفه‌ای در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). کمترین و بیشترین عملکرد تر به‌ترتیب مربوط به سطوح آبیاری ۴۰ و ۱۳۰ درصد آبیاری کامل با مقادیر به‌ترتیب ۴۳/۱۱ و ۸۸/۱۵ تن در هکتار بود (جدول ۳). مشعل و همکاران مقدار عملکرد تر رقم سینگل کراس ۷۰۴ تحت روش آبیاری جویچه‌ای برای دو تیمار ۴۰ و ۱۲۰ درصد را به‌ترتیب ۴۲/۶۲ و ۶۲/۲۷ تن در هکتار به‌دست آوردند (۵). به‌نظر می‌رسد دلیل بالاتر بودن عملکرد ذرت در این پژوهش متفاوت بودن رقم کشت شده، اقلیم منطقه، خصوصیات خاک مزرعه، عوامل مدیریتی در مزرعه و تاریخ کاشت باشد. قیصری و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند با ثابت بودن میزان کود کاربردی، با افزایش عمق آب مصرفی عملکرد ذرت علوفه‌ای افزایش می‌یابد (۹). نتایج محققان دیگر نیز نشان می‌دهد با افزایش آب کاربردی عملکرد کل محصول افزایش می‌یابد (۱، ۲، ۸ و ۱۰). مقایسه میانگین‌ها نشان داد عملکرد تر محصول در تیمارهای ۱۰۰، ۱۱۵ و ۱۳۰ درصد آبیاری کامل، تفاوت معنی‌دار نداشت (جدول ۴).

همچنین اثر سطوح مختلف آب آبیاری بر میزان عملکرد خشک ذرت علوفه‌ای در سطح ۱ درصد معنی‌دار بود (جدول ۳). کمترین و بیشترین عملکرد خشک به‌ترتیب مربوط به سطوح آبیاری ۴۰ و ۱۱۵ درصد آبیاری کامل با مقادیر به‌ترتیب۱۰/۴ و ۲۶/۰۷ تن در هکتار بود (جدول ۴). همان‌گونه

جدول ۴. مقایسه میانگین‌های عملکرد تر و خشک

سطوح آبیاری	٪۴۰ آبیاری کامل	٪۵۵ آبیاری کامل	٪۷۰ آبیاری کامل	٪ ۸۵ آبیاری کامل	٪۱۰۰ آبیاری کامل	٪۱۱۵ آبیاری کامل	٪۱۳۰ آبیاری کامل
عملکرد تر(Ton/ha)	۴۳/۱۱^{e}	۵۹/۷۸^{d}	۷۳/۷۸^{c}	۷۹/۵۶^{b}	۸۷/۳۳^{a}	۸۶/۸۹^{a}	۸۸/۱۶^{a}
عملکرد خشک (Ton/ha)	۱۰/۴^{e}	۱۵/۳^{d}	۱۹/۹۵^{c}	۲۲/۱۷^{b}	۲۵/۹^{a}	۲۶/۰۷^{a}	۲۴/۸^{a}

اعداد هر ستون که دارای یک حرف مشترک هستند، اختلاف معنی‌داری براساس آزمون LSD در سطح احتمال ۵ درصد ندارند



شکل ۲. تابع تولید ذرت علوفه‌ای

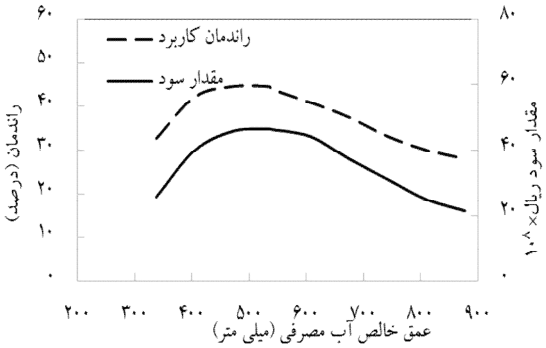
که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، در تیمارهای ۱۰۰، ۱۱۵ و ۱۳۰ درصد آبیاری کامل تفاوت معنی‌داری در عملکرد خشک مشاهده نمی‌شود.

