



بررسی اثر تبخیر بر سطح ایستابی و ضریب زهکشی با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-2D (مطالعه موردی: زهکش حائل دشت قزوین)

مهدیه لطیفی^۱، مسعود سلطانی^{۲*}، هادی رمضانی اعتدالی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

* نویسنده مسئول: msoltani@eng.ikiu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۰۲

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۴/۱۳

چکیده

برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی شیرین، مشکلات زیادی ایجاد می‌کند که مهم‌ترین آن‌ها پیشروی آب زیرزمینی شور به سمت اراضی بالادست در دشت‌ها و افزایش غلظت نمک در شورهزار، در شرایط آب زیرزمینی کم‌عمق است. برای جلوگیری از این اتفاق، از زهکش حائل برای کنترل و کاهش گرادیان هیدرولیکی آب شور به سمت منابع آب زیرزمینی شیرین استفاده می‌شود. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، علاوه بر زهکش حائل، تبخیر نیز سهم مهی در ایجاد افت بار هیدرولیکی دارد. در این تحقیق از نرم‌افزار HYDRUS-2D برای بررسی اثر و سهم تبخیر بر عمق آب زیرزمینی و نرخ ضریب زهکشی در زهکش حائل منطقه آبیک قزوین استفاده شده است. این شورهزار در جنوب‌شرقی استان قزوین واقع شده و هدف از اجرای زهکش حائل در این منطقه، پایین انداختن سطح آب زیرزمینی شور و کنترل پیشروی شوری در منطقه می‌باشد تا اراضی بالادست زهکش با آب‌شویی خاک در اثر بارش و جریان آب زیرزمینی و درنتیجه خروج این زهاب به‌وسیله زهکش به‌تدريج اصلاح شوند. مدل‌سازی برای منطقه شورهزار مرکزی به مدت ۹۰ روز و برای سه بافت خاک رسی، لومی، شنی و چهار تیمار نرخ تبخیر شامل: نرخ تبخیر کم، متوسط و زیاد (۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر بر روز) و بدون تبخیر، انجام گرفته است. نتایج نشان داد در خاک رسی، تبخیر سهم زیادی در ایجاد افت و کاهش ضریب زهکشی دارد. به‌طوری‌که با افزایش نرخ تبخیر از ۰/۰۲ میلی‌متر در روز میزان افت آب زیرزمینی ۱۶/۵ درصد افزایش یافته و ضریب زهکشی نیز ۲۰/۶ درصد کاهش می‌یابد. در خاک لومی این مقادیر به‌ترتیب ۱/۹ و ۱/۷ درصد بوده است. درنتیجه در خاک لومی تأثیر تبخیر کمتر بوده و از تبخیر با نرخ کم چشم‌پوشی می‌شود. نرخ کم و متوسط تبخیر در خاک شنی در ایجاد افت در سطح آب زیرزمینی و کاهش ضریب زهکشی بی‌تأثیرنده؛ اما نرخ تبخیر زیاد با افزایش ۶/۹ درصد افت در سطح آب زیرزمینی و ۱۵/۷ درصد کاهش در ضریب زهکشی، مؤثر بوده و لازم است با اندازه‌گیری دقیق نرخ تبخیر، مقدار آن در شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شود و قابل چشم‌پوشی نیست. نتایج تحقیق حاضر با کارهای محققانی که در زمینه‌های مرتبط کارکرده‌اند، همخوانی دارد و پیشنهاد می‌شود در مطالعات زهکشی به اثر تبخیر به‌خصوص در خاک‌های رسی توجه ویژه‌ای صورت گیرد.

واژه‌های کلیدی: افت آب زیرزمینی، رس، سهم تبخیر، شن، لوم.

حال) در مورد گستره زمین‌های شور و ماندابی در ایران وجود

مقدمه

ایران از جمله کشورهایی است که سطح بزرگی از اراضی ندارد اما زابلکس در سال ۱۹۸۵ برآورد کرده که حدود ۲۳/۵ آن متأثر از املاح است. آمار دقیق و روزآمدی (متناسب با زمان میلیون هکتار (۱۴/۲ درصد مساحت کل و ۳۰ درصد مساحت

افت سطح این آب‌ها می‌شود (شمسی‌پور و محمدی، ۱۳۸۵). همچنین در بررسی اثر نوسانات اقلیمی و برداشت آب بر سطح ایستابی در منطقه دامنه در استان اصفهان، با استفاده از GIS نتایج نشان داد که ارتباط تراز سطح آب، علاوه بر برداشت آب از آبخوان با تبخیر نیز رابطه معناداری دارد (آروین و همکاران، ۱۳۹۵).

