تأثیر زهکشی آزاد و کنترل‌شده بر بیلان آب و شوری خاک و زهاب در زراعت کلزای دیم در اراضی شالیزاری

کلثوم داودی ، عبداله درزی نفت‌چالی[1] *و قاسم آقاجانی مازندرانی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

k.davoodi32@gmail.com

عضو هیات علمی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

abdullahdarzi@yahoo.com

مربی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

q_aqajani@yahoo.com

چکیده

زهکشی زیرزمینی، به‌عنوان یک تغییر ساختاری در راستای بهبود بهره‌وری اراضی شالیزاری، هیدرولوژی این اراضی را تغییر می‌دهد. در این پژوهش، با استفاده از مدل DRAINMOD-S، تأثیر مدیریت‌های زهکشی آزاد و کنترل‌شده بر مؤلفه‌های بیلان آب و شوری زهاب در کشت کلزای دیم به عنوان کشت دوم، پس از برنج در اراضی شالیزاری بررسی شد. داده‌های موردنیاز برای ارزیابی مدل طی دو فصل کشت کلزا (۱۳۹۶-۱۳۹۴) از یک مزرعه شالیزاری دارای سامانه زهکشی زیرزمینی (عمق زهکش ۰/۶۵ متر و فاصله زهکش ۳۰ متر) تهیه شد. با استفاده از مدل واسنجی و صحت‌سنجی شده، تأثیر سامانه‌های مختلف زهکشی زیرزمینی معمولی و کنترل شده (با کنترل عمق سطح ایستابی در ۴۰ سانتی‌متری از سطح زمین) بر بیلان آب و شوری خاک و زهاب ارزیابی شد. مدل از قابلیت قابل قبولی برای برآورد عمق سطح ایستابی و شوری زهاب در فرایندهای واسنجی و صحت‌سنجی برخوردار بود. بر اساس شبیه‌سازی‌ها، برای عمق زهکش ۱/۵ متر، افزایش فاصله زهکش‌ها از ۳۰ به ۷۰ متر در دو سامانه زهکشی آزاد و کنترل‌شده، بار نمک خروجی را به‌ترتیب ۸۰۵/۳ و ۷۴۱/۶ کیلوگرم بر هکتار کاهش داد. برای فاصله زهکش ۳۰ متر، با افزایش عمق زهکش‌ها از ۰/۵ به ۱/۸ متر، حجم زهاب خروجی در سامانه زهکشی کنترل‌شده از ۲/۷ به ۹ سانتی‌متر و در سامانه زهکشی آزاد از ۵/۱ به ۱۴/۳ سانتی‌متر افزایش یافت. براساس نتایج شبیه‌سازی‌ها، برای کاهش تخلیه نمک، مناسب‌ترین عمق و فاصله زهکش چه در زهکشی آزاد و چه در زهکشی کنترل شده به‌ترتیب ۰/۵ و ۳۰ متر بود. نتایج نشان داد که، سامانه زهکشی کنترل‌شده می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مدیریتی مفید برای کاهش مسائل زیست‌محیطی از منظر میزان بار نمک و زهاب در زراعت کلزا به عنوان کشت دوم در اراضی شالیزاری مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: نفوذ عمقی، عمق سطح ایستابی،DRAINMOD-S

---

[1]- آدرس نویسنده مسئول: ساری- دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

*- دریافت: بهمن ۱۳۹۶ وپذیرش: مرداد ۱۳۹۷

مقدمه

با توجه به پتانسیل‌های اقلیمی استان‌های شمالی کشور، در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی به‌منظور ایجاد شرایط مناسب برای کشت زمستانه از طریق بهبود وضعیت زهکشی شالیزارهای تجهیز و نوسازی شده این مناطق انجام‌شده است. شبکه‌های زهکشی گاهی علی‌رغم منافعی که دارند، اثرات منفی زیست‌محیطی مختلفی از خود به‌جای می‌گذارند که ازجمله آن‌ها می‌توان به تخریب کیفی خاک و منابع پذیرنده آب به‌دلیل ورود زهاب با کیفیت نامناسب اشاره نمود. با توجه به محدودیت منابع آب‌وخاک، باید پذیرفت که دنیای پیشرفته امروز، زهکشی به شیوه سنتی را در بیشتر موارد با محیط زیست سازگار نمی‌داند. به نظر می‌رسد که باید در اندیشه تغییر تدریجی از شیوه‌های معمول زهکشی به روش‌های دوستدار محیط‌زیست بود (حسین‌پور و همکاران ۱۳۹۱).

روش‌های زهکشی سازگار با محیط‌زیست در حال تکامل هستند که یکی از آن‌ها زهکشی کنترل‌شده است. زهکشی کنترل‌شده به عنوان یک اقدام مدیریتی برای کاهش اثرات ناشی از کیفیت زهاب کشاورزی مطرح است (حسین‌پور و همکاران ۱۳۹۱). در زهکشی کنترل شده سعی بر این است که حجم زهاب کاهش یابد. با کنترل خروجی زهکش می‌توان سطح ایستابی را در خاک در حد مطلوبی حفظ کرد و از خروج ناخواسته زهاب تا حدی که بتواند مورد استفاده گیاه قرار گیرد، خودداری نمود. زهکشی کنترل‌شده می‌تواند نقش مهمی در ذخیره آب و مواد غذایی و همچنین بهبود کیفیت آب در پایین‌دست داشته باشد (ولتمن و جانسن ۲۰۰۳). علاوه بر این، به‌عنوان یکی از بهترین اقدامات مدیریتی برای کاهش انتقال آلاینده‌های غیر نقطه‌ای از اراضی کشاورزی ضمن بهبود تولید محصول شناخته شده است (تن و ژانگ ۲۰۱۱؛ اسکگز و همکاران ۲۰۱۲؛ وستروم و همکاران ۲۰۱٤).

عمق و فاصله زهکش‌ها به عنوان دو پارامتر مهم در طراحی سامانه‌های زهکشی به‌همراه عمق سازه کنترل، بر عملکرد سامانه زهکشی کنترل‌شده تأثیر دارند. یکی از راه‌حلهای اساسی در شناخت و ارزیابی عکس‌العمل واقعی این عوامل در سامانه‌های زهکشی، انجام آزمایش‌های مزرعه‌ای است (فائو ۱۹۸٦). با توجه به اینکه این آزمایش‌ها مستلزم صرف وقت و هزینه بسیار زیاد است، استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی محدودیت‌های موجود را به مقدار قابل‌توجهی کاهش می‌دهد؛ اما قبل از کاربرد این مدل‌ها، درستی نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها باید با نتایج آزمایش‌های مزرعه‌ای مورد مقایسه قرار گیرد (اسکگز ۱۹۸۲). در سال‌های اخیر، مدل‌های زیادی نظیر SWAP، LEACHM، ADAPT و DRAINMOD برای شبیه‌سازی سامانه‌های زهکشی ارائه شده‌اند که هرکدام مبانی مختلف و روش‌های حل متفاوتی را برای شبیه‌سازی به کار می‌گیرند. در این میان، مدل DRAINMOD به‌دلیل توانایی بالایی که در شبیه‌سازی شرایط مزرعه از خود نشان داده است، نسبت به سایر مدل‌ها کاربرد بیشتری داشته است. این مدل در سال ۱۹۷۸ توسط اسکگز (اسکگز ۱۹۸۰) ارائه شد و در سال ۱۹۹۲ توسط کندیل (کندیل ۱۹۹۲) برای شبیه‌سازی کیفیت زهاب، شوری خاک و تأثیر تنش شوری بر عملکرد محصول و در سال ۱۹۹۷ به‌وسیله بریو و همکاران (بریو و همکاران ۱۹۹۷) برای شبیه‌سازی تغییرات نیتروژن در خاک توسعه داده شد.

تأثیر مدیریت‌های مختلف زهکشی و پارامترهای طراحی سامانه‌های زهکشی بر کمیت و کیفیت زهاب تاکنون در برخی پژوهش‌های میدانی و یا با استفاده از مدل DRAINMOD-S مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی تأثیر پارامترهای طراحی و مدیریت سامانه‌های زهکشی زیرزمینی بر کمیت و کیفیت زهاب خروجی در اراضی فاریاب استرالیا نشان داد که با افزایش عمق و فاصله زهکش‌ها، میزان زهاب و بار نمک خروجی افزایش‌یافته و کیفیت زهاب خروجی کاهش می یابد (کریستن و اسکین ۲۰۰۱). طی پژوهشی تأثیر عمق و فاصله زهکش‌های زیرزمینی بر کیفیت زهاب در دره سن جواکین کالیفرنیا موردبررسی قرار گرفت (گریمر ۱۹۹۳). نتایج نشان داد که

با افزایش عمق زهکش از ۲/۵ تا ٤ متر و افزایش فاصله زهکش‌ها از ۲۰ تا ۸۰ متر، کیفیت زهاب خروجی کاهش یافت.

نتایج پژوهشی در مناطق خشک و نیمه‌خشک استرالیا حاکی از آن است که زهکشی کنترل‌شده نقش مهمی در مدیریت سطح ایستابی، کاهش حجم زهاب و میزان بار نمک خروجی و حفظ محیط‌زیست دارد (ایرس و همکاران ۲۰۰٦). اثرات زهکشی کنترل‌شده و زهکشی معمولی بر حجم زهاب در پژوهشی دو ساله در جنوب سوئد بررسی شد. آنالیزها نشان داد که کل حجم زهاب و نیترات خروجی در حالت زهکش کنترل‌شده در سال اول به‌ترتیب ۷۹ و ۹٤ درصد و در سال دوم به‌ترتیب ۷۸ و ۹٤ درصد کمتر از زهکشی معمولی بود (وستروم و همکاران ۲۰۰۱). بررسی اثرات زهکش کنترل‌شده بر کمیت و کیفیت زهاب در مصر نیز نشان داد که حجم زهاب زهکش‌های کنترل‌شده در فصل تابستان ٦۸ درصد و در فصل زمستان ۲۸ درصد نسبت به وضعیت زهکشی آزاد کمتر بود (وهبا و همکاران ۲۰۰۵). در پژوهشی دیگر، کارایی مدل DRAINMOD-S برای شبیه‌سازی مدیریت آب تحت شرایط نیمه‌خشک دلتای غربی مصر، ارزیابی شد (وهبا و همکاران ۲۰۰٦). در این مطالعه میزان اطمینان به مدل از مقایسه داده‌های پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده، سطح ایستابی روزانه، شوری خاک در طول هر فصل، عملکرد نسبی محصول و میزان زهاب مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج، توافق خوبی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده وجود داشت. نتایج یک پژوهش طولانی‌مدت نیز حاکی از کارایی مناسب مدل DRAINMOD-S برای طراحی و ارزیابی سامانه‌های آبیاری و زهکشی در مناطق خشک بود (کاندیل و همکاران ۱۹۹۵).

