

ارزیابی مدل‌های DRAINMOD، ENDRAIN و SWAP در تخمین نوسانات سطح ایستابی (مطالعه موردی: کشت و صنعت امیرکبیر، خوزستان)

نیاز علی ابراهیمی پاک^{۱*}، عبدالمجید لیاقت^۲، اصلان اگدرنژاد^۳ و محسن احمدی^۴

چکیده

وجود سطح ایستابی نزدیک زمین، یکی از مشکلات مناطق خشک و نیمه‌خشک است. با توجه به تأثیر این پدیده بر تولید محصولات کشاورزی، پیش‌نوسانات آن بر اثر آبیاری و زهکشی اهمیت می‌یابد. پژوهش حاضر با هدف ارزیابی سه مدل DRAINMOD، ENDRAIN و SWAP در تخمین سطح ایستابی در مزارع نیشکر کشت و صنعت امیرکبیر واقع در استان خوزستان انجام شد. بدین‌منظور، داده‌های سطح ایستابی در یک واحد زراعی با وسعت ۲۵ هکتار مورد استفاده قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی توسط مدل‌های مورد استفاده با استفاده از آماره‌های میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، کارایی مدل (EF)، ضریب باقیمانده جرم (CRM) و ضریب تعیین (R2) با داده‌های برداشت شده از مزرعه مقایسه شد. نتایج نشان داد که آماره‌های RMSE، EF، CRM و R2 برای مدل DRAINMOD در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۱۳/۱۹ (سانتی‌متر)، ۰/۸۴، ۰/۰۰۸ و ۰/۸۵ بود. این آماره‌ها برای مدل SWAP در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۱۷/۰۰ (سانتی‌متر)، ۰/۷۵، ۰/۰۲۰ و ۰/۸۲ به دست آمدند. آماره‌های مذکور برای مدل ENDRAIN نیز به ترتیب برابر با ۲۸/۱۰ (سانتی‌متر)، ۰/۲۰، ۰/۶۰۳ و ۰/۹۱ تعیین شد. بنابراین، مدل DRAINMOD با توجه به ضریب تعیین بالاتر و خطای کمتر به‌عنوان مدل مناسب‌تر برای پیش‌بینی سطح ایستابی در این منطقه معرفی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بیلان انرژی جریان، زهکشی، مدل‌سازی آب زیرزمینی، نیشکر.

ارجاع: ابراهیمی پاک ن. لیاقت ع. اگدرنژاد ا. و احمدی م. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های DRAINMOD، ENDRAIN و SWAP در تخمین نوسانات سطح ایستابی (مطالعه موردی: کشت و صنعت امیرکبیر، خوزستان). مجله پژوهش آب ایران. ۳۵: ۹۳-۱۰۲.

۱- دانشیار، بخش آبیاری و فیزیک خاک، موسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج.

۲- استاد گروه آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۳- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، اهواز.

۴- دکتری آبیاری و زهکشی.

* نویسنده مسئول: nebrahimipak@yahoo.com

مقدمه

می‌توان به مشاهدات بابازاده و همکاران (۱۳۸۹) در ارزیابی زهکش‌های زیرزمینی نخیلات آبادان و اثر آن بر نوسانات سطح ایستابی، نوری و همکاران (۱۳۸۹ ب) در شبیه‌سازی تغییرات سطح ایستابی در اراضی شالیزاری و زارع ایبانه و همکاران (۱۳۹۰) در واسنجی نوسانات سطح ایستابی در مازندران اشاره کرد. گل‌محمدی و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از این مدل به شبیه‌سازی عملیات خاک‌ورزی بر عمق سطح ایستابی، زهاب خروجی و میزان نیتروژن زهاب پرداختند. محمدی قوام و ک洛夫 (۲۰۱۶) از این مدل برای شبیه‌سازی نوسانات سطح ایستابی و میزان زهاب خروجی در فنلاند استفاده کردند.

با وجود این، توجه به مدل زهکشی ENDRIAN به نسبت کمتر از مدل DRAINMOD بوده است. این مدل براساس رابطهٔ بیلان انرژی به تعیین سطح ایستابی می‌پردازد. شار انرژی توسط این مدل براساس مضرری از پتانسیل هیدرولیکی و سرعت جریان محاسبه می‌شود. از جمله تحقیقات انجام شده توسط این مدل می‌توان به مطالعات زامفیر (۲۰۱۰) اشاره کرد. این محققان با استفاده از این مدل به تعیین فواصل زهکش‌ها در منطقه‌ای در غرب رومانی پرداختند. در تحقیقی دیگر، شیری و همکاران (۱۳۸۹) از این مدل برای تعیین دبی زهکش‌ها در منطقه زوریخ در کشور سوئیس استفاده و بیان کردند که مقادیر محاسبه شده با مقادیر اندازه‌گیری شده تطابق خوبی داشت.

SWAP، یک مدل آگروهیدرولوژیکی و یک بعدی است که نسبت به مدل DRAINMOD کمتر در زمینهٔ زهکشی مورد استفاده قرار گرفته است. با وجود این قابلیت شبیه‌سازی جریان در شرایط آبیاری و زهکشی و تخمین نوسانات سطح ایستابی را دارد.