از رسم مقادیر عملکرد خشک در برابر مقدار آب مصرفی جدول (۲) تابع تولید ذرت علوفه‌ای مطابق شکل (۲) به‌دست آمد. دلیل استفاده نکردن از عملکرد تر ذرت علوفه‌ای در محاسبه تابع تولید، متغیر بودن قیمت فروش محصول تر تحت مدیریت‌های مختلف آبیاری است، بدین معنی که قیمت فروش محصول تری که تحت تنش آبی قرار گرفته است کمتر از محصول بدون تنش است و این موضوع (ثابت بودن قیمت فروش) در محاسبات بخش‌های بعدی دارای اهمیت است.

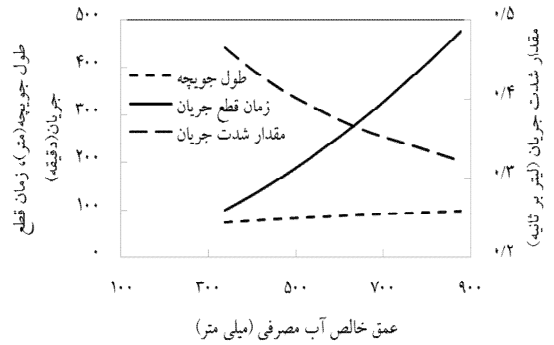
نتایج بهینه‌سازی

بهینه‌سازی با کمک نرم‌افزار لینگو انجام شد. نتایج نشان داد، بیشترین سود به‌ازای مصرف ۵۳۵ میلی‌متر عمق خالص آبیاری و از کار برد مقادیر ۸۵ متر، ۰/۰۲۳۵ مترمکعب بر دقیقه (۰/۳۹ لیتر بر ثانیه) و ۲۱۰ دقیقه به‌ترتیب برای طول جویچه، دبی ورودی و زمان قطع جریان حاصل شد. بیشترین مقدار راندمان کاربرد در این حالت و برابر ۴۵ درصد به‌دست آمد. با توجه به این که در آبیاری کامل عمق خالص آبیاری برابر ۶۷۲ میلی‌متر بود، مقدار عمق بهینه برابر با ۷۹ درصد در حالت آبیاری کامل می‌باشد، که این موضوع نشان از اهمیت کم‌آبیاری برای نیل به بیشترین سود دارد. حال اگر بهینه‌سازی با فرض ثابت بودن عمق خالص آبیاری برابر با ۶۷۲ میلی متر (حالت آبیاری کامل) انجام شود، مقادیر طول جویچه، دبی ورودی و زمان قطع جریان به ترتیب برابر با ۹۲ متر، ۰/۳۶ لیتر بر ثانیه و ۳۰۸ دقیقه با حداکثر کردن مقدار سود به‌دست می‌آید، در این حالت راندمان کاربرد برابر با همان ۴۵ درصد می‌باشد. شکل (۳) مقادیر راندمان کاربرد و سود و شکل (۴) متغیر (مشخصه)های طراحی به ازای عمق‌های مختلف آب مصرفی را نشان می‌دهد.

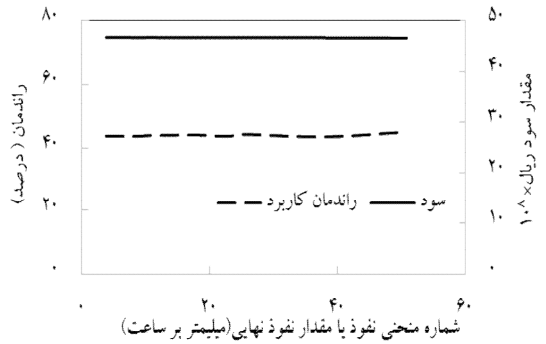
نتایج این تحقیق به بهره‌برداران کمک می‌کند، که به‌ازای



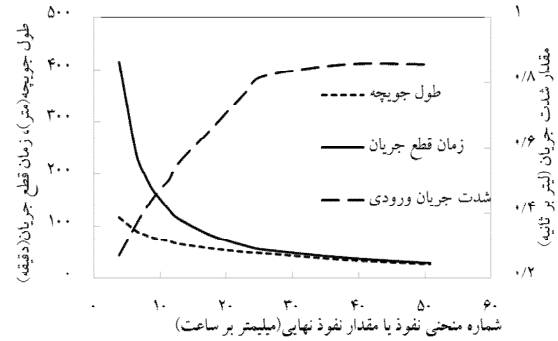
شکل ۳. مقادیر سود و راندمان کاربرد به ازای حجم معینی از آب مصرفی



شکل ۴. مشخصه‌های طراحی آبیاری جویچه‌ای در برابر عمق آب



شکل ۵. مقادیر راندمان کاربرد و سود در مقابل خاک‌های با بافت مختلف برای گیاه ذرت علوفه‌ای