در تحقیق دیگری نیز به جداسازی سهم تبخیر از تعرق و بررسی نقش هر یک در ایجاد افت در آب زیرزمینی در نیمه‌خشک پرداخته شده است. نتایج نهایی نشان داد که در نواحی نیمه‌خشک با پوشش گیاهی کم، تبخیر نقش عمده‌ای در پایین‌انداختن سطح ایستابی دارد (Balugani et al., 2017). علاوه در پژوهشی دیگر اثر تبخیر از سطح آبخوان‌ها در شش نوع بافت خاک گراول، شن‌ریز، لوم‌شنی، لوم‌سبک، لوم معمولی و لوم سنگین بررسی شده است. نتایج نشان داد که میزان تبخیر از سفره علاوه بر پتانسیل تبخیر به زبری سطح تبخیر، ظرفیت گرمایی خاک، هدایت حرارتی خاک، رنگ خاک و ضریب آلبیدوی خاک نیز بستگی دارد، که این مشخصات در خاک‌هایی با بافت‌های متفاوت، متفاوت است. نتایج تجربی در این آزمایش نشان داده است با کوچکتر شدن سایز ذرات خاک مقدار تبخیر نیز کاهش می‌یابد. همچنین ظرفیت حرارتی و هدایت حرارتی خاک نیز کاملاً در ارتباط با ترکیب مکانیکی ذرات خاک است و با کاهش سایز ذرات خاک، میزان رطوبت اشباع در خاک و به دنبال آن ظرفیت حرارتی خاک افزایش می‌یابد به این معنا که در اثر گرمشدن سطح، دما کمتر بالا می‌رود حرکت مولکول‌های آب آهسته‌تر است و تبخیر کمتری اتفاق می‌افتد. علاوه رنگ خاک بر ضریب آلبیدوی سطح و دریافت تابش خورشیدی توسط زمین مؤثر است، هرچه خاک تیره‌تر باشد، گرمای بیشتری توسط خاک جذب می‌شود دمای خاک زودتر افزایش می‌یابد و تبخیر بیشتری اتفاق می‌افتد (Hu et al., 2018). یو و همکاران نیز در پژوهشی که بر روی منطقه آبیاری هیتاو چین انجام شد، با شبیه‌سازی نشان دادند نفوذ و تبخیر دو عامل اصلی در نوسانات سطح ایستابی است که ۹۲ درصد کل تغذیه و تخلیه از آب‌های زیرزمینی منطقه را شامل می‌باشد (Yue et al., 2016).

دشت‌ها) از اراضی کشور بهنوعی متأثر از فرآیند شوری است. استان‌های خراسان، خوزستان و مازندران دارای بیشترین خاک‌های تحت‌تأثیر املاح هستند. بیشترین وسعت خاک‌های بالتلایی شور در مازندران، خراسان، خوزستان و سیستان و بلوچستان وجود دارد. از کل ۲۳/۵ میلیون هکتار، ۷/۷ میلیون هکتار آن غیرقابل اصلاح تشخیص داده شده است (جعفری و ستوده نیا، ۱۳۹۵). از سوی دیگر، رشد جمعیت و نیاز به تأمین منابع غذایی برای آن را نیز نمی‌توان نادیده گرفت. بهمین دلیل، استفاده از منابع آب زیرزمینی در کشور روزبه روز در حال افزایش است. درنتیجه، میزان برداشت از آبخوان‌ها بیشتر از تغذیه و سطح جایگزینی سفره شده و سطح آب در سفره زیرزمینی دچار افت خواهد شد. افت سفره آب زیرزمینی مشکلات بسیاری به همراه دارد که از آن جمله می‌توان به خشکشدن چاه‌های نیمه عمیق و نیاز به حفر چاه عمیق‌تر برای دسترسی به آب، فشرده‌گی خاک و کاهش ضریب ذخیره سفره در اثر نشست خاک در دشت و درنهایت کاهش میزان جریان آب زیرزمینی و کاهش میزان خروجی دشت‌ها و افزایش شوری آبخوان اشاره نمود (جهاد کشاورزی قزوین، ۱۳۸۹). درنتیجه برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی در شورهزارها باعث افت شدید آب در آبخوان، افزایش شوری آب آبخوان و کاهش میزان خروجی دشت‌ها می‌شود. آب شور موجود در آبخوان که نمی‌تواند از دشت خارج شود، بالا مده و اراضی را شور و ماندابی می‌کند. در این موقع احداث یک زهکش حائل به خروج جریان شور از شورهزار کمک کرده و باعث افت سطح آب زیرزمینی شور شده و از ماندابی و شور شدن اراضی جلوگیری می‌کند. ولی علاوه بر نقش کلیدی این سازه در پایین‌انداختن سطح آب زیرزمینی، تبخیر نیز به پایین‌انداختن سطح ایستابی کمک می‌کند.

در پژوهشی به بررسی تأثیر تبخیر و تعرق در میزان افت سطح ایستابی و فواصل زهکش‌های پلکانی پرداخته شده است و نتایج نشان داد در مناطق با شدت بالای تبخیر و تعرق این دو عامل نقش مؤثری در افت سطح آب زیرزمینی داشته و نرخ افت را افزایش می‌دهند (حمزه و همکاران، ۱۳۸۹). در بررسی‌های انجام‌شده بر پدیده خشکسالی نیز گزارش شد که خشکسالی به‌طور غیرمستقیم و از طریق کاهش تغذیه منابع آب زیرزمینی و افزایش دما و افزایش تبخیر موجب آسیب و