بر اساس مطالعات یونسکو در سطح جهانی به‌طور میانگین تنها ٤۵ درصد از آب مصرفی کشاورزی به‌صورت مؤثر توسط گیاه مورداستفاده قرار می‌گیرد (محجوبی و همکاران ۱۳۹۲). تلاش‌های فراوانی نیز که در چند دهه گذشته در زمینه افزایش کارایی مصرف آب صورت گرفته نتوانسته منجر به کاهش چشمگیری در مصرف آب کشاورزی گردد؛ بنابراین کاهش حجم زهاب، حفظ کیفیت و استفاده مجدد آن از ضروریات توسعه کشاورزی ایران به‌شمار می‌رود (محجوبی و همکاران ۱۳۹۲). با توجه به اینکه زهکشی اراضی شالیزاری شمال کشور در ابتدای راه و در حال توسعه است، بر این اساس باید پژوهش‌هایی با فن‌های مدیریتی جدید نظیر زهکشی کنترل‌شده صورت گیرد تا خطرات احتمالی زیست‌محیطی ناشی از طرح‌های زهکشی را به حداقل برساند. هدف از پژوهش حاضر، تحلیل تأثیر اعماق و فواصل مختلف زهکش‌های زیرزمینی بر حجم زهاب و شوری آن در زراعت کلزای دیم پس از برداشت برنج با استفاده از مدل DRAINMOD-S در دو حالت زهکشی آزاد و کنترل‌شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

داده‌های موردنیاز این پژوهش طی دو فصل کشت کلزا (۱۳۹٦-۱۳۹٤) از پایلوت زهکشی زیرزمینی اراضی شالیزاری تجهیز و نوسازی شده دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تهیه شد. منطقه موردنظر در کیلومتر نه جاده ساری- دریا با عرض و طول جغرافیایی به‌ترتیب ۳٦/۳۹ درجه شمالی و ۵۳/۰٤ درجه شرقی و ارتفاع ۱۵- متر از سطح دریا واقع است. دمای هوای منطقه طی فصل‌های کشت ۹۵- ۱۳۹٤ و ۹٦- ۱۳۹۵ به‌ترتیب در محدوده ۱/٤- تا ۳۹/۵ و ٤/٦- تا ۳٤/٦ درجه سانتی‌گراد قرار داشت. کل بارندگی در فصل کشت کلزا ۹۵- ۱۳۹٤ معادل ٦۲۸ میلی‌متر و در فصل کشت ۹٦- ۱۳۹۵ معادل ٤۰۲/۷ میلی‌متر و میزان تبخیر در این فصول به‌ترتیب ٤۲۷/٤ و ۵۵۷/٦ میلی‌متر بود. اقلیم منطقه بر اساس روش تعیین اقلیم دومارتن، از نوع مرطوب است (بخت فیروز ۱۳۹۰). مطالعات لایه‌بندی خاک نشان داد که بافت خاک مزرعه در لایه سطحی و نیمه عمیق (تا ۱۵۰ سانتی‌متر) از نوع رس سیلتی با درصد بالای رس و در لایه ۱۵۰ تا ۳۰۰

سانتی‌متر از نوع رس است. مطالعات خاکشناسی نشان داد که لایه‌ای با هدایت هیدرولیکی بسیار کم و رس بیشتر از ۵۵ درصد در عمق حدود ۳۰ تا ٦۰ سانتی‌متری خاک کرت-های مختلف مزرعه وجود دارد به آن به‌عنوان سخت لایه یا هاردپن اطلاق می‌شود.

داده‌های مدل

مزرعه موردمطالعه دارای چهار سامانه مختلف زهکشی زیرزمینی است. با توجه به اهداف موردنظر در این پژوهش، داده‌های موردنیاز مدل DRAINMOD-S از منطقه تحت پوشش یک سامانه زهکشی زیرزمینی معمولی با عمق (D) ۰/٦۵ متر و فاصله زهکش (L)۳۰ متر (D0.65L30) در طول دو فصل کشت کلزای دیم (از ۱۱ مهر ۱۳۹٤ تا ۲۰ اردیبهشت ۱۳۹۵ و از ۷ مهر ۱۳۹۵ تا ۳۰ اردیبهشت ۱۳۹٦) تهیه شد. ورودی‌های اصلی این مدل شامل داده‌های هواشناسی، خصوصیات خاک، گیاه و داده-های مربوط به طراحی سامانه زهکشی است. داده‌های هواشناسی شامل، مقادیر باران ساعتی، حداقل و حداکثر دمای روزانه، عرض جغرافیایی، نمایه حرارتی و فاکتورهای تبخیر- تعرق پتانسیل (PET) می‌باشند که برای یک دوره ۱۵ ساله (۱۳۸۲ تا ۱۳۹٦) از ایستگاه هواشناسی موجود در نزدیکی مزرعه مورد مطالعه تهیه شد. از آنجایی که مدل DRAINMOD-S مقادیر باران ساعتی را مورد استفاده قرار می‌دهد، داده‌های بارندگی روزانه موجود به باران ساعتی تبدیل و به مدل معرفی شد. در مدل برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل از رابطه تورنت وایت استفاده می-شود. پارامترهای موردنیاز این رابطه شامل: دمای متوسط ماهانه، عرض جغرافیایی برای محاسبه ضرایب اصلاحی رابطه یادشده و نمایه حرارتی است (علیزاده ۱۳۸۰).

نمایه حرارتی محاسبه‌شده بر اساس داده‌های طولانی مدت هواشناسی منطقه، برابر ۸۳/٤ است. اطلاعات خاک موردنیاز در مدل DRAINMOD-S شامل منحنی مشخصه رطوبتی و هدایت هیدرولیکی لایه‌های مختلف خاک می‌باشند. منحنی مشخصه رطوبتی خاک لایه‌های ۳۰-۰، ٦۰-۳۰، ۹۰-٦۰، ۱۲۰-۹۰، ۱۵۰-۱۲۰، ۲۰۰-۱۵۰ و ۳۰۰-۲۰۰ سانتی‌متری مزرعه با استفاده از دستگاه صفحات فشاری تعیین شد. هدایت هیدرولیکی این لایه‌های خاک نیز با استفاده از روش چاهک با کاربرد رابطه ارنست (علیزاده ۱۳۸۲) اندازه‌گیری و در جدول (۱) نشان داده شد. پارامترهای سامانه زهکشی شامل عمق و فاصله زهکش، عمق لایه نفوذناپذیر، شعاع مؤثر و عمق اولیه سطح ایستابی می‌باشند که به‌ترتیب برابر ۰/٦۵، ۳۰، ۲، ۰/۰۵۸ و ۰/۳ متر در نظر گرفته شدند. عمق لایه نفوذ ناپذیر براساس نظر USBR (بای‌بوردی ۱۳۷۸) (لایه یا افقی از خاک که ضریب آبگذری آن ۰/۱ تا ۰/۲ میانگین وزنی ضرایب آبگذری لایه‌های بالایی باشد) تعیین شد. در مدل DRAINMOD-S، شعاع موثر از حاصلضرب شعاع لوله زهکش در ۱/۱۷۷ به‌دست می‌آید (اسکگز ۱۹۸۰).

علاوه بر این، ضریب زهکشی منطقه بر اساس بارندگی‌های پنج روزه دوره مطالعه برابر سه میلی‌متر در روز تعیین شد. وضعیت زهکشی سطحی در مدل با استفاده از دو پارامتر حداکثر ذخیره سطحی و عمق کرکهام برای جریان به‌سمت زهکش مشخص شد. حداکثر ذخیره سطحی با توجه به سیستم زهکشی سطحی انتخاب می‌شود به گونه‌ای که برای زهکشی سطحی خوب، مقادیر ذخیره کم و برای زهکشی سطحی ضعیف مقادیر ذخیره بزرگ‌تر انتخاب می‌شود. عمق کرکهام نیز کوچک‌تر یا مساوی حداکثر ذخیره سطحی انتخاب می‌شود (علی‌بخشی و همکاران ۱۳۹۱). با توجه به وضعیت زهکشی سطحی در اراضی مورد مطالعه و جدول (۲) مقادیر مختلفی در فرایند واسنجی استفاده شد که در نهایت مقادیر ۰/۷ و ۰/۵ سانتی-متر به‌عنوان مناسب ترین مقدار برای دو پارامتر حداکثر ذخیره سطحی و عمق کرکهام انتخاب شدند.

