نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۸، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۰، ص. ۴۶-۳۱

Water Management in Agriculture
Vol. 8, No. 1, Spring and Summer 2021, 31-46

مقاله علمی-پژوهشی

عملکرد مدل SaltMod در شبیه‌سازی سطح ایستابی، حجم و شوری زهاب در زهکشی آزاد و کنترل‌شده

معصومه جعفری [۱]، بیژن نظری [۲*]، عباس ستوده‌نیا [۳]، هادی رمضانی اعتدالی [۴] و حمیدرضا جوانی جونی [۵]

چکیده

برای کنترل شوری آب‌وخاک از سامانه‌های زهکشی استفاده می‌شود که شناخت آن‌ها نیازمند صرف وقت و هزینه است. برای صرفه‌جویی در هزینه و زمان می‌توان مدل‌های شبیه‌سازی زهکشی را بکار برد. پژوهش حاضر، عملکرد مدل SaltMod در شبیه-سازی سطح ایستابی، حجم و شوری زهاب را ارزیابی نمود. شبیه‌سازی برای سه محصول مهم دشت مغان (گندم، جو و ذرت) و سه تیمار FD، CD70 و CDch انجام شد. برای بررسی زهکشی کنترل‌شده در مدل، ضریب کنترل زهکشی (Frd) لحاظ شد. تیمار FD برای کالیبراسیون، تیمارهای CD70 و CDch برای اعتبارسنجی انتخاب شدند. پس از شبیه‌سازی، میزان مطابقت میان مقادیر واقعی و شبیه‌سازی‌شده بررسی شد. در شبیه‌سازی سطح ایستابی، میانگین RE برای گندم، جو و ذرت به ترتیب ۱۷/۳، ۱۱/۳ و ۱۱ درصد و میانگین RMSE ۰/۱۳، ۰/۰۷ و ۰/۰۷ به دست آمد. همین شاخص‌ها برای حجم زهاب ۱۶، ۲۲ و ۱۷ درصد و همچنین ۰/۰۵، ۰/۰۷ و ۰/۰۶ حاصل شد. این نتایج، دقت قابل‌قبول مدل را تائید می‌نماید. سپس از مدل برای بررسی تأثیر عامل کنترل زهکشی، عمق آب آبیاری و عمق نصب زهکش بر سطح ایستابی، حجم و شوری زهاب استفاده گردید؛ بنابراین مدل می‌تواند مدیریت‌های مختلف آبیاری و زهکشی را در دشت مغان شبیه‌سازی نماید.

واژه‌های کلیدی: دشت مغان، زهکشی کنترل‌شده، شبیه‌سازی ضریب کنترل زهکشی، SaltMod

مقدمه

بخش کشاورزی یکی از عمده‌ترین مصرف‌کنندگان منابع آبی است که کیفیت منابع آب مصرفی در آن، تأثیر زیادی بر کیفیت و میزان محصول می‌گذارد. درمجموع شوری آب‌وخاک به‌صورت روزافزون تهدیدی جدی برای کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (رنجبر و پیراسته انوشه، ۱۳۹۴). آزمایش‌های مزرعه‌ای به‌منظور شناخت شرایط موجود سامانه‌های زهکشی مفید می‌باشند، اما محدودیت‌های قابل‌توجهی نیز دارند. یکی از محدودیت‌ها این است که این آزمایش‌ها را نمی‌توان برای پیش‌بینی استفاده نمود و روش‌های موجود وقت‌گیر و هزینه‌بر می‌باشند (صیادی شهرکی و همکاران، ۱۳۹۸). بنابراین با توجه به لزوم بررسی عوامل مختلف آب‌وخاک و همچنین شبیه‌سازی و پیش‌بینی آن‌ها، استفاده از مدل شبیه‌سازی توصیه می‌شود. امروزه تعداد بسیار زیادی از مدل‌ها مانند DrainMod، SaltMed، SaltMod و SWAP در علوم آب استفاده می‌شوند. در میان مدل‌هایی که شبیه‌سازی شرایط گوناگون را با هزینه و وقت کم انجام می‌دهند، مدل Saltmod می‌تواند گزینه‌ای

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
[۲] دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران (*نویسنده مسئول: b.nazari@eng.ikiu.ac.ir)
[۳] دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
[۴] دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران
[۵] دانش‌آموخته دکتری آبیاری و زهکشی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱/۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۲/۱۹
DOR: 20.1001.1.24764531.2021.8.1.3.1

مناسب باشد. مدل SaltMod یک برنامه رایانه‌ای برای پیش-بینی شوری رطوبت خاک، آب زیرزمینی و زهکش، عمق سطح ایستابی و خروجی زهکش در زمین‌های کشاورزی است که قادر به بررسی حالت‌های مختلف هیدرولوژیک و گزینه‌های متنوع مدیریت آب است (Oosterbaan, 2002). خروجی‌های این مدل درک فیزیکی مبتنی بر روند طولانی‌مدت جریان و انتقال نمک را فراهم می‌کند. این مدل در پژوهش‌های متعددی مورد ارزیابی قرار گرفته است که نتایج آن‌ها حاکی از توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی شرایط مختلف است. سرنگی و همکاران مطالعه ای با عنوان اجرای زهکشی زیرسطحی در دشت های برنج در منطقه ساحلی آندراپرادش در هند انجام دادند. در این پژوهش به شبیه سازی شوری پروفیل خاک و خروجی زهکش ها با استفاده از مدل Saltmod پرداختند. نتایج نشان دادند که با توجه به راندمان مدل و تفاوت میان مشاهدات و مقادیر پیش بینی شده شوری و ارزشیابی پارامترها، مدل Saltmod شوری پروفیل خاک را بهتر از دیگر مدل های موردمطالعه پیش‌بینی نمود (Sarangi et al., 2006). باهسی و همکاران با تعیین راندمان آبشویی، زهکشی طبیعی منطقه و استفاده از مدل Saltmod و نیز اندازه‌گیری‌های مزرعه‌ای، اثرات درازمدت زهکشی کنترل‌شده بر شوری خاک و راندمان آبیاری را در طول فصل رشد در دشت حران واقع در جنوب شرقی ترکیه بررسی کردند. نتایج شبیه سازی مدل نشان داد که استفاده از زهکشی کنترل‌شده، کارایی و کفایت مصرف آب را به ترتیب ۱۱ و ۳۸/۵ درصد افزایش می‌دهد (Bahceci et al., 2008). سینگ در مطالعه‌ی خود اعتبارسنجی SaltMod را برای بخش نیمه‌خشک شمال غربی هند و برخی گزینه‌ها برای کنترل آب‌گرفتگی موردبررسی قرار داد. نتایج نشان داد که سطح آب‌های زیرزمینی در طولانی‌مدت تحت الگوهای کشت موجود در حال افزایش است؛ بنابراین، استراتژی‌های مناسب مدیریت آب مانند کاهش سطح برنج ۵-۹ درصد، کاهش استفاده از آب کانال ۱۰-۷ درصد و افزایش مصرف آب زیرزمینی ۶-۸ درصد برای پایین آوردن سطح آب زیرزمینی به یک عمق امن و جلوگیری از افزایش بیشتر سطح آب زیرزمینی پیشنهاد می‌شود (Singh, 2012). فرجانی و همکاران مطالعه‌ای را باهدف پیش‌بینی شوری منطقه ریشه (بیش از ۱۰ سال) در مناطق دیم کشور تونس با استفاده از مدل شبیه سازی SaltMod تحت سیستم زهکشی زیرسطحی انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل قادر به پیش‌بینی این مقادیر کم‌وبیش مشابه هدایت الکتریکی در ناحیه ریشه است. شبیه‌سازی همچنین نشان داد که کاهش عمق زهکشی به‌طور معنی‌داری شوری منطقه ریشه را تغییر نمی دهد و فقط تراز سطح آب را کاهش می دهد. همچنین این محققان نشان دادند که هیچ تغییری در شوری منطقه ریشه به دلیل تغییر در فاصله زهکش وجود ندارد. در این مطالعه، کالیبراسیون SaltMod برای پارامترهای تعادل نمک –آب، اعتبار مدل را برای شرایط محلی ثابت کرد (Farjani et al., 2013). یائو و همکاران مطالعه‌ای را به‌منظور ارائه یک روش شبیه‌سازی به‌منظور مطالعه توازن آب و نمک و سناریوهای مدیریت آبیاری و زهکشی برای مزارع کشاورزی دیم تحت تأثیر نمک دیم در یک منطقه ساحلی از شرق چین انجام دادند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، روش‌های مدیریتی مناسب برای کنترل ورود به سیستم آب و شوری خاک توصیه می‌شود. راندمان شستشوی ۵۰ درصد در منطقه ریشه و زهکشی طبیعی ۰/۰۳ متر در سال، نتایج مدل را با داده‌های مشاهده‌شده مطابقت می‌دهد. عمق و فواصل مختلف زهکش تأثیر قابل‌توجهی بر شوری منطقه ریشه و عمق سطح آب دارد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوی آبیاری نیز نشان داد که آبیاری مستقیم با آب‌شور رودخانه توصیه نمی‌شود. این مطالعه نشان داد که SaltMod می‌تواند با موفقیت برای پیش‌بینی تأثیر تغییر روش‌های آبیاری و زهکشی بر شوری منطقه ریشه استفاده شود (Yao et al., 2014). سینگ مطالعه‌ای را به‌منظور ارزیابی تأثیر سیاست‌های مختلف مدیریتی بر پایداری طولانی‌مدت کشاورزی آبی انجام داد و پس از کالیبراسیون و اعتبارسنجی موفقیت‌آمیز، چندین سیاست مدیریتی جایگزین برای تأثیرات طولانی‌مدت آن‌ها بر سطح آب‌های زیرزمینی و شوری موردمطالعه قرار داد. سیاست‌های جایگزین نشان داد که سطح آب زیرزمینی در منطقه موردمطالعه در طولانی‌مدت

