

بررسی و تحلیل متغیرهای جریان و هندسی بر عملکرد بهینه آبیاری نواری با استفاده از مدل WinSRFR

وحید رضاوردی نژاد^{۱*}، رزا جنوبی^۲، سینا بشارت^۳، فریبرز عباسی^۴

۱. استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۲. دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۳. استاد مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج

۴. تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱/۸ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۴/۴/۲۳

چکیده

مسئله اصلی روش‌های آبیاری سطحی بازده اندک آب آبیاری است که اغلب از ضعف مدیریت و طراحی نامناسب ناشی می‌شود. هدف از این مطالعه، بهبود عملکرد آبیاری نواری براساس چهار متغیر شامل دبی ورودی، زمان قطع جریان، طول و شیب نوار بود. برای این منظور هشت سری داده میدانی آبیاری نواری با سیستم انتها باز در نظر گرفته شد. واسنجی پارامترهای نفوذ نوارها براساس روش بهینه‌سازی چندسطحی انجام شد. نتایج نشان داد که روش بهینه‌سازی چندسطحی در تخمین پارامترهای نفوذ آبیاری نواری روشی قابل قبول و با دقت مناسب است. مطابق روش بهینه‌سازی چندسطحی متوسط خطای نسبی تخمین حجم رواناب ۰/۵ درصد و متوسط ریشه میانگین مربعات خطای تخمین زمان پیشروی و پسروی به ترتیب ۳/۱ و ۳/۲ دقیقه محاسبه شد. با استفاده از منحنی‌های هم راز بازده کاربرد و یکنواختی توزیع WinSRFR، عملکرد نوارها بهینه شد. براساس مدیریت متغیرهای جریان دبی ورودی و زمان قطع جریان، بازده کاربرد به طور متوسط ۱۲ درصد (با فرض کفایت ۱۰۰ درصد) برای هشت سری آزمایش نسبت به شرایط موجود افزایش پذیر است. نتایج نشان داد متغیرهای هندسی نوار (شیب و طول نوار) به همراه متغیرهای جریان، تأثیر کم بر عملکرد بهینه داشت و مطابق تمام متغیرهای جریان و هندسی نوار به عنوان متغیرهای تصمیم، بازده کاربرد به طور متوسط ۱۳/۳۵ درصد نسبت به شرایط موجود افزایش پذیر است.

کلیدواژگان: روش بهینه‌سازی چندسطحی، مدل آبیاری سطحی، مدیریت آبیاری.

مقدمه

مشکل عمده روش‌های آبیاری سطحی بازده اندک آب آبیاری است که به طور عمده از ضعف مدیریت و طراحی نامناسب ناشی می‌شود. با توجه به هزینه زیاد سامانه‌های آبیاری تحت فشار و افزایش روزافزون هزینه‌های انرژی، بهبود و اصلاح روش‌های آبیاری سطحی امری اجتناب‌ناپذیر است (Abbasi, 2012). آبیاری سطحی رایج‌ترین شیوه آبیاری در جهان است و بیش از ۹۰ درصد از کل اراضی فاریاب به این طریق آبیاری می‌شود (Abbasi, 2012). در طراحی و ارزیابی آبیاری سطحی، نفوذ مهم‌ترین پارامتر است و بر مراحل پیشروی و پسروی آب در مزرعه تأثیر دارد. تعیین نفوذ آب به خاک به دلایل مختلف از جمله استفاده از معادلات تجربی، وابستگی به زبری سطح، مکان و زمان، از پارامترهای مهم در مطالعات آبیاری است (Ansari, 2011). معادله کوستیاکف- لوئیز یکی از پرکاربردترین معادلات

تخمین میزان نفوذ در آبیاری سطحی است که برای گستره وسیعی از خاک‌ها مناسب است (Hanson et al., 1993):

$$I = kt^a + f.t \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن I حجم نفوذ تجمعی در واحد طول در واحد عرض نوار (m^3/m^2)، f_0 سرعت نفوذ نهایی ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{min}$)، t زمان (min)، ضرایب a (-) و k ($\text{m}^3/\text{min}^a/\text{m}^2$) پارامترهای تجربی معادله نفوذ است. از جمله روش‌های متداول تخمین پارامترهای نفوذ می‌توان به روش‌های دو قطه‌ای الیوت و واکر (Elliott and Walker, 1982)، روش یک نقطه‌ای شپرد و همکاران (Shepard et al., 1993)، بهینه‌سازی مک‌کلایمونت و اسمیت (McClymont and Smith, 1996)، یک نقطه‌ای والیانتراس و همکاران (Valiantzas et al., 2001)، یک نقطه‌ای میلپالی و همکاران (Mailapalli et al., 2008)، بهینه‌سازی رودریگز و مارتوس (Rodriguez and Martos, 2008) و دونقطه‌ای ابراهیمیان و همکاران (Ebrahimian et al., 2010) اشاره کرد. این روش‌ها مبتنی بر معادله بیلان حجم است و فقط از داده‌های مرحله پیشروی جریان استفاده می‌کند. روش‌های

مبتنی بر معادله بیلان حجم، این ضعف را دارد که فقط از داده‌های مرحله پیشروی استفاده می‌کند و بخشی از فرایند جریان در تخمین پارامترها، نادیده گرفته می‌شود.

برای تخمین دقیق‌تر پارامترهای نفوذ، به جای داده‌های پیشروی، باید از اطلاعات کل مراحل آبیاری استفاده کرد (Walker, 2005؛ Abbasi, 2012). روش بهینه‌سازی چندسطحی، یکی از روش‌های نسبتاً جدید برای تخمین پارامترهای معادله کوستیاکف- لوئیز و نیز ضریب زبری مانینگ است که برخلاف روش‌های قبلی، از اطلاعات تمام مراحل آبیاری استفاده می‌کند (Walker, 2005). Moravejalakhani و همکاران (2009) در مطالعه‌ای روش بهینه‌سازی چندسطحی را در تخمین پارامترهای نفوذ معادله کوستیاکف- لوئیز و ضریب زبری آبیاری جویچه‌ای و با در نظر گرفتن سه شکل هیدروگراف ورودی مختلف شامل ثابت، کاهشی و کابلی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این روش دقت بیشتری نسبت به روش دونقطه‌ای دارد. Verdinejad and Norjoo (2014) پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف- لوئیز و ضریب زبری مانینگ را در شرایط تحکیم بستر جویچه، به روش بهینه‌سازی چندسطحی واسنجی کردند که نتایج حاکی از دقت بالای این روش در تخمین پارامترهای نفوذ در آبیاری جویچه‌ای بود. از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد آبیاری سطحی می‌توان به بازده کاربرد آب، یکنواختی توزیع و کفایت آبیاری اشاره کرد. با استفاده از مدل‌های ریاضی در آبیاری سطحی، امکان شبیه‌سازی پدیده جریان، مراحل آبیاری، بازده‌های آبیاری و یکنواختی توزیع وجود دارد و می‌توان براساس این مدل‌ها رویداد آبیاری را شبیه‌سازی و با تغییر عوامل ورودی آن که در واقع عوامل طراحی نیز است، به بازده و یکنواختی بالا دست یافت (Mokari-Gahroodi et al., 2013).

مدل‌های هیدرودینامیک کامل، اینرسی صفر و موج کینماتیک از رایج‌ترین مدل‌های ریاضی در آبیاری سطحی است. مدل اینرسی- صفر به سبب سادگی، دقت و دامنه کاربرد زیاد، مدل برتر در مدل‌سازی هیدرولیک جریان آب روی سطح خاک است و در شرایط مزرعه‌ای، دقت مدل هیدرودینامیک کامل را دارد و فاقد نقاط ضعف آن (ناپایداری و واگرایی) است (Abbasi, 2012). نتایج مدل ریاضی آبیاری سطحی همان اندازه دقیق است که اطلاعات اولیه مورد نیاز آن‌ها دقیق باشد. در عمل، اندازه‌گیری جریان ورودی و مشخصات هندسی مزرعه با دقت نسبتاً خوبی امکان‌پذیر است و بیشترین منبع خطا به تعیین ویژگی‌های نفوذ از سطح خاک و ضریب زبری سطح خاک مربوط می‌شود، زیرا این عوامل طی عملیات آبیاری، با زمان و

مکان متغیر است (Walker, 2005؛ Abbasi, 2012).

نرم‌افزار WinSRFR مدل ریاضی یک‌بعدی برای تحلیل و شبیه‌سازی آبیاری سطحی است که در سال ۲۰۰۶ توسعه یافت و از جمله مدل‌هایی است که کاربرد زیادی در طراحی و مدیریت آبیاری سطحی دارد. این نرم‌افزار برای تحلیل هیدرولیک آبیاری سطحی چهار بخش دارد: شبیه‌سازی، تحلیل رویداد (ارزیابی مزرعه‌ای)، طراحی فیزیکی و تحلیل عملیات؛ و با دو مدل ریاضی اینرسی صفر و موج کینماتیکی محاسبات را انجام می‌دهد (Bautista et al., 2009a). در مدل WinSRFR امکان برآورد میزان آب نفوذیافته از راه معادلات مختلف از جمله کوستیاکف، کوستیاکف- لوئیز (کوستیاکف اصلاح‌شده)، تابع شاخه‌ای، گرین- امپت و خانواده نفوذ NRCS وجود دارد (Bautista et al., 2009b). این مدل تحلیل‌کننده قادر است تا دامنه راه‌حل‌های منجر به عملکرد تقریباً بهینه را تجسم کند و راه‌حلی برگزیند که همخوانی بیشتری با محدودیت‌های اجرایی داشته باشد (Bautista et al., 2009b).