جدول ۱- بافت خاک لایه‌های مختلف و هدایت هیدرولیکی هر لایه

عمق خاک (سانتی‌متر)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	شن (درصد)	بافت خاک	هدایت هیدرولیکی Ks (سانتی‌متر بر روز)
۰-۳۰	۴۸/۵	۴۴/۴	۷	رسی- سیلتی	۲۵/۶
۳۰-۶۰	۵۵/۵	۴۲	۲/۵	رسی- سیلتی	۸/۱
۶۰-۹۰	۴۶/۵	۴۵/۵	۸	رسی- سیلتی	۲۰/۷
۹۰-۱۲۰	۴۲/۵	۵۱/۵	۶	رسی- سیلتی	۱۶/۳
۱۲۰-۱۵۰	۵۲	۴۲	۶	رسی- سیلتی	۱۰/۹
۱۵۰-۲۰۰	۵۸/۵	۳۵/۵	۶	رسی	۸/۳
۲۰۰-۳۰۰	۶۱	۳۳/۵	۵/۵	رسی	۲/۵

جدول ۲- مقادیر حداکثر ظرفیت ذخیره سطحی (اسکگز ۱۹۸۰)

کیفیت زهکشی سطحی	وضعیت زمین	ذخیره سطحی (Sm) cm
خوب	سطح نسبتا مسطح، شیب یکنواخت، بدون پستی و بلندی و دارای خروجی کافی جهت جلوگیری از غرقابی	۰/۱ تا ۰/۵
نسبتا خوب	چاله‌های کوچک (بعد از باران زیاد غرقابی کمی ایجاد می‌شود)	۰/۶ تا ۱/۵
ضعیف	پستی و بلندی زیاد، خروجی‌های ناکافی (غرقابی زیاد)	۱/۶ تا ۲/۵ و بزرگتر

واسنجی و صحت‌سنجی مدل

طی فصل‌های کشت ۹۵- ۱۳۹٤ و ۹٦- ۱۳۹۵ اندازه‌گیری عمق سطح ایستابی از چاهک‌های مشاهده‌ای به صورت روزانه و اندازه‌گیری شوری زهاب عموماً هر ۱۵ روز یک‌بار انجام شد. مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در فصل کشت اول (۹۵- ۱۳۹٤) واسنجی و در فصل کشت دوم (۹٦- ۱۳۹۵) صحت‌سنجی شد. واسنجی در دو مرحله صورت گرفت. ابتدا بر اساس داده‌های میدانی عمق سطح ایستابی، با تغییر مقادیر هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، حداکثر ذخیره سطحی، عمق کرکهام و فاکتورهای تبخیر- تعرق، واسنجی انجام شد. در مرحله بعد، واسنجی مدل بر اساس داده‌های شوری زهاب، از طریق تنظیم پارامترهای شوری انجام شد. ارزیابی مدل در فرایندهای واسنجی و صحت‌سنجی با استفاده از آماره‌های راندمان مدل (EF) (نش و ساتکلیف ۱۹۷۰)، درصد خطا (PE)، ضریب تبیین (R^2)، خطای معیار (RMSE) (وانگ و همکاران ۲۰۰٦) و میانگین انحراف معیار (AD) (لیگتس و مک‌کیب ۱۹۹۹) انجام شد.

سناریوهای مورد بررسی

بسته به اعماق و فواصل مختلف، تأثیر زهکشی آزاد و کنترل‌شده روی خروجی‌های مدل DRAINMOD-S متفاوت است. بر این اساس، مدل برای دو وضعیت زهکشی آزاد و کنترل‌شده (کنترل عمق سطح ایستابی در عمق ٤۰ سانتی‌متر از سطح خاک) در دو حالت عمق زهکش ثابت ۱/۵ متر با فواصل مختلف ۲۰، ۳۰، ٤۰، ۵۰، ٦۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ متر و فاصله زهکش ثابت ۳۰ متر با اعماق مختلف ۰/۵، ۰/۸، ۱، ۱/۲، ۱/٤، ۱/٦ و ۱/۸ متر شبیه‌سازی شد. با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، خروجی‌های مدل نظیر میزان نفوذ (INFIL)، تبخیر- تعرق (ET)، عمق زه‌آب (DRAIN)، عمق سطح ایستابی (DTWT)، رواناب (RUNOFF)، غلظت نمک در اعماق مختلف خاک (SAL) و مقدار کل بار نمک خارج‌شده از خاک (SDR) موردبررسی قرار گرفت. همچنین، مقدار مجموع آب مازاد خاک با مبنا قرار دادن عمق سطح ایستابی ۳۰ سانتی‌متر (SEW30) به‌صورت زیر محاسبه شد:

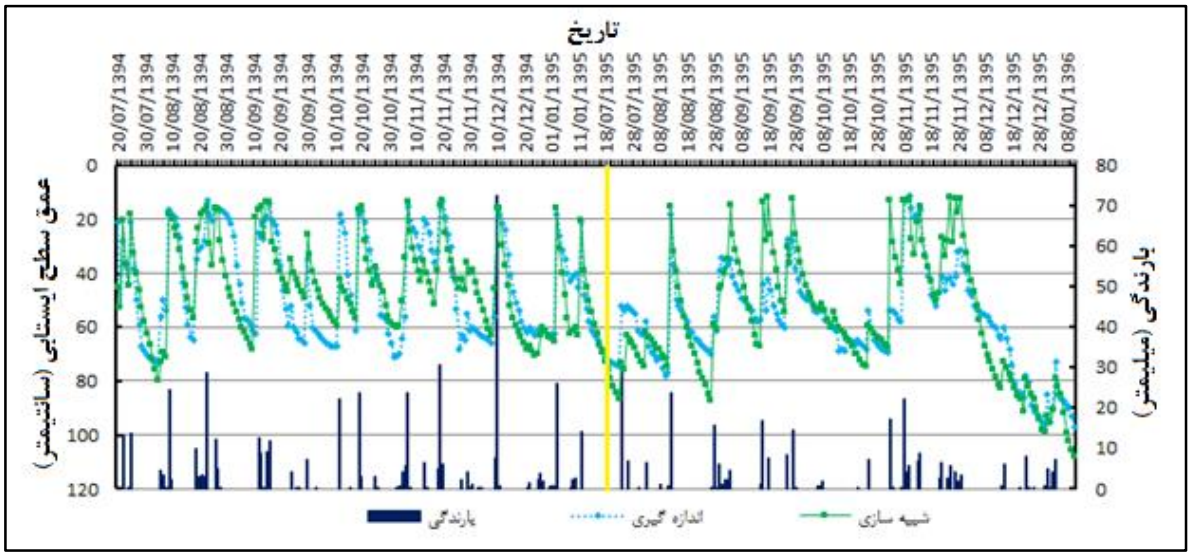
$$SEW30 = \sum_{i=1}^{n}(30 - x_i) \quad (1)$$

SEW30 مجموع آب مازاد (سانتی‌متر)، x_i عمق سطح ایستابی در روز i ام و n تعداد روزهایی است که عمق سطح ایستابی کمتر از ۳۰ سانتی‌متر است.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل

روند تغییرات مقادیر سطح ایستابی واقعی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی (۲۰ مهر ۱۳۹٤ تا ۱۱ فروردین ۱۳۹۵) و صحت‌سنجی (۱۸ مهر ۱۳۹۵ تا ۱۱ فروردین ۱۳۹٦) در شکل (۱) ارائه شد. در هر دو دوره، تطابق خوبی بین اعماق سطح ایستابی واقعی و شبیه‌سازی شده وجود داشت. جدول (۳) متوسط اعماق سطح ایستابی و مقادیر شوری زهاب اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده را برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد. متوسط عمق سطح ایستابی شبیه‌سازی شده در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر مقدار واقعی و اندکی کمتر از مقدار واقعی بود. با این وجود، آماره‌های ارزیابی مربوط به این پارامتر در فصل کشت ۹٦-۱۳۹۵ در مقایسه با فصل کشت ۹۵-۱۳۹٤ بهبود قابل‌توجهی یافت. براساس گزارش اسکگز و همکاران (۲۰۱۲)، عملکرد قابل قبول مدل جهت پیش بینی عمق سطح ایستابی به ازای راندمال مدل بیش از ۰/٤ و ۰/٦ حاصل خواهد شد. بر این اساس، مدل در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب از کارایی قابل قبول و خوبی برخوردار بود. علاوه بر این، مقادیر RMSE مربوط به پیش‌بینی‌های عمق سطح ایستابی در دوره واسنجی و صحت‌سنجی در محدوده مقادیر گزارش شده در برخی تحقیقات گذشته نظیر اسکگز (۱۹۸۰) (۷/۵ تا ۱۹/٦ سانتی‌متر) و هلویگ و همکاران (۲۰۰۲) (٤/٦ تا ۲۲/۵ سانتی‌متر) بود. مقادیر AD (میانگین انحراف) دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی برای عمق سطح ایستابی بر اساس گزارش اسکگز و همکاران (۲۰۱۲) در محدوده عالی قرار داشت. به‌طورکلی، مقایسه آماره‌های مختلف حاکی از قابلیت مدل برای برآورد عمق سطح ایستابی برای سامانه زهکشی موردنظر در منطقه مطالعه است. کارایی مدل برای برآورد شوری زه‌آب مشابه وضعیت مربوط به سطح ایستابی بود. توجه به آماره‌های ارزیابی نشان می‌دهد که مدل DRAINMOD برآوردهای قابل قبولی از شوری زهاب در دوره‌های واسنجی و صحت-سنجی ارائه داد. اختلاف بین متوسط مقادیر شوری اندازه-گیری شده و شبیه‌سازی شده در فصول کشت ۹۵-۱۳۹٤ و ۹٦-۱۳۹۵ به‌ترتیب ۰/۷ و ۱/۲ درصد بود. مقادیر درصد خطا و ضریب تبیین مربوط به پیش‌بینی عمق سطح ایستابی و شوری زهاب در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی نیز دلالت بر کارایی مناسب مدل DRAINMOD-S در پیش‌بینی این مولفه‌ها برای مزرعه مورد مطالعه دارند.