تحت شرایط موجود افزایش می‌یابد؛ بنابراین، استراتژی‌های مناسب مدیریت آب مانند تغییر در الگوی کشت با کاهش سطح برنج، کاهش استفاده از آب کانال، افزایش استفاده از آب زیر-زمینی و پوشش کانال پیشنهاد شد که سطح آب زیرزمینی را به یک عمق ایمن کاهش داده و از افزایش بیشتر سطح آب زیر-زمینی جلوگیری می‌کند (Singh, 2016). ازجمله مطالعات داخلی نیز می‌توان به کاظمی زریون و همکاران (۱۳۹۲) اشاره کرد که به شبیه‌سازی تغییرات زمانی و مکانی شوری خاک در زمین‌های پایاب سد حاجیلر چای استان آذربایجان شرقی با استفاده از تلفیق زمین‌آمار و مدل کامپیوتری Saltmod پرداختند. آنان میزان شوری خاک در دوره‌های زمانی ۵ و ۱۰ ساله را با مدل Saltmod پیش‌بینی نمودند. مقادیر شوری در ۹۸ نقطه از محدوده موردمطالعه تعیین شد. نتایج نشان داد که در منطقه ریشه، مقادیر شوری کمتر از ۶/۳ دسی زیمنس بر متر در دوره‌های ۵ و ۱۰ ساله روند افزایشی و مقادیر بیشتر از آن روند کاهشی دارند. محجوبی و صادقی لاری (۱۳۹۴) در تحقیقی به برآورد شوری خاک در محدوده ریشه نیشکر با مدیریت‌های مختلف آبیاری و زهکشی درکشت و صنعت امام خمینی با استفاده از مدل Saltmod پرداختند. در این پژوهش جهت پیش‌بینی آثار بلندمدت (۱۰ ساله) مدیریت‌های مختلف آبیاری و زهکشی بر شوری خاک، عمق زهاب، عمق سطح ایستابی، کفایت و راندمان آبیاری درکشت و صنعت امام خمینی از مدل Saltmod استفاده نمودند. چندین حالت مختلف ازجمله کاربرد عامل کنترل زهکشی، کاهش عمق آب آبیاری، شوری آب آبیاری و کاهش عمق نصب زهکش زیرزمینی فرض و توسط مدل اجرا شد. نتایج مدل با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده در مزرعه واسنجی شد. بر اساس پیش‌بینی مدل، استفاده از عامل کنترل زهکشی بیشتر از ۰/۲۵، بدون کاهش در مصرف آب آبیاری سبب بالا آمدن سطح ایستابی به محدوده ریشه گیاه نیشکر خواهد شد. تخمین مدل Saltmod نشان می‌دهد که در زهکش‌های زیرزمینی بافاصله ۷۰ متر، افزایش عمق نصب بیش از ۱/۵ متر فایده‌ای ندارد و تغییری در کاهش شوری خاک به وجود نخواهد آورد. با توجه به‌مرور منابع، مشاهده می‌شود که مدل Saltmod به‌صورت گسترده‌ای برای مدیریت طولانی‌مدت منابع آب در مناطق مختلف استفاده‌شده است تا تعاملات پیچیده بین تغییرات هیدرولیکی و روش‌های مدیریت آب را نشان دهد. دشت مغان در ساحل جنوبی رود ارس و غرب دریای خزر واقع است که به دلیل وجود لایه غیرقابل نفوذ در عمق نسبتاً کم و منابع آب دائمی و کافی، شرایط برای اجرای روش زهکشی کنترل‌شده فراهم است. از سوی دیگر، یکی از مشکلات اصلی در مناطقی که دارای شبکه‌های آبیاری و زهکشی می‌باشند، زهاب خروجی از مزارع است. بررسی پژوهش‌های مختلف نشان می‌دهد که مدل SaltMod توانایی شبیه‌سازی برخی خصوصیات گیاه و خاک را در شرایط مختلف مدیریتی دارد. در این پژوهش ابتدا مدل Saltmod واسنجی و صحت‌سنجی شد. سپس از این مدل برای بررسی تأثیر مدیریت‌های مختلف آبیاری و زهکشی بر سطح ایستابی، حجم و شوری زهاب خروجی استفاده گردید. واسنجی و صحت‌سنجی مدل با بررسی عملکرد مدل SaltMod در شبیه‌سازی سطح ایستابی، حجم و شوری زهاب خروجی برای سه محصول مهم دشت مغان (گندم، جو و ذرت) و برای سه تیمار زهکشی آزاد (FD)، زهکشی کنترل‌شده با عمق کنترل ثابت ۷۰ سانتیمتر (CD70) و زهکشی کنترل‌شده با عمق کنترل متغیر (CDch) انجام شد.

مواد و روش‌ها

محدوده موردمطالعه

دشت مغان شامل سه شهرستان پارس‌آباد، گرمی و بیله‌سوار است. طبق اظهارنظر کارشناسان کشاورزی، محصول‌دهی خاک این شهرها از دیگر مناطق بیشتر است. خاک هر سه شهر مغان بسیار ارزشمند است. قسمت شمالی جلگه وسیع و حاصلخیز مغان، شهرستان پارس‌آباد است. در بین شهرهای منطقه مغان، پارس‌آباد به‌دلیل رونق کشاورزی از دو شهر دیگر بهتر شناخته شده است و کشت و صنعت‌های شهرستان پارس‌آباد مغان زبانزد و مشهور است. آب‌وهوای مناسب این شهرستان نیز در استان نمونه است. در حال حاضر دشت مغان به یکی از قطب‌های

پیشرفته در زمینه کشاورزی، دامپروری، باغداری و صنایع در کشور ایران تبدیل‌شده است. محصولات رایج در منطقه مغان عبارت‌اند از گندم، پنبه، چغندرقند، یونجه، ذرت و صیفی و در مراتب بعدی سویا، جو، کنجد و بادام‌زمینی (عبدالله زاده، ۱۳۹۶). شکل ۱ موقعیت دشت مغان در استان اردبیل را نشان داده است. ایستگاه پارس‌آباد در دشت مغان در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۶ دقیقه و ۴۴ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۹ درجه و ۳۶ دقیقه و ۱۴ ثانیه شمالی و در ارتفاع ۷۲ متری از سطح دریا قرار دارد. برای هرکدام از محصولات موردمطالعه این پژوهش، مزرعه‌ای به وسعت ۴۰ هکتار واقع در کشت و صنعت مغان در شمال استان اردبیل و در ۳۰ کیلومتری شهرستان پارس‌آباد انتخاب شد.

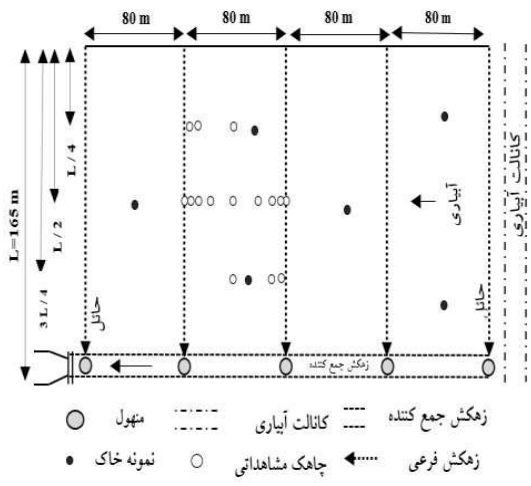
شکل ۱ - موقعیت دشت مغان در استان اردبیل

شبکه آبیاری و زهکشی

آب مزرعه موردنظر از طریق شبکه آبیاری و زهکشی دشت مغان تأمین می‌شود. شبکه مغان از چهار منطقه آبیاری تشکیل شده است. برای انتقال آب بین قطعات، از کانال‌های آبیاری استفاده می‌شود و عملیات آبیاری با استفاده از آبگیر ساخته‌شده در ابتدای قطعات انجام می‌گیرد (شکل ۲). مزرعه انتخاب‌شده مجهز به سیستم زهکشی زیرزمینی بوده و سیستم زهکشی هر قطعه به‌صورت مجزا است.