شکل ۶. مقادیر مشخصه‌های طراحی در مقابل خاک‌های با بافت مختلف

عمق خالص آب آبیاری ثابت (دلخواه) در مزرعه‌ای با بافت خاک و اقلیم مشابه مزرعه آزمایشی، ترکیبی از طول جویچه، شدت جریان ورودی و زمان قطع جریان به کار ببرند که به بیشترین سود به ازای این عمق آبیاری برسند. همانگونه که در شکل‌های (۳) و (۴) مشخص است، با افزایش عمق خالص آب کاربردی، مقادیر طول جویچه و زمان قطع جریان برای شرایط بهینه افزایش پیدا می‌کنند، در حالی که از شدت جریان ورودی به جویچه کاسته می‌شود.

بهینه‌سازی به ازای خاک‌های با بافت متفاوت

شکل (۵) مقادیر راندمان کاربرد و سود و شکل (۶) مقادیر مشخصه‌های طراحی در مقابل شدت نفوذ نهایی آب به خاک‌های با بافت مختلف برای گیاه ذرت علوفه‌ای را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این اشکال مشخص است با تغییر بافت خاک مقادیر راندمان کاربرد و سود در شرایط بهینه تقریباً ثابت است ولی با افزایش نفوذپذیری خاک از طول جویچه و زمان قطع جریان در حالت بهینه کاسته می‌شود، در حالی که مقدار شدت جریان ورودی به جویچه کم می‌شود. با تغییر نفوذپذیری خاک عمق خالص آبیاری یا همان درصد کم آبیاری ثابت و برابر با ۵۳۵ میلی‌متر یا ۷۹ درصد آبیاری کامل می‌باشد. با استفاده از این نمودارها می‌توان در بافت‌های مختلف، مقادیر متغیرهای طراحی بهینه را به‌دست آورد. در واقع شکل (۶) منحنی‌های طراحی برای محصول ذرت علوفه‌ای در بافت‌های مختلف خاک می‌باشد، که طراح با در اختیار داشتن این منحنی‌ها برای اقلیم و مدیریتی مشابه طرح مورد مطالعه می‌تواند ترکیبی از مشخصه‌های طراحی به کار ببرد که به بیشترین سود و راندمان کاربرد دست یابد.

نتیجه‌گیری

مشخصه‌های طراحی بهینه در حالت آبیاری کامل با حالت کم آبیاری متفاوت بود. نتایج نشان داد، برای محصول ذرت علوفه‌ای با به کار بردن ۵۳۵ میلی‌متر عمق خالص آبیاری (که برابر با ۷۹ درصد عمق خالص در آبیاری کامل است) و مقادیر ۸۵ متر، ۰/۳۹ لیتر بر ثانیه و ۲۱۰ دقیقه به‌ترتیب برای طول جویچه، دبی ورودی و زمان قطع جریان بیشترین سود حاصل می‌شود که این مشخصه‌ها در حالت آبیاری کامل با این حالت متفاوت بودند. با افزایش نفوذپذیری خاک از طول جویچه و زمان قطع جریان در حالت بهینه کاسته می‌شود، در حالی که مقدار شدت جریان ورودی به جویچه زیاد می‌شود. در ضمن با تغییر نفوذپذیری خاک عمق خالص آبیاری یا همان درصد کم‌آبیاری ثابت می‌باشد و مقادیر راندمان کاربرد و سود در شرایط بهینه تقریباً ثابت است یعنی در شرایط بهینه برای خاک‌های با بافت مختلف ترکیبی از مشخصه‌های طراحی وجود دارد که راندمان کاربرد و سود را ثابت نگه می‌دارند.

منابع مورد استفاده

۱. انصاری، ح. ۱۳۸۶. تعیین عمق شاخص و بهینه آبیاری در ذرت‌های زودرس با هدف احتساب حداکثر سود. آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۲(۲): ۱۱۶-۱۰۷.

۲. رضایی، ع.، ع. ر. غفوری، ف علی‌اصغری، ز امیرتیموری، گ. کریمی و ر. مقیمی. ۱۳۸۶. بررسی تأثیر تنش آبی بر محصول ذرت علوفه‌ای در منطقه کرمان. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، کرمان.