شکل ۱- مقادیر سطح ایستابی واقعی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی (۲۰ مهر ۱۳۹۴ تا ۱۱ فروردین ۱۳۹۵) و صحت‌سنجی (۱۸ مهر ۱۳۹۵ تا ۱۱ فروردین ۱۳۹۶، خط زرد رنگ عمودی دو سال پیاپی را از یکدیگر جدا می کند)

جدول ۳- متوسط عمق سطح ایستابی (سانتی‌متر) و شوری زهاب (میلی‌گرم در لیتر) اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده و آماره‌های ارزیابی مدل

پارامتر	تاریخ	اندازه‌گیری	شبیه‌سازی	PE	EF	R^2	RMSE	AD
متوسط عمق سطح ایستابی	۱۳۹۴-۹۵	۴۴	۴۴	۰/۰۱	۰/۵۶	۰/۵۷	۱۲/۴	۱۰
	۱۳۹۵-۹۶	۵۸/۱	۵۷/۲	-۱/۵۷	۰/۶۳	۰/۸	۱۰/۷	۷/۹۱
شوری زهاب	۱۳۹۴-۹۵	۸۹۴	۹۰۰	۰/۶۱	۰/۴۷	۰/۴۹	۱۳۷	۱۱۵
	۱۳۹۵-۹۶	۱۳۲۴	۱۳۰۸	-۱/۲	۰/۶۵	۰/۷۲	۴۸/۷۴	۳۹/۲۲

تأثیر زهکشی آزاد بر بیلان آب و شوری زهاب وخاک

با توجه به کارایی مناسب مدل در برآورد عمق سطح ایستابی و شوری زهاب، تأثیر ترکیب‌های مختلف عمق و فاصله زهکش‌ها به‌همراه عمق کنترل سطح ایستابی بر حجم و شوری زهاب موردبررسی قرار گرفت تا مناسب‌ترین سامانه زهکشی از این نظر مشخص شود. تأثیر فواصل مختلف زهکشی بر مؤلفه‌های بیلان آب، عمق سطح ایستابی و SEW30 در سامانه زهکشی آزاد با عمق زهکش ۱/۵ متر در جدول (٤) ارائه شد. در فواصل زهکش ۲۰ و ۳۰ متر، کل مقدار بارندگی در دوره شبیه‌سازی (۲٦/٤ سانتی‌متر) به داخل نفوذ نمود لکن با افزایش فاصله زهکش‌ها تا ۱۰۰ متر، میزان نفوذ تا حد زیادی کاهش یافت. درنتیجه، به‌دلیل افزایش فاصله زهکش‌ها، عمق زهاب کاهش‌یافته و رواناب سطحی زیاد شد. این نتایج حاکی از آن است که در صورت نامساعد بودن زهکشی سطحی یا فراهم نبودن شیب کافی برای تخلیه رواناب‌های سطحی، فواصل زهکش بیشتر از ۳۰ متر، به‌دلیل افزایش احتمال وقوع غرقابی و ماندابی سطحی، برای منطقه مطالعه مناسب نخواهند بود. کمترین و بیشترین مقدار زهاب به‌ترتیب مربوط به سامانه‌های زهکشی D1.5L100 (۳/٦ سانتی‌متر) و D1.5L20 (۱۵/۲ سانتی‌متر) بود. مسیر جریان آب به‌سمت زهکش‌ها تابع عمق و فاصله است (جوری ۱۹۷۵). به‌عبارت‌دیگر، افزایش فاصله زهکش‌ها به‌معنای افزایش طول مسیر جریان آب به‌سمت زهکش‌ها است که نتیجه آن، افت کندتر سطح ایستابی و نفوذ کمتر آب به داخل خاک یا افزایش رواناب، به‌ویژه در خاک‌های سنگین نظیر خاک مزرعه موردمطالعه است. مقایسه روند تغییرات نفوذ و رواناب با افزایش فاصله زهکش‌ها از ۲۰ به ۱۰۰ متر در جدول (٤) مؤید این موضوع است.

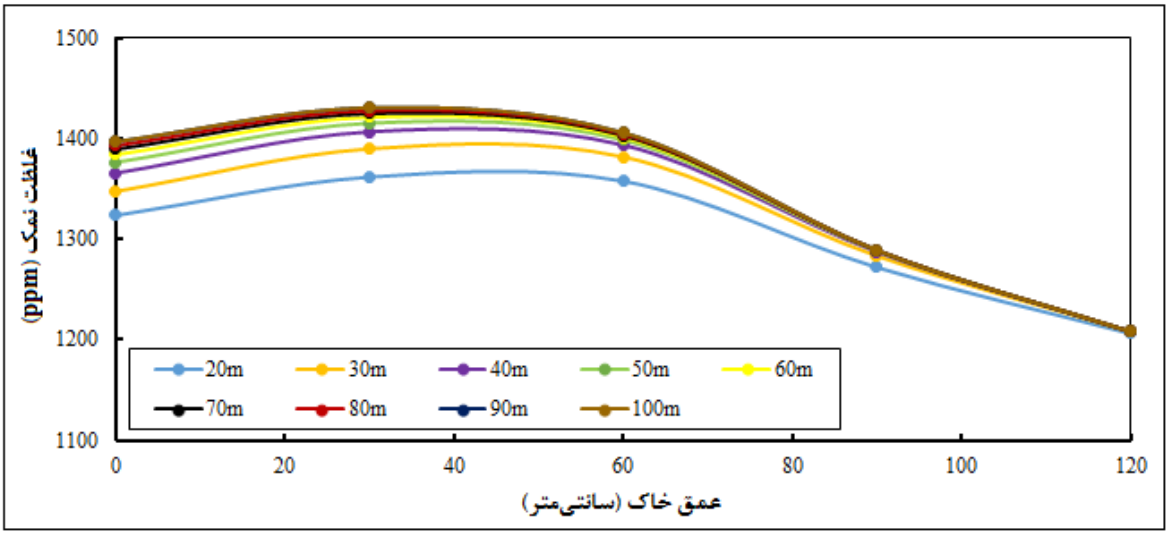
به‌عبارت‌دیگر، افزایش فاصله زهکش‌ها می‌تواند خطر غرقابی یا ماندابی در زمان بارندگی را افزایش دهد که این شرایط برای کشت گیاه کلزا مضر است. این گیاه دارای ریشه‌های جانبی متعددی بوده که معمولاً در لایه بالایی خاک و در عمق ٤۰ سانتی‌متری پراکنده هستند (ژانگ و همکاران ۲۰۰٤). درنتیجه، بالا بودن سطح ایستابی از طریق تأثیر بر خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، رشد ریشه و سرانجام رشد گیاه را محدود و متوقف می‌کند (مالیک و همکاران ۲۰۰۱؛ ویسر و ویزیناک ۲۰۰٤). تغییرات فواصل زهکش‌ها تأثیر زیادی بر SEW30 داشت به‌طوری‌که با افزایش آن، SEW30 افزایش پیدا کرد که این وضعیت، با نتایج دوستی پاشاکلایی و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت داشت. در این پژوهش، با افزایش فاصله زهکش از ۱۵ به ۳۰ متر برای عمق زهکش ۰/٦۵ متر، مقدار SEW30 از ۲۵۲ به ۵۲٤ سانتی‌متر افزایش یافت.

شکل (۲) تأثیر فواصل زهکش را بر تغییرات غلظت نمک در اعماق مختلف خاک در سامانه زهکشی آزاد نشان می‌دهد. برای عمق زهکش ۱/۵ متر، از میان فواصل مختلف زهکش موردمطالعه، فواصل زهکش ۲۰ و ۱۰۰ متر به‌ترتیب بهترین و بدترین شرایط را از منظر کنترل نمک در پروفیل خاک ایجاد نمودند. به‌عبارت‌دیگر، با افزایش فاصله زهکش‌ها، میزان تخلیه نمک از پروفیل خاک به‌ویژه در اعماق کم، کاهش یافت. گزارش شد که افزایش فاصله زهکش‌ها در خاک‌های سنگین، سبب کاهش احتمال زهکشی املاح از پروفیل خاک خواهد شد (درزی نفت‌چالی ۱۳۹۵) که نتیجه آن افزایش خطر آلودگی آب‌های

زیرزمینی به‌واسطه آبشویی املاح به منطقه زیر سطح ایستابی است. نکته قابل‌توجه دیگر در شکل (۲)، عدم اختلاف زیاد در تأثیر فواصل زهکش بیشتر از ۵۰ متر بر میزان شوری خاک است. این مهم نشان می‌دهد که فواصل زهکش زیاد به‌تدریج منجر به شور شدن خاک مزرعه موردمطالعه خواهد شد.

جدول ۴-تأثیر فاصله زهکش‌های زیرزمینی بر مؤلفه‌های بیلان آب و عمق سطح ایستابی در سامانه زهکشی آزاد با عمق زهکش ۱/۵ متر

فاصله زهکش (m)	بارندگی (cm)	نفوذ (cm)	زهاب (cm)	رواناب (cm)	عمق سطح ایستابی (cm)	SEW30 (cm)
۲۰	۲۶/۴	۲۶/۴	۱۵/۲	۰	۱۰۸/۶	۰
۳۰	۲۶/۴	۲۶/۴	۱۳/۸	۰	۸۸/۴	۳/۶
۴۰	۲۶/۴	۲۵/۶	۱۱/۹	۰/۹	۷۴/۶	۸۲/۷
۵۰	۲۶/۴	۲۳/۷	۹/۵	۲/۷	۶۶/۵	۲۰۸/۶
۶۰	۲۶/۴	۲۲/۱	۷/۷	۴/۳	۶۰/۸	۳۲۰/۴
۷۰	۲۶/۴	۲۰/۹	۶/۳	۵/۵	۵۶/۶	۴۶۸/۷
۸۰	۲۶/۴	۲۰	۵/۲	۶/۵	۵۳/۵	۶۲۰/۷
۹۰	۲۶/۴	۱۹/۲	۳/۴	۷/۲	۵۱/۷	۷۰۳/۱
۱۰۰	۲۶/۴	۱۸/۶	۳/۶	۷/۹	۵۰/۴	۷۵۳/۴



شکل ۲- تغییرات غلظت نمک خاک تحت تأثیر فواصل زهکش مختلف در سامانه‌های زهکشی آزاد با عمق ۱/۵ متر

مقادیر کل بار نمک خروجی از سامانه‌های زهکشی آزاد با عمق ثابت ۱/۵ متر و فواصل مختلف زهکش در جدول (۵) ارائه شد. از لحاظ تخلیه نمک، سامانه‌های زهکشی با فواصل کمتر تأثیر منفی بیشتری بر آب‌های سطحی پذیرنده زهاب نسبت به سامانه‌های زهکشی با فواصل بیشتر داشتند. با افزایش فاصله زهکش‌ها از ۳۰ به ۷۰ متر، میزان کل بار نمک خروجی از ۱۷٦٦/۷ به ۹٦۱/٤ کیلوگرم بر هکتار کاهش یافت. نتایج برخی پژوهش‌های گذشته نشان داد با افزایش فاصله زهکش‌ها از ۱۵ به ۳۰ متر از میزان بار نمک خارج‌شده از خاک کاسته می‌شود (جعفری تلوکلایی و همکاران ۲۰۱۵) که مؤید نتایج پژوهش حاضر است. تخلیه کل بار نمک خروجی از سامانه‌های مختلف زهکشی، تابعی از روند تغییرات زهاب بود به این معنی که با کاهش حجم زهاب، تخلیه نمک نیز کاهش یافت. نتایج پژوهش درزی نفت‌چالی (۱۳۹۵) نیز مؤید این موضوع است.