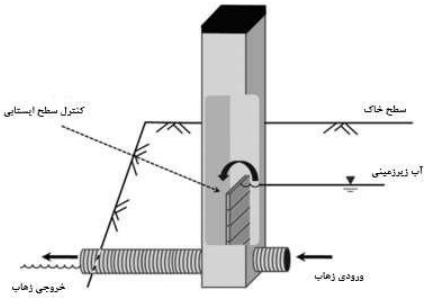
لوله‌های زهکش زیرزمینی از جنس PVC (لوله‌های خرطومی) با قطر ۲۰۰ میلی‌متر، همراه با پوشش معدنی (شن و ماسه) در اطراف می‌باشند. این لوله‌ها در عمق ۱/۸ تا ۲ متری از سطح زمین، با شیب ۰/۲ درصد، بافاصله نزدیک به ۸۰ متر و طول ۱۶۵ متر (در هر قطعه) نصب‌شده و در انتهای هر زهکش، منهول سیمانی کار گذاشته شده است. این زهکش‌ها به زهکش جمع کننده که از نوع لوله‌ای سیمانی است متصل می‌شوند. درنهایت زهکش‌های جمع کننده هر دو قطعه به کانال زهکشی اصلی تخلیه می‌گردد (شکل ۳).

شکل ۲- آبگیر و کانال‌های آبیاری مورداستفاده در آبیاری زمین‌های کشت و صنعت مغان



شکل ۳- آرایش سیستم آبیاری و زهکشی

نوع سازه به کار برده شده برای کنترل سطح ایستابی در مزرعه در شکل ۴ نشان داده شده است. پس از ارزیابی روش‌های موجود، این سازه در کنترل سطح ایستابی و یکنواختی تراز آب زیرزمینی بهترین کارایی را در مزرعه نشان داد.



شکل ٤- شماتیک سازه مورداستفاده برای کنترل سطح ایستابی

چاهک‌های مشاهداتی

برای بررسی نوسانات سطح ایستابی، تعداد ۴۵ چاهک مشاهداتی در هر محصول (۱۵ چاهک برای هر تیمار) و درمجموع تعداد ۱۳۵ چاهک برای هر سه محصول حفر شد. تغییرات سطح ایستابی در سه گروه از چاهک‌های مشاهداتی حفرشده در طول زهکش‌ها شامل یک‌چهارم ابتدا، وسط و یک‌چهارم انتهای طول زهکش فرعی در دو زهکش جانبی از سه زهکش موردبررسی در هر تیمار آزمایشی تا عمق ۱/۸ متر موردبررسی قرار گرفت.

جمع‌آوری داده‌ها

در پژوهش حاضر برای سه محصول گندم، جو و ذرت سه نوع روش زهکشی در نظر گرفته‌شده است. تیمار اول زهکشی، زهکشی آزاد (FD) است. در این تیمار هیچ‌گونه عملیات کنترلی بر زهاب خروجی از زهکش‌ها صورت نگرفته است. تیمار دوم، زهکشی کنترل‌شده با عمق کنترل ثابت ۷۰ سانتیمتر (CD70) است. سطح ایستابی با استفاده از سازه کنترل در عمق ۷۰ سانتیمتری زیر سطح خاک تثبیت‌شده و تا انتهای فصل کشت در این عمق ثابت ماند. تیمار سوم، زهکشی کنترل‌شده با عمق کنترل متغیر (CDch) است.

در این تیمار سطح ایستابی در طول فصل کشت متغیر بود. در ابتدا سطح ایستابی در عمق ۴۰ سانتیمتری زیر سطح خاک تثبیت شد. در مرحله دوم، سطح ایستابی به ۷۰ سانتیمتر افزایش یافت. در مرحله سوم، سطح ایستابی در عمق ۹۰ سانتیمتری از سطح خاک تثبیت و تا انتهای طول دوره رشد گیاه در این عمق باقی ماند. جمع‌آوری داده‌ها از زمان شروع فصل کشت گندم و جو در آبان ماه سال ۱۳۹۴ آغاز شد و پس از پایان فصل کشت ذرت در مهرماه ۱۳۹۵ به اتمام رسید. در طول دوره مطالعه، میزان آب آبیاری بر اساس عرف آبیاری منطقه برای هر سه تیمار تقریباً شبیه به یکدیگر اعمال گردیده است. همچنین مدیریت کشاورزی و کاربرد کود برای هر سه تیمار یکسان اعمال شد. داده‌های موردنیاز محصولات گندم، جو و ذرت در دوره کشت متوالی این محصولات اندازه‌گیری شد. عمق سطح ایستابی با استفاده از چاهک‌های مشاهداتی و به‌وسیله عمق سنج الکتریکی اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری زهاب خروجی به‌صورت دستی و با استفاده از ظرف مدرج به همراه زمان‌سنج انجام گرفت. اندازه-گیری زهاب خروجی در تمام طول فصل کشت و به‌صورت روزانه اجرا شد. نمونه‌برداری از زهاب برای اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آن، در محصول گندم و جو هر دو هفته یک‌بار و برای ذرت هر هفته از هر سه زهکش و در هر سه تیمار در طول دوره کشت محصول انجام شد. سپس نمونه‌ها برای تحلیل کیفی به آزمایشگاه انتقال داده شدند. شوری زهاب با استفاده از دستگاه EC متر اندازه‌گیری شد.

برای تجزیه‌وتحلیل آماری داده‌ها و بررسی سطوح معنی‌داری آن‌ها، از نرم‌افزار SPSS استفاده شد. برای آنالیز آماری پارامترها از روش تی–استیودنت استفاده و میانگین پارامترهای اندازه‌گیری شده، به روش دو به دو مورد مقایسه قرار گرفت.

مدل SaltMod

مدل SaltMod برنامه‌ای کامپیوتری برای شبیه‌سازی عمق سطح ایستابی، حجم و شوری زهاب خروجی، شوری پروفیل خاک و ... است که از قابلیت بررسی حالت‌های مختلف مدیریت آبیاری و زهکشی در زمین‌های کشاورزی نیز برخوردار است

(محجوبی و صادقی لاری، ۱۳۹۴). این مدل، بخشی از اطلاعات ورودی را به‌صورت کیفی و بخشی دیگر را به‌صورت عددی از کاربر دریافت می‌نماید. مقادیر مورداستفاده در پژوهش حاضر که به‌عنوان داده‌های ورودی مدل استفاده شدند، در جدول ۱ ارائه‌شده است.

پس از وارد نمودن اطلاعات موردنیاز مدل متناسب با شرایط پژوهش میدانی و خصوصیات محصولات مورد کشت در منطقه مغان، شبیه‌سازی با مدل SaltMod انجام شد.

واسنجی مدل

برای انجام واسنجی مدل SaltMod تیمار زهکشی آزاد (FD) به‌عنوان تیمار واسنجی انتخاب شد. پارامترهای شوری آب آبیاری، عمق زهکشی، عمق لایه محدودکننده و عمق توسعه ریشه گیاه پارامترهای مرحله واسنجی برای تنظیم مدل می‌باشند. به عبارت بهتر برای واسنجی مدل با تغییر در مقادیر شوری آب آبیاری، عمق زهکشی، عمق لایه محدودکننده و عمق توسعه ریشه گیاه شبیه‌سازی‌های مختلفی انجام شد. با توجه به گزارش-های موجود محدوده‌ای برای پارامترهای مرحله واسنجی انتخاب شد. می‌توان گفت مدل SaltMod در محدوده قابل‌قبول و منطقی برای رسیدن به بهترین مطابقت بین داده‌های برآورد شده و مشاهده‌شده کالیبره شد.

صحت‌سنجی مدل

پس از واسنجی مدل و ثابت قرار دادن پارامترهای کالیبراسیون از تیمارهای زهکشی کنترل‌شده با عمق کنترل ثابت (CD70) و زهکشی کنترل‌شده با عمق کنترل متغیر (CDch) برای صحت‌سنجی مدل SaltMod استفاده شد.

برای ارزیابی صحت مدل، مقادیر خروجی پیش‌بینی‌شده بر اساس مدل در حالت‌های زهکشی کنترل‌شده ملاک قرار گرفت. در مدل SaltMod ضریبی (Frd) برای مدیریت و کاهش زهاب خروجی لحاظ شده که بین صفر تا یک متغیر است و در صورت کاربرد سامانه‌های زهکشی کنترل‌شده می‌توان سایر مؤلفه‌های خروجی (عمق سطح ایستابی، شوری زهاب و ...) را به ازای مقادیر مختلف این ضریب پیش‌بینی کرد (محجوبی و صادقی لاری، ۱۳۹۴). نحوه محاسبه ضریب کنترل زهکشی در رابطه ۱ ارائه شده است.

$$Frd=\frac{\text{میزان زهاب خروجی (مشاهداتی) حالت زهکشی کنترل‌شده} - \text{میزان زهاب خروجی (مشاهداتی) حالت زهکشی آزاد}}{\text{میزان زهاب خروجی (مشاهداتی) حالت زهکشی آزاد}} \quad (۱)$$

در این حالت همان داده‌های ورودی تیمار کالیبراسیون به مدل داده می‌شود و ضریب کنترل زهکشی (Frd)، عمق آب آبیاری و سطح ایستابی اولیه هر تیمار به این داده‌ها اضافه می-شود. مقادیر این داده‌های ورودی در پژوهش حاضر در جدول ۲ و ۳ ارائه شده است. در واقع با واردکردن مقدار Frd می‌توان مشخص نمود مدل چند درصد میزان زهاب خروجی را کنترل نماید و مدل به‌صورت خودکار شوری زهاب و سطح ایستابی را نیز کنترل می‌نماید.