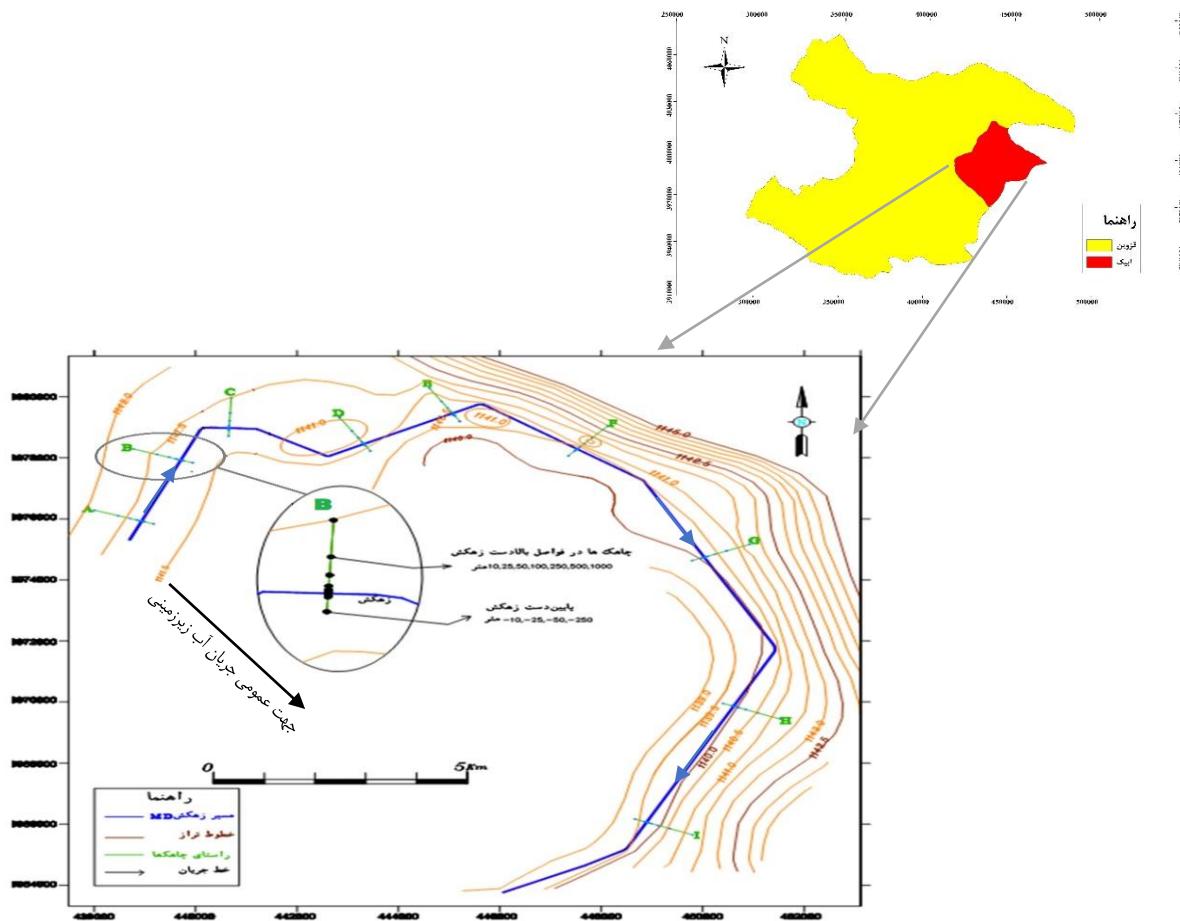
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شورهزار مرکزی قزوین با محدوده جغرافیایی طول شرقی ۳۸۰ تا ۴۲۰ کیلومتر و عرض شمالی ۳۹۲۰ تا ۳۹۸۰ کیلومتر (برحسب UTM) واقع در قسمتی از جنوب‌شرقی دشت قزوین به مساحت ۶۴۴۰۰ هکتار با ارتفاع متوسط ۱۱۳۵ تا ۱۱۴۵ متر از سطح دریا بوده و دارای اقلیم نیمه‌خشک سرد است. شبیب اراضی در این نواحی از ۰/۱ تا ۰/۳ درصد متغیر است. وسعت هسته‌ی مرکزی این شورهزار، قبلًا حدود ۱۰۰۰۰ هکتار بوده که امروزه به ۲۰۰۰۰ هکتار افزایش یافته است. علت این پدیده را می‌توان پایین‌رفتن کلی سطح ایستابی در دشت و کاهش شبیب هیدرولیکی به‌سمت خروجی دشت نسبت داد (جهاد کشاورزی قزوین، ۱۳۸۹).