جدول ۵- مقادیر کل بار نمک خروجی (کیلوگرم در هکتار) در دوره شبیه‌سازی در سامانه‌های زهکشی آزاد با فواصل مختلف

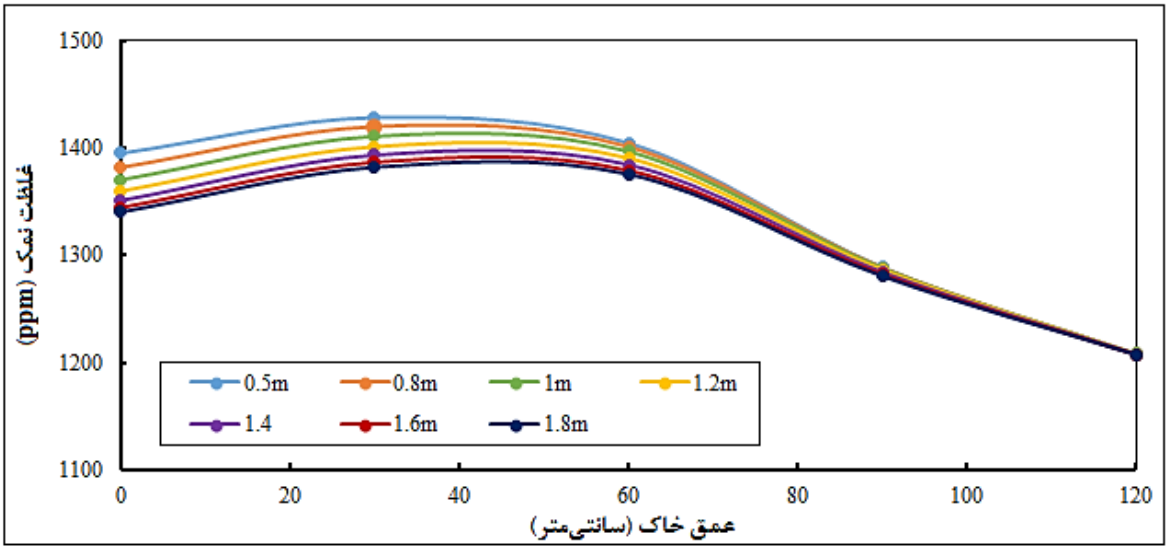
فاصله زهکش (m)	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰
بار نمک	۱۶۴۲	۱۷۶۷	۱۶۱۰	۱۳۹۵	۱۲۸۶	۹۶۱

مقادیر مؤلفه‌های بیلان آب، عمق سطح ایستابی و SEW30 تحت تأثیر اعماق مختلف زهکش و فاصله زهکش ثابت ۳۰ متر در شرایط زهکشی آزاد در جدول (٦) ارائه شد. با افزایش عمق زهکش‌های زیرزمینی، کل میزان بارندگی در خاک نفوذ یافته و به‌دنبال آن حجم زهاب خروجی افزایش و از میزان رواناب کاسته شد. به‌عبارت‌دیگر، زهکش‌های با عمق کم احتمال ماندابی شدن در بارندگی‌های شدید را افزایش دادند. علیزاده و همکاران (۱۳۹۵) نشان دادند در سامانه زهکشی زیرزمینی با فاصله ۷/۵ و عمق یک متر، میزان دبی خروجی نسبت به سامانه زهکشی با عمق ۰/۸ متر افزایش یافت که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. کلیه زهکش‌ها با اعماق مختلف توانستند عمق سطح ایستابی را تا حد قابل قبولی کاهش دهند و شرایط را برای کشت زمستانه فراهم آورند. بااین‌حال، زهکش‌های عمیق‌تر توانایی بیشتری در تخلیه آب مازاد داشته و سبب افت قابل‌توجه عمق سطح ایستابی شدند. مقایسه مقادیر SEW30 در سامانه‌های زهکشی با اعماق مختلف نشان داد با افزایش عمق زهکش، آب اضافی خاک کاهش و درنهایت در عمق ۱/٦ متری به صفر رسید. بیش‌ترین (٤۲۰/۵ سانتی‌متر) مقدار SEW30 مربوط به سامانه زهکشی با عمق ۰/۵ متر بود.

جدول ۶- مقادیر مؤلفه‌های بیلان آب، عمق سطح ایستابی و SEW30 تحت تأثیر اعماق مختلف زهکش و فاصله زهکش ثابت ۳۰ متر در شرایط زهکشی آزاد

عمق زهکش (m)	بارندگی (cm)	نفوذ (cm)	زهاب (cm)	رواناب (cm)	عمق سطح ایستابی (cm)	SEW30 (cm)
۰/۵	۲۶/۴	۲۰/۳	۵/۱	۶/۱	۵۲/۶	۴۲۰/۵
۰/۶۵	۲۶/۴	۲۲	۶/۸	۴/۴	۵۷/۱	۳۰۰/۲
۰/۸	۲۶/۴	۲۳/۹	۹/۲	۲/۵	۶۲/۶	۱۵۹/۵
۱	۲۶/۴	۲۵/۲	۱۱/۰	۱/۲	۷۱/۲	۶۵/۰
۱/۲	۲۶/۴	۲۶/۱	۱۲/۶	۰/۳	۷۸/۹	۳۷/۶
۱/۴	۲۶/۴	۲۶/۴	۱۳/۵	۰	۸۵/۵	۱۲/۷
۱/۶	۲۶/۴	۲۶/۴	۱۴/۰	۰	۹۰/۸	۰
۱/۸	۲۶/۴	۲۶/۴	۱۴/۳	۰	۹۴/۱	۰

شکل (۳) تأثیر عمق زهکش بر تغییرات غلظت نمک در اعماق مختلف خاک در سامانه زهکشی آزاد را نشان می‌دهد. افزایش عمق زهکش‌ها سبب تخلیه بیشتر نمک از پروفیل خاک به‌ویژه از لایه ٦۰ سانتی‌متر سطحی شد. به‌عبارت دیگر، در صورت استفاده از زهکش‌های کم عمق‌تر، به‌دلیل تخلیه کمتر نمک از پروفیل خاک، امکان افزایش شوری خاک به‌واسطه نمک‌های موجود در آب آبیاری افزایش می‌یابد. با این وجود، دفع کمتر نمک از طریق این سیستم‌ها از منظر زیست محیطی منجر به وقوع اثرات منفی کمتری بر منابع پذیرنده زه‌آب خواهد شد. در اعماق خاک بیشتر از ٦۰ سانتی‌متر، تاثیر افزایش عمق زهکش بر نمک خاک به‌تدریج کاهش یافت طوری‌که در عمق خاک بیشتر از ۹۰ سانتی‌متر، اختلاف غلظت نمک خاک برای کلیه اعماق زهکش‌ها ناچیز بود.



شکل ۳- روند تغییرات غلظت نمک خاک تحت تأثیر اعماق مختلف زهکش در سامانه‌های زهکشی آزاد

کل بار نمک خروجی از سامانه‌های زهکشی آزاد با اعماق مختلف در جدول (۷) ارائه شد. الگوی تخلیه نمک از سامانه‌های مختلف زهکشی نیز عموماً تابعی از روند تغییرات زهاب این سامانه‌ها بود. سامانه D0.5L30 کم‌ترین میزان زه‌آب را ایجاد کرد و میزان نمک تخلیه شده به‌وسیله این سامانه، کم‌تر از سایر سامانه‌ها بود. اختلاف میزان نمک خروجی در سامانه‌های با اعماق مختلف فراوان بود. این موضوع نقش بارز کاهش عمق زهکش‌ها در کاستن خطرات زیست‌محیطی ناشی از دفع نمک را نمایان می‌سازد. طبق پژوهش‌های گذشته، کل بار نمک خارج‌شده از سامانه زهکشی کم‌عمق به‌طور چشمگیری پایین‌تر از زهکش‌های عمیق بود (هرن‌باکل و همکاران ۲۰۰۷). همچنین نتایج حاصل از پژوهش‌های آیرس و همکاران (۱۹۸۷) نشان داد که شوری زهاب خارج‌شده از زهکش با عمق دو متر بیشتر از میزان آن از زهکش‌های با عمق ۱/۷ متر بود که مؤید نتایج پژوهش حاضر است.