تجزیه‌وتحلیل آماری

به‌منظور ارزیابی نتایج مدل از شاخص‌های آماری درصد خطای نسبی (RE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد.

$$RE = 100 \times \frac{(\mathrm{Pi} - \mathrm{Qi})}{\mathrm{Qi}} \quad (۲)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum(\mathrm{Pi} - \mathrm{Qi})^2}{\mathrm{n}}\right]^{1/2} \quad (۳)$$

در این روابط Qi: مقادیر اندازه‌گیری شده (مشاهده‌شده)، Pi: مقادیر پیش‌بینی‌شده و n تعداد نمونه‌های بکار رفته است. RMSE میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی‌شده از مقادیر اندازه-گیری شده را نشان می‌دهد که نمایش‌دهنده عدم اطمینان مطلق مدل است. هرچه RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، کارایی مدل در شبیه‌سازی بهتر است (علیزاده و همکاران، ۱۳۸۹).

جدول ۱- داده‌های ورودی مدل SaltMod در تیمار واسنجی (FD)

پارامتر ورودی	واحد	مقادیر مورداستفاده
۱- تعداد فصل مشاهده‌شده		
تعداد فصل	گندم (۱۱ آبان ۱۳۹۴ تا ۱۱ خرداد ۱۳۹۵)	۷
	جو (۱۱ آذر ۱۳۹۴ تا ۱۱ خرداد ۱۳۹۵)	۶
	ذرت (۱۱ تیر ۱۳۹۵ تا ۱۱ مهر ۱۳۹۵)	۳
۲- مشخصات خاک		
راندمان ذخیره آب آبیاری یا بارندگی در منطقه ریشه (محاسبه‌شده)	–	۰/۷۳
تخلخل کل منطقه ریشه (محاسبه‌شده)	متر بر متر	۰/۳۸
راندمان آبشویی منطقه ریشه (محاسبه‌شده)	–	۰/۶۹
تخلخل کل منطقه انتقال (محاسبه‌شده)	متر بر متر	۰/۳۸
راندمان آبشویی منطقه انتقال (محاسبه‌شده)	–	۰/۳۸
تخلخل کل آبخوان (محاسبه‌شده)	متر بر متر	۰/۳۶
راندمان آبشویی منطقه آبخوان (محاسبه‌شده)	–	۰/۳
تخلخل قابل زهکشی منطقه ریشه (محاسبه‌شده)	متر بر متر	۰/۱
تخلخل قابل زهکشی منطقه انتقال (محاسبه‌شده)	متر بر متر	۰/۱
تخلخل قابل زهکشی آبخوان (محاسبه‌شده)	متر بر متر	۰/۱
۳-اجزای بیلان آب		
میزان آبیاری در فصل اول کشت (مشاهده‌شده) (متر)	گندم	۰/۷۳۶
	جو	۰/۶۶
	ذرت	۱/۲
میزان بارندگی در فصل اول کشت (مشاهده‌شده) (متر)	گندم	۰/۲
	جو	۰/۱۸
	ذرت	۰/۰۹۴
تبخیر و تعرق پتانسیل در فصل اول کشت (مشاهده‌شده) (متر)	گندم	۰/۵۴
	جو	۰/۴۹
	ذرت	۰/۵۳
٤- معیارهای طراحی زهکشی زیرزمینی		
عمق ریشه (واسنجی مدل) (متر)	گندم	۱
	جو	۱
	ذرت	۱/۵
عمق نصب زهکش‌های زیرزمینی (واسنجی مدل)	متر	۱/۸۵
ضخامت منطقه انتقالی بین منطقه ریشه و آبخوان (مشاهده‌شده)	متر	۰/۸۶
ضخامت آبخوان	متر	۳
نسبت تخلیه زهکش‌ها به ارتفاع سطح ایستابی بالای زهکش‌ها (محاسبه‌شده) (متر بر روز)	گندم	۰/۰۰۱۸
	جو	۰/۰۰۱۶
	ذرت	۰/۰۰۲۳
نسبت تخلیه زهکش‌ها به مجذور ارتفاع سطح ایستابی بالای زهکش‌ها (محاسبه-شده)	گندم	۰/۰۰۱۶
	جو	۰/۰۰۱۳
	ذرت	۰/۰۰۲۷
۵- شرایط مرزی		
عمق سطح ایستابی اولیه (مشاهده‌شده) (متر)	گندم	۱/۱۱
	جو	۱/۲۲
	ذرت	۰/۸۶
شوری اولیه خاک مرطوب منطقه ریشه در حالت اشباع مزرعه (مشاهده‌شده)	دسی‌زیمنس بر متر	۱/۸
میانگین شوری آب آبیاری (واسنجی مدل)	دسی‌زیمنس بر متر	۱/۵

جدول ۲ -داده‌های ورودی مدل SaltMod در تیمار صحت‌سنجی CD70

پارامتر ورودی مدل	محصول	مقدار	واحد
عمق اولیه سطح ایستابی (مشاهده‌شده)	گندم جو ذرت	۰/۷۱ ۰/۶۷ ۰/۶	متر
ضریب کنترل زهکشی (محاسبه‌شده)	گندم جو ذرت	۰/۶ ۰/۵۹ ۰/۵۷	متر
عمق آب آبیاری (مشاهده‌شده)	گندم جو ذرت	۰/۷۳۱ ۰/۶۶۳ ۱/۰۱	متر

جدول ۳ - داده‌های ورودی مدل SaltMod در تیمار صحت‌سنجی CDch

پارامتر ورودی مدل	محصول	مقدار	واحد
عمق اولیه سطح ایستابی (مشاهده‌شده)	گندم جو ذرت	۰/۶۶ ۰/۶۸ ۰/۶	متر
ضریب کنترل زهکشی (محاسبه‌شده)	گندم جو ذرت	۰/۵ ۰/۴۷ ۰/۴۶	متر
عمق آب آبیاری (مشاهده‌شده)	گندم جو ذرت	۰/۷۳۴ ۰/۶۵۸ ۰/۹۸	متر

نتایج و بحث

سطح ایستابی

نتایج حاصل از مدل SaltMod برای شبیه‌سازی سطح ایستابی برای هر کدام از محصولات گندم، جو و ذرت در جدول ۴ ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار شاخص RMSE در مرحله واسنجی سطح ایستابی برای هر کدام از محصولات گندم، جو و ذرت برابر با ۰/۱۶، ۰/۰۳ و ۰/۱۳ به دست آمد و نشان می‌دهد که مدل SaltMod از کارایی نسبتاً خوبی در شبیه‌سازی سطح ایستابی برخوردار است. در مرحله صحت‌سنجی سطح ایستابی در تیمار CD70 مقدار شاخص RMSE به ترتیب برابر ۰/۰۷، ۰/۰۴ و ۰/۰۶ برای گندم، جو و ذرت و در تیمار CDch نیز مقدار شاخص RMSE به ترتیب برابر ۰/۱۷، ۰/۱۴ و ۰/۰۳ برای گندم، جو و ذرت به دست آمد. آماره RE در مرحله واسنجی سطح ایستابی برای هر کدام از محصولات گندم، جو و ذرت برابر ۱۶٪، ۳٪ و ۱۵٪ به دست آمد. در مرحله صحت‌سنجی سطح ایستابی در تیمار CD70 مقدار شاخص RE به ترتیب برابر ۱۱٪، ۷٪ و ۱۱٪ برای گندم، جو و ذرت و در تیمار CDch نیز مقدار شاخص RE به ترتیب برابر ۲۵٪، ۲۴٪ و ۷٪ برای گندم، جو و ذرت به دست آمد. دامنه تغییرات شاخص RE عملکرد قابل‌قبول مدل SaltMod در شبیه‌سازی پارامتر سطح ایستابی را نشان می‌دهد.