در این منطقه زهکش حائل احداث شده که هدف از اجرای آن، پایین‌انداختن سطح آب زیرزمینی شور و کنترل پیشروی شوری در منطقه می‌باشد تا اراضی بالادست زهکش با آبشویی خاک در اثر بارش و جریان آب زیرزمینی و درنتیجه خروج این زهاب به‌وسیله زهکش به‌تدريج اصلاح شوند. ولی در پایین‌انداختن سطح ایستابی علاوه بر زهکش حائل، تبخیر نيز مؤثر است. در مسیر زهکش حائل شورهزار که به شکل نعل اسي است، برای کنترل عملکرد زهکش، تعداد ۹۹ چاهک مشاهداتی در مقاطع (A) تا (I) عمود بر زهکش حفر شده‌اند، جهت جریان در زهکش از مقطع A به سمت مقطع I می‌باشد، مقطع B برای مدل‌سازی انتخاب شد. دلیل انتخاب مقطع B وابسته به شرایط منطقه و تأثیر مورد انتظار از زهکش است. به‌این‌ترتیب که مقطع B به‌دلیل قرار گرفتن در محدوده ابتدایی مسیر زهکش، کمتر تحت تأثیر جریان بالادستی زهکش قرار گرفته است. شکل ۱ مسیر زهکش و محل قرارگیری مقاطع را نشان می‌دهد. از چاهک‌های موجود در مقطع B به‌عنوان نقاط مشاهداتی برای کنترل پایین‌افتادگی در اثر تبخیر استفاده شده است. چاهک‌ها در فواصل ۱۰، ۲۵ و ۱۰۰ متری پایین‌دست و ۵۰، ۲۵ و ۱۰۰ بالادست قرار گرفته‌اند (به‌منظور یکسان‌سازی مدل‌سازی در بالادست و پایین‌دست، چاهکی نیز در ۵۰ متری پایین‌دست زهکش در نرم‌افزار تعریف شد).

علم مطالعه روابط آب‌وخاک و معادلات پیچیده حاکم بر این روابط نیاز به استفاده از نرم‌افزارها را اجتناب‌ناپذیر نموده است. معادلات ناحیه غیراشباع خاک، تابع متغیرهای بیشتری نسبت به ناحیه اشباع بوده و همچنین تأثیر بسزایی در چرخه هیدروژئولوژیکی دارد. به همین دلیل مدل‌سازی هم‌زمان ناحیه اشباع و غیراشباع خاک به کمک انواع نرم‌افزارهای آب زیرزمینی که معادلات حاکم بر جریان آب و انتقال املال را به صورت عددی و یا تحلیلی حل می‌کنند، دقت نتایج شبیه‌سازی را در حد قابل قبولی بالا می‌برد (نخعی، ۱۳۹۸؛ میرعباسی نجف‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۵؛ نیکبخت و همکاران، ۱۳۹۵). از مهم‌ترین نرم‌افزارهای موجود برای شبیه‌سازی روابط حرکت آب، گرما و املال در محیط مخلخل اشباع و غیراشباع، می‌توان به نرم‌افزار HYDRUS اشاره کرد (Sena et al., 2011). در تحقیقی برای شبیه‌سازی انتقال آب و نمک در پروفیل خاک (منطقه سیستان) از HYDRUS-1D استفاده شده است. نتایج گویای دقت سیار بالای مدل در این امر بوده است (محمدی و دلبری، ۱۳۹۴). همچنین به‌وسیله HYDRUS به شبیه‌سازی تغییرات شوری خاک در مزارع نی‌ریز فارس پرداخته شده است (سلمان‌پور و همکاران، ۱۳۹۷). در پژوهشی دیگر برای شبیه‌سازی سامانه‌های زهکشی خشک از نرم‌افزار HYDRUS-2D استفاده شده است. نتایج خروجی HYDRUS مدل و شاخص‌های آماری نشان داده‌اند که مدل می‌تواند حرکت آب و انتقال شوری را برای زهکشی خشک در شرایط آزمایش لایسیمتری و با دقت معقولی برآورد کند (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۶). زهکشی زیرزمینی در سالیزارها نیز با استفاده از HYDRUS-2D شبیه‌سازی شده است. این مدل‌سازی برای عمق‌ها و فواصل مختلف زهکش‌ها و بافت‌های Ebrahimian and Noori, 2015 متفاوت خاک نتایج قابل قبولی ارائه داده است. با بررسی پژوهش‌های گذشته، مشخص شد که سهم تبخیر از سطح خاک کمتر در طراحی و مدیریت سیستم‌های زهکشی موردنوجه قرار گرفته است. بنابراین هدف از این تحقیق بررسی اثر تبخیر در ایجاد افت در آب زیرزمینی و کاهش ضریب زهکشی است و این عمل برای سه نوع بافت خاک (رس، لوم و شن) و سه نرخ تبخیر متفاوت کم، متوسط و زیاد و به‌وسیله نرم‌افزار HYDRUS که کارایی بسیار زیادی در شبیه‌سازی دارد، انجام شده است.



شكل 1- منطقه موردمطالعه و مسیر زهکش حائل.

مایع را درنظر می‌گیرد بعلاوه انتقال املاح برای شرایط غیرتعادلی فیزیکی ممکن است با درنظر گرفتن فرمول نویسی دو ناحیه‌ای یا تخلخل دوگانه که فاز مایع را به ناحیه متحرک و غیرمتحرک تقسیم می‌کند، در نظر گرفته شود (Senja.et.al., 2011).