جدول ۷- میزان کل بار نمک خروجی (کیلوگرم در هکتار) در سامانه‌های زهکشی آزاد با اعماق مختلف و فاصله ۳۰ متر

عمق زهکش (m)	۰/۵	۰/۸	۱	۱/۲	۱/٤	۱/٦	۱/۸
کل بار نمک خروجی	٦۹۳/٦	۱۳۱۰/۲	۱۵۷۸/۱	۱٦۷۹/۸	۱۷۵۳/۲	۱۷۵۲/۰	۱۷۰۷/٤

تأثیر زهکشی کنترل‌شده بر بیلان آب و شوری زهاب

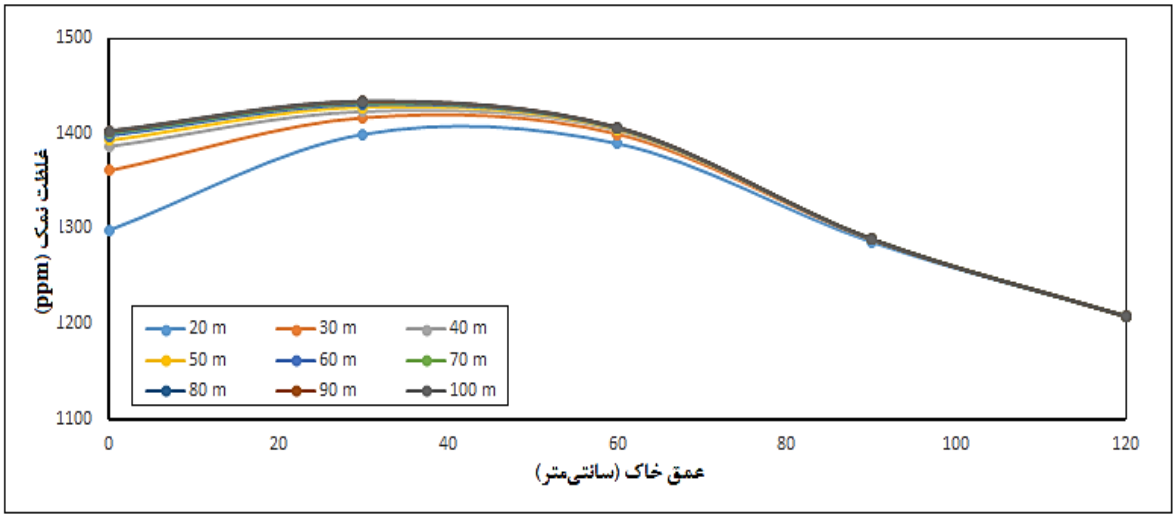
جدول (۸) تأثیر فواصل مختلف زهکش بر مؤلفه‌های بیلان آب، عمق سطح ایستابی و SEW30 در سامانه زهکشی کنترل‌شده را نشان می‌دهد. تنها در سامانه زهکشی D1.5L20 نفوذ صددرصدی بارندگی مشاهده شد و با افزایش فاصله زهکش‌ها از میزان نفوذ کاسته و درصد زیادی از بارندگی به رواناب تبدیل شد. کمترین و بیشترین میزان زهاب مربوط به سامانه‌های زهکشی با فاصله ۱۰۰ و ۲۰ متر بود. به‌عبارت‌دیگر، استفاده از زهکش‌های با فاصله کم مانع از ایجاد شرایط ماندابی و غرقابی در مزرعه خواهد شد. مقایسه میزان زهاب خروجی در دو سامانه زهکشی آزاد و کنترل‌شده حاکی از آن است که زهکشی کنترل‌شده تأثیر قابل‌توجهی بر کل زهاب خروجی داشت. حجم زه‌آب فاصله زهکش ٤۰ متر در سامانه زهکشی کنترل‌شده، ۵۷ درصد کمتر از میزان آن در شرایط زهکشی آزاد بود. نتایج حاصل از مطالعات مزرعه‌ای ویستروم و همکاران (۲۰۰۱) در منطقه سرد و نیمه مرطوب جنوب غربی سوئد بیانگر این است که میزان زهاب خروجی از سامانه زهکشی کنترل‌شده ۷۹ درصد کمتر از سامانه زهکشی آزاد بود. همچنین، محجوبی و همکاران (۱۳۹۲) طی پژوهشی که در

منطقه گرم و خشک خوزستان در مزرعه‌ای با بافت خاک سیلتی لومی رسی تا رسی لومی انجام دادند و نتیجه گرفتند که میزان زهاب خروجی در سیستم زهکشی کنترل شده ٤٥ درصد کمتر از سیستم زهکشی آزاد بود که با نتایج پژوهش حاضر مطابقت دارد. فاصله زهکش‌ها تأثیر بسزایی بر عمق سطح ایستابی دارد به‌طوری‌که با افزایش آن، عمق سطح ایستابی با فاصله کمتری از سطح زمین قرار می‌گیرد. بیشترین و کمترین میزان عمق سطح ایستابی برابر ۸۰/۱ و ٤٥/۷ سانتی‌متر بود که به‌ترتیب مربوط به سامانه‌های زهکشی D1.5L20 و D1.5L100 بود. مقایسه میزان عمق سطح ایستابی در دو سامانه زهکشی آزاد و کنترل‌شده نشان-دهنده کنترل بهتر عمق سطح ایستابی در حالت اول بود بطوریکه برای فاصله زهکش ۷۰ متر، عمق سطح ایستابی در دو سامانه زهکشی آزاد و کنترل شده به‌ترتیب برابر ٥٦/٦ و ٤٨/۱ سانتی‌متر بود. محجوبی و همکاران (۱۳۹۲) طی پژوهشی در یکی از کشت و صنعت‌های نیشکر خوزستان، برای شرایط زهکشی مشخص، عمق سطح ایستابی در دو حالت زهکشی آزاد و کنترل‌شده را به‌ترتیب برابر ٦۷/۸ و ٤۹/۲ سانتی‌متر گزارش کردند. مقایسه مقادیر SEW30 در سامانه‌های زهکشی با فواصل مختلف نشان داد که با افزایش فاصله زهکش‌ها از ۲۰ به ۱۰۰ متر، آب اضافی خاک به مقدار ۹۷ درصد افزایش یافت. درنتیجه، انتخاب فواصل مناسب زهکش باید با دقت زیادی صورت گیرد تا تهویه خاک ازلحاظ میزان رطوبت اضافی با مشکل مواجه نشود.

جدول ۸- مقادیر مؤلفه‌های بیلان آب، عمق سطح ایستابی و SEW30 در سامانه زهکشی کنترل‌شده تحت تأثیر فواصل مختلف و عمق ثابت ۱/۵ متر

فاصله (m)	بارندگی (cm)	نفوذ (cm)	زهاب (cm)	رواناب (cm)	متوسط عمق سطح ایستابی (cm)	SEW30 (cm)
۲۰	۲۶/۴	۲۶/۴	۱۰/۰	۰	۸۰/۱	۲۵/۳
۳۰	۲۶/۴	۲۳/۶	۷/۰	۳/۰	۶۵/۸	۲۴۴/۸
۴۰	۲۶/۴	۲۱/۴	۵/۲	۵/۰	۵۸/۹	۳۸۲/۳
۵۰	۲۶/۴	۱۹/۸	۴/۰	۶/۵	۵۴/۰	۵۰۲/۵
۶۰	۲۶/۴	۱۸/۷	۲/۹	۷/۷	۵۰/۲	۶۴۰/۴
۷۰	۲۶/۴	۱۸/۰	۲/۳	۸/۴	۴۸/۱	۷۶۱/۲
۸۰	۲۶/۴	۱۷/۰	۱/۷	۹/۰	۴۷/۰	۸۳۲/۲
۹۰	۲۶/۴	۱۷/۰	۱/۴	۹/۳	۴۶/۲	۸۸۷/۳
۱۰۰	۲۶/۴	۱۶/۸	۱/۱	۹/۶	۴۵/۷	۹۲۸/۲

شکل (٤) روند تغییرات غلظت نمک در سامانه زهکشی کنترل‌شده با فواصل مختلف را نشان می‌دهد. کمترین (ppm۱۳۹۹) و بیشترین (ppm ۱٤۳٤) میزان غلظت نمک به‌ترتیب مربوط به سامانه‌های زهکشی D1.5L20 و D1.5L100 بود. افزایش فاصله زهکش‌ها سبب کاهش میزان تخلیه نمک از پروفیل خاک شده است. به‌عبارت‌دیگر، سامانه‌های زهکشی دارای فاصله کمتر در کنترل میزان نمک خاک نقش موثرتری ایفا نمودند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی غلظت نمک در دو سامانه زهکشی آزاد و کنترل‌شده حاکی از افزایش غلظت نمک در سامانه زهکشی کنترل‌شده نسبت به سامانه زهکشی آزاد است. بااین‌وجود، مقدار افزایش غلظت نمک فراوان نبود که این مسئله با نتایج محجوبی (۱۳۹۱) مطابقت داشت.



شکل ۴- روند تغییرات میزان غلظت نمک در اعماق مختلف خاک در سامانه زهکشی کنترل‌شده با فواصل مختلف

جدول (۹) روند تغییرات کل بار نمک خروجی در سامانه‌های زهکشی کنترل‌شده با عمق ثابت ۱/۵ متر و فواصل مختلف را نشان می‌دهد. میزان بار نمک خروجی در سامانه‌های زهکشی D1.5L20 و D1.5L100 معادل ۱۴۹۹/۲ و ۱۷۷/۵ کیلوگرم بر هکتار بود. اختلاف میزان کل بار نمک خروجی در سامانه‌های مذکور قابل‌توجه بود. مقایسه میزان بار نمک خروجی در دو سامانه زهکشی آزاد و کنترل‌شده بیانگر این مطلب است که سامانه زهکشی کنترل‌شده به نحو بهتری میزان زهاب خروجی را کنترل و از خروج نمک جلوگیری کرده است. کل بار نمک خارج‌شده در فاصله ۳۰ متر و عمق ۱/۵ متر در دو سامانه زهکشی آزاد و کنترل‌شده به‌ترتیب معادل ۱۷۶۶/۷ و ۱۱۳۸/۵ کیلوگرم در هکتار بود که مؤید این مطلب است.

جدول ۹- مقادیر کل بار نمک خروجی (کیلوگرم بر هکتار) از سامانه‌های زهکشی کنترل‌شده با فواصل مختلف

فاصله زهکش (m)	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰
کل بار نمک خروجی	۱۴۹۹/۲	۱۱۳۸/۵	۸۵۷/۸	۱۱۲۰/۰	۵۶۴/۲	۳۹۶/۹	۳۰۳/۵	۱۹۱/۷	۱۷۷/۵

نتایج شبیه‌سازی‌های مؤلفه‌های بیلان آب، عمق سطح ایستابی و SEW30 در سامانه زهکشی کنترل‌شده با فاصله زهکش ثابت ۳۰ متر و عمق‌های مختلف زهکش در جدول ۱۰ ارائه شد. با افزایش عمق زهکش‌ها، میزان نفوذ در خاک و به‌تبع آن میزان زهاب خروجی افزایش یافت. بااین‌وجود، در هیچ عمقی میزان کل بارندگی به‌صورت صد در صد نفوذ پیدا نکرد این امر باعث شد در کلیه اعماق رواناب سطحی مشاهده شود. در این صورت، زهکش‌های سطحی با توجه به بافت سنگین مزرعه نقش موثری در کنترل میزان رواناب و جلوگیری از ماندابی شدن مزرعه ایفا خواهند کرد.