Mokari-Gahroodi و همکاران (2013) از مدل WinSRFR برای مطالعه، ارزیابی و شبیه‌سازی مراحل مختلف آبیاری جویچه‌ای و برای دامنه گسترده‌ای از بافت‌های خاک استفاده کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که مدل با دقت خوبی زمان‌های پیشروی و پسروی، فرصت و عمق نفوذ و بیلان حجم را در جویچه‌ها شبیه‌سازی می‌کند. Beykzadeh و همکاران (2014) براساس متغیرهای جریان (دبی ورودی و زمان آبیاری) و با استفاده از مدل هیدرودینامیک کامل، سیستم آبیاری جویچه‌ای را با هدف حداکثر کردن بازده کاربرد آب، بهینه‌سازی کردند. Gonzalez و همکاران (2011) اثر شیب طولی مزرعه بر یکنواختی توزیع آبیاری کرتی را با استفاده از WinSRFR بررسی کردند. نتایج به‌صورت گراف‌های سه‌بعدی ارائه شد که رابطه شیب مزرعه و یکنواختی توزیع با سایر متغیرهای بی‌بعد شده شامل پارامترهای نفوذ، ضریب زبری، زمان قطع جریان، شدت جریان و طول و عرض مزرعه را نشان می‌دهد.

Chen و همکاران (2013) در شبکه آبیاری در امتداد رودخانه زرد چین، عملکرد آبیاری نواری را براساس مدل اینرسی- صفر و متغیرهای هندسی عرض و طول نوار بهینه کردند. آن‌ها برای متغیرهای جریان مشخص (دبی ورودی و زمان آبیاری مشخص)، ابعاد نوار را بر اساس خطوط هم‌تراز بازده کاربرد، بهینه کردند. Morris و همکاران (2015) اثر مقدار و مدت زمان دبی ورودی بر شاخص‌های عملکرد آبیاری نواری (بازده کاربرد و نفوذ عمقی) را با مدل winSRFR تحلیل کردند. آن‌ها در دامنه دبی ورودی ۲ تا ۷ لیتر بر ثانیه بر متر و مدت

مواد و روش‌ها

داده‌های تحقیق

در این تحقیق، دو مطالعه موردی مربوط به ارزیابی آبیاری نواری در نظر گرفته شد. مشخصات سری داده‌های مزرعه‌ای مطالعه موردی اول (Abbasi et al., 1999) و مطالعه موردی دوم (Abbasi, 1994) در جدول ۱ آمده است. در این دو مطالعه، اطلاعات مراحل پیشروی، پسروی، هیدروگراف جریان ورودی و خروجی نوارها، پارامترهای هندسی نوارها و سایر مشخصات اندازه‌گیری و ارزیابی شده است. شرایط پایین‌دست جریان در تمامی نوارها به صورت انتها باز بود و با نصب فلوم‌های WSC در انتهای نوارها، هیدروگراف رواناب خروجی اندازه‌گیری شد. سرعت نفوذ پایه (f_0) براساس روش استوانه‌های مضاعف اندازه‌گیری شد (جدول ۱). همچنین، تخمین اولیه ضریب زبری مانینگ (n) براساس جداول توصیه‌شده SCS صورت گرفت (جدول ۱). آزمایش‌ها در دامنه‌ای از خاک با بافت‌های مختلف شامل لومی، لوم رسی سیلتی، رسی و نوارها با هندسه‌های مختلف انجام گرفت (جدول ۱). نوع کشت تمام سری آزمایش‌های مزرعه‌ای در هر دو مطالعه موردی، یونجه بود. عمق خالص آبیاری براساس مقدار تخلیه رطوبت خاک در ناحیه ریشه و برای هر رویداد آبیاری محاسبه شد. رطوبت نیم‌رخ خاک به روش وزنی و قبل از عملیات آبیاری اندازه‌گیری شد. مطابق پیشروی جریان و تابع نفوذ آب در خاک، مدت آبیاری به منظور تأمین عمق خالص مورد نیاز در انتهای نوار محاسبه شد. عمق خالص آبیاری برای هر سری آزمایش در جدول ۱ آمده است.

آبیاری ۵۰ تا ۳۰۰ دقیقه و مطابق خطوط همتراز بازده کاربرد و نفوذ عمقی، دبی ورودی و مدت آبیاری را بهینه کردند.

براساس مطالعات صورت‌گرفته در ایران بخش وسیعی از سامانه‌های آبیاری سطحی به روش نواری آبیاری می‌شود که بازده آن‌ها مانند سایر روش‌های آبیاری سطحی پایین است (Abbasi, 2012). به دلیل زیاد بودن پارامترهای مؤثر بر عملکرد آبیاری سطحی و نیز تغییرات زمانی و مکانی آن‌ها، مدیریت آبیاری سطحی برای به‌دست آوردن بازده و یکنواختی زیاد، پیچیده است؛ از این‌رو بهبود عملکرد آبیاری براساس متغیرهایی با حداقل هزینه اجرایی، سهولت کاربرد و امکان اجرا در مزرعه امری ضروری است.

در این مطالعه در مرحله اول عملکرد بهینه آبیاری نواری بر اساس متغیرهای مدیریت جریان (دبی ورودی و زمان قطع جریان) بررسی شد. در مرحله دوم، تأثیر متغیرهای هندسی نوار (شیب و طول) بر عملکرد بهینه آبیاری بررسی و تحلیل شد. علاوه بر این، مطابق بررسی‌های صورت‌گرفته روش بهینه‌سازی چندسطحی روشی نسبتاً دقیق در تخمین پارامترهای نفوذ بود که برای آبیاری جویچه‌ای توسعه یافته و به‌کار گرفته شده است. در این مطالعه امکان‌سنجی استفاده از روش بهینه‌سازی چندسطحی برای تخمین پارامترهای نفوذ و ضریب زبری مانینگ در آبیاری نواری نیز بررسی شد. برای این منظور از مدل آبیاری سطحی WinSRFR استفاده شد که امکان مدیریت بهینه آبیاری را براساس متغیرهای جریان و هندسی فراهم می‌کند.

جدول ۱. مشخصات سری داده‌های مزرعه‌ای آبیاری نواری مربوط به مطالعات موردی

سری آزمایش مزرعه‌ای مطالعه موردی دوم**				سری آزمایش مزرعه‌ای مطالعه موردی اول*				علامت	متغیر آبیاری
S ₄	S ₃	S ₂	S ₁	B ₄	B ₃	B ₂	B ₁		
۳/۱	۳/۰۲	۱/۳۷	۱/۵	۱/۳۷	۱/۳۵	۱/۶۶	۱/۱۱	q	دبی ورودی (lit/s/m)
۰/۰۰۷	۰/۰۰۶۶	۰/۰۰۱۵۶	۰/۰۰۰۸۶	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۸۲	۰/۰۰۸۲	S	شیب طولی نوار (m/m)
۱۷۰	۱۷۰	۱۴۷	۱۱۰	۱۷۰	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	L	طول نوار (m)
۱۶۰	۹۰	۱۳۷	۱۷۸	۲۶۰	۳۹۰	۲۷۰	۳۲۰	t _{co}	زمان قطع جریان (min)
۵/۴	۷/۳	۷/۲	۵/۲	۸	۸	۸	۸	w	عرض نوار (m)
L	L	C	C	SiCL	SiCL	SiCL	SiCL	-	بافت خاک (عمق ۰-۶۰ سانتی‌متر)
۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۴۹	۰/۰۶۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	n	ضریب زبری مانینگ (-)
۵۰/۴	۴۳/۲	۷/۸	۷/۸	۱۳/۲	۱۳/۲	۱۳/۲	۱۳/۲	f ₀	سرعت نفوذ پایه (mm/hr)
۱۰۵	۵۹/۶	۵۰/۲	۷۰/۷	۶۱/۶	۱۲۵	۶۷/۲	۶۵	d	عمق خالص آبیاری (mm)

**Abbasi et al. (1999)

**Abbasi (1994)

واسنجی ضریب زبری مانینگ و پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف اصلاح‌شده برای آبیاری جویچه‌ای با سیستم انتهاباز

روش بهینه‌سازی چندسطحی

روش بهینه‌سازی چندسطحی (Walker, 2005) روشی برای

(RE) و زمان‌های پیشروی و پسروی از شاخص ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای نسبی (RE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد.

$$RE = \frac{|V_p - V_m|}{V_m} \times 100 \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{mi} - T_{pi})^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن، V_p حجم رواناب پیش‌بینی شده، V_m حجم رواناب اندازه‌گیری شده، T_p زمان پیشروی یا پسروی پیش‌بینی شده در ایستگاه i ام، T_m زمان پیشروی یا پسروی اندازه‌گیری شده در ایستگاه i ام و N تعداد ایستگاه اندازه‌گیری پیشروی و پسروی است.