مقادیر تخمینی و مشاهداتی سطح ایستابی برای هر سه محصول در قالب نمودار در شکل ۵ قابل‌مشاهده است. نتایج شبیه‌سازی سطح ایستابی در تیمارهای FD، CD70 و CDch برای هرکدام از محصولات گندم و جو نشان داد که مدل میزان سطح ایستابی را برای همه تیمارها بیشتر از مقدار مشاهده‌ای

پیش‌بینی نموده است؛ اما در گیاه ذرت برای تیمارهای مختلف، نتیجه متفاوت با گندم و جو بود. در گیاه ذرت سطح ایستابی شبیه‌سازی‌شده در هرکدام از تیمارهای FD، CD70 کمتر از مقدار مشاهده‌ای بود اما در تیمار CDch مقدار سطح ایستابی شبیه‌سازی‌شده بیشتر از مقدار مشاهده‌ای بود. درمجموع می‌توان نتیجه گرفت مدل در شبیه‌سازی میزان سطح ایستابی برای محصول گندم و جو بیش‌برآورد و برای محصول ذرت کم‌برآورد داشت. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در تیمار CD70 کمتر از تیمار CDch بود و نتایج آماری شامل درصد خطای کم و همچنین شاخص RMSE کم گویای این حقیقت است (جدول ۴). مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که دقت مدل در برآورد سطح ایستابی در تیمارهای مختلف متفاوت بود. سینگ و همکاران نیز با استفاده از مدل Saltmod سطح ایستابی را در خاک‌های رسی ساحلی برای داده‌هایی از منطقه ساحلی آندرا پرادش در هند پیش‌بینی نمودند (Singh et al., 2002).

جدول ٤ - نتایج تحلیل آماری در شبیه‌سازی میزان سطح ایستابی توسط مدل SaltMod

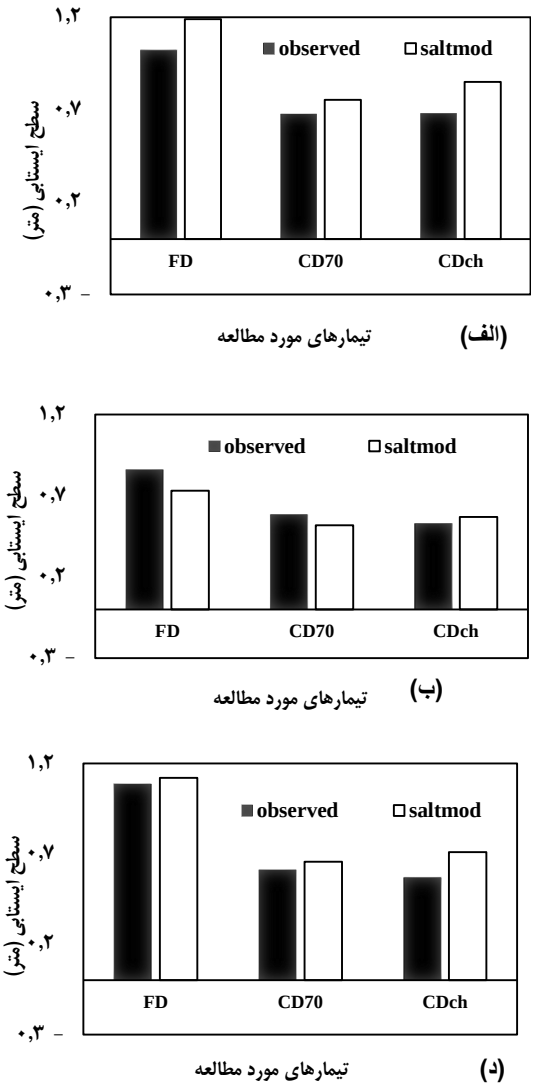
تیمار	گندم		جو		ذرت
	RE	RMSE	RE	RMSE	RMSE
FD (واسنجی)	٪۱۶	۰/۱۶	٪۳	۰/۰۳	۰/۱۳
CD70 (صحت سنجی)	٪۱۱	۰/۰۷	٪۷	۰/۰۴	۰/۰۶
CDch (صحت سنجی)	٪۲۵	۰/۱۷	٪۲۴	۰/۱۴	۰/۰۳

حجم زهاب خروجی

نتایج حاصل از مدل SaltMod برای شبیه‌سازی حجم زهاب خروجی برای هرکدام از محصولات گندم، جو و ذرت در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار شاخص RMSE در مرحله واسنجی حجم زهاب خروجی برای هرکدام از محصولات گندم، جو و ذرت برابر با ۰/۰۵، ۰/۱۲و ۰/۰۷ به دست آمد و نشان می‌دهد که مدل SaltMod از کارایی نسبتاً خوبی در شبیه‌سازی حجم زهاب خروجی برخوردار است. در مرحله صحت‌سنجی حجم زهاب خروجی در تیمار CD70 مقدار شاخص RMSE به ترتیب برابر ۰/۰۶، ۰/۰۵ و ۰/۰۵ برای گندم، جو و ذرت و در تیمار CDch مقدار شاخص RMSE به ترتیب برابر ۰/۰۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۷ برای گندم، جو و ذرت به دست آمد. آماره RE در مرحله واسنجی حجم زهاب خروجی برای هرکدام از محصولات گندم، جو و ذرت برابر ۱۱٪، ۲۶٪ و ۵٪ به دست آمد. در مرحله صحت‌سنجی حجم زهاب خروجی در تیمار CD70 مقدار شاخص RE به ترتیب برابر ۲۳٪، ۲۲٪ و ۲۱٪ برای گندم، جو و ذرت و در تیمار CDch مقدار شاخص RE به ترتیب برابر ۱۶٪، ۱۹٪ و ۲۵٪ برای گندم، جو و ذرت به دست آمد. نتایج، بیانگر عملکرد قابل‌قبول مدل SaltMod در شبیه-سازی حجم زهاب خروجی بود.

در شکل ۶ مقادیر تخمینی و مشاهداتی حجم زهاب خروجی برای سه محصول گندم، جو و ذرت ارائه‌شده است. مدل میزان حجم زهاب خروجی را برای محصولات گندم و جو در تیمار FD کمتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد نمود اما برای تیمارهای CD70 و CDch بیشتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد نمود. در گیاه ذرت برای هر سه تیمار FD، CD70 و CDch نتیجه متفاوت با گندم و جو بود و مدل میزان حجم زهاب خروجی شبیه‌سازی‌شده در هر سه تیمار را بیشتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد نمود. درمجموع می‌توان نتیجه گرفت که اختلاف بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در هر سه تیمار مورد پژوهش کم بود و شاخص-های آماری شامل درصد خطا و شاخص RMSE اندک نیز گویای این حقیقت بودند (جدول ۵).

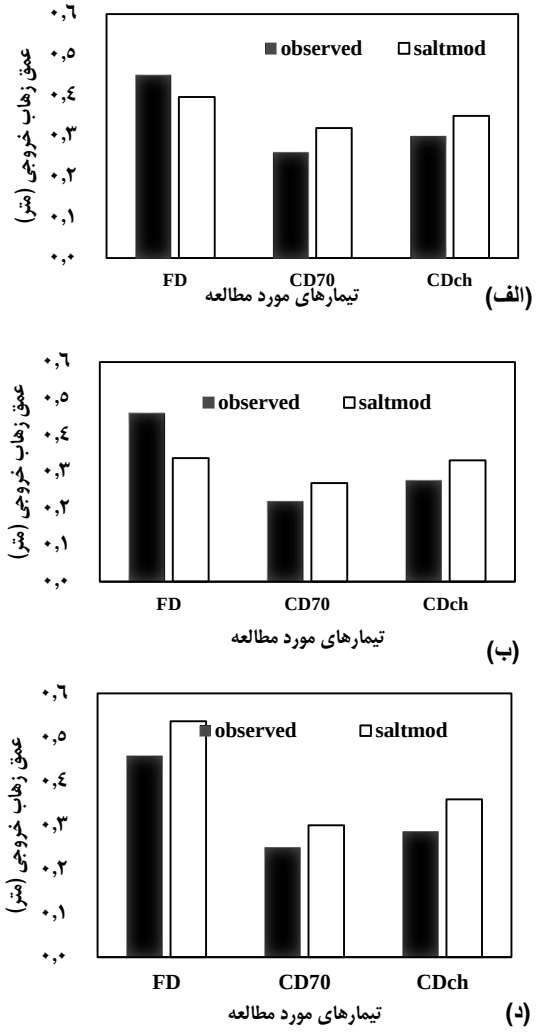
محجوبی و صادقی لاری (۱۳۹۴) نیز در کشت و صنعت نیشکر امام خمینی به پیش‌بینی میزان زهاب با استفاده از مدل Saltmod پرداختند و دریافتند که مدل Saltmod ابزاری مفید برای پیش‌بینی میزان زهاب خروجی است و نتایج این پژوهش نیز نشان داد که آب مصرفی در کشت و صنعت نیشکر امام خمینی بیش‌ازحد نیاز گیاه است و سبب بیش زهکشی و افزایش میزان زهاب خروجی از مزارع می‌شود.