از جمله تحقیقاتی که با استفاده از این مدل انجام شده است، می‌توان به مطالعات سرور (۱۹۹۳) برای شبیه‌سازی انتقال آب در لایسیمتر، کلنر (۱۹۹۴) در شبیه‌سازی تعادل آب و املاح در پروژه‌های زهکشی، بیکما و همکاران (۱۹۹۵) برای شبیه‌سازی جریان آب زهکشی‌شده، ون‌دم و فوس (۱۹۹۶) در مدل‌سازی انتقال آب و املاح در پروژه‌های آبیاری و زهکشی، سرور و همکاران (۲۰۰۰) در ارزیابی پارامترهای زهکشی، دهقان و همکاران (۱۳۸۹) در پیش‌بینی رطوبت نیمرخ خاک، وردی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۱) در ارزیابی عملکرد زهکشی زیرزمینی در منطقه

تولید محصولات کشاورزی در مناطق با سطح ایستابی نزدیک زمین همواره با دشواری‌های خاصی مواجه بوده است. این شرایط برای کشورهای خشک و نیمه‌خشک مانند ایران که عمدتاً دارای آب‌های زیرزمینی شور و یا لب‌شور هستند، تشدید می‌شود (نوری و همکاران، ۱۳۸۹ الف). با توجه به این موضوع، نیاز است که واکنش سطح ایستابی به عملیات آبیاری و زهکشی در هر واحد زراعی به صورت مداوم پایش شود. با توجه به مشکلاتی، از جمله صرف وقت و هزینه، مدل‌هایی بدین منظور ارائه شده است تا بتوان حتی پیش از انجام عملیات آبیاری و زهکشی، تخمینی از وضعیت سطح ایستابی به‌دست آورد. از جمله این مدل‌ها می‌توان به DRAINMOD (اسکگز، ۱۹۷۸)، ENDRAIN (اوستریان و همکاران، ۱۹۹۶) و SWAP (ون‌دم و همکاران، ۱۹۹۷) اشاره کرد.

تاکنون تحقیقات متعددی با استفاده از این مدل‌ها انجام شده است که از این جمله می‌توان به مطالعات سینگ و همکاران (۲۰۰۶) اشاره کرد. این محققان با استفاده از مدل DRAINMOD به بررسی زهکشی زیرزمینی در طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۳ در منطقه آیوا پرداختند. این پژوهشگران نشان دادند که ضریب تعیین بین مقادیر مشاهده شده و مقدار زهاب شبیه‌سازی شده توسط مدل DRAINMOD دو درصد بیشتر از مقدار واقعی محاسبه شده بود. درزی و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از مدل DRAINMOD به بررسی اثر کنترل سطح ایستابی بر محصول کلزا در استان گیلان پرداختند و نشان دادند که این مدل نتایج مطلوبی نسبت به داده‌های واقعی نشان داد. یانگ (۲۰۰۸) در تحقیقی دو ساله به ارزیابی مدل DRAINMOD در بررسی نوسانات سطح ایستابی در مزارع نیشکر در کشور استرالیا پرداخت و گزارش کرد که تطابق خوبی بین نتایج این مدل و مشاهدات واقعی وجود داشت. حسن‌پور و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از مدل DRAINMOD به بررسی نوسانات سطح ایستابی در اراضی شالیزاری رشت پرداختند. این پژوهشگران نشان دادند که مقادیر پیش‌بینی شده توسط این مدل نسبت به واقعیت حداکثر ۴ درصد برای زمین دارای زهکشی سطحی و ۱۷ درصد برای زمین بدون زهکشی بود. از جمله سایر مطالعات انجام شده با استفاده از این مدل

۸۰۰ میلی‌متر متصل می‌شوند. در این پژوهش از داده‌های سطح ایستابی برداشت‌شده توسط منصوری سرنجیانه (۱۳۸۷) استفاده شد.

مدل SWAP

این مدل با حل معادله ریچاردز (۱) به شبیه‌سازی حرکت آب در خاک‌های اشباع و غیراشباع می‌پردازد (کروس و ون‌دم، ۲۰۰۳).

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) - S(h) \quad (1)$$

در این معادله، θ ، رطوبت حجمی خاک ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)؛ t ، زمان (hr)؛ z ، افزایش عمق نسبت به سطح زمین (cm)؛ $K(\theta)$ ، هدایت هیدرولیکی ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)؛ و h ، بار هیدرولیکی (cm) است.

مشخصات فیزیکی خاک در جدول ۱ نشان داده شده است. برخی از این خصوصیات با استفاده از داده‌برداری در مزرعه مشخص شد. پارامترهای هیدرولیکی خاک، شامل رطوبت باقی‌مانده θ_{res} ، درصد رطوبت اشباع θ_{sat} ، هدایت هیدرولیکی اشباع خاک K_{sat} ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$) و ثابت‌های (cm^{-1}) a ، b و n با استفاده از بخش Rosetta در مدل RETC تعیین شد.

برای شبیه‌سازی زهکشی در این مدل، از سه فرمول هوخهات، ارنست و زهکشی پایه استفاده می‌شود (کروس و ون‌دم، ۲۰۰۳). در این تحقیق از زهکشی پایه استفاده شد؛ بدین‌صورت که جریان زهکشی براساس معادله بین عمق سطح ایستابی و عمق زهکش‌ها در درجات مختلف (لاترال یا کلکتور) تعیین می‌شود (معادله (۲)).