بهینه‌سازی عملکرد آبیاری نواری

متغیرهای زیادی در افزایش عملکرد و کارایی آبیاری سطحی مؤثرند که مهم‌ترین آن‌ها دبی و زمان قطع جریان است (Bautista *et al.*, 2009b). در صورتی که برای افزایش کارایی آبیاری تغییر هندسه نوارها (شیب طولی و طول نوار) امکان‌پذیر نباشد، افزایش عملکرد آبیاری نواری تنها براساس متغیرهای دبی ورودی و زمان قطع جریان انجام می‌گیرد. با کمک مدل WinSRFR و با در نظر گرفتن شاخص‌های ارزیابی عملکرد آبیاری سطحی از قبیل حداقل کفایت آبیاری (AD_{min})، بازده کاربرد (AE) و حداقل توزیع یکنواختی (DU_{min}) می‌توان با اطمینان برای بهبود عملکرد آبیاری اقدام کرد. برای رسیدن به این هدف، از نمودار شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل در مقابل دبی و زمان قطع جریان، همچنین از منحنی‌های هم‌تراز ایجاد شده به وسیله تحلیل عملیاتی مدل WinSRFR استفاده و بهترین زوج مرتب برای دبی و زمان قطع جریان استخراج شد. این نتایج با درون‌یابی از نتایج شبیه‌سازی مدل WinSRFR در شبکه‌ای مستطیل‌شکل از نقاط و در فضایی موجه و امکان‌پذیر از دبی ورودی و زمان قطع جریان، ایجاد می‌شود. تابع هدف (OF) به منظور عملکرد بهینه نوار به صورت زیر در نظر گرفته شد.

$$OF = a \times AE + b \times DU_{min} \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن ضرایب a و b وزن هر یک از شاخص‌ها و مجموع آن‌ها برابر یک بود که با فرض ارزش یکسان برای هر یک، مقدار 0.5 برای هر کدام از ضرایب فرض شد. طی دومرحله، بهینه‌سازی عملکرد آبیاری نواری انجام شد. در مرحله اول، فرض بر این است که هندسه نوار ثابت باشد و متغیرهای مدیریت جریان شامل زمان قطع جریان و دبی ورودی به نوار بررسی شود. طی

پیشنهاد شده است. در این مطالعه کاربرد این روش در برآورد پارامترهای نفوذ کوستی‌کاف اصلاح‌شده و ضریب زبری در آبیاری نواری بررسی شد. روش بهینه‌سازی چندسطحی روشی مبتنی بر داده‌های مراحل مختلف آبیاری است. برخلاف روش دونقطه‌ای (Elliott and Walker, 1982)، f_0 نیز در این روش از داده‌های مراحل آبیاری برآورد می‌شود. علاوه بر پارامترهای نفوذ، ضریب زبری مانینگ نیز با این روش تخمین‌زده می‌شود. گام اول بهینه‌سازی چندسطحی، تخمین اولیه برای پارامترهای مجهول (a ، f_0 ، k و n) است. در این تحقیق، برای تخمین اولیه پارامترهای k و a از روش دونقطه‌ای و برای تخمین اولیه f_0 و n به ترتیب از مقادیر حاصل از استوانه‌های مضاعف و توصیه‌شده SCS (جدول ۱) استفاده شد. در گام دوم، پارامترها به ترتیب اولویت و حساسیت، با روش بهینه‌سازی برآورد می‌شود. واکر با آزمون و خطا، ترتیب تخمین k ، f_0 ، a و n را مناسب‌ترین گزینه پیشنهاد کرد. پارامتر k با استفاده از پیشروی جریان، به صورت زیر برآورد می‌شود.

$$k^* = \min \left[|t_L - \bar{t}_L| \right]_{a, f_0, n} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن، k^* مقدار برآوردشده k ، t_L و \bar{t}_L مقدار اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده زمان پیشروی به ازای مقادیر تخمین اولیه f_0 ، a و n است. f_0 از هیدروگراف رواناب خروجی تعیین می‌شود.

$$f_0^* = \min \left[\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R}_i)^2} \right]_{a, k^*, n} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن، f_0^* مقدار برآوردشده f_0 ، R_i و \bar{R}_i مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده دبی رواناب در زمان‌های مختلف و N تعداد نقاط اندازه‌گیری رواناب است. پس از تخمین f_0 ، مرحله قبل با f_0^* مجدداً برای تخمین k تکرار شد. ضریب a با استفاده از داده‌های هیدروگراف خروجی و به صورت زیر برآورد می‌شود.

$$a^* = \min \left[\frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (R_i - \bar{R}_i)^2} \right]_{k^*, f_0^*, n} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن، a^* مقدار برآوردشده a است. پس از تخمین a ، مرحله قبلی برای برآورد مجدد k و f_0 تکرار می‌شود. در نهایت، ضریب زبری مانینگ (n) از داده‌های مرحله پسروی برآورد می‌شود.

$$n^* = \min \left[|t_R - \bar{t}_R| \right]_{a^*, f_0^*, k^*} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن، t_R و \bar{t}_R مقادیر زمان پسروی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده است. پس از تخمین n ، همه مراحل قبلی برای برآورد مجدد a ، k و f_0 با n^* تکرار می‌شود (Walker, 2005; Abbasi, 2012). به منظور ارزیابی عملکرد روش بهینه‌سازی چندسطحی در تخمین حجم رواناب، از معیار خطای نسبی

که بیانگر عملکرد مناسب و دقیق روش بهینه‌سازی چندسطحی است. متوسط مقدار ریشه میانگین مربعات خطای برآورد مراحل پیشروی و پسروی به ترتیب ۳/۱۰ و ۳/۲۱ دقیقه محاسبه شد. دقت مدل در پیش‌بینی زمان پیشروی مزارع در مطالعه موردی اول (مزارع سری B) کمتر از مزارع مطالعه موردی دوم (مزارع سری S) است. یکی از دلایل آن را می‌توان به هندسه نوارها نسبت داد. در آزمایش‌های سری B عرض نوارها ۸ متر و در آزمایش‌های سری S کمتر از این مقدار است (۵/۲ تا ۷/۳ متر). هر اندازه عرض نوارها کمتر باشد، خطاهایی از قبیل تأثیر شیب عرضی بر پیشروی جریان کمتر خواهد بود. علاوه بر این، طول نوارهای سری آزمایش‌های B بیشتر از سری آزمایش‌های S است. هر چه طول نوار بیشتر باشد، احتمال وجود خطا در شیب طولی بیشتر است و ممکن است که شیب‌های طولی مختلف در طول نوار وجود داشته باشد، درحالی‌که در مدل اینرسی- صفر یک شیب معین برای مدل تعریف شد. دقت مدل در پیش‌بینی زمان پسروی سری آزمایش‌های B نیز کمتر از مزارع سری S است. با توجه به اینکه در نوارهای مطالعه موردی اول، شیب نوار بیش از نوارهای مطالعه موردی دوم است، پسروی در فواصل ابتدایی نوارها با سرعت بیشتر نسبت به نوارهای مطالعه موردی دوم اتفاق می‌افتد. معمولاً این شرایط باعث می‌شود که تجمع آب در انتهای نوار به وجود آید و زمان پسروی کندتر شود (شکل ۱). بزرگ‌بودن عرض نوار نیز سبب می‌شود که زمان ثبت پسروی در هر ایستگاه با خطا صورت گیرد، زیرا لحظه‌ای برای زمان پسروی در ایستگاهی معین در نظر گرفته می‌شود که آب از تمام مقطع عرضی نوار به صورت کامل محو شود.

این مرحله، پارامترهای هندسی نوارها (طول نوار و شیب طولی) ثابت و برابر مقادیر اندازه‌گیری شده (جدول ۱) در نظر گرفته شد. در مرحله دوم بهینه‌سازی عملکرد آبیاری نواری، تأثیر متغیرهای هندسی (طول نوار و شیب طولی) نوار نیز به همراه متغیرهای جریان در ارتقای عملکرد سیستم تحلیل شد. بهینه‌سازی عملکرد سیستم آبیاری نواری با فرض تأمین عمق مورد نیاز در انتهای نوار (کفایت آبیاری ۱۰۰ درصد) انجام شد. همچنین، در تمامی نوارها شبیه‌سازی براساس مدل اینرسی- صفر صورت گرفت.

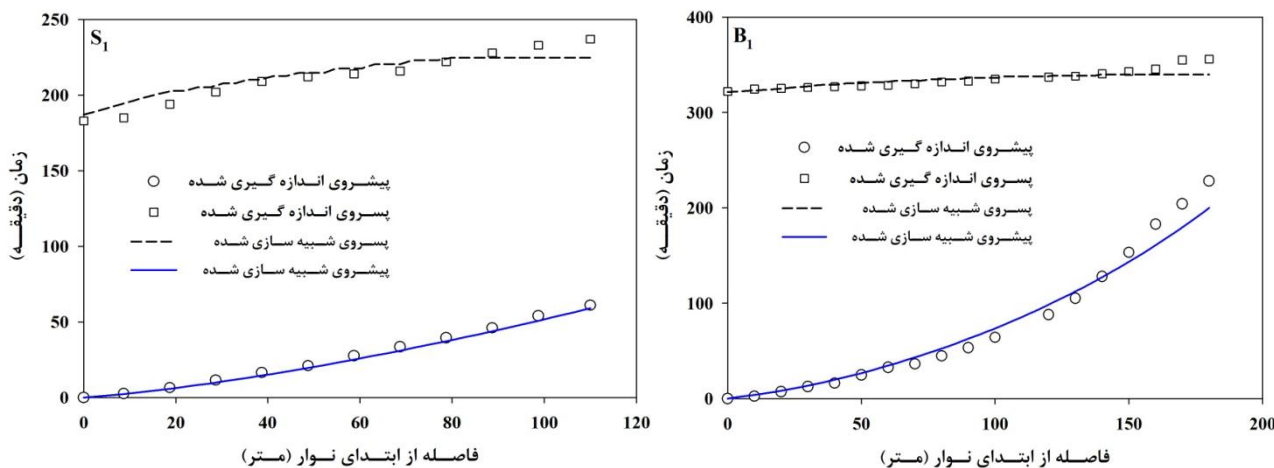
نتایج و بحث

پیشروی، پسروی و رواناب

نتایج واسنجی پارامترهای معادله نفوذ (f_0 و k , a) و ضریب زبری مانینگ (n) به روش بهینه‌سازی چندسطحی برای هر یک از نوارهای آبیاری محاسبه شد (جدول ۲). مطابق روش واسنجی بهینه‌سازی چندسطحی، مقایسه نتایج مراحل پیشروی و پسروی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده مدل WinSRFR برای سری آزمایش S_1 و B_1 در شکل ۱ ارائه شده است. مقادیر ضریب R^2 و ریشه میانگین مربعات خطای برآورد زمان پیشروی و پسروی دو مطالعه موردی در جدول ۳ آمده است. مقادیر حداکثر و حداقل ریشه میانگین مربعات خطای برآورد زمان پیشروی برای مطالعه موردی اول به ترتیب ۶/۱ و ۳/۰۳ دقیقه و برای مطالعه موردی دوم به ترتیب ۲/۷۴ و ۱/۱۹ دقیقه به دست آمد. مقادیر حداکثر و حداقل ریشه میانگین مربعات خطای برآورد زمان پسروی برای مطالعه موردی اول به ترتیب ۴/۰۲ و ۲/۳ دقیقه و برای مطالعه موردی دوم به ترتیب ۶/۲۷ و ۱/۳۸ دقیقه به دست آمد.