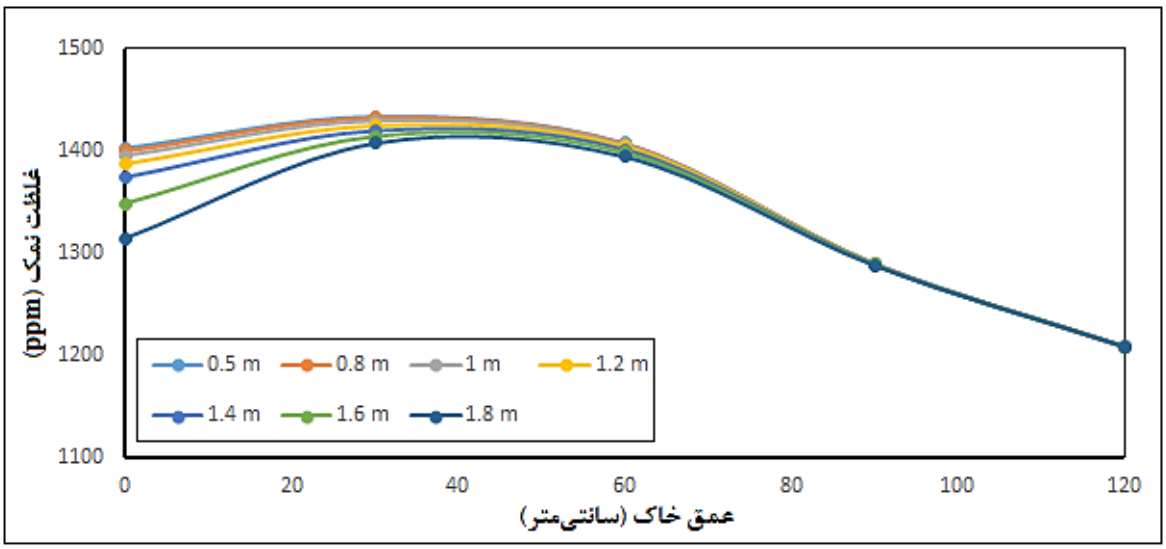
زهکشی کنترل‌شده تأثیر زیادی بر کل زهاب خروجی دارد و به‌هدر رفت کمتر آب خاک در فصول بارندگی منجر می‌شود (ویستروم و مسینگ ۲۰۰۷). مقایسه میزان زهاب خروجی در دو سامانه زهکشی آزاد و کنترل‌شده نشان داد که میزان زهاب خروجی در سامانه زهکشی کنترل‌شده دارای عمق یک متر ٦٢ درصد کمتر از مقدار متناظر آن در سامانه زهکشی آزاد بود. پژوهشی مشابه در خاک سیلتی‌لوم در سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۳ نشان داد که سامانه‌های زهکشی کنترل‌شده سبب کاهش قابل‌توجه حجم زهاب در مقایسه با زهکشی آزاد شدند (لالونده و همکاران ۱۹۹٦). مقایسه عمق سطح ایستابی در دو سامانه زهکشی D1.8L30 و D0.5L30 حاکی از آن است که با

افزایش عمق زهکش‌ها، عمق سطح ایستابی افزایش یافت. بااین‌حال سامانه‌های زهکشی کنترل‌شده باوجود سازه کنترل، سطح ایستابی را در فاصله کمتری از سطح زمین کنترل نمودند. بیشترین میزان SEW30 مربوط به سامانه زهکشی D0.5L30 بود که دارای کمترین عمق زهکش بود. با افزایش عمق زهکش، از مجموع آب اضافی لایه ۳۰ سانتی‌متری خاک کاسته شد. هرچند سامانه زهکشی کنترل‌شده با نگهداری آب در خاک سبب می‌شود رطوبت موردنیاز به‌سهولت در دسترس گیاه قرار گیرد، لکن عدم کنترل سطح ایستابی، در عمق مناسب تهویه منطقه ریشه را دچار مشکل خواهد کرد.

جدول ۱۰- نتایج شبیه‌سازی‌های مدل در سامانه زهکشی کنترل‌شده برای فاصله ثابت ۳۰ متر و عمق‌های مختلف

عمق (m)	بارندگی (cm)	نفوذ (cm)	زهاب (cm)	رواناب (cm)	عمق سطح ایستابی (cm)	SEW30 (cm)
۰/۵	۲۶/۴	۱۸/۷	۲/۷	۷/۷	۴۷/۰	۵۸۳/۸
۰/۸	۲۶/۴	۱۹/۹	۳/۴	۶/۴	۴۹/۵	۴۵۶/۵
۱	۲۶/۴	۲۰/۸	۴/۲	۵/۶	۵۲/۸	۳۵۲/۵
۱/۲	۲۶/۴	۲۱/۹	۵/۳	۴/۴	۵۸/۲	۳۰۳/۵
۱/۴	۲۶/۴	۲۳/۱	۶/۴	۳/۳	۶۳/۴	۲۶۶/۸
۱/۶	۲۶/۴	۲۴/۲	۷/۵	۲/۲	۶۸/۳	۲۰۶/۲
۱/۸	۲۶/۴	۲۵/۳	۹/۰	۱/۰	۷۴/۳	۱۲۱/۸

میزان غلظت نمک اعماق مختلف خاک در سامانه زهکشی کنترل‌شده تحت تأثیر عمق‌های مختلف زهکش و فاصله زهکش ۳۰ متر در شکل ٤ نشان داده شد. بیشترین میزان غلظت نمک در سامانه زهکشی کنترل‌شده با عمق ۰/۵ متر مشاهده شد. با افزایش عمق زهکش، همراه با افزایش میزان زهاب خروجی، مقدار قابل‌توجهی نمک تخلیه و از غلظت نمک در اعماق مختلف خاک کاسته شد. با افزوده شدن عمق خاک در کلیه سامانه‌های زهکشی، میزان غلظت نمک کاهش یافت به‌طوری‌که در عمق ۱۲۰ سانتی‌متری خاک، میزان غلظت نمک در کلیه سامانه‌های زهکشی باهم برابر و معادل ۱۲۰۸ ppm بود.



شکل ۵- میزان غلظت نمک در اعماق مختلف خاک در سامانه زهکشی کنترل‌شده با عمق‌های مختلف

مقادیر کل بار نمک خروجی (کیلوگرم در هکتار) در سامانه زهکشی کنترل‌شده تحت تأثیر اعماق مختلف در جدول (۱۱) ارائه شد. با توجه به اینکه روند تخلیه نمک تابعی از میزان زه‌آب خروجی است، با افزایش عمق زهکش

میزان زهاب و متناسب با آن میزان کل بار نمک خروجی افزایش یافت. درنتیجه، سامانه زهکشی کنترل‌شده با کنترل سطح ایستابی در اعماق کم مانع از خروج آب از پروفیل خاک شده و از میزان بار نمک خروجی کاسته است. به‌همین دلیل، زهکشی کنترل‌شده در مقایسه با سامانه زهکشی آزاد، نقش مهمی در حفاظت از محیط‌زیست پایین‌دست ایفا خواهد کرد.

جدول ۱۱- روند تغییرات میزان نمک خروجی (کیلوگرم در هکتار) در سامانه زهکشی کنترل‌شده تحت تأثیر اعماق زهکش مختلف و فاصله زهکش ۳۰ متر

عمق زهکش (m)	۰/۵	۰/۸	۱	۱/۲	۱/۴	۱/۶	۱/۸
کل بار نمک خروجی	۵۵۳/۳	۶۸۹/۲	۸۵۵/۹	۹۴۷/۶	۱۰۳۳/۷	۱۲۰۹/۳	۱۳۳۹/۸

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پس از اثبات قابلیت مدل DRAINMOD برای برآورد سطح ایستابی و شوری زهاب طی فصول کشت زمستانه در اراضی شالیزاری تجهیز و نوسازی شده دارای زهکشی زیرزمینی، تأثیر سامانه‌های زهکشی آزاد و کنترل‌شده از جنبه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. در سامانه زهکشی آزاد، با افزایش فاصله زهکش‌ها، عمق زهاب کاهش‌یافته و رواناب سطحی زیاد شد. بر اساس نتایج، فواصل زهکش بیشتر از ۳۰ متر در سیستم زهکشی آزاد و فواصل زهکش بیشتر از ۲۰ متر در سیستم زهکش کنترل شده به دلیل عدم کنترل مناسب سطح ایستابی و فراهم نکردن شرایط مناسب برای ذخیره بارندگی‌ها، برای منطقه مطالعه مناسب نخواهند بود. افزایش عمق در سامانه زهکشی آزاد سبب شد کل میزان بارندگی در خاک نفوذ یافته و به‌دنبال آن حجم زهاب افزایش و از میزان رواناب کاسته شود. زهکش‌های با عمق کم منجر به افزایش احتمال ماندابی شدن در بارندگی‌های شدید شدند. با افزایش عمق زهکش، میزان کل بار نمک خروجی در دو سامانه زهکشی آزاد و کنترل‌شده به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت. مقایسه میزان بار نمک خروجی در دو سامانه زهکشی آزاد و کنترل‌شده بیانگر این مطلب است که سامانه زهکشی کنترل‌شده به نحو بهتری میزان زهاب خروجی را کنترل و از خروج نمک جلوگیری کرده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی غلظت نمک در اعماق مختلف خاک در دو سیستم زهکشی آزاد و کنترل شده حاکی از افزایش غلظت نمک در سیستم زهکشی کنترل شده نسبت به سیستم زهکشی آزاد است.

فهرست منابع

۱. بخت‌فیروز، ع. ۱۳۹۰. بررسی اثر سامانه‌های زهکشی بر گسیل گاز متان و دی‌اکسید کربن از شالیزارها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ۵۰ صفحه.