شکل ۵- سطح ایستابی در تیمارهای زهکشی آزاد و کنترل-شده الف) گندم، ب) جو، ج) ذرت

جدول ۵- نتایج تحلیل آماری در شبیه‌سازی میزان زهاب توسط مدل SaltMod

تیمار	گندم		جو		ذرت	
	RE	RMSE	RE	RMSE	RE	RMSE
FD (واسنجی)	٪۱۱	۰/۰۵	٪۲۶	۰/۱۲	٪۵	۰/۰۷
CD70 (صحت سنجی)	٪۲۳	۰/۰۶	٪۲۲	۰/۰۵	٪۲۱	۰/۰۵
CDch (صحت سنجی)	٪۱۶	۰/۰۵	٪۱۹	۰/۰۵	٪۲۵	۰/۰۷



شکل ٦- میزان زهاب در تیمارهای زهکشی آزاد و کنترل-شده الف) گندم ب) جو ج) ذرت

در شکل ۷ مقادیر تخمینی و مشاهداتی شوری زهاب خروجی برای سه محصول گندم، جو و ذرت ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل میزان شوری زهاب خروجی را در تیمار FD برای محصول جو و ذرت بیشتر از مقدار مشاهده‌ای برآورد نموده است، اما این میزان خطا نسبت به مقدار مشاهده‌ای در محصول جو بیشتر بود. ولی در محصول گندم، مدل میزان شوری زهاب خروجی در تیمار FD را نسبت به مقدار مشاهده‌ای کمتر برآورد نمود. میزان شوری زهاب در تیمارهای CD70 و CDch برای محصول گندم و جو نسبت به مقدار مشاهده‌ای کمتر برآورد شد اما مدل در شبیه‌سازی میزان شوری زهاب برای محصول ذرت در تیمار CD70 نسبت به مقدار مشاهده‌ای کم برآورد و در تیمار CDch بیش‌برآورد داشت. بر طبق نتایج حاصل از تحقیقات سرینیواسولو و همکاران نیز با استفاده از مدل Saltmod در زمینه ارزیابی زهکش‌های زیرزمینی اجراشده در مزرعه آزمایشی زمین‌های کونانکی هندوستان نشان داده شد که مدل Saltmod، نرم‌افزاری مفید برای پیش‌بینی شوری زهاب و به‌صورت کلی‌تر کیفیت آب زهکشی در زمین‌های کشاورزی هست (Srinivasulu, 2004).

شوری زهاب

نتایج حاصل از مدل SaltMod برای شبیه‌سازی شوری زهاب خروجی برای هرکدام از محصولات گندم، جو و ذرت در جدول ۶ ارائه‌شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مقدار شاخص RMSE در مرحله واسنجی شوری زهاب خروجی برای هرکدام از محصولات گندم، جو و ذرت برابر با ۰/۱۲، ۰/۵۷ و ۰/۵۴ به دست آمد. در مرحله صحت‌سنجی شوری زهاب در تیمار CD70 مقدار شاخص RMSE به ترتیب برابر ۰/۴۹، ۰/۵۴ و ۰/۵۵ برای گندم، جو و ذرت و در تیمار CDch نیز مقدار شاخص RMSE به ترتیب برابر ۰/۶۴، ۰/۲۶ و ۰/۳۰ برای گندم، جو و ذرت به دست آمد. آماره RE که در مرحله واسنجی شوری زهاب برای هرکدام از محصولات گندم، جو و ذرت برابر با ۳٪، ۱۵٪ و ۱۱٪ به دست آمد نشان‌دهنده این است که مدل SaltMod از کارایی نسبتاً خوبی در شبیه‌سازی شوری زهاب برخوردار است. در مرحله صحت‌سنجی شوری زهاب در تیمار CD70 مقدار شاخص RE به ترتیب برابر ۲۰٪، ۱۸٪ و ۱۵٪ برای گندم، جو و ذرت و در تیمار CDch نیز مقدار شاخص RE به ترتیب برابر ۲۴٪، ۸٪ و ۷٪ برای گندم، جو و ذرت به دست آمد. نتایج حاصل از دامنه تغییرات شاخص RE حاکی از عملکرد قابل‌قبول مدل SaltMod در شبیه‌سازی شوری زهاب خروجی بود.

جدول ٦ - نتایج تحلیل آماری در شبیه‌سازی میزان شوری زهاب توسط مدل SaltMod

تیمار	گندم		جو		ذرت	
	RE	RMSE	RE	RMSE	RE	RMSE
FD (واسنجی)	٪۳	۰/۱۲	٪۱۵	۰/۵۷	٪۱۱	۰/۵۴
CD70 (صحت سنجی)	٪۲۰	۰/۴۹	٪۱۸	۰/۵۴	٪۱۵	۰/۵۵
CDch (صحت سنجی)	٪۲۴	۰/۶۴	٪۸	۰/۲۶	٪۷	۰/۳۰

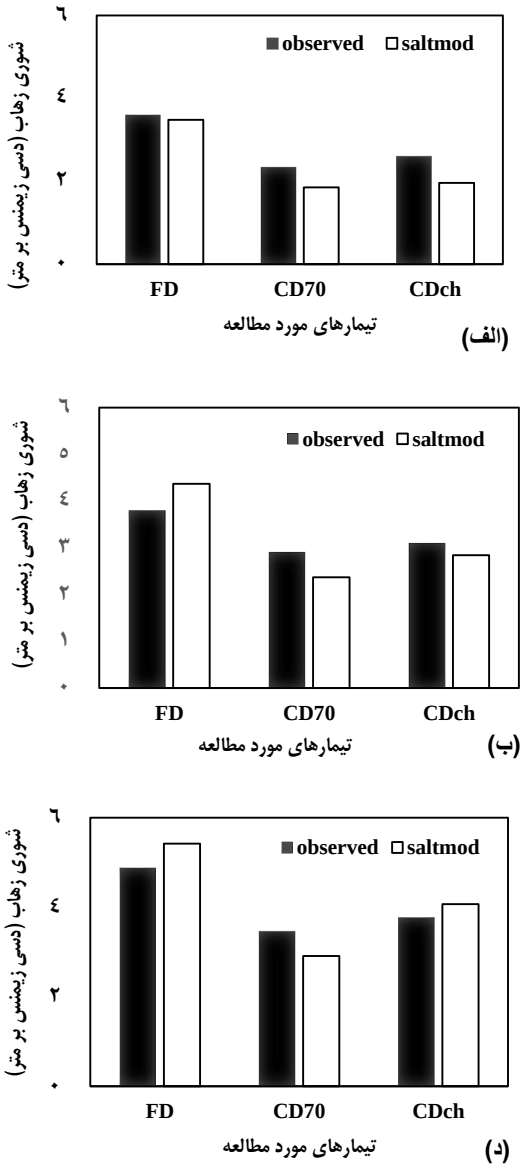
هدف از شبیه‌سازی با مدل SaltMod رسیدن به مقادیر خروجی قابل قبولی از پارامترهای سطح ایستابی، حجم و شوری زهاب بود. با مشاهده شاخص درصد خطای نسبی (RE) در هر شبیه‌سازی مدل می‌توان دریافت که این مدل برآورد هر سه پارامتر خروجی را به‌خوبی انجام داده است. نتایج حاصل از مدل SaltMod تفاوت جزئی و قابل‌چشم‌پوشی با مقادیر مشاهده‌شده داشت. علت وجود اندکی خطا می‌تواند تعدادی از پارامترهای ورودی باشد که کاملاً با شرایط واقعی تطابق ندارند. شاخص ریشه دوم میانگین مجذور خطاها (RMSE) که میانگین انحراف مقادیر شبیه‌سازی‌شده از مقادیر اندازه‌گیری شده را نمایش می‌دهد، در تمام شبیه‌سازی‌ها، عددی کوچک و تقریباً نزدیک به صفر است. کوچک بودن مقدار عددی پارامتر RMSE نشان‌دهنده این است که عملکرد مدل در شبیه‌سازی خوب بوده است. درمجموع پس از تجزیه‌وتحلیل آماری و محاسبه RE و RMSE می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که مدل شرایط کشت و زهکشی را بسیار خوب پیش‌بینی می‌نماید و این مدل از توانمندی قابل قبولی در برآورد نتایج خروجی برخوردار است. عملکرد مدل SaltMod و دقت در شبیه‌سازی مدل نسبت به شرایط واقعی مناسب بود. این نتایج، مشابه با نتایج گزارش‌شده توسط دیگر

محققین بود (Sarangi et al., 2006; Yao et al., 2014; Mao et al., 2017). این مدل برای هر فصل کشت یک مقدار ارائه می‌دهد و نتایج خروجی را برای هر روز از دوره کشت نمایش نمی‌دهد؛ بنابراین نمی‌توان نوسانات سطح ایستابی و دیگر پارامترهای خروجی را به‌صورت روزانه در خروجی‌های این مدل مشاهده نمود، زیرا فقط یک عدد به‌عنوان میانگین کلی طول دوره کشت ارائه می‌دهد.