جدول ۲. پارامترهای معادله نفوذ و ضریب زبری مانینگ براساس روش بهینه‌سازی چندسطحی

n (-)	k(mm/h ^a)	f ₀ (mm/h)	a (-)	سری آزمایش	مطالعه موردی
۰/۰۲۲	۴۲/۰	۸/۵	۰/۳۰	B ₁	اول
۰/۰۳۵	۴۴/۵	۱۷/۰	۰/۳۵	B ₂	
۰/۰۲۸	۳۰/۰	۱۳/۶	۰/۲۴	B ₃	
۰/۰۲۷	۴۰/۶	۱۱/۷	۰/۴۳	B ₄	
۰/۰۳۵	۳۹/۲	۱/۷	۰/۴۳	S ₁	دوم
۰/۰۵۲	۲۵/۸	۱۱/۰	۰/۱۶	S ₂	
۰/۰۴۰	۳۷/۵	۴۲/۹	۰/۱۲	S ₃	
۰/۰۵۶	۴۰/۰	۵۲/۴	۰/۱۱	S ₄	



شکل ۱. مقایسه پیشروی و پسروی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده در سری آزمایش‌های B_1 و S_1

جدول ۳. مقادیر ضریب تبیین و ریشه میانگین مربعات خطا در برآورد مرحله پیشروی و پسروی**

مطالعه موردی دوم				مطالعه موردی اول				آماره
S_4	S_3	S_2	S_1	B_4	B_3	B_2	B_1	RMSE (min)
۱/۱۹ (۱/۳۸)	(۱/۸۸)	(۴/۰۳)	۱/۹۶ (۶/۲۷)	(۲/۶۴)	۳/۳۵ (۴/۰۲)	۵/۲۱ (۳/۱۸)	۶/۱ (۲/۳۰)	
۰/۹۹ (۰/۹۶)	(۰/۹۵)	(۰/۹۸)	(۰/۹۲)	۰/۹۹ (۰/۹۲)	۰/۹۹ (۰/۸۵)	۰/۹۸ (۰/۸۹)	(۰/۸۹)	R^2 (-)

** مقادیر داخل پاراتنز مربوط به مرحله پسروی است.

موردی دوم به ترتیب ۱/۰۷، ۰/۲۱ و ۰/۸۳ درصد محاسبه شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، روش بهینه‌سازی چندسطحی در برآورد مقدار رواناب نیز دقت زیادی دارد و حداکثر خطای روش ۱/۰۷ درصد است. به این ترتیب، نتایج نشان‌دهنده دقت زیاد و قابلیت مناسب روش بهینه‌سازی چندسطحی در تخمین پارامترهای نفوذ و رواناب در آبیاری نواری است.

برای بررسی کارایی روش بهینه‌سازی چندسطحی، علاوه بر زمان‌های پیشروی و پسروی، پیش‌بینی اجزای بیلان (رواناب و نفوذ) نیز ضروری است. مقادیر رواناب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده، به همراه مقادیر خطای نسبی و مطلق هشت نوار مورد مطالعه در جدول ۴ آمده است. حداکثر، حداقل و متوسط خطای نسبی محاسبه‌شده برای حجم رواناب در مطالعه موردی اول به ترتیب ۰/۴۱، ۰/۰۱ و ۰/۱۸ درصد و در مطالعه

جدول ۴. مقادیر رواناب اندازه‌گیری‌شده، شبیه‌سازی‌شده و خطای نسبی و مطلق تخمین رواناب

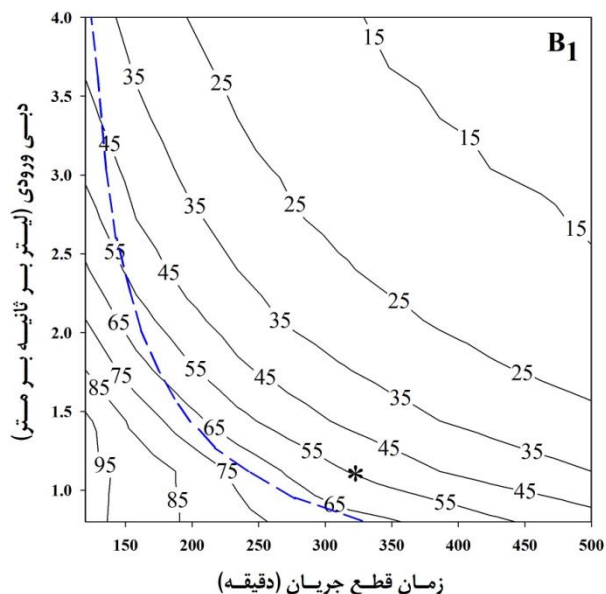
مطالعه موردی دوم				مطالعه موردی اول				پارامتر
S_4	S_3	S_2	S_1	B_4	B_3	B_2	B_1	
۱۹۰۰/۰	۱۰۳۰/۰	۳۲۴۰/۰	۸۴۲۰/۰	۲۰۲۴/۹	۸۵۶۰/۰	۲۴۷۱/۵	۲۹۲۰/۲	رواناب اندازه‌گیری‌شده (lit)
۱۹۰۳/۹	۱۰۱۹/۷	۳۲۷۳/۹	۸۳۲۹/۷	۲۰۲۰/۱	۸۵۵۹/۴	۲۴۷۰/۳	۲۹۰۸/۲	رواناب شبیه‌سازی‌شده (lit)
۳/۹	۱۰/۳	۳۳/۹	۹/۳	۴/۸	۰/۶	۱/۲	۱۲/۰	خطای مطلق (lit)
۰/۲۱	۰/۹۹	۱/۰۵	۱/۰۷	۰/۲۴	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۴۱	خطای نسبی (%)

عمق مورد نیاز آبیاری است، در حالی که در سمت چپ، عکس این شرایط وجود دارد. در بخش چپ خط‌چین، هر چند ممکن است که با ترکیباتی از دبی ورودی و زمان قطع جریان به بازده کاربرد بالادست یافت، ولی حداقل عمق مورد نیاز آبیاری تأمین نمی‌شود و کفایت آبیاری کمتر از ۱۰۰ درصد خواهد بود. علامت * نشان‌دهنده شرایط جاری در نوار مورد نظر است. با توجه به شکل ۲، بازده کاربرد در شرایط جاری ۵۵ درصد و علامت * در سمت راست خط‌چین نشان‌دهنده این است حداقل عمق نفوذ

بهینه‌سازی آبیاری نواری براساس متغیرهای مدیریت جریان: دبی ورودی، زمان قطع جریان

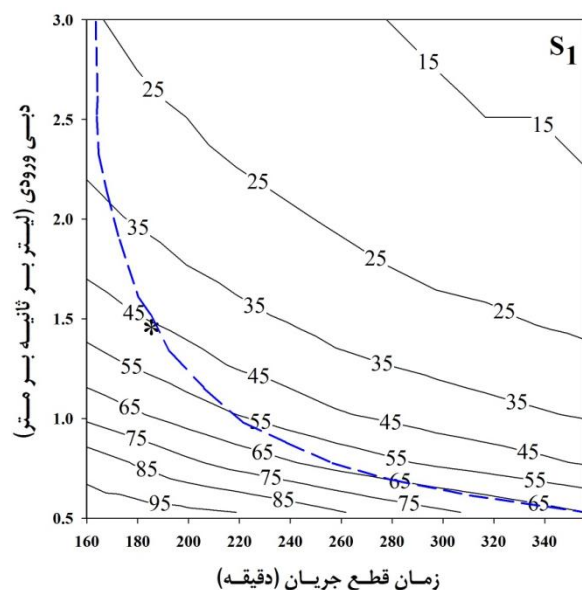
منحنی‌های هم‌تراز بازده کاربرد (AE) متغیرهای دبی و زمان قطع جریان برای نوارهای B_1 و S_1 در شکل ۲ آمده است. در این شکل نقطه‌چین نشان‌دهنده مکان هندسی نقاطی از t_{co} و q است که در آن حداقل عمق مورد نیاز آبیاری (در انتهای نوار) تأمین می‌شود. سمت راست نقطه‌چین نشان‌دهنده ترکیباتی از دبی ورودی و زمان قطع جریان است که حداقل عمق آبیاری بیشتر از

موردی دوم، مقدار بازده کاربرد آبیاری در شرایط جاری ۴۶ درصد تحت دبی ۱/۵ لیتر بر ثانیه بر متر و زمان قطع جریان ۱۷۸ دقیقه است که با حرکت روی خطچین، حداکثر افزایش بازده کاربرد آبیاری برای این نوار، ۶۴/۷۱ درصد تحت دبی ۰/۵۶ لیتر بر ثانیه و زمان قطع جریان ۳۴۱ دقیقه به دست می‌آید. در این نوار علامت * در سمت چپ خطچین نشان‌دهنده این است که حداقل عمق آبیاری کمتر از عمق مورد نیاز (کفایت آبیاری کمتر از ۱۰۰ درصد) است.