$$q_{drain,i} = \frac{F_{gwl} - F_{drain,i}}{g_{drain,i}} \quad (2)$$

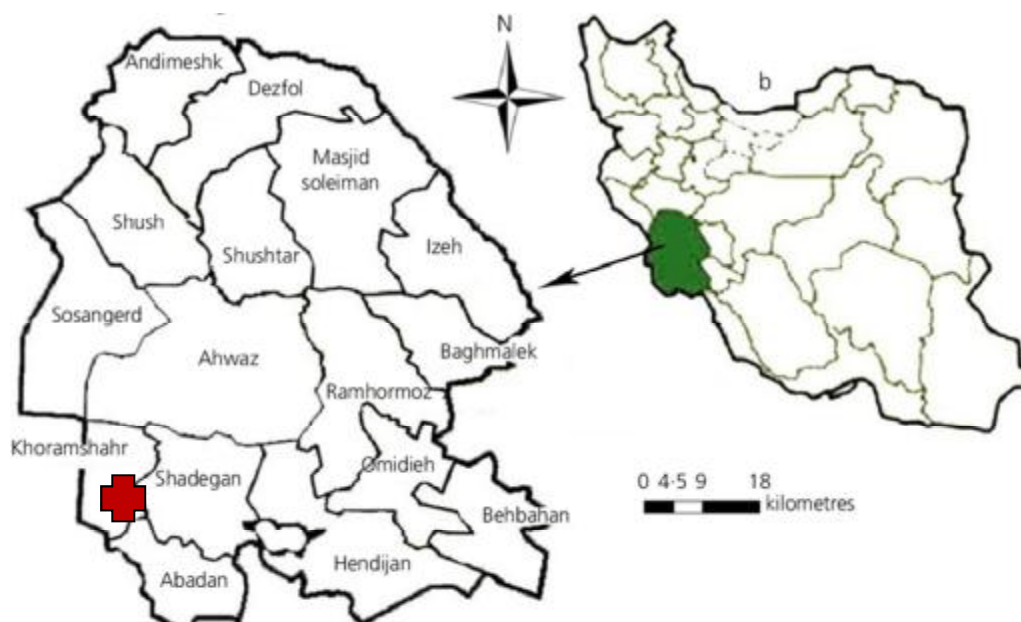
در این معادله، $q_{drain,i}$ ، شدت جریان زهکشی؛ F_{gwl} ، عمق سطح ایستابی؛ $F_{drain,i}$ ، عمق زهکش؛ $g_{drain,i}$ ، مقاومت زهکشی؛ و i ، درجه زهکش است. همچنین در این مدل، شبیه‌سازی گیاه و اثر آن بر بیلان آب به سه صورت گیاه ساده، گیاه تفضیلی و چمن تفضیلی شبیه‌سازی می‌شود. پارامترهای زهکشی و گیاه نیشکر به‌ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. در این پژوهش از نسخه ۳.۲.۳۶ این مدل استفاده شد.

ران بهشهر و نوری و همکاران (۱۳۸۹) ب) در برآورد نوسانات سطح ایستابی و شدت جریان زهکشی زیرزمینی اشاره کرد. کی و کی (۲۰۱۶) از مدل SWAP برای شبیه‌سازی زهکشی و تغییرات سطح آب در مزارع کشاورزی و انتقال فسفر به زهکش‌ها استفاده کردند. جیانگ و همکاران (۲۰۱۶) این مدل را برای برنامه‌ریزی آبیاری و تغییرات رطوبت خاک مورد استفاده قرار دادند. وجود سطح ایستابی بالا در استان خوزستان سبب شده است که زراعت محصولات کشاورزی با مشکل روبه‌رو شود. این مشکلات در مناطق توسعه نیشکر که عمدتاً مساحت‌های بالایی را نیز شامل می‌شوند، دو چندان می‌شود. بنابراین، نیاز است که نوسانات سطح ایستابی در طول دوره کشت نیشکر تخمین زده شود. با توجه به این موضوع و براساس سابقه تحقیق، سه مدل SWAP، ENDRAIN و DRAINMOD توانایی مناسبی در برآورد سطح ایستابی دارند؛ ولی تاکنون مطالعات اندکی در خصوص مقایسه این سه مدل در این زمینه انجام شده است. بدین منظور، تحقیق حاضر با هدف ارزیابی این سه مدل در برآورد نوسانات سطح ایستابی در کشت و صنعت امیرکبیر انجام شد.

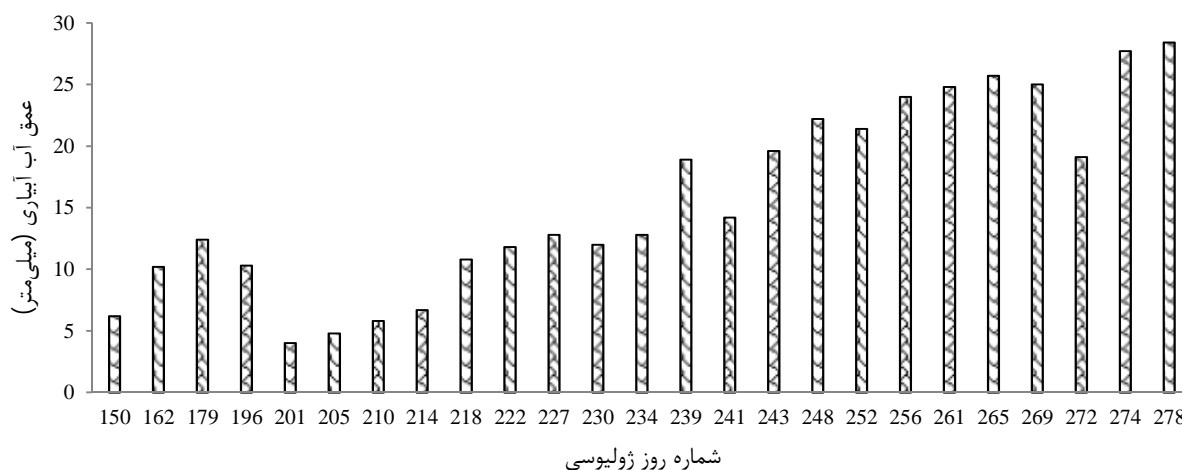
مواد و روش‌ها

این پژوهش در کشت و صنعت امیرکبیر واقع در استان خوزستان با مختصات جغرافیایی $48^{\circ} 12'$ تا $48^{\circ} 30'$ طول شرقی و $31^{\circ} 15'$ تا $31^{\circ} 40'$ عرض شمالی انجام شد (شکل ۱). زمین‌های کشاورزی موجود در این منطقه تحت کشت نیشکر بوده و شامل ۴۸۰ مزرعه ۲۵ هکتاری هستند.