اثر عامل کنترل زهکشی بر سطح ایستابی، مقدار و شوری زهاب

مدل برای مقادیر متفاوت ضریب کنترل زهکشی صفر، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ اجرا شد. خروجی‌های شبیه‌سازی‌شده مدل در جدول ۷ نشان داده شده است. چنانچه مقدار ضریب کنترل زهکشی از صفر (زهکشی آزاد) به ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ (زهکشی کنترل‌شده) افزایش پیدا کند، میانگین عمق سطح ایستابی از ۱/۱۹ متر به ۱/۰۶، ۰/۸۴ و ۰/۳۹ متر کاهش می‌یابد؛ یعنی مدل پیش‌بینی می‌نماید که با استفاده از عامل کنترل زهکشی بیشتر از ۰/۲۵، میانگین عمق سطح ایستابی به محدوده ریشه نزدیک شده و افزایش این ضریب تا ۰/۵، موجب بالا آمدن عمق سطح ایستابی به محدوده ریشه خواهد شد. محجوبی و صادقی لاری (۱۳۹۴) نیز اثر ضریب کنترل زهکشی را بر عمق سطح ایستابی با استفاده از مدل Saltmod بررسی نمودند. نتایج پژوهش محجوبی و صادقی لاری نشان داد که استفاده از ضریب کنترل زهکشی بیشتر از ۰/۲۵ سبب بالا آمدن سطح ایستابی به محدوده ریشه نیشکر در کشت و صنعت امام خمینی خواهد شد. در جدول ۷ مشاهده می‌شود که عمق زهاب خروجی از مزرعه در پیش-بینی‌های مدل، روند کاهشی دارد. بر طبق تحقیقات اسکگز و همکاران با اجرای زهکشی کنترل‌شده، حجم زهاب خروجی از ۱۷ تا ۸۰ درصد کاهش می‌یابد و میزان کاهش حجم زهاب به عواملی مانند نوع خاک، شرایط آب و هوایی، طراحی سیستم زهکشی و شیوه مدیریت سطح ایستابی بستگی دارد (Skaggs et al., 2012). کاهش زهاب خروجی با اجرای زهکشی کنترل‌شده در تحقیقات گون و همکاران، الغنم و همکاران و ژانگ و همکاران نیز گزارش شده است (Gunn et al., 2015; El-Ghannam et al., 2016; Zhang et al., 2017).

جدول ۷ نشان می‌دهد که مدل برای پارامتر شوری زهاب نیز روند کاهشی را پیش‌بینی نموده است. کاهش شوری زهاب در زهکشی کنترل‌شده نسبت به زهکشی آزاد در پژوهش‌های محجوبی و همکاران (۱۳۹۱) نیز گزارش شده است.



شکل ۷-شوری زهاب در تیمارهای زهکشی آزاد و کنترل‌شده الف) گندم، ب) جو، ج) ذرت

جدول ۷ - برآورد سطح ایستابی، عمق و شوری زهاب با مقادیر متفاوت ضریب کنترل زهکشی برای کشت گندم

عامل کنترل زهکشی	میانگین عمق سطح ایستابی (متر)	عمق زهاب (متر)	شوری زهاب (دسی‌زیمنس بر متر)
.	۱/۱۹	۰/۳۹۶	۳/۴۸
۰/۲۵	۱/۰۶	۰/۳۸	۳/۳
۰/۵	۰/۸۴	۰/۳۶	۳/۱۵
۰/۷۵	۰/۳۹	۰/۳۱	۳/۰۵

اثر کاهش آبیاری بر سطح ایستابی، مقدار و شوری زهاب

مدل برای مقادیر مختلف عمق آب آبیاری شامل ۰/۵۱۱، ۰/۵۸۴، ۰/۶۵۷ و ۰/۷۳ متر به ترتیب ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ درصد عمق آب آبیاری اجرا شد. در جدول ۸ نتایج حاصل از پیش‌بینی مدل با لحاظ نمودن این مقادیر ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که کاهش ۱۰ درصد عمق آب آبیاری موجب کاهش بیش از ۱۰ درصد از عمق زهاب خروجی از مزرعه می‌شود. همچنین کاهش این مقدار از میزان آبیاری سبب کاهش بیشتر از ۱۰ درصد از شوری زهاب خروجی می‌شود؛ بنابراین کاهش آب آبیاری مصرفی می‌تواند منجر به کاهش در عمق و شوری زهاب خروجی از مزرعه شود. همچنین با اعمال این مقادیر عمق آب آبیاری، سطح ایستابی در عمق مناسبی از سطح خاک قرارگرفته و محدودیتی برای رشد ریشه ایجاد نخواهد نمود. محجوبی و صادقی لاری (۱۳۹۴) نیز با استفاده از مدل Saltmod تأثیر مقادیر مختلف مصرف آب را بر عمق سطح ایستابی و عمق زهاب در کشت و صنعت امام خمینی بررسی نمودند. پیش‌بینی مدل در مطالعه محجوبی و صادقی لاری نشان داد با کاهش ۲۰ درصد در مصرف آب آبیاری، علاوه بر مناسب بودن عمق سطح ایستابی، عمق زهاب نیز ۴۰ درصد کاهش پیدا می‌کند.

اثر تغییر عمق زهکش زیرزمینی بر سطح ایستابی، مقدار و شوری زهاب

مدل برای مقادیر مختلف عمق نصب زهکش شامل ۱/۸۵، ۲، ۲/۱۵ و ۲/۳ متر اجرا شد. در جدول ۹ نتایج حاصل از پیش-بینی مدل با لحاظ نمودن این مقادیر ارائه‌شده است. بر اساس پیش‌بینی مدل در این اعماق نصب زهکش، عمق سطح ایستابی محدودیتی برای گیاه ایجاد نخواهد کرد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش عمق نصب زهکش موجب افزایش عمق زهاب خروجی از مزرعه می‌شود.

جدول ۸ - برآورد سطح ایستابی، عمق و شوری زهاب با اعماق مختلف آبیاری برای کشت گندم

عامل میزان آبیاری	میانگین عمق سطح ایستابی (متر)	عمق زهاب (متر)	شوری زهاب (دسی‌زیمنس بر متر)
۰/۷۳	۱/۱۹	۰/۳۹۶	۳/۴۸
۰/۶۵۷	۱/۲۷	۰/۳۳۲	۲/۴۳
۰/۵۸۴	۱/۳۶	۰/۲۶۸	۱/۴۷
۰/۵۱۱	۱/۴۳	۰/۲۱۶	۰/۷۷۶

جدول ۹ - برآورد سطح ایستابی، عمق و شوری زهاب با اعماق مختلف نصب زهکش

عمق زهکش (متر)	میانگین عمق سطح ایستابی (متر)	عمق زهاب (متر)	شوری زهاب (دسی‌زیمنس بر متر)
۱/۸۵	۱/۱۹	۰/۳۹۶	۳/۴۸
۲	۱/۳۲	۰/۴۰۹	۲/۷۴
۲/۱۵	۱/۴۶	۰/۴۲۲	۲/۱۵
۲/۳	۱/۵۹	۰/۴۳۶	۱/۶۵

محجوبی و صادقی لاری (۱۳۹۴) نیز با استفاده از مدل Saltmod تأثیر مقادیر مختلف عمق نصب زهکش را بر عمق سطح ایستابی و عمق زهاب در کشت و صنعت امام خمینی بررسی نمودند. نتایج پژوهش محجوبی و صادقی لاری نشان داد که کاهش عمق نصب زهکش (به‌جز عمق نصب ۱/۳ متر)، محدودیتی برای گیاه به وجود نخواهد آورد و با کاهش عمق زهاب خروجی، موجب بهبود شرایط زیست‌محیطی نیز خواهد شد. با دقت در جدول ۹ می‌توان دریافت که افزایش عمق نصب زهکش سبب کاهش شوری زهاب می‌شود و این دو مؤلفه با یکدیگر رابطه معکوس دارند.

نتیجه‌گیری

استفاده از مدل‌های شبیه‌ساز مانند مدل SaltMod یکی از روش‌های مناسب پیش‌بینی شوری آب‌وخاک برای جلوگیری از گسترش آن است. در این پژوهش شبیه‌سازی سطح ایستابی، حجم و شوری زهاب خروجی برای سه محصول مهم دشت مغان (گندم، جو و ذرت) و برای سه تیمار زهکشی آزاد (FD)، زهکشی کنترل‌شده با عمق کنترل ثابت ۷۰ سانتیمتر (CD70) و زهکشی کنترل‌شده با عمق کنترل متغیر (CDch) با استفاده از مدل SaltMod انجام شد. نتایج نشان داد که مدل از قابلیت پیش‌بینی مدیریت‌های مختلف آبیاری و زهکشی در دشت مغان برخوردار است و خروجی‌های این مدل، نوسانات سطح ایستابی، دبی خروجی از زهکش‌ها و تغییرات شوری زهاب را در کل دوره کشت نمایش می‌دهد. بر اساس پیش‌بینی مدل، با استفاده از عامل کنترل زهکشی بیشتر از ۰/۲۵، میانگین عمق سطح ایستابی به محدوده ریشه نزدیک شده و افزایش این ضریب تا ۰/۵، موجب بالا آمدن عمق سطح ایستابی به محدوده ریشه خواهد شد. همچنین بر طبق شبیه‌سازی مدل، کاهش آب آبیاری مصرفی می تواند منجر به کاهش در عمق و شوری زهاب خروجی از مزرعه شود. پیش بینی مدل برای مقادیر مختلف عمق نصب زهکش شامل ۱/۸۵، ۲، ۲/۱۵ و ۲/۳ متر نشان داد که در این اعماق نصب زهکش، عمق سطح ایستابی محدودیتی برای گیاه ایجاد نخواهد کرد و افزایش عمق نصب زهکش موجب افزایش عمق زهاب خروجی از مزرعه می شود. همچنین افزایش عمق زهکشی سبب کاهش شوری زهاب خروجی می شود. تجزیه‌وتحلیل آماری نشان داد که مدل SaltMod میزان خطای قابل قبولی در اختلاف بین مقادیر مشاهده‌شده در واقعیت و مقادیر پیش‌بینی‌شده ارائه داد. درمجموع با توجه به نتایج حاصل از مدل SaltMod در پیش‌بینی متغیرهای خروجی می‌توان دریافت که این مدل شبیه‌ساز، برآورد خوبی از این متغیرها در مقایسه با مقادیر مشاهده‌شده دارد. نتایج نشان داد که مدل SaltMod امکان بررسی تأثیر زهکشی کنترل‌شده را بر روی متغیرهای خروجی دارد و در صورت کم بودن داده‌های ورودی و کوتاه بودن طول دوره کشت، مدل SaltMod می‌تواند به پیش-بینی زهکشی کمک نماید و برای شبیه‌سازی مدیریت‌های مختلف زهکشی و ارزیابی زهکشی کنترل‌شده در دشت مغان استفاده شود.