بازده کاربرد آب (AE) ——— $D_{min}=D_{req}$ - - - - - ارزیابی جاری *

(در انتها) بیش از عمق مورد نیاز است. با حرکت روی خطچین حداکثر افزایش بازده کاربرد آبیاری برای نوار B_1 ، ۶۲/۴۸ درصد و تحت دبی در واحد عرض نوار ۱/۴۲ لیتر بر ثانیه بر متر و زمان قطع جریان ۲۱۹/۸ دقیقه به دست می‌آید. با اعمال این دبی و زمان قطع جریان، حداقل توزیع یکنواختی از ۷۳ درصد در شرایط جاری به ۷۶/۸ درصد افزایش خواهد یافت. در شرایط موجود، دبی در واحد عرض نوار ۱/۱۱ لیتر بر ثانیه بر متر و زمان قطع جریان ۳۲۰ دقیقه بوده است. در نوار S_1 مربوط به مطالعه



بازده کاربرد آب (AE) ——— $D_{min}=D_{req}$ - - - - - ارزیابی جاری *

شکل ۲. منحنی‌های همتراز بازده کاربرد آب تحت متغیرهای دبی و زمان قطع جریان برای نوارهای B_1 و S_1

بازده در شرایط جاری (جدول ۵) نسبتاً بالاست، ولی در آنها حداقل کفایت آبیاری کمتر از ۱۰۰ درصد است. در صورتی که در شرایط بهینه (جدول ۶) کفایت آبیاری نیز ۱۰۰ درصد است. مطابق یافته‌های Morris و همکاران (2015) با مدیریت جریان ورودی و مدت آبیاری، می‌توان شاخص AE را تا ۷۱ درصد ارتقا داد.

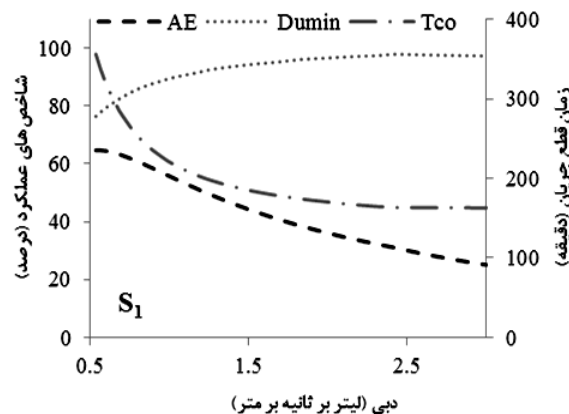
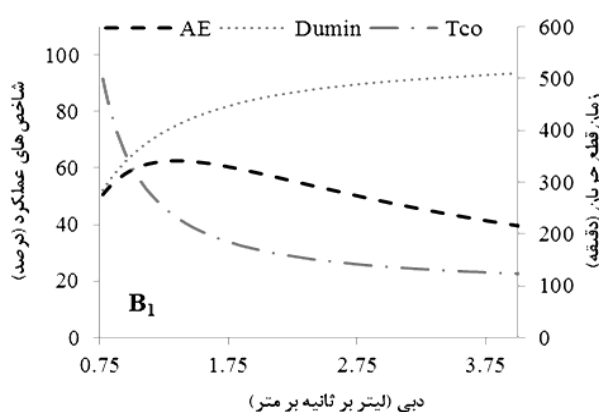
بررسی اثر شیب نوار

برای شیب‌های طولی مختلف در دامنه تغییرات ۰/۱ تا ۳ درصد و برای تمام نوارهای مورد مطالعه، مقادیر دبی و زمان قطع جریان بهینه با هدف حداکثر کردن بازده کاربرد و یکنواختی توزیع و حداقل کردن رواناب و نفوذ عمقی (رابطه ۸)، با استفاده از WinSRFR استخراج شد. طول نوارها ثابت و برابر شرایط موجود در نظر گرفته شد. در جدول ۷ نتایج این بررسی برای تمام نوارهای مطالعه شده آمده است. در نوار B_1 و در شیب‌های

با توجه به اینکه برای عملکرد بهینه نوارهای آبیاری، علاوه بر شاخص AE، شاخص DU_{min} نیز اهمیت دارد، مقادیر این شاخص نیز در مقابل متغیرهای جریان و با فرض تأمین حداقل عمق آب مورد نیاز در انتها (نقاط روی خطچین) استخراج شد. این نتایج برای سری آزمایش B_1 و S_1 در شکل ۳ ارائه شده است. به این ترتیب، برای تمام نوارها، دبی و زمان قطع جریان بهینه و نیز مقادیر شاخص‌های ارزیابی استخراج شد (جدول‌های ۵ و ۶). بر اساس دبی و زمان قطع جریان بهینه می‌توان بازده کاربرد آبیاری را برای نوارهای B_1 ، B_2 ، B_3 و B_4 به ترتیب از ۵۵، ۴۴، ۴۳ و ۴۸ به ۶۲/۴۸، ۶۱/۹۰، ۶۴/۱۹ و ۶۱/۷۸ درصد افزایش داد. همچنین، در نوارهای S_1 ، S_2 ، S_3 و S_4 با اعمال دبی و زمان قطع جریان بهینه می‌توان بازده کاربرد آبیاری را به ترتیب از ۴۶، ۵۹، ۵۹ و ۶۰ به ۶۴/۷۱، ۶۲/۴۵، ۶۳/۹۱ و ۶۳/۵۹ درصد افزایش داد. در سه نوار S_2 ، S_3 و S_4

نوار، بازده کاربرد در شرایط بهینه به ترتیب ۶۲/۳، ۶۴/۲، ۶۳/۷، ۶۳/۷، ۶۳/۶، ۶۳/۶ و ۶۳/۶ درصد و مقدار حداقل توزیع یکنواختی به ترتیب ۷۵/۶، ۷۷/۲، ۷۷/۴، ۷۷/۴، ۷۷/۵، ۷۷/۶ و ۷۷/۵ درصد حاصل شد.

۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد، با طول ۱۸۰ متر (شرایط موجود)، مقدار دبی بهینه به ترتیب ۱/۴۲۳، ۱/۳۹۹، ۱/۴۰۵، ۱/۴۰۵، ۱/۴۰۶، ۱/۴۰۶ و ۱/۴۰۶ لیتر بر ثانیه بر متر و زمان قطع جریان بهینه به ترتیب ۲۲۰/۱۴، ۲۱۷/۱۲، ۲۱۷/۸۳، ۲۱۷/۹۰، ۲۱۸، ۲۱۸/۰۵ و ۲۱۸/۰۶ دقیقه به دست آمد. در این



شکل ۳. نمودارهای شاخص‌های ارزیابی عملکرد در مقابل دبی و زمان قطع جریان با در نظر گرفتن تأمین حداقل عمق آب مورد نیاز برای نوارهای B₁ و S₁

جدول ۵. مقدار دبی، زمان قطع جریان و شاخص‌های ارزیابی عملکرد در شرایط جاری

مطالعه موردی دوم				مطالعه موردی اول				پارامتر
S ₄	S ₃	S ₂	S ₁	B ₄	B ₃	B ₂	B ₁	
۱۶۰	۹۰	۱۳۷	۱۷۸	۲۶۰	۳۹۰	۲۷۰	۳۲۰	زمان قطع جریان (min)
۳/۱	۳/۰۲	۱/۳۷	۱/۵	۱/۳۷	۱/۳۵	۱/۶۶	۱/۱۱	دبی ورودی (lit/s/m)
۶۰	۵۹	۵۹	۴۶	۴۸	۴۳	۴۴	۵۵	بازده کاربرد آب (%)
۶۵	۶۲	۸۱	۸۴	۶۷	۸۶	۶۸	۷۳	حداقل یکنواختی توزیع (%)
۶۲/۵	۶۰/۵	۷۰	۶۵/۵	۵۷/۵	۶۴	۵۶	۶۴	OF (%)

جدول ۶. نتایج دبی و زمان قطع جریان بهینه و مقادیر شاخص‌های ارزیابی عملکرد نوار در شرایط بهینه

مطالعه موردی دوم				مطالعه موردی اول				پارامتر
S ₄	S ₃	S ₂	S ₁	B ₄	B ₃	B ₂	B ₁	
۱۱۸/۱۶	۵۴/۷۰	۱۶۰/۶۰	۳۴۰/۹۲	۱۳۳/۰۳	۲۸۲/۸۵	۱۲۱/۰۴	۲۱۹/۷۹	زمان قطع جریان (min)
۳/۹۶	۴/۶۲	۱/۱۰	۰/۵۶	۲/۰۷	۱/۲۴	۲/۶۰	۱/۴۲	دبی ورودی (lit/s/m)
۶۳/۵۹	۶۳/۹۱	۶۲/۴۵	۶۴/۷۱	۶۱/۷۸	۶۴/۱۹	۶۱/۹۰	۶۲/۴۸	بازده کاربرد آب (%)
۷۷/۱۷	۸۰/۲۹	۷۹/۱۴	۷۷/۶۱	۷۶/۵۱	۷۶/۶۴	۷۶/۳۱	۷۶/۷۶	حداقل یکنواختی توزیع (%)
۷۰/۳۸	۷۲/۱۰	۷۰/۷۹	۷۱/۱۶	۶۹/۱۴	۷۰/۴۱	۶۹/۱۰	۶۹/۶۲	OF (%)

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش شیب طولی نوار و در طول نوار معین، مقدار دبی و زمان قطع جریان جهت دستیابی به شرایط بهینه به مقدار جزئی تغییر می‌کند و تغییرات شیب، موجب افزایش یا کاهش چشمگیر عملکرد نمی‌شود. با مقایسه مقادیر OF برای شیب‌های مختلف در این نوار آبیاری، بیشترین مقدار شاخص OF، ۷۰/۶۹ مربوط به شیب ۰/۵ درصد با دبی ۱/۴ لیتر بر ثانیه بر متر و زمان قطع جریان

۲۱۷/۱۲ دقیقه است. کمترین OF مربوط به شیب ۰/۱ درصد نوار و در بقیه شیب‌ها شرایط بهینه (OF) تقریباً یکسان است. اما برای هر شیب مقادیر دبی و زمان قطع جریان متفاوت است. در نوار آبیاری S₁ از مطالعه موردی دوم نیز کمترین بازده در شیب ۰/۱ درصد و حداکثر بازدهی در شیب طولی ۰/۵ درصد حاصل شد. با این حال از اختلاف مقدار OF شیب‌های ۱ تا ۳ درصد با مقدار بهینه (شیب ۰/۵ درصد) می‌توان چشم پوشید.