آب آبیاری توسط ایستگاه پمپاژ از رودخانه کارون تأمین می‌شود. مقدار آب آبیاری براساس روز ژولیوسی در شکل ۲ نشان داده شده است. این مقادیر براساس محاسبه نیاز آبی و با در نظرگرفتن مقدار بارندگی بوده است. طبق آمار موجود، این منطقه دارای آب و هوای خشک است؛ به طوری که متوسط کل بارندگی سالیانه این منطقه برابر $209/2$ میلی‌متر و میانگین دمای هوا برابر $25/4$ درجه سانتی‌گراد است. به‌منظور زهکشی زمین‌های منطقه از لوله‌های زهکشی از جنس موج‌دار پلاستیکی و به قطرهای ۱۲۵ و ۱۶۰ میلی‌متر استفاده شده است. این لوله‌ها به کلکتورهای زیرزمینی به جنس بتن و به قطرهای ۳۰۰ تا



شکل ۱- موقعیت کشت و صنعت امیرکبیر در استان خوزستان (علامت قرمز)



شکل ۲- مقدار آب آبیاری براساس روز ژولیوسی

نمی‌دهد و به‌منظور یکسان‌سازی تبخیر-تعرق برآورد شده توسط هر دو مدل SWAP و DRAINMOD، فایل تبخیر-تعرق به روش فائو-پنمن-مانتیث به مدل DRAINMOD معرفی شد. پارامترهای خاک‌شناسی، سیستم زهکشی و اطلاعات مرتبط با گیاه مورد کشت نیز مشابه مدل SWAP بوده و براساس اطلاعات جمع‌آوری شده (جدول‌های ۱ تا ۳) به مدل معرفی شدند. واسنجی این مدل نیز مانند SWAP بود و با تغییر ثابت‌های معادله ون‌گنوختن- معلم سعی شد تا نتایج شبیه‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده مطابقت پیدا کند. در این پژوهش از نسخه ۶.۱ این مدل استفاده شد.

مدل DRAINMOD

این مدل نیز براساس معادلهٔ بیلان آبی و داده‌های هواشناسی، داده‌های خاک مزرعه، اطلاعات مربوط به سیستم زهکشی و پارامترهای گیاه موردنظر به شبیه‌سازی رژیم جریان آب در خاک به سمت زهکش‌های سطحی و غیرسطحی، رواناب سطحی، تبخیر-تعرق، زهکشی زیرزمینی و نشت (عمودی و جانبی) می‌پردازد. اطلاعات هواشناسی مورد نیاز، شامل بارش روزانه (که مدل آن را به بارش ساعتی تبدیل می‌کند)، دمای حداکثر و دمای حداقل روزانه است. این مدل براساس معادلهٔ تورنت‌وایت به شبیه‌سازی تبخیر-تعرق گیاه می‌پردازد. با توجه به اینکه این معادله در شرایط گرم و خشک جواب دقیقی

جدول ۱- مشخصات فیزیکی خاک مزرعه

رس	سیلت	شن	بافت خاک	q_{FC}	r_b	q_{res}	q_{sat}	K_{sat}	n	λ	a
	%		-	$cm^3.cm^{-3}$	$g.cm^{-3}$	$cm^3.cm^{-3}$	$cm^3.cm^{-3}$	$m.d^{-1}$	-	cm^{-1}	
۳۱	۳۳	۳۶	رسی لومی	۰/۴۰	۱/۳۳	۰/۰۷۸	۰/۴۳	۰/۲۵	۱/۵۶	-۱/۵	۰/۰۳۶

جدول ۲- مشخصات پارامترهای زهکشی مورد استفاده

پارامتر	مقدار
عمق زهکش (متر)	۲
فاصله زهکش‌ها (متر)	۴۰
ضریب زهکشی (میلی‌متر در روز)	۱/۲
شعاع مؤثر زهکش‌ها (سانتی‌متر)	۱/۵
عمق کم نفوذ (متر)	۴/۵
حداکثر نگهداشت سطحی (سانتی‌متر)	۱۰

جدول ۳- عمق ریشه و ضریب گیاهی نیشکر در طول دوره رشد

مرحله رشد	عمق ریشه (سانتی‌متر)	ضریب گیاهی
اولیه	۲۰	۰/۴
توسعه	۳۵	۰/۷۲
میانی	۶۰	۱/۱۲
انتهایی	۶۰	۰/۸۶

مدل ENDRAIN

این مدل توسط اوستریان و همکاران (۱۹۹۶) ارائه شد. این مدل از بیلان انرژی جریان به منظور تخمین فواصل زهکش‌ها و میزان سطح ایستابی استفاده می‌کند. این روش براساس یکسان فرض کردن تغییرات شار انرژی هیدرولیکی در طول یک فاصله افقی استوار است. شار انرژی براساس ضرب پتانسیل هیدرولیکی در سرعت جریان و تقسیم آن بر عمق جریان به دست می‌آید. در واقع، این محاسبات الهام گرفته شده از جریان الکتریسیته در یک مدار الکتریکی است. ورودی‌های این مدل شامل بارهیدرولیکی واقع در نقطه وسط دو زهکش، شعاع لوله زهکش، عمق تراز زهکش، عمق لایه غیرقابل نفوذ از سطح زمین، فاصله بین دو زهکش و هدایت هیدرولیکی لایه‌های بالایی و پایینی خاک است. این مدل به کاربر اجازه می‌دهد که حداکثر سه لایه خاک با مشخصات هیدرولیکی و فیزیکی مختلف تعیین کند. البته محدودیتی در تعریف این سه مدل وجود دارد؛ به طوری که تنها یک لایه خاک می‌تواند بالای زهکش‌ها در نظر گرفته شود.

این مدل از معادله (۳) برای تعیین شرایط حاکم بر جریان در شرایط زهکشی استفاده می‌کند:

$$\frac{dJ}{dX} = -\frac{Vx}{Kx} - \frac{R(J - Jr)}{Vx.J} \quad (3)$$

که در این معادله، J سطح آب زیرزمینی در فاصله X ؛ Jr مقدار مرجع برای سطح آب زیرزمینی؛ Kx ، فاصله زهکش‌ها؛ Vx ، سرعت جریان ظاهری؛ و R ، تغذیه ماندگار توسط بارش یا آبیاری است. البته این مدل از معادله‌های قبلی ارائه شده حاکم بر جریان زهکشی نیز استفاده می‌کند. با وجود این، در این پژوهش از معادله (۵) استفاده شد.