۳. شایان‌نژاد، م. ۱۳۸۳. طراحی بهینه آبیاری شیاری براساس حداقل هزینه و حداکثر راندمان آبیاری. اولین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب وخاک، کرمان. اردیبهشت ماه ۱۳۸۳

۴. علیزاده، ا. ۱۳۸۹. *طراحی سیستم های آبیاری سطحی*.انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، ۶۵۵ ص.

۵. مشعل، م.، م. وراوی‌پور، س. ا. س. نوری و ا. زارع‌زیرک. ۱۳۸۷. بهینه‌سازی عمق آب مصرفی ذرت با کم آبیاری (مطالعه موردی: دشت و رامین). آب، خاک و گیاه در کشاورزی ۸(۴): ۱۳۴-۱۲۳

۶. نوابیان، م. و م. مسلمی. ۱۳۹۱. بهینه یابی طول جویچه و دبی جریان در آبیاری جویچه ای. مجله پژوهش آب ایران ۶(۱۱) : ۳۴-۲۷.

7. Amer, H. K. 2010. Corn crop response under managing different irrigation and salinity levels. Agr. Water Manage. 97: 1553-1563.
8. Djaman, K. 2011. Crop evapotranspiration, crop coefficients, plant growth and yield parameters, and nutrient uptake dynamics of maize (*zea mays* L.) Under full and limited irrigation. Effect of irrigation on yield and above-ground biomass. University of Nebraska, Lincoln. pp .61-67.
9. Gheysari, M., S. M. Mirlatifi, M. Homaee, M. E. Asadi and G. Hoogenboom. 2009. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates. Agric. Water Manage. 96: 946-954.
10. Mahmoud, M. 2006. Process Systems Engineering, Appendix ii: Lingo software, Academic Press 7: 389-394.
11. SrinivasaPrasad, A., N. V. Umamahesh and G. K. Viswanath. 2006. Optimal irrigation planning under water scarcity. ASCE J. Irrig. Drain. Eng. 132(3): 228–237.
12. Valiantzas, J. D. 2001. Optimal furrow design. I: Time of advance equation. J. Irrig. Drain. E. ASCE. 127: 201-208.
13. Valiantzas, J. D. 2001. Optimal furrow design. II: Explicit calculation of design variables. J. Irrig. Drain. E. ASCE 127: 209-215.

J. Water and Soil Sci (Sci. & Technol. Agric. & Natur. Resour.)
Vol. 21, No. 3, Fall 2017, Isf. Univ. Technol., Isf., Iran.

Economic Optimization of Design Parameters of Furrow Irrigation under Deficit Irrigation for Corn in Shahrekord Region

M. Naderi[1*], M. Shayannejad[1], B. Haghighati[2], S. Karimi[3] and S. Heydari [1]

(Received: Dec. 05-2015 ; Accepted: Dec. 26-2016)

Abstract

Considering water scarcity in Iran, application of deficit irrigation or water stress on some crops is inevitable. We need to provide appropriate design for deficit irrigation. Furrow irrigation management to obtain high efficiency and uniformity is difficult. Therefore, to investigate the variation of the input discharge, the cut-off time and furrow length that are effective on the efficiency and uniformity are very important. The purpose of this research is to provide a method for determining the optimum water use depth and optimizing furrow irrigation design in deficit irrigation conditions and finally comparing design characteristics under full irrigation conditions and deficit irrigation and comparison in different soil tissues. In order to achieve the objectives of this research, an experiment was conducted on forage corn in Shahrekord in a completely randomized block design with 7 treatments of different levels of irrigation in 3 replications. The costs and benefits functions were determined based on design variable and depth of applied water. The software Lingo was used to optimize the design variables (length of the furrow, the input discharge and cut-off time) and depth of applied water in deficit irrigation condition. The results showed that the highest net profit was obtained using 535 mm (equivalent to 79% of full irrigation) and 85 meters, 0.39 liter per second and 188 minutes, respectively, for the length of furrow, input discharge and cut-off time. The results of this design were compared to full irrigation of deferent soil textures. The results showed that an increase in the permeability of the soil caused length of furrow and the cut-off time to decrease, while the flow rate increases and depth of applied water or percent of deficit irrigation were constant.

Keywords: Production function, Benefits functions, Optimum Applied Water.

1. Dept. of Water, Eng. College of Agric., Isf. Univ. of Technol., Iran.
2. Chaharmahal Va Bakhtiari Reseach Center, Iran.
3. Dept. of Irrigation, Faculty of Agric., Univ., Shiraz, Iran.
*: Corresponding Author, Email: naderi7403@yahoo.com