جدول ۷. نتایج بهینه‌سازی متغیرهای جریان در شیب‌های طولی مختلف نوار

سری	S (m/m)	L (m)	t _{co} (min)	q (lit/s/m)	AE (%)	DU (%)	OF (%)
B ₁	۰/۰۰۱	۱۸۰	۲۲۰/۱	۱/۴	۶۲/۳	۷۵/۶	۶۸/۹۱
	۰/۰۰۵	۱۸۰	۲۱۷/۱	۱/۴	۶۴/۲	۷۷/۲	۷۰/۶۹*
	۰/۰۱۰	۱۸۰	۲۱۷/۸	۱/۴	۶۳/۷	۷۷/۴	۷۰/۵۸
	۰/۰۱۵	۱۸۰	۲۱۷/۹	۱/۴	۶۳/۷	۷۷/۴	۷۰/۵۵
	۰/۰۲۰	۱۸۰	۲۱۸/۰	۱/۴	۶۳/۶	۷۷/۵	۷۰/۵۶
	۰/۰۲۵	۱۸۰	۲۱۸/۱	۱/۴	۶۳/۶	۷۷/۶	۷۰/۵۸
	۰/۰۳۰	۱۸۰	۲۱۸/۱	۱/۴	۶۳/۶	۷۷/۵	۷۰/۵۵
B ₂	۰/۰۰۱	۱۸۰	۱۱۸/۰	۲/۷	۶۱/۸	۷۴/۶	۶۸/۱۸
	۰/۰۰۵	۱۸۰	۱۱۷/۵	۲/۶	۶۳/۳	۷۶/۹	۷۰/۱۰*
	۰/۰۱۰	۱۸۰	۱۱۸/۸	۲/۶	۶۲/۷	۷۷/۱	۶۹/۹۴
	۰/۰۱۵	۱۸۰	۱۱۸/۹	۲/۶	۶۲/۷	۷۷/۲	۶۹/۹۵
	۰/۰۲۰	۱۸۰	۱۱۹/۸	۲/۶	۶۲/۴	۷۷/۱	۶۹/۷۱
	۰/۰۲۵	۱۸۰	۱۱۹/۸	۲/۶	۶۲/۴	۷۷/۰	۶۹/۶۹
	۰/۰۳۰	۱۸۰	۱۲۰/۰	۲/۶	۶۲/۳	۷۷/۲	۶۹/۷۱
B ₃	۰/۰۰۱	۱۸۰	۲۷۵/۴	۱/۳	۶۴/۰	۷۶/۶	۷۰/۳۰
	۰/۰۰۵	۱۸۰	۲۷۲/۶	۱/۳	۶۵/۲	۷۸/۰	۷۱/۵۸
	۰/۰۱۰	۱۸۰	۲۷۲/۸	۱/۳	۶۵/۱	۷۸/۲	۷۱/۶۵
	۰/۰۱۵	۱۸۰	۲۶۹/۰	۱/۳	۶۵/۱	۷۹/۰	۷۲/۰۵*
	۰/۰۲۰	۱۸۰	۲۷۲/۵	۱/۳	۶۵/۲	۷۸/۶	۷۱/۹۱
	۰/۰۲۵	۱۸۰	۲۷۲/۵	۱/۳	۶۵/۲	۷۸/۶	۷۱/۸۸
	۰/۰۳۰	۱۸۰	۲۷۲/۴	۱/۳	۶۵/۲	۷۸/۶	۷۱/۹۳
B ₄	۰/۰۰۱	۱۷۰	۱۳۲/۷	۲/۱	۶۱/۳	۷۴/۶	۶۷/۹۸
	۰/۰۰۵	۱۷۰	۱۲۹/۹	۲/۱	۶۳/۱	۷۷/۳	۷۰/۱۶
	۰/۰۱۰	۱۷۰	۱۳۰/۲	۲/۱	۶۲/۹	۷۷/۶	۷۰/۲۵*
	۰/۰۱۵	۱۷۰	۱۳۰/۷	۲/۱	۶۲/۵	۷۷/۵	۷۰/۰۲
	۰/۰۲۰	۱۷۰	۱۳۰/۸	۲/۱	۶۲/۵	۷۷/۷	۷۰/۱۱
	۰/۰۲۵	۱۷۰	۱۳۰/۸	۲/۱	۶۲/۵	۷۷/۷	۷۰/۱۰
	۰/۰۳۰	۱۷۰	۱۳۰/۹	۲/۱	۶۲/۵	۷۷/۷	۷۰/۰۷
S ₁	۰/۰۰۱	۱۱۰	۳۵۶/۰	۰/۵	۶۴/۴	۷۶/۷	۷۰/۵۲
	۰/۰۰۵	۱۱۰	۳۴۰/۶	۰/۶	۶۵/۱	۷۸/۹	۷۱/۹۸*
	۰/۰۱۰	۱۱۰	۳۴۰/۹	۰/۶	۶۴/۸	۷۹/۰	۷۱/۸۸
	۰/۰۱۵	۱۱۰	۳۴۱/۰	۰/۶	۶۴/۶	۷۹/۱	۷۱/۸۸
	۰/۰۲۰	۱۱۰	۳۴۱/۰	۰/۶	۶۴/۶	۷۹/۲	۷۱/۹۱
	۰/۰۲۵	۱۱۰	۳۴۱/۰	۰/۶	۶۴/۶	۷۹/۲	۷۱/۹۲
	۰/۰۳۰	۱۱۰	۳۴۱/۱	۰/۶	۶۴/۶	۷۹/۳	۷۱/۹۱
S ₂	۰/۰۰۱	۱۴۷	۱۶۰/۶	۱/۱	۶۱/۸	۷۷/۴	۶۹/۶۲
	۰/۰۰۵	۱۴۷	۱۷۴/۶	۱/۰	۶۴/۱	۷۸/۱	۷۱/۱۰
	۰/۰۱۰	۱۴۷	۱۷۵/۰	۱/۰	۶۳/۸	۷۸/۵	۷۱/۱۵
	۰/۰۱۵	۱۴۷	۱۷۴/۹	۱/۰	۶۳/۹	۷۸/۷	۷۱/۲۹
	۰/۰۲۰	۱۴۷	۱۷۵/۱	۱/۰	۶۳/۸	۷۸/۹	۷۱/۳۲
	۰/۰۲۵	۱۴۷	۱۷۵/۰	۱/۰	۶۳/۸	۷۹/۲	۷۱/۵۱*
	۰/۰۳۰	۱۴۷	۱۹۲/۹	۰/۹	۶۴/۱	۷۵/۸	۶۹/۹۴
S ₃	۰/۰۰۱	۱۷۰	۴۸/۵	۵/۲	۶۳/۶	۷۸/۷	۷۱/۱۶
	۰/۰۰۵	۱۷۰	۵۰/۷	۴/۹	۶۵/۶	۸۲/۰	۷۳/۷۸*
	۰/۰۱۰	۱۷۰	۵۴/۷	۴/۶	۶۴/۵	۸۰/۰	۷۲/۲۶
	۰/۰۱۵	۱۷۰	۵۷/۹	۴/۴	۶۴/۰	۷۸/۷	۷۱/۳۵
	۰/۰۲۰	۱۷۰	۵۷/۹	۴/۴	۶۳/۹	۷۸/۹	۷۱/۴۲
	۰/۰۲۵	۱۷۰	۵۸/۱	۴/۴	۶۳/۶	۷۹/۰	۷۱/۳۲
	۰/۰۳۰	۱۷۰	۵۹/۵	۴/۳	۶۳/۷	۷۸/۴	۷۱/۰۶
S ₄	۰/۰۰۱	۱۷۰	۱۱۷/۴	۴/۲	۶۱/۰	۷۴/۳	۶۷/۶۳
	۰/۰۰۵	۱۷۰	۱۱۶/۶	۴/۰	۶۴/۰	۷۷/۲	۷۰/۵۸*
	۰/۰۱۰	۱۷۰	۱۲۳/۷	۳/۸	۶۴/۱	۷۵/۱	۶۹/۵۳
	۰/۰۱۵	۱۷۰	۱۲۳/۷	۳/۸	۶۴/۰	۷۵/۴	۶۹/۶۵
	۰/۰۲۰	۱۷۰	۱۲۳/۸	۳/۸	۶۳/۹	۷۵/۶	۶۹/۷۷
	۰/۰۲۵	۱۷۰	۱۲۳/۸	۳/۸	۶۳/۹	۷۵/۶	۶۹/۷۷
	۰/۰۳۰	۱۷۰	۱۲۳/۷	۳/۸	۶۴/۰	۷۵/۷	۶۹/۸۳

* متناظر با شیب بهینه نوار

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش شیب نوار از ۰/۵ به ۳ درصد، تغییر قابل توجهی در شاخص عملکرد ملاحظه نمی‌شود. با بررسی نتایج مربوط به تمام نوارهای مورد مطالعه، می‌توان گفت نیازی به تصحیح شیب نوار و صرف هزینه تسطیح جهت دستیابی به شاخص عملکرد بالا نیست و در شیب‌های بالای ۰/۵ درصد تا ۳ درصد، با مدیریت جریان (دبی و زمان قطع جریان)، شرایط بهینه در نوار آبیاری حاکم خواهد بود. در تمام نوارها در شیب ۰/۱ درصد کمترین بازده کاربرد و یکنواختی توزیع مشاهده شد. با مقایسه نتایج جدول‌های ۶ و ۷، در نوار B₁ و تحت شیب جاری (۰/۰۰۸۲)، با مدیریت دبی ورودی و زمان آبیاری، حداکثر OF برابر ۶۹/۶۲ درصد بود و با فرض عملیات تسطیح و تغییر شیب، مقدار OF حداکثر به مقدار ۷۰/۶۹ درصد (تحت شیب ۰/۰۰۵) قابل افزایش خواهد بود. این وضعیت در سایر نوارها نیز چنین شرایطی را دارد و اثر تغییر شیب طولی، حداکثر سبب افزایش ۱/۶۸ درصد در OF (نوار S₃) خواهد شد.