نتایج و بحث

با توجه به نتایج محققان قبلی، تخمین اشتباه پارامترهای فیزیکی خاک، سبب ایجاد خطا در خروجی مدل خواهد شد. بنابراین، لازم است که پیش از شبیه‌سازی از صحت اطلاعات ورودی مطمئن شد. بدین منظور، به صورت تصادفی، ۷۰ درصد داده‌ها به منظور واسنجی انتخاب شد. سپس با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری

است. نتایج نشان می‌دهد که برای هر دو مدل، پارامترهای n و a بیشترین تغییرات را نسبت به قبل از واسنجی داشتند. تحقیقات سایر محققان، از جمله اسکگر (۱۹۸۲)، سینگ و همکاران (۲۰۰۶) و سمیع‌پور و همکاران (۱۳۸۹) نیز نشان داده است که تمامی پارامترهای فیزیکی خاک، اثر معنی‌داری بر نتایج شبیه‌سازی مدل‌های مورد استفاده ندارند و بیشترین حساسیت نتایج نسبت به دو پارامتر n و a وجود دارد.

مقادیر به‌دست آمده برای سطح ایستابی با استفاده از هر سه مدل مورد استفاده در مرحله واسنجی در شکل ۳ و در مرحله صحت‌سنجی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. نتایج به‌دست آمده از مدل DRAINMOD نشان داد که داده‌های شبیه‌سازی شده توسط این مدل، چه در مرحله واسنجی و چه در مرحله صحت‌سنجی، همسبستگی مناسبی نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده دارند (شکل ۵)؛ این در حالی است که ضریب تعیین بین نتایج مدل SWAP و داده‌های اندازه‌گیری شده، در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، نسبت به مدل DRAINMOD پایین بود (شکل ۶). به دلیل خصوصیات هر مدل، تعیین شرایط حاکم بر شبیه‌سازی مانند تبخیر-تعرق و جریان از پایین در مدل DRAINMOD نسبت به SWAP به واقعیت‌تر نزدیک بوده و به همین دلیل، نتایج برآوردشده توسط این مدل نیز به واقعیت نزدیک‌تر است. مدل ENDRAIN، نیازی به تعیین پارامترهای فیزیکی خاک نداشت و تنها پارامترهای نامشخص در طرح مانند زمان تغذیه و تخلیه، مقاومت ورودی به زهکش و هدایت هیدرولیکی افقی و عمودی در خاک مورد واسنجی قرار گرفتند. با وجود این، نتایج واسنجی این پارامترها نشان داد که تطابق خوبی بین داده‌های شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده وجود داشت.

نتایج برآورد RMSE برای دو مدل DRAINMOD و SWAP در مرحله واسنجی به ترتیب برابر ۱۲/۴۲ و ۱۰/۴۶ سانتی‌متر و در مرحله صحت‌سنجی به ترتیب برابر ۱۳/۱۹ و ۱۷/۰۰ سانتی‌متر به دست آمد (جدول ۵). یانگ (۲۰۰۸) برای تعیین سطح ایستابی با استفاده از مدل DRAINMOD، مقدار RMSE را برابر ۷ سانتی‌متر گزارش کرد؛ در حالیکه اسکگر (۱۹۸۰)، سمیع‌پور و همکاران (۱۳۸۹) و آذرنوش (۱۳۸۳) مقدار RMSE را برای این پارامتر به ترتیب برابر ۱۹/۶-۷/۵، ۲۰/۶۹ و ۱۸/۴

شده، پارامترهای فیزیکی خاک آن قدر تغییر داده شدند تا دقت نتایج شبیه‌سازی نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده به حد قابل قبولی برسد. ۳۰ درصد داده‌ها نیز برای صحت‌سنجی مدل‌ها استفاده شد. به‌منظور ارزیابی هر سه مدل مورد استفاده و نیز مقایسه آن‌ها، از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب باقیمانده جرم (CRM) و شاخص کارایی مدل (EF) استفاده شد. این آماره‌ها به ترتیب در معادلات (۴) تا (۷) نشان داده شده‌اند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴).

$$R^2 = \frac{(\hat{a} (P_i - P)(O_i - O))^2}{\hat{a} (P_i - P)^2 \hat{a} (O_i - O)^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}^{0.5} \quad (5)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (6)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \quad (7)$$

در این معادلات، n تعداد کل داده‌های مورد بررسی؛ O میانگین مقادیر مشاهده شده؛ P میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده؛ O_i مقدار مشاهده شده در برداشت i ام؛ و P_i مقدار پیش‌بینی‌شده با استفاده از دو مدل DRAINMOD و SWAP است. آماره R^2 نشان‌دهنده شدت رابطه خطی بین دو مقدار مشاهده شده و اندازه‌گیری شده است و مقدار آن بین صفر تا یک متغیر است. مقادیر نزدیک به یک برای این پارامتر نشان‌دهنده ارتباط بیشتر بین متغیرهای مورد بررسی است. مقدار RMSE از صفر تا بی‌نهایت متغیر است و هر چه مقدار این آماره به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده برآورد بهتر مدل است. مقدار آماره CRM از منفی بی‌نهایت تا بی‌نهایت متغیر است و نشان‌دهنده بیش‌آوردی یا کم‌برآوردی مدل است. هر چه مقادیر این آماره به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده دقت بیشتر مدل است. آماره EF نیز مقادیری بین منفی بی‌نهایت تا یک را شامل می‌شود و هر چه مقدار آن به یک نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر است.

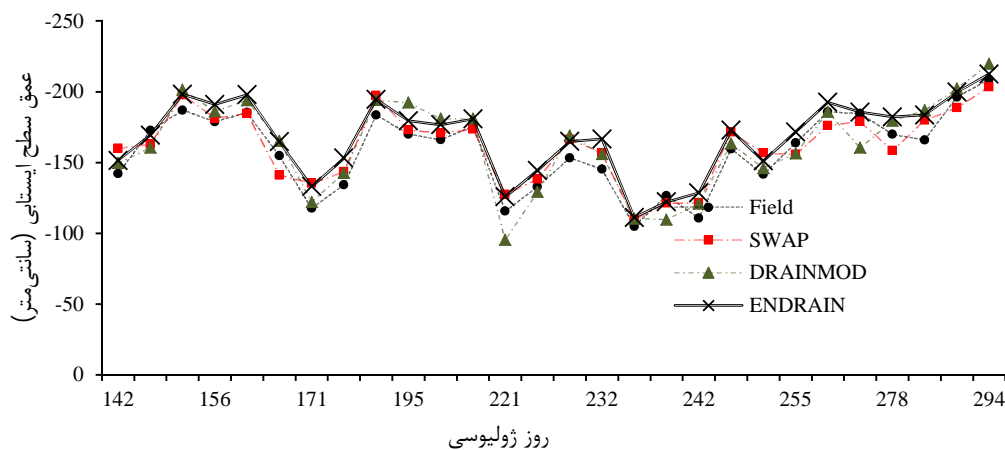
نتایج واسنجی پارامترهای فیزیکی خاک برای مدل‌های SWAP و DRAINMOD در جدول ۴ نشان داده شده