همان‌طور که گفته شد HYDRUS از معادله‌ی ریچاردز (۱) برای شبیه‌سازی جریان آب استفاده می‌کند که برای محیط هم‌سان به شرح زیر است:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r K(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] \quad (1)$$

که در آن، θ رطوبت حجمی آب خاک ($m^3 m^{-3}$)، h پتانسیل
فشاری آب (m)، t زمان (day)، r محور افقی، z محور عمودی
و $K(h)$ هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک ($m day^{-1}$) است.
(بابوردی، ۱۳۸۵).

نرم افزار HYDRUS-2D

HYDRUS یک بسته نرم افزاری تحت سیستم عامل ویندوز، برای شبیه سازی حرکت آب، گرما و املاح، جذب آب توسط ریشه و همچنین رشد ریشه در محیط های متخلخل دو بعدی و سه بعدی است که توسط Simunak et al. (2006) در آزمایشگاه شوری خاک امریکا بسط داده شد. این بسته شامل دو بخش کامپیوتربی محاسباتی و گرافیکی استانیون نرم افزار یک مدل اجزای محدود است و توانایی تخمین خصوصیات خاک به روش حل معکوس را دارد. این مدل می تواند جریان آب و املاح را در یک صفحه افقی، عمودی و به صورت سه بعدی شبیه سازی کند. نرم افزار HYDRUS به صورت عددی معادله ریچاردز را برای جریان در محیط های اشباع و همچنین معادلات انتقال-انتشار را برای انتقال املاح و گرما حل می کند. مدل HYDRUS معادله انتقال املاح و همچنین، واکنش های غیر خطی و غیر تعادلی را بین فاز های چامد و مایع و واکنش های خطی متعادل بین فاز های گاز و

روش مطالعاتی

HYDRUS تولید گردید و نتایج زیر از تحلیل نمودارهای مذکور استخراج گردیده است.

سطح آب زیرزمینی

نتایج مدل‌سازی‌ها نشان داد اثر تبخیر و مقادیر مختلف آن در پایین انداختن سطح ایستابی معنی‌دار و در بافت‌های مختلف خاک، متفاوت است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

سطح آب زیرزمینی در خاک رسی

تبخیر در پایین انداختن سطح آب زیرزمینی در خاک رسی بسیار مؤثر است. با توجه شکل ۲ و شکل ۳ که نمودارهای پایین‌دست و بالادست زهکش را نشان می‌دهند، در تیمار بدون تبخیر زهکش حائل باعث افت سطح آب زیرزمینی شده است، این اثر در مقاطع نزدیک به زهکش بیشتر بوده و به مرور و با فاصله از زهکش، کمتر شده است. زمانی که تبخیر به میزان کم، متوسط و یا زیاد در منطقه اعمال می‌شود، در تمام مقاطع، سطح ایستابی بیشتر پایین می‌افتد و اثر زهکشی تشدید می‌شود. برای بررسی بیشتر، یکی از چاهک‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. چاهک BD3 (منحنی ج) در فاصله ۵۰ متری در پایین‌دست زهکش قرار گرفته است. در پایان ۹۰ روز مدل‌سازی، در حالت بدون تبخیر، سطح ایستابی در عمق ۰/۲۱۳ متری سطح زمین واقع شده است. اگر روزانه ۰/۲ میلی‌متر تبخیر از سطح خاک وجود داشته باشد، در پایان دوره ۹۰ روزه، سطح ایستابی به ۲/۵۵ متری سطح زمین می‌رسد. با افزایش تبخیر از ۰/۰۲ میلی‌متر بر روز، افت سطح ایستابی ۱۶/۵ درصد افزایش خواهد یافت. اگر میزان تبخیر روزانه به ۱ میلی‌متر بر سد در پایان دوره، سطح ایستابی به ۳/۶۱ متری زمین می‌رسد؛ بنابراین ۱ میلی‌متر بر روز افزایش در تبخیر افت را ۴۱ درصد افزایش می‌دهد. اگر تبخیر روزانه به ۲/۵ میلی‌متر بر سد، سطح آبخوان به ۴/۵۳ متری زمین می‌رسد که نسبت به حالت بدون تبخیر، ۵۳ درصد افزایش افت داشته است.

به منظور بررسی تأثیر تبخیر در انواع بافت خاک‌ها، علاوه بر بافت منطقه مذکور که رس است، خاک‌های شنی و لومی نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مدل‌سازی به مدت ۹۰ روز برای هر بافت خاک در چهار حالت بدون تبخیر، با نرخ تبخیر کم، متوسط و زیاد (۰/۰۲، ۰/۵ و ۰/۲۵ میلی‌متر بر روز) انجام گرفت. جریان‌های ورودی بالادست و پایین‌دست زهکش نیز با توجه به هدایت هیدرولیکی مشخص برای هر بافت خاک و هد فشاری در اولین و آخرین چاهک در هر دو سمت زهکش (علوم بودن شرایط مرزی بالادست و پایین‌دست)، با استفاده از معادله بوسینسک، رابطه (۲) برای شرایط آبخوان آزاد، همگن و ایزوتروپ و با وجود ترم تغذیه و تخلیه (تبخیر)، تعیین گردید. (این کار به وسیله حل عمومی معادله دیفرانسیلی (۲) و انتگرال‌گیری نسبت به x انجام شده است، لازم به ذکر است تنها برای محاسبه نرخ جریان‌های بالادست و پایین‌دست شرایط جریان ماندگار فرض شده‌اند و شبیه‌سازی در نرم‌افزار برای حالت غیرماندگار صورت گرفته است).