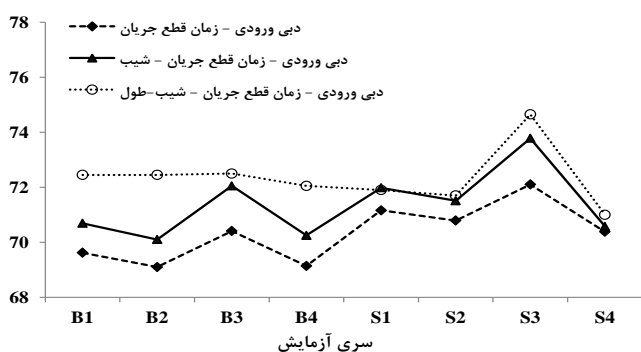
بررسی اثر طول نوار

برای بررسی عملکرد بهینه آبیاری نواری تحت طول‌های مختلف، با در نظر گرفتن شیب بهینه نوار (جدول ۷)، طول‌های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ متر، وارد مدل WinSRFR شد و مقادیر بهینه زمان قطع جریان و دبی ورودی جهت دستیابی به شاخص‌های عملکرد بهینه استخراج شد. در جدول ۸، نتایج این بررسی برای سری آزمایش‌های مطالعه شده آمده است که از مدل WinSRFR و با استفاده از منحنی‌های همتراز یکنواختی توزیع و بازده کاربرد استخراج شده است. مطابق جدول ۸، در سری آزمایش B₁، در طول‌های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰ و ۳۰۰ متر، در شیب ثابت ۰/۵ درصد (شیب بهینه)، مقدار دبی بهینه به ترتیب ۰/۸۳، ۱/۱۸، ۱/۶۶، ۲/۰۵ و ۲/۴۴ لیتر بر ثانیه بر متر و مقدار زمان قطع جریان بهینه به ترتیب ۲۰۰/۶، ۲۱۲/۳، ۲۰۶/۶، ۲۰۹/۳ و ۲۱۱/۱۷ دقیقه است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش طول نوار، مقدار دبی و زمان قطع جریان جهت دستیابی به شرایط بهینه باید افزایش یابد. همچنین، در این نوار در طول‌های اشاره شده، بازده کاربرد (AE) به ترتیب ۶۴/۸۰، ۶۴/۹۵، ۶۳/۱۷، ۶۳/۱۴ و ۶۳/۰۷ درصد و مقدار حداقل یکنواختی توزیع (DU_{min}) به ترتیب ۰/۰۶، ۰/۰۷، ۰/۱۹، ۰/۳ و ۰/۵۴ درصد است.

در سری آزمایش‌های مطالعه موردی اول، شرایط بهینه در نوار با طول ۱۰۰ متر اتفاق افتاده است. در مطالعه موردی اول بافت خاک در تمام سری آزمایش‌های SiCL بوده است. در مطالعه موردی دوم، بافت خاک در سری آزمایش S₁ و S₂ رسی و در سری آزمایش S₃ و S₄ لوم بود. در سری آزمایش‌های

مطالعه موردی دوم و با توجه به سنگین بودن بافت خاک، طول بهینه در چهار سری آزمایش از ۱۰۰ تا ۲۰۰ متر متغیر بوده است. در این چهار سری آزمایش مقدار ضریب یکنواختی بالا (بیش از ۷۸ درصد) و عامل مهم در شاخص OF بوده است. با مقایسه جدول ۷ (شرایط بهینه با سه متغیر دبی ورودی - زمان قطع جریان - شیب طولی) و جدول ۸ (شرایط بهینه با چهار متغیر دبی ورودی - زمان قطع جریان - شیب طولی - طول نوار)، مقادیر شاخص OF با چهار متغیر نسبت به سه متغیر، افزایش یافت. مقادیر OF در چهار سری آزمایش B₁، B₂، B₃ و B₄ در جدول ۷ به ترتیب ۷۰/۶۹، ۷۰/۱۰، ۷۲/۰۵ و ۷۰/۲۵ درصد بود که این مقادیر در جدول ۸ به ترتیب ۷۲/۴۵، ۷۲/۴۵، ۷۲/۴۵ و ۷۲/۵۰ درصد محاسبه شد. به این ترتیب، با چهار متغیر امکان افزایش شاخص OF در این چهار سری به ترتیب ۱/۷۶، ۲/۳۵، ۰/۴۵ و ۱/۸۰ درصد نسبت به حالت سه متغیر وجود دارد.

مقایسه امکان افزایش بازدهی سیستم آبیاری نواری در سه وضعیت در شکل ۴ آمده است، شامل ۱. براساس متغیرهای جریان، ۲. متغیرهای جریان و متغیر هندسی شیب نوار، ۳. متغیرهای جریان و متغیرهای هندسی شیب و طول نوار برای هر هشت سری آزمایش. براساس متغیرهای جریان و بدون تغییر هندسه مزرعه، امکان رسیدن به بازده بالا وجود دارد. براساس شکل ۴ و افزودن شیب نوار به عنوان متغیر تصمیم، مقدار OF نسبت به حالت دو متغیر تصمیم دبی و زمان قطع جریان، از ۰/۲ تا ۱/۲۶ درصد (متوسط حدود ۰/۸۷ درصد) قابل افزایش خواهد بود. بر اساس چهار، مقدار OF نسبت به حالت دو متغیر تصمیم دبی و زمان قطع جریان، از ۰/۴ تا ۲/۷۶ درصد (متوسط حدود ۱/۴۶ درصد) قابل افزایش خواهد بود. مطابق یافته‌های Chen و همکاران (2013) براساس متغیرهای تصمیم طول و عرض نوار و تحت مدیریت جریان مشخص (دبی جریان ورودی و مدت زمان آبیاری مشخص)، برای سه نوار مطالعه شده مقدار AE از وضع موجود شامل ۶۱، ۵۹ و ۵۰ درصد به ترتیب قابل افزایش به ۸۹، ۸۵ و ۸۱ درصد بود.



شکل ۴. مقایسه شرایط بهینه عملکرد نوار براساس متغیرهای تصمیم مختلف در سری آزمایش‌ها