فیزیکی خاک مانند هدایت هیدرولیکی اشباع باشد. با توجه به اینکه در مطالعات محققان قبلی و نیز در این تحقیق، این پارامتر براساس توابع انتقالی تعیین شد، نتایج مدل‌ها نیز با خطا همراه بود. نتایج این آماره برای مدل ENDRAIN در مرحله واسنجی قابل قبول بود؛ ولی در مرحله صحت‌سنجی با مقدار $28/10$ سانتی‌متر خطای بالایی داشت.

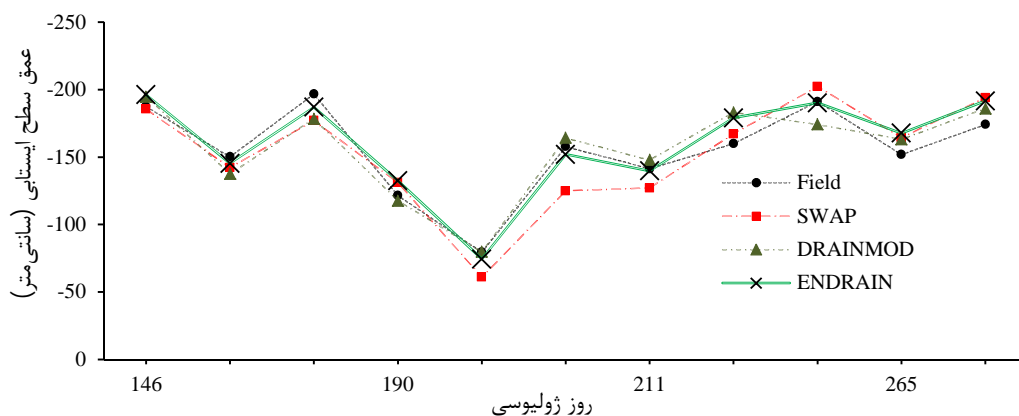
سانتی‌متر گزارش کردند. بنابراین، می‌توان نتایج به‌دست آمده از این مدل را قابل قبول دانست. نتایج تحقیقات سمیع‌پور و همکاران (۱۳۸۹) و مارینوف و همکاران (۲۰۰۵) مقدار RMSE را برای مدل SWAP به‌ترتیب برابر $14/9$ و $14/85$ سانتی‌متر گزارش کردند. بنابراین، نتایج به‌دست آمده توسط این مدل نیز قابل قبول است. وجود خطا در هر دو مدل احتمالاً به‌دلیل تخمین خصوصیات

جدول ۴- نتایج واسنجی پارامترهای فیزیکی خاک

نام مدل	a	l	n	K_{sat}	q_{sat}	q_{res}
DRAINMOD	۰/۰۲۲	-۱/۴۲	۱/۱۷	۰/۲۵	۰/۴۱	-۰/۰۸۹
SWAP	۰/۰۲۸	-۱/۳۹	۱/۲۶	۰/۲۵	۰/۴۵	-۰/۰۸۵



شکل ۳- مقایسه نتایج واسنجی مدل‌های DRAINMOD, ENDRAIN, SWAP با داده‌های اندازه‌گیری شده



شکل ۴- مقایسه نتایج صحت‌سنجی مدل‌های DRAINMOD, ENDRAIN, SWAP با داده‌های اندازه‌گیری شده

شرایط حاکم بر زهکشی را ساده‌تر از دو مدل دیگر فرض می‌کند؛ و به‌ویژه در تعیین شرایط بالادست و پایین‌دست ضعیف‌تر از دو مدل دیگر است. با توجه به ثابت بودن شرایط بالادست برای هر دو مدل SWAP و

نتایج به‌دست آمده از آماره EF نشان داد که گرچه کارایی هر سه مدل در مرحله صحت‌سنجی قابل قبول بود؛ ولی مدل DRAINMOD کارایی نسبتاً بهتری در تخمین سطح ایستابی داشت (جدول ۵). مدل ENDRAIN

تعیین شرایط پایین‌دست بهتر از مدل SWAP بود، کارایی بهتری نیز نسبت به این مدل نشان داد. گرچه معیارهای انتخاب شرایط مرزی پایین‌دست در مدل SWAP بیشتر از DRAINMOD است؛ ولی خطای ناشی از تعیین نادرست این شرط و ورود اطلاعات با دقت کم، سبب ایجاد خطای بیشتر در مدل SWAP می‌گردد.

DRAINMOD، احتمالاً علت تفاوت کارایی این دو مدل در برآورد سطح ایستابی به دلیل شرایط حاکم بر مزر پایین‌دست در مدل‌سازی بوده است. در مدل DRAINMOD فرض می‌شود که تمام جریان در نیمرخ خاک باقی می‌ماند و نشت از لایهٔ مرزی انجام نمی‌شود. به همین دلیل، چون خصوصیات مدل DRAINMOD در

جدول ۵- مقایسه سه مدل DRAINMOD, SWAP و ENDRAIN

ENDRAIN	SWAP	DRAINMOD	آماره	
-۰/۹۳	-۰/۸۳	-۰/۸۷	R ²	
۱۱/۶۳	۱۰/۴۶	۱۲/۴۲	RMSE (سانتی‌متر)	واسنجی
-۰/۰۶۱	-۰/۰۲۲	-۰/۰۲۸	CRM	
۰/۸۵	۰/۸۸	۰/۸۳	EF	
۰/۹۱	۰/۸۲	۰/۸۵	R ²	
۲۸/۱۰	۱۷/۰۰	۱۳/۱۹	RMSE (سانتی‌متر)	صحت‌سنجی
۰/۶۰۳	۰/۰۲۰	-۰/۰۰۸	CRM	
-۲/۸۰	۰/۷۵	۰/۸۴	EF	

بنابراین، با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان مدل DRAINMOD را مدل مناسب‌تری برای برآورد سطح ایستابی در این منطقه نسبت به SWAP دانست. گرچه نتایج مدل SWAP نیز حاکی از دقت نسبتاً مناسب این مدل در تعیین نوسانات سطح ایستابی در این واحد کشت و صنعت بود.