$$-\nabla^2 h^2 = \frac{2s}{k} + \frac{2N_r^*}{k} \quad (2)$$

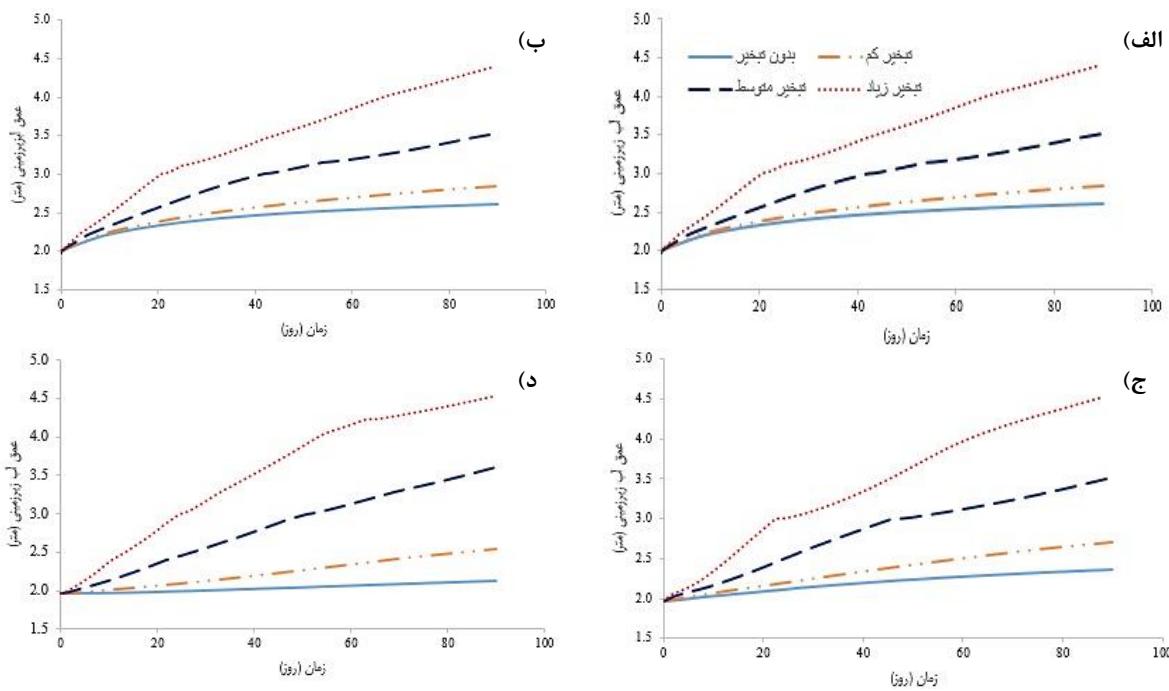
$$h^2 = -\frac{N_r^*}{k}x^2 + c_1x + c_2 \quad (3)$$

$$q = \frac{-N_r^*}{h}x + \frac{c_1k}{2h} \quad (4)$$

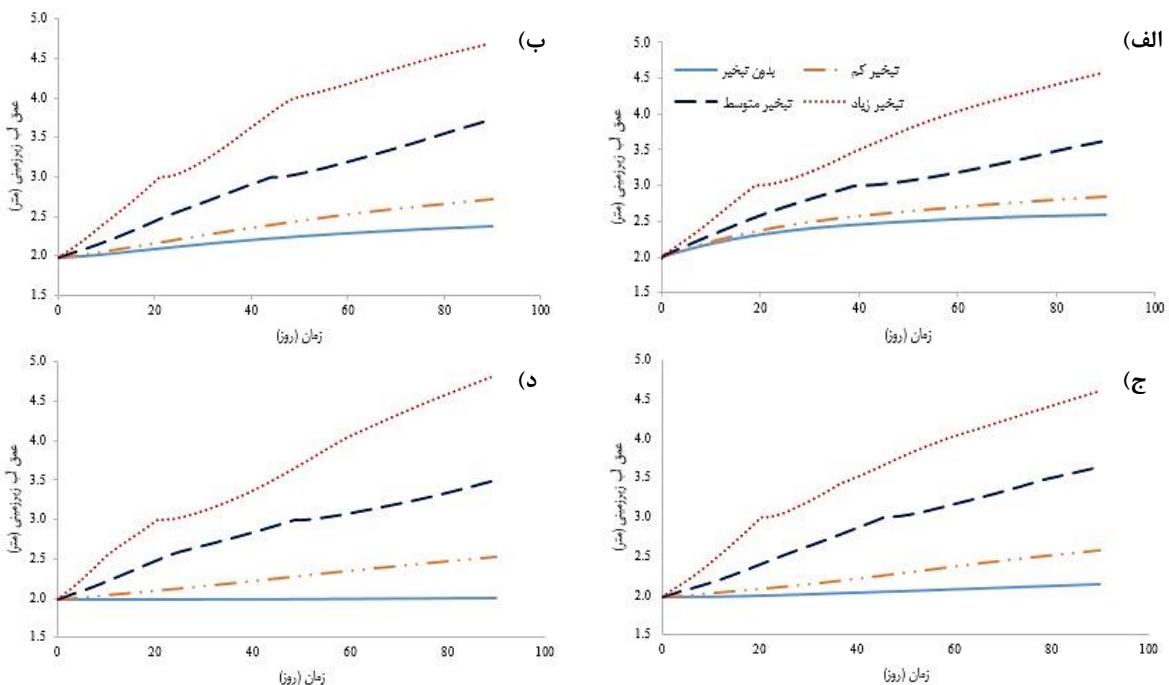
در این معادله h هد پیزومتری در چاهک‌ها (m)، s ضریب ذخیره آبخوان (N_r^*) جمع جبری ورودی و خروجی آبخوان ($m day^{-1}$)، k هدایت هیدرولیکی اشباع خاک ($m day^{-1}$)، x فاصله نقطه موردنظر از زهکش (m) c_1 و c_2 ثوابت انتگرال‌گیری و q فلاکس جریان ورودی ($m^3 m^{-2} day^{-1}$) می‌باشد (شمسایی، ۱۳۷۷).