جدول ۸. نتایج بهینه‌سازی دبی و زمان قطع جریان در طول‌های مختلف نوار

سری	L(m)	S (m/m)	T _{co} (min)	q (lit/s/m)	AE (%)	DU (%)	OF (%)
B ₁	۱۰۰	۰/۰۰۵	۲۰۰/۶	۰/۸	۶۴/۸	۸۰/۱	۷۲/۴۵*
	۱۵۰	۰/۰۰۵	۲۱۲/۳	۱/۲	۶۵/۰	۷۸/۱	۷۱/۵۵
	۲۰۰	۰/۰۰۵	۲۰۶/۶	۱/۷	۶۳/۲	۷۸/۲	۷۰/۷
	۲۵۰	۰/۰۰۵	۲۰۹/۳	۲/۱	۶۳/۱	۷۷/۵	۷۰/۳
	۳۰۰	۰/۰۰۵	۲۱۱/۲	۲/۴	۶۳/۱	۷۷/۰	۷۰/۰۵
B ₂	۱۰۰	۰/۰۰۵	۱۱۵/۰	۱/۴	۶۶/۱	۷۸/۸	۷۲/۴۵*
	۱۵۰	۰/۰۰۵	۱۱۹/۲	۲/۱	۶۵/۱	۷۷/۰	۷۱/۰۵
	۲۰۰	۰/۰۰۵	۱۲۲/۱	۲/۹	۶۰/۸	۷۳/۹	۶۷/۳۵
	۲۵۰	۰/۰۰۵	۱۲۴/۷	۳/۶	۶۰/۳	۷۲/۶	۶۶/۴۵
	۳۰۰	۰/۰۰۵	۱۲۶/۱	۴/۳	۵۹/۹	۷۱/۷	۶۵/۸
B ₃	۱۰۰	۰/۰۱۵	۲۶۵/۳	۰/۷	۶۵/۳	۷۹/۷	۷۲/۵*
	۱۵۰	۰/۰۱۵	۲۷۸/۸	۱/۰	۶۵/۵	۷۷/۷	۷۱/۶
	۲۰۰	۰/۰۱۵	۲۷۵/۹	۱/۴	۶۴/۷	۷۷/۷	۷۱/۲
	۲۵۰	۰/۰۱۵	۲۸۴/۴	۱/۸	۶۲/۶	۷۵/۳	۶۸/۹۵
	۳۰۰	۰/۰۱۵	۲۸۷/۲	۲/۱	۶۲/۳	۷۴/۶	۶۸/۴۵
B ₄	۱۰۰	۰/۰۱۰	۱۳۱/۵	۱/۲	۶۵/۸	۷۸/۳	۷۲/۰۵*
	۱۵۰	۰/۰۱۰	۱۲۹/۴	۱/۸	۶۴/۱	۷۸/۵	۷۱/۳
	۲۰۰	۰/۰۱۰	۱۴۹/۸	۲/۳	۵۹/۴	۷۲/۵	۶۵/۹۵
	۲۵۰	۰/۰۱۰	۱۵۵/۸	۲/۷	۵۸/۷	۷۰/۸	۶۴/۷۵
	۳۰۰	۰/۰۱۰	۱۹۵/۱	۲/۷	۵۶/۱	۶۳/۴	۵۹/۷۵
S ₁	۱۰۰	۰/۰۰۵	۳۴۲/۴	۰/۵	۶۵/۱	۷۸/۷	۷۱/۹*
	۱۵۰	۰/۰۰۵	۳۴۸/۴	۰/۷	۶۴/۸	۷۸/۱	۷۱/۴۵
	۲۰۰	۰/۰۰۵	۳۵۴/۷	۱/۰	۶۴/۲	۷۷/۶	۷۰/۹
	۲۵۰	۰/۰۰۵	۳۵۲/۸	۱/۲	۶۴/۲	۷۷/۶	۷۰/۹
	۳۰۰	۰/۰۰۵	۳۴۹/۳	۱/۵	۶۴/۱	۷۷/۷	۷۰/۹
S ₂	۱۰۰	۰/۰۲۵	۱۸۷/۳	۰/۶	۶۳/۸	۷۶/۷	۷۰/۲۵
	۱۵۰	۰/۰۲۵	۱۷۶/۷	۱/۰	۶۳/۸	۷۸/۷	۷۱/۲۵
	۲۰۰	۰/۰۲۵	۱۶۷/۷	۱/۴	۶۳/۰	۸۰/۴	۷۱/۷*
	۲۵۰	۰/۰۲۵	۱۷۵/۶	۱/۷	۶۳/۴	۷۸/۷	۷۱/۰۵
	۳۰۰	۰/۰۲۵	۱۸۲/۰	۲/۰	۶۳/۵	۷۷/۳	۷۰/۴
S ₃	۱۰۰	۰/۰۰۵	۵۹/۷	۲/۵	۶۲/۷	۷۷/۱	۶۹/۹
	۱۵۰	۰/۰۰۵	۵۱/۴	۴/۳	۶۵/۱	۸۲/۴	۷۳/۷۵
	۲۰۰	۰/۰۰۵	۴۹/۱	۵/۹	۶۵/۹	۸۳/۴	۷۴/۶۵*
	۲۵۰	۰/۰۰۵	۶۰/۳	۶/۰	۶۵/۲	۷۶/۸	۷۱/۰
	۳۰۰	۰/۰۰۵	۷۷/۲	۶/۰	۶۱/۱	۶۸/۰	۶۴/۵۵
S ₄	۱۰۰	۰/۰۰۵	۱۱۷/۷	۲/۳	۶۳/۸	۷۸/۱	۷۰/۹۵
	۱۵۰	۰/۰۰۵	۱۱۶/۶	۳/۵	۶۳/۷	۷۸/۳	۷۱*
	۲۰۰	۰/۰۰۵	۱۱۶/۴	۴/۸	۶۳/۴	۷۸/۰	۷۰/۷
	۲۵۰	۰/۰۰۵	۱۱۶/۳	۶/۰	۶۳/۱	۷۷/۶	۷۰/۳۵
	۳۰۰	۰/۰۰۵	۱۳۷/۵	۶/۲	۶۱/۶	۷۰/۵	۶۶/۰۵

* متناظر با طول بهینه نوار

نتیجه‌گیری

شد. براساس دو متغیر آبیاری شامل دبی ورودی و زمان قطع جریان و بدون تغییر هندسه موجود نوار (طول و شیب)، عملکرد آبیاری نواری، افزایش چشمگیری یافت. علاوه بر متغیرهای جریان، با در نظر گرفتن تأثیر هندسه نوار (شیب و طول)، افزایش عملکرد بهینه آبیاری نواری شایان ملاحظه نبود و جزئی بود. با لحاظ شیب و طول به همراه متغیرهای دبی و زمان قطع جریان، اختلاف عملکرد بهینه نسبت به عملکرد بهینه براساس متغیرهای جریان، به طور متوسط ۲/۰ درصد به دست آمد. در شرایطی که امکان تغییر هندسه نوار وجود ندارد، عملکرد بهینه

به منظور تخمین پارامترهای معادله نفوذ کوستیاکف- لوییز و تخمین ضریب زبری مانینگ، روش بهینه‌سازی چندسطحی (که برای سیستم آبیاری جویچه‌ای توسعه یافته است) روشی دقیق و کاربردی در سیستم آبیاری نواری است. براساس روش بهینه‌سازی چندسطحی متوسط خطای RMSE برای هشت سری آزمایش برای مراحل پیشروی و پسروی به ترتیب ۳/۱ و ۳/۲ دقیقه به دست آمد. مطابق این روش متوسط خطای نسبی تخمین رواناب در این هشت سری آزمایش ۰/۵ درصد حاصل

نتایج به دست آمده با فرض کفایت ۱۰۰ درصد به دست آمد. با فرض کفایت کمتر از ۱۰۰ درصد، می توان به شاخص های عملکرد بالاتر نیز دست یافت.

بر اساس متغیرهای جریان، نزدیک به عملکرد بهینه بر اساس تمام متغیرها (جریان و هندسی) بود. در شرایط نوارهای مورد مطالعه، نیازی به صرف هزینه و تغییر هندسه نوارها نبود. تمام

REFERENCES

- Abbasi, F. (2012). Principle Flow in Surface Irrigation. *Iranian National Committee on Irrigation and Drainage (IRNCID)*, p. 232, Tehran, Iran.
- Abbasi, F. (1994). Border irrigation design using mathematical models. M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
- Abbasi, F., Jolaini, M., Moayeri, M., Rezaee, H. T., and Shooshtari, M. M. (1999). Development a mathematical model to evaluate and design of surface irrigation systems. Technical Report No. 122, *Iranian Agricultural Engineering Research Institute (IAERI)*, Karaj, Iran.
- Ansari, H. (2011). Surface Irrigation: Evaluation, Design and Simulation. *Jahad Daneshgahi Mashad*, p. 352. Mashhad, Iran.
- Bautista, E., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., and Schlegel, J. (2009a). Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*, 96, 1146-1154.
- Bautista, E., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S., and Niblack, M. (2009b). Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR-Example application. *Agricultural Water Management*, 96, 1162-1169.
- Beykzadeh, E., Ziaei, A. N., Davari, K., and Ansari, H. (2014). Optimization of inflow rate and cutoff time using the full hydrodynamic model. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 8 (2), 377-385.
- Chen, B., Ouyang, Z., Sun, Z., Wu, L., and Li, F. (2013). Evaluation on the potential of improving border irrigation performance through border dimensions optimization: a case study on the irrigation districts along the lower Yellow River. *Irrigation Science*, 31, 715-728.
- Ebrahimian, H., Liaghat, A., Ghanbarian-Alavijeh, B., and Abbasi, F. (2010). Evaluation of various quick methods for estimating furrow and border infiltration parameters. *Irrigation Science*, 28, 479-488.
- Hanson, B. R., Prichard, T. L., and Schulbach, H. (1993). Estimating furrow infiltration. *Agricultural Water Management*, 24(4), 281-298.
- Elliott, R. L., and Walker, W. R. (1982). Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the ASAE*, 25 (2), 396-400.
- Gonzalez, C., Cervera, L., and Fernandez, D. M. (2011). Basin irrigation design with longitudinal slope. *Agricultural Water Management*, 98, 1516-1522.
- Mailapalli, D. R., Wallender, W. W., Raghuvanshi, N. S., and Singh, R. (2008). Quick method for estimating furrow infiltration. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 134(6), 788-795.
- McClymont, D. J., and Smith, R. J. (1996). Infiltration parameters from optimization on furrow irrigation advance data. *Irrigation Science*, 17(1), 15-22.
- Mokari-Gahrood, E., Liaghat, A. M., and Nahvinia, M. J. (2013). Application of WinSRFR3.1 model in furrow irrigation simulation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*, 1(7), 59-67.
- Moravejalahkami, B., Mostafazadeh-Fard, B., Heidarpour, M., and Abbasi, F. (2009). Furrow infiltration and roughness prediction for different furrow inflow hydrographs using a zero-inertia model with a multilevel calibration approach. *Biosystems Engineering*, 103 (3), 371-381.
- Morris, M. R., Hussain, A., Gillies, M. H., and Halloran, N. J. (2015). Inflow rate and border irrigation performance. *Agricultural Water Management*, 155, 76-86.
- Rodriguez, J. A. and Martos, J.C. (2008). SIPAR_ID: Freeware for surface irrigation parameter identification. *Environmental Modelling and Software*, 25(11), 1487-1488.
- Shepard, J. S., Wallender, W. W., and Hopmans, J. W. (1993). One method for estimating furrow infiltration. *Transactions of the ASAE*, 36(2), 395-404.
- Valiantzas, J. D., Aggelides, S., and Salsalou, A. (2001). Furrow infiltration estimation from time to a single advance point. *Agricultural Water Management*, 52, 17-32.
- Walker, W. R. (2005). Multilevel calibration of furrow infiltration and roughness. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 131 (2), 129-136.
- Verdinejad, V., and Norjoo, A. (2014). Optimization of furrow irrigation performance using WinSRFR under furrow firming conditions of sugarbeet cultivation. *Iranian Journal of Soil and Water*, 27 (6), 1281-1293.