نتیجه‌گیری

براساس نتایج این پژوهش، مقدار خطای سه مدل مورد مطالعه بین بازه ۱۳ تا ۲۹ سانتی‌متر متغیر بود؛ به طوری که کمترین خطا به مدل DRAINMOD و بیشترین خطا به مدل ENDRAIN اختصاص داشت. همچنین، کارایی مدل در مرحلهٔ صحت‌سنجی برای مدل DRAINMOD نسبت به مدل‌های SWAP و ENDRAIN بهتر بود. براساس نتایج این تحقیق، مدل DRAINMOD به دلیل تخمین بهتر پارامترهایی مانند تبخیر-تعرق و بیلان آب، دقت بیشتری در تعیین سطح ایستابی نسبت به دو مدل دیگر داشت. بنابراین، می‌توان DRAINMOD را مدل مناسب‌تری برای پیش‌بینی سطح ایستابی در این منطقه معرفی کرد.

مقادیر CRM در مرحلهٔ واسنجی نشان داد که هر سه مدل در تخمین سطح ایستابی دارای خطای بیش‌برآوردی بودند؛ در حالیکه در مرحلهٔ صحت‌سنجی مدل‌های ENDRAIN و SWAP دارای خطای کم‌برآوردی و مدل DRAINMOD دارای خطای بیش‌برآوردی بود. شیب خط رگرسیونی بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مدل‌های ENDRAIN, SWAP و DRAINMOD در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نیز نشان‌دهندهٔ کم‌برآوردی و بیش‌برآوردی تخمین سطح ایستابی توسط هر سه مدل مورد استفاده است. نتایج تحقیقات سایر محققان، از جمله سمیع‌پور و همکاران (۱۳۸۹) نیز نشان داده است که مدل DRAINMOD به دلیل در نظر نگرفتن تبخیر-تعرق در زمان آبیاری، دچار خطا در تعیین سطح ایستابی می‌شود. با توجه به وجود شرایط مختلف پایین‌دست در مدل SWAP، وجود خطا در برآورد سطح ایستابی برای این مدل نیز احتمالاً به دلیل عدم اطلاعات کافی برای تعیین دقیق شرایط مرزی پایین‌دست باشد. از طرفی، با توجه به اینکه هیچ‌کدام از این دو مدل توانایی شبیه‌سازی جریان‌های ترجیحی در خاک را ندارند، احتمالاً یکی از عوامل خطا در برآورد سطح ایستابی برای هر دو مدل به این دلیل باشد (سمیع‌پور و همکاران، ۱۳۸۹).