نتایج و بحث

طبق روش ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها و با اعمال مقادیر جریان‌های ورودی و مقادیر متفاوت تبخیر نمودارهای سطح آب زیرزمینی و ضریب زهکشی توسط نرم‌افزار



شکل ۲- عمق سطح آب زیرزمینی در چاهک‌های مشاهداتی پایین دست. (الف) فاصله ۱۰ متری، (ب) فاصله ۲۵ متری، (ج) فاصله ۵۰ متری و (د) فاصله ۱۰۰ متری



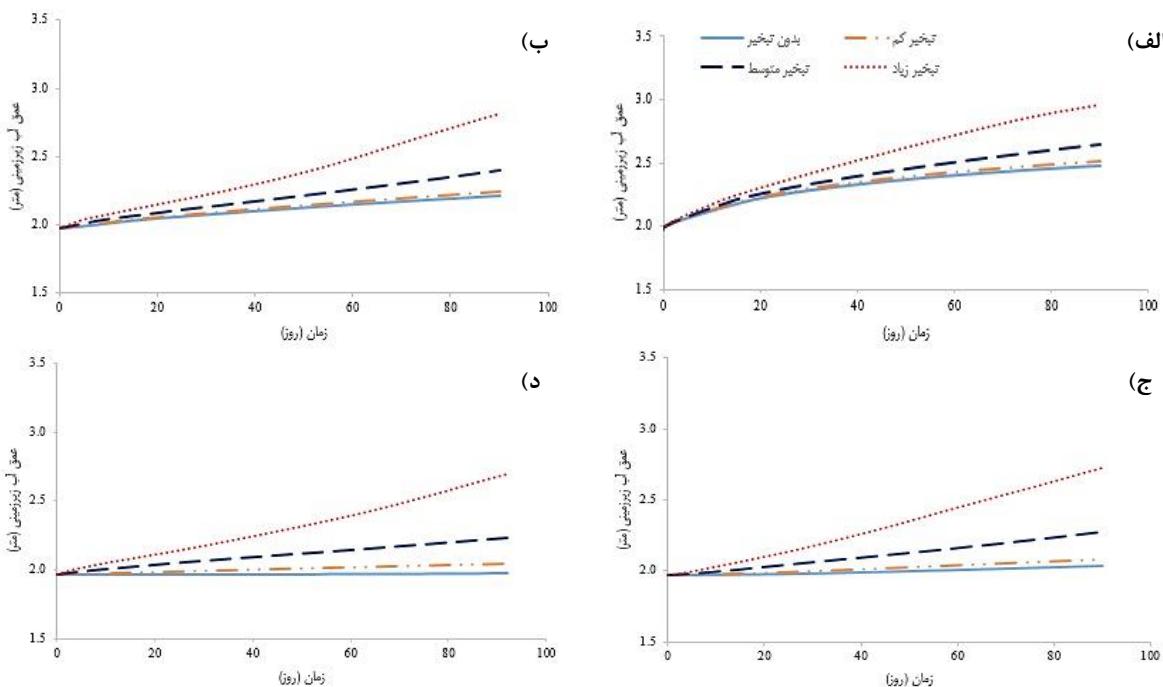
شکل ۲- عمق سطح آب زیرزمینی در چاهک‌های مشاهداتی بالادست. (الف) فاصله ۱۰ متری، (ب) فاصله ۲۵ متری، (ج) فاصله ۵۰ متری و (د) فاصله ۱۰۰ متری

منطبق با منحنی بدون تبخیر است. این میزان تبخیر تأثیر چندانی در پایین انداختن سطح ایستابی ندارد. در چاهک BD3 (منحنی ج)، در پایان ۹۰ روز مدل‌سازی، در تیمار بدون تبخیر، سطح آب زیرزمینی در ۲۰۴ متری سطح زمین است. اگر روزانه ۰/۰ میلی‌متر در روز تبخیر صورت گیرد، سطح