۲. حسین‌پور، ف.، نوری م.ر. امامزاده‌ئی.، م. خدامباشی امامی. و م. زمانیان. ۱۳۹۱. تأثیر زهکشی کنترل‌شده بر عملکرد سویا و ارتقاء کارایی مصرف آب. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. (٦) ۱. ۲۰-۱۱.

۳. درزی نفت‌چالی، ع. ۱۳۹۵. تحلیل تأثیر مدیریت زهکشی بر شوری زه¬آب در تناوب کشت برنج¬- کلزا. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. (۱۰) ٤. ۵۳۱- ۵۲۰.

٤. دوستی‌پاشاکلایی، س.، ع. شاهنظری. و م. جعفری‌تلوکلایی. ۱۳۹۵. بررسی عملکرد کلزا به‌عنوان کشت دوم در اراضی شالیزاری دارای زهکش زیرزمینی. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک. (۱) ۲٤. ۲٤۹- ۲۳۷.

۵. علیزاده، ا. ۱۳۸۰. رابطه آب‌وخاک و گیاه، چاپ دوم، انتشارات آستان قدس رضوی، ۳۵۳ ص.

٦. علیزاده، م.، پ. افراسیاب.، م.ر. یزدانی.، ع. لیاقت. و م. دلبری. ۱۳۹۵. ارزیابی اثر فاصله و عمق زهکش‌های زیرزمینی در اراضی شالیزاری، به منظور توسعه کشت دوم در یک مزرعه نمونه در گیلان. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. (۲) ۳۰. ۱۷۲– ۱٦۰.

۷. محجوبی، آ. ۱۳۹۱. بررسی اثرات زهکشی کنترل‌شده بر روی شوری خاک، مدیریت آبیاری و عملکرد نیشکر در کشت وصنعت امام خمینی. پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز. ۱۸۰ صفحه.

۸. محجوبی، آ.، ع. هوشمند.، ع. ناصری. و س. جعفری. ۱۳۹۲. اثر زهکشی کنترل‌شده بر روی کاهش ضریب زهکشی و حجم زهاب خروجی در مزارع نیشکر کشت و صنعت امام خمینی. نشریه آب‌وخاک (علوم و صنایع کشاورزی)، (٦) ۲۷: ۱۱٤٤– ۱۱۳۳.

۹. نوذری، ح.، آ. پورصمدی. و ع. زالی. ۱۳۹۵. بررسی آزمایشگاهی تأثیر آرایش منافذ لوله‌های زهکش بر میزان نمک زه‌آب خروجی. نشریه دانش آب و خاک، (۳) ۲۷: ۱۹۸– ۱۸۷.

10. Ayars, J.E., Christen, E.W., and J.W. Hornbuckle. 2006. Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture. Agric. Water Manage. 86 (1–2), 128–139.
11. Ayars, J.E., Patton, S.H., and R.A. Schoneman. 1987. Drain water quality from arid irrigated lands. Proc., ASAE 5th National Drain Symp. W.R. Johnston, ed., American Society of Agricultural and Engineers, St. Joseph, MI, 220–230.
12. Breve M.A., Skaggs R.W., Parsons J.E., Gilliam J.W., Mohammad A.T., Chescheir G.M., and R.O. Evans, 1997 .Field testing Of DRAINMOD-N. Soil & Water Div. of ASAE. l40 (4):1077-1085.
13. Christen E., and D. Skehan. 2001. Design and management of subsurface horizontal drainage to reduce salt loads. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 127(3):148-155.
14. F.A.O, 1986, Drainage testing, Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage paper, No. 28, Rome, Italy.
15. Grismer, M.E. 1993. Subsurface drainage system design and drain water quality. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 119 (3):537-543.
16. Hornbuckle, J.W., Christen, E.W., and R.D. Faulkner. 2007. Evaluating a multilevel subsurface drainage system for improved drainage water quality. Agriculture Water Management, 89(3):208–216.
17. Helwig, T.G., Madramootoo, C.A., G.T. Dodds. 2002. Modeling nitrate losses in drainage water using DRAINMOD 5, 0. Agr. Water Manage. 56(2), 153-168.
18. Jafari-Talukolaee, M., Shahnazari, A., Ahmadi, M. Z., and A. Darzi-Naftchali. 2015. Drain discharge and salt load in response to subsurface drain depth and spacing in paddy fields. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 141(11):4010-5017.
19. Jury, W.A. 1975. Solute travel-time estimates for tile-drained fields. I. Theory. Soil Science Society of America Proceeding, 39: 1020–1023.
20. Kandil, H. M. 1992. DRAINMOD-S: A Water management model for irrigated arid lands. PhD Thesis. North Carolina State University.
21. Kandil, H.M., Skaggs, R.W., Dayem, S. A., and Y. Aiad. 1995. DRAINMOD-S: Water management model for irrigated arid lands, crop yield and applications. Irrigation and Drainage Systems, 9(3): 239-258.
22. Legates, D.R., and G.J. Mc Cabe. 1999. Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, 35: 233-241.
23. Lalonde, V., Madramootoo, C.A., Trenholm, L., and R.S. Broughton. 1996. Effects of controlled drainage on nitrate concentrations in subsurface drain discharge. Agriculture Water Management, 29: 187–199.

24. Malik, A., Colmer, T.D., Lambers, H., and M. Schortemyer. 2001. Changes in physiological and morphological traits of roots and shoots of wheat in response to different depths of water logging. Australian J. Plant. Physiol., 28: 1121-1131.
25. Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models, A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10: 282-290.
26. Skaggs, R.W. 1982. Field evaluation of a water management simulation model. Transactions of the ASAE, 25(4): 666 – 674.
27. Skaggs, R.W. 1980. Drainmod Reference Report; Methods for design and evaluation of drainage water management systems for soils with high water tables, USDA, SCS, North Carolina State University, Raliegh,p. 185.
28. Skaggs, R.W., Youssef, M.A and G.M. Chescheir. 2012. DRAINMOD: model use, calibration and validation. Transactions of the ASABE. 55 .2:1509-1522.
29. Tan, C.S., and T.Q. Zhang. 2011. Surface runoff and sub-surface drainage phosphorus losses under regular free drainage and controlled drainage with sub-irrigation systems in southern Ontario. Can J Soil Sci. 91:349–359.
30. Visser, E.J.W., and L.A.C.J Voesenek. 2004. Acclimation to soil flooding sensing and signal transduction. Plant Soil, 244: 197-214.
31. Voltman, W.F., and H.C. Jansen. 2003, Controlled drainage for integrated water management. 9th International drainage workshop, Utreched. The Netherlands. Paper No 125.
32. Wahba, M.A.S., and E.W. Christen. 2006. Modeling subsurface drainage for salt load management in southeastern Australia. Irrigation and Drainage Systems, 20(2-3): 267-282.
33. Wahba, M.A.S., Christen, E.W., and M.H. Amer. 2005. Irrigation water saving by management of existing subsurface drainage in Egypt. Irrig. Drain. 54: 1–11.
34. Wang, X., Mosley, C.T., Frankenberger, J.R., and E.J. Kladivko. 2006. Subsurface drain flow and crop yield predictions for different drain spacings using DRAINMOD. Agricultural Water Management, 79(2):113-136.
35. Wesström, I., Joel, A. and I. Messing. 2014. Controlled drainage and subirrigation–A water management option to reduce non-point source pollution from agricultural land. Agriculture, ecosystems & environment, 198, 74-82.
36. Wesstrom, I., and I. Messing. 2007. Effects of Controlled drainage on N & P losses and N dynamics in loamy sand with spring crops. Agriculture Water Management, 87: 229-240.
37. Wesstrom, I., Messing, I., Linner, H., and J. Lindstrom. 2001. Controlled drainage- effects on drain outflow and water quality. Agricultural Water Management, 85-100.
38. Zhang, H., Turner, N.C., and M.L Poole. 2004. Yield of wheat and canola in the high rainfall zone of south-western Australia in years with and without a transient perched water table. Austr. J. Agric. Res. 55(4): 461-470.

Effect of Free and Controlled Drainage on Water Balance and Soil and Drainage Water Salinity under Rainfed Canola in Paddy Fields

K. Davoodi, A. Darzi- Naftchali [1] *, and Gh. Aghajani- Mazandarani

MSc. in Irrigation and Drainage Engineering, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
k.davoodi32@gmail.com
Assisstant Professor, Water Engineering Department Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
abdullahdarzi@yahoo.com
Faculty member, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
q_aqajani@yahoo.com

Abstract

Subsurface drainage, as a structural modification to improve the productivity of paddy fields, changes the hydrology of the fields. In this research, the response of water balance and drainage water salinity to free and controlled subsurface drainage systems during winter cropping in paddy fields was investigated by using the DRAINMOD-S model. The data were collected during two canola growing seasons (2015-2017) from a paddy field with a subsurface drainage system (drain depth of 0.65 m and drain spacing of 30 m). The calibrated and validated model was applied to explore effects of conventional and controlled (by controlling water table depth at 40 cm)- subsurface drainage on water balance and soil and drainage water salinity. The model showed acceptable capability for simulating water table depth and drainage water salinity during calibration and validation processes. Based on the simulations, for drain depth of 1.5 m, increase in drain spacing from 30 to 70 m resulted in 805.3 and 741.6 kg ha^{-1} decrease in total salt load under free and controlled drainage systems, respectively. For drain spacing of 30 m, increase in drain depth from 0.5 to 1.8 m, caused 2.7- 9 mm and 5.1- 14.3 mm increase in drainage water in controlled and free drainage systems, respectively. Simulation results indicated that, to decrease salt load, a drainage system with 30 m drain spacing and 0.5 m drain depth is suitable for both free and controlled drainage conditions. Based on the results, controlled drainage can be used as a management tool to diminish environmental problems in heavy paddy soils from the viewpoint of salt load and drainage water volume.

Keywords: DRAINMOD-S, Deep percolation, Water table depth

1- Corresponding author: Sari- Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
*- Received: February 2018 and Accepted: August 2018