منابع

۱. احمدی م.، خاشعی سیوکی ع. و سیاری م. ح. ۱۳۹۵. بررسی مدل مناسب تعیین نیاز آبی زعفران (*Crocus sativus L.*) و تعیین میزان تنش‌های آبی وارده. بوم شناسی کشاورزی. ۸(۴): ۵۰۵-۵۲۰.
۲. آذرنوش م. ۱۳۸۳. مدل‌سازی تغییرات سطح ایستابی در خاک با استفاده از مدل DRAINMOD و شبکه عصبی (مطالعه موردی: خوزستان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس. ۱۰۵ ص.
۳. بابازاده ح. خدادای دهکردی، د. رفیعی‌نیا ا. شمس‌نیا س. ا. و نوروزی اقدم ا. ۱۳۸۹. ارزیابی سیستم زهکش زیرزمینی نخیلات آبادان از نظر زهاب خروجی و تأثیر آن بر نوسانات سطح ایستابی با استفاده از مدل DRAINMOD. دانش آب و خاک، ۲۰(۳): ۱۸۵-۱۹۸.
۴. حسن‌پور ب. پارسی‌نژاد م. سلحشور دلیوند ف. و کوثری ه. ۱۳۸۹. برآورد نوسانات سطح ایستابی در اراضی شالیزاری با استفاده از مدل DRAINMOD (مطالعه موردی: رشت)، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۲(۴): ۱۶۷-۱۷۴.
۵. دهقان ه. علیزاده ا. حقایقی م. س. و انصاری ح. ۱۳۸۹. پیش‌بینی رطوبت نیم‌رخ خاک در سه مزرعه گندم با استفاده از مدل SWAP. نشریه آب و خاک. ۲۴(۵): ۱۰۰۸-۱۰۱۸.
۶. زارع ابیانه ح. نوری ح. لیاقت ع. کریمی و. و نوری ح. ۱۳۹۰. واسنجی آب‌شویی نیترات و نوسانات سطح ایستابی در زمین‌های شالیزاری با استفاده از نرم‌افزار DRAINMOD-N، مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک. ۱۵(۵۷): ۴۹-۶۰.
۷. سمیع‌پور ف. محمدی ک. مهدیان م. ح. و ناصری ع. ع. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل‌های زهکشی SWAP و DRAINMOD به منظور تعیین عمق و فاصله بهینه زهکش‌ها براساس بیشترین عملکرد محصول و کمترین مقدار خروجی زه‌آب، نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۳(۴): ۳۷۵-۳۸۶.
۸. شیرینی ج. ناظمی ا. ح. صدرالدینی ع. ا. و فاخری‌فرد ا. ۱۳۸۹. تأثیر مقاومت ورودی بر مشخصه‌های هیدرولیکی جریان در زهکشی زیرزمینی. دانش آب و خاک. ۱(۴): ۴۷-۶۰.
۹. منصوری سرنجیانه ف. ۱۳۸۷. بررسی پارامترهای طراحی سیستم زهکشی زیرزمینی در پروژه آبیاری و زهکشی طرح توسعه نیشکر (مطالعه موردی: واحد امیر کبیر)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه تهران، دانشکده کشاورزی. ۱۱۳ ص.
۱۰. نوری ح. زارع ابیانه ح. لیاقت ع. و نوری ح. ۱۳۸۹ الف. شبیه‌سازی تغییرات سطح ایستابی و غلظت نیترات در اراضی شالیزاری با مدل DRAINMOD-N (مطالعه موردی: کاپیک). دانش آب و خاک. ۲۰(۱): ۹۹-۱۰۹.
۱۱. نوری ح. لیاقت ع. پارسی‌نژاد م. و وظیفه‌دوست م. ۱۳۸۹ ب. ارزیابی مدل آگروهیدرولوژیکی SWAP در برآورد نوسانات سطح ایستابی و شدت جریان زهکشی زیرزمینی. مجله دانش آب و خاک. ۲۰(۲): ۱۵۷-۱۷۱.
۱۲. وردی‌نژاد و. ابراهیمیان ح. و احمدی ح. ۱۳۹۱. ارزیابی عملکرد زهکشی زیرزمینی با استفاده از مدل SWAP (مطالعه موردی: شبکه زهکشی ران بهشهر). ۲۶(۵): ۱۲۵۷-۱۲۶۷.
13. Beekma J. Kelleners T. J. Boers Th. M. and Raza Z. I. 1995. Application of SWATRE to evaluate drainage of an irrigated field in the Indus Plain, Pakistan. In: L.S. Pereira et al. (Eds.), Crop-Water-Simulation Models in Practice, Wageningen Press, Wageningen, The Netherlands. pp. 141-160.
14. Darzi A. Ejlali F. Ahmadi M. Z. and Najafi G. H. 2007. The suitability of controlled drainage and subirrigation in paddy fields. Pakistan Journal of Biological Science. 10(3): 492-497.
15. Golmohammadi G. Rudra R. P. Prasher Sh. O. Madani A. Goel P. K. and Mohammadi K. 2016. Modeling the impacts of tillage practices on water table depth, drain outflow and nitrogen losses using DRAINMOD, Computers and Electronics in Agriculture. 124: 73-83.
16. Jiang J. Feng Sh. Ma J. Huo Z. and Zhang Ch. 2016. Irrigation management for spring maize grown on saline soil based on SWAP model, Field Crops Research. 196: 85-97.

- DRAINMOD. *Transaction of the ASAE*. 25(3): 666-674.
29. Van Dam J. C. and Feddes R. A. 1996. Modeling of water flow and solute transport for irrigation and drainage. In: L.S. Pereira et al. (Eds.), *Sustainability of Irrigated Agriculture*. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands. 211-231.
 30. Van Dam J. C. Huygen J. Wesseling J. G. Feddes R. A. Kabat P. and Van Walsum P. E. V. 1997. Simulation of transport processes in the Soil-Water-Air-Plant environment. *SWAP User's Manual*. DLO-Winand Staring Centre, Wageningen, The Netherlands. 153 p.
 31. Yang X. 2008. Evaluation and application of DRAINMOD in an Australian sugarcane field. *Agricultural Water Management*. 95: 439-446.
 32. Zamfir R. H. C. 2010. Calculation of distance between drains using ENDRAIN program. *Research Journal of Agricultural Science*. 42(3): 161-166.
 17. Kelleners T. J. 1994. Use of SWATRE to simulate water and salt balance of an irrigated field in the Indus Plain of Pakistan. *IWASRI Report 140*, Lahore, Pakistan. 42 p.
 18. Kroes J. and Van Dam J. C. 2003. Reference manual SWAP version 3.03. *Altera Green World Research, Altera report 773*. 211 p. Wageningen University and Research Center, The Netherlands.
 19. Marinov D. Querner E. and Roelsma J. 2005. Simulation of water flow and nitrogen transport for a Bulgarian experimental plot using SWAP and ANIMO models. *Journal of Contamination Hydrology*. 77: 145-164.
 20. Mohammadi ghavam Sh. and Klove B. 2016. Evaluation of Drainmod 6.1 for hydrological simulations of peat extraction areas in northern Finland, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 142(11): 1-10.
 21. Oosterbaan R. J. and Boonstra Hand Rao K. V. G. 1996. The energy balance of groundwater. In: SinghVP(ed). *Subsurface – Water Hydrology*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. 111-118.
 22. Qi H. and Qi Zh. 2016. Simulation phosphorus loss to subsurface tile drainage flow: a review, *Environmental Review*. 1-13.
 23. Sarwar A. Bastiaanssen W. G. M. Boers Th. M. and Van Dam J. C. 2000. Evaluating drainage design parameters for the fourth drainage project, Pakistan by using SWAP model: Part I–calibration. *Irrigation and Drainage Systems*. 14: 257-280.
 24. Sarwar A. 1993. Application of SWATRE to predict soil water flow in a lysimeter. *IWASRI Publication No. 141*. International Waterlogging and Salinity Research Institute, Lahore, Pakistan. 53 p.
 25. Singh R. Helmers M. J. and Qi Z. 2006. Calibration and validation of DRAINMOD to design subsurface drainage systems for Iowa's tile landscapes. *Journal of Agricultural Water Management*. 85: 221-232.
 26. Skaggs R. W. 1978. A water management model for shallow water table soils. *Technical Report No. 134 of the Water Resources Research Institute of the University of North Carolina*. North Carolina State University. 200 p.
 27. Skaggs R. W. 1980. *DRAINMOD Reference Report: Methods for design and evaluation of drainage water management system for soils with high water tables*. United State Department of Agriculture. 10 chapter.
 28. Skaggs R. W. 1982. Field evaluation of a water management simulation model,