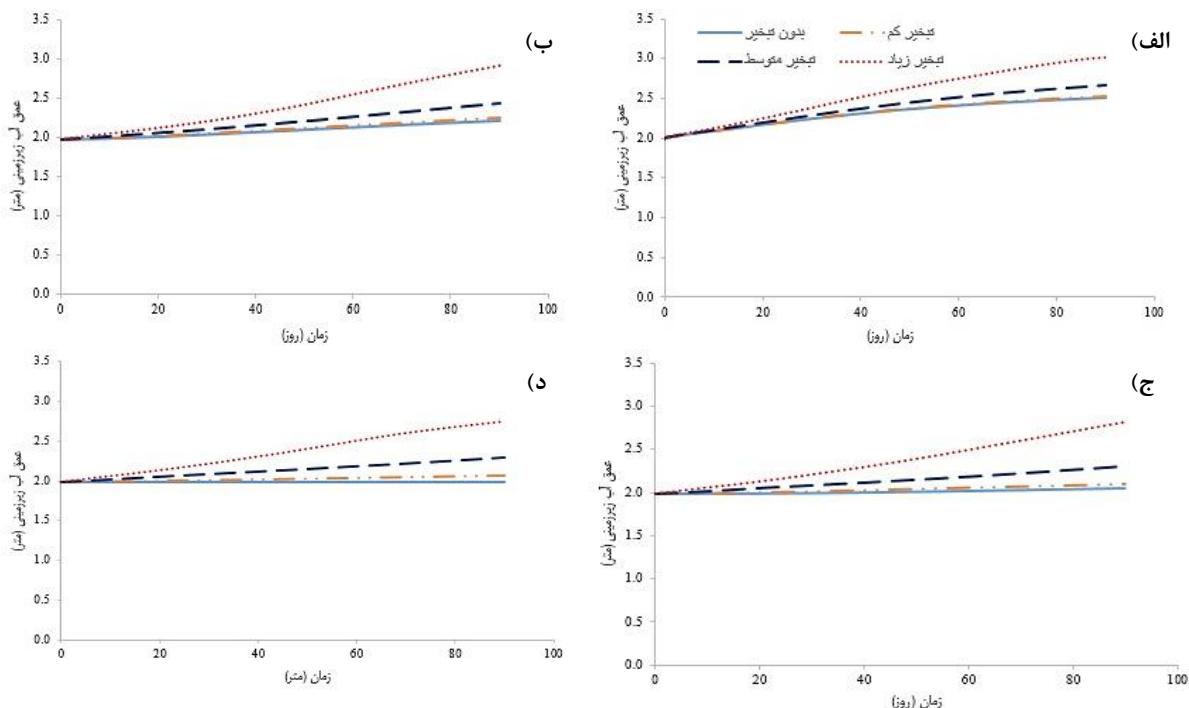
سطح آب زیرزمینی در خاک لومی
در خاک لومی نیز تبخیر در پایین انداختن سطح ایستابی مؤثر است ولی تأثیر آن کمتر از خاک رسی است. با توجه به شکل ۴ و شکل ۵ منحنی نرخ تبخیر کم (۰/۰۰ میلی‌متر در روز) هم در پایین دست و هم در بالادست زهکش، تقریباً

میلی‌متر بر روز افزایش تبخیر، افت را ۱۰ درصد افزایش می‌دهد؛ و اگر روزانه ۲/۵ میلی‌متر تبخیر در منطقه صورت گیرد سطح ایستابی به ۲/۷۲ متری زمین می‌رسد و نسبت به حالت بدون تبخیر، ۲۵ درصد افت را افزایش می‌دهد.

ایستابی به ۲/۰۸ متری سطح زمین می‌رسد. ۰/۲ میلی‌متر در روز افزایش تبخیر، سطح آب زیرزمینی را ۱/۹ درصد بیشتر پایین می‌اندازد. اگر تبخیر روزانه ۱ میلی‌متر افزایش یابد، سطح ایستابی به ۲/۲۷ متری سطح زمین می‌رسد و ۱



شکل ۳- عمق سطح آب زیرزمینی در چاهک‌های مشاهداتی پایین‌دست. (الف) فاصله ۱۰ متری، (ب) فاصله ۲۵ متری، (ج) فاصله ۵۰ متری و (د) فاصله ۱۰۰ متری.



شکل ۴- عمق سطح آب زیرزمینی در چاهک‌های مشاهداتی بالادست. (الف) فاصله ۱۰ متری، (ب) فاصله ۲۵ متری، (ج) فاصله ۵۰ متری و (د) فاصله ۱۰۰ متری

موضوع جریان‌هایی است که از بالادست و پایین‌دست وارد زهکش می‌شوند. این جریان‌ها طبق رابطه (۲) که پیش‌تر ذکر شد محاسبه شده‌اند و چون هدایت هیدرولیکی در خاک‌های شنی بیش از خاک‌های رسی و لومی است، شار ورودی نیز بیشتر است؛ بنابراین این اتفاق، تنها در این بافت خاک رخ داده است.

ضریب زهکشی