منابع

رنجبر، غ و پیراسته انوشه، ه. ۱۳۹۴. نگاهی به تحقیقات شوری در ایران با تأکید بر بهبود تولید گیاهان زراعی. مجله علوم زراعی ایران. ۱۷(۲): ۱۶۵-۱۷۸.

صیادی شهرکی، ع.، ناصری، ع.، سلطانی محمودی،ا. و مختاران، ع. ۱۳۹۸. مقایسه عملکرد دو مدلDRAINMOD و شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی سطح ایستابی (مطالعه موردی: مزارع کشت و صنعت نیشکر دعبل خزاعی). فصلنامه انسان و محیطزیست. شماره یکم. ۱۷(۱): ۱-۱۱.

عبدالله زاده، م. ۱۳۹۶. تعیین نیاز آبی واقعی محصولات مهم کشاورزی دشت‌های قزوین و مغان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. مهندسی آبیاری و زهکشی. دانشکده فنی و مهندسی. دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)، قزوین، ایران، ۲۰-۲۴.

علیزاده، ح.ع، نظری، ب.، پارسی نژاد، م.، رمضانی اعتدالی، ه. و جانباز، ح. ۱۳۸۹. ارزیابی مدل AQUACROP در مدیریت کم آبیاری گندم در منطقه کرج. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۴(۲): ۲۷۳-۲۸۳.

کاظمی زریون، م.، ناظمی، ا.، صدرالدینی، ع و قربانی، م. ۱۳۹۲. مدل‌سازی تغییرات زمانی و مکانی شوری خاک اراضی پایاب سد حاجیلر چای در استان آذربایجان شرقی با استفاده از تلفیق زمین آمار و مدل SALTMOD. مجله پژوهش آب ایران. ۷(۱۲): ۲۱-۳۱.

محجوبی، آ.، ناصری، ع.، هوشمند، ع. و برومند نسب، س. ۱۳۹۱. بررسی آثار زهکشی کنترل‌شده بر روی شوری خاک، مدیریت آبیاری و عملکرد نیشکر. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۱۳(۴): ۴۰-۲۵.

محجوبی، آ. و صادقی لاری، ع. ۱۳۹۴. برآورد شوری خاک در محدوده ریشه نیشکر با مدیریت‌های مختلف آبیاری و زهکشی در کشت و صنعت امام خمینی با استفاده از مدل Saltmod. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۱۶(۱). ۱-

Bahceci. I., Cakir, R., Nacar, A.S., Bahceci, P. 2008. Estimating the effect of controlled drainage on soil salinity and irrigation efficiency in the Harran Plain using SaltMod. Turkish Journal of Agriculture and Forestry. 32(2): 101–109

El-Ghannam, M.K., AboWaly, M.E., Gaheen, S.A., Karajeh, F.F.and Gendy, A.A. 2016.Controlled drainage effects on nitrate leaching, salinity build-up and sugar beet production (Egypt).Merit Research Journal of Agricultural Science and Soil Sciences. 4(2): 023-032.

Ferjani, N., Morri, M. and Daghari, H. 2013. Estimation of root-zone salinity using SaltMod in the irrigated area of Kalaât El Andalous (Tunisia). Journal of Agricultural Science and Technology. 15(7): 1461–1477.

Gunn, K.M., Fausey, N.R., Shang, Y., Shedekar, V.S., Ghane, E., Wahl, M.D. and Brown, L.C. 2015. Subsurface drainage volume reduction with drainage water management: case studies in Ohio. . Agriculture Water Management. 149: 131–142.

Mao, W., Yang, J., Zhu, Y., Ye, M. and Wu, J. 2017. Loosely coupled SaltMod for simulating groundwater and salt dynamics under well-canal conjunctive irrigation in semi-arid areas. Agricultural Water Management. 192: 209-220.

Oosterbaan, R.J. 2002. SALTMOD Descreiption of Principles, User Manual, and Exampeles of Application.International Institute for t Land Reclamation and Improvement, Wageningen ,The NetherlaND.

Sarangi, A., Singh, M., Bhattacharya, A. and Singh, A.K. 2006. Subsurface drainage performance study using SALTMOD and ANN models. Agricultural Water Management. 84(3): 240–248.

Singh, M., Bhattacharya, A. K. and Simgh, A. K. and Simgh, A. 2002. Application of SALTMOD in Coastal Clay Soil in India. J Irrigation and Drainage Systems 16(3): 213-231.

Singh, A. 2012. Validation of SaltMod for a semi-arid part of northwest India and some options for control of waterlogging. Agricultural Water Management. 115(3): 194–202.

Singh, A. 2016. Evaluating the effect of different management policies on the long-term sustainability of irrigated agriculture. Land Use Policy. 54(1): 499–507.

Skaggs, R.W., Fausey, N.R. and Evans, R.O. 2012. Drainage water management.Journal of Soil Water Conservation. 67(6): 167–172.

Srinivasulu, A., Sujani Rao, C., Lakshmi, G.V., Satyanarayana T.V. and Boonstra, J. 2004. Model studies on salt and water balances at Konanki pilot area, Andhra Pradesh, India. Irrigation Drainage Systems. 18(1) : 11–17.

Yao, R. J., Yang, J. S., Zhang, T. J., Hong, L. Z., Wang, M. W., Yu, S. P. and Wang, X. P. 2014. Studies on soil water and salt balances and scenarios simulation using SaltMod in a coastal reclaimed farming area of eastern China. Agricultural Water Management. 131: 115-123.

Zhang, T.Q., Tan, C.S., Zheng, Z.M., Welacky, T. and Wang, Y.T. 2017. Drainage water management combined with cover crop enhances reduction of soil phosphorus loss. Science of the Total Environment. 586: 362–371

.

Water Management in Agriculture
Vol. 8, No. 1, Spring and Summer 2021, 31-46

نشریه مدیریت آب در کشاورزی
جلد ۸، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۰، ص. ۴۶-۳۱

SaltMod Model Performance in Simulating Water Level, Volume and Salinity of Drainage in Free and Controlled Drainage

M. Jafari[1], B. Nazari [2]*, A. Sotoude niya[3], H. Ramezani etedali[4] and H. Javani jouni[5]

Abstract

Drainage systems are used to control soil and water salinity, which requires time and money to know. Drainage simulation models can be used to save cost and time. The present study evaluated the performance of the SaltMod model in simulating the water table, volume and salinity of the drain. Simulations were performed for three important crops of Moghan plain (wheat, barley and corn) and three treatments of FD, CD70 and CDch. To evaluate the controlled drainage in the model, the drainage control coefficient (Frd) was considered. FD treatments for calibration, CD70 and CDch treatments were selected for validation. After simulation, the degree of correspondence between the real and simulated values was checked. In water table simulation, the mean RE for wheat, barley and corn was 17.3, 11.3 and 11% and the mean RMSE was 0.13, 0.07 and 0.07, respectively. The same indices were obtained for drainage volume of 16, 22 and 17% as well as 0.05, 0.07 and 0.06. These results confirm the acceptable accuracy of the model. Then the model was used to investigate the effect of drainage control factor, irrigation water depth and drainage installation depth on water table, volume and salinity of the drain. Therefore, the model can simulate different irrigation and drainage managements in Moghan plain.

Keywords: Controlled Drainage, Drainage Control Coefficient Simulation, Moghan Plain, SaltMod

[1] Master student of Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University
[2] Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University,Qazvin, Iran (* Corresponding Author: b.nazari@eng.ikiu.ac.ir)
[3] Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University,Qazvin, Iran
[4] Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University,Qazvin, Iran
[5] PhD student in Irrigation and Drainage, Campus of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran
Received: 23 March 2021
Accepted: 9 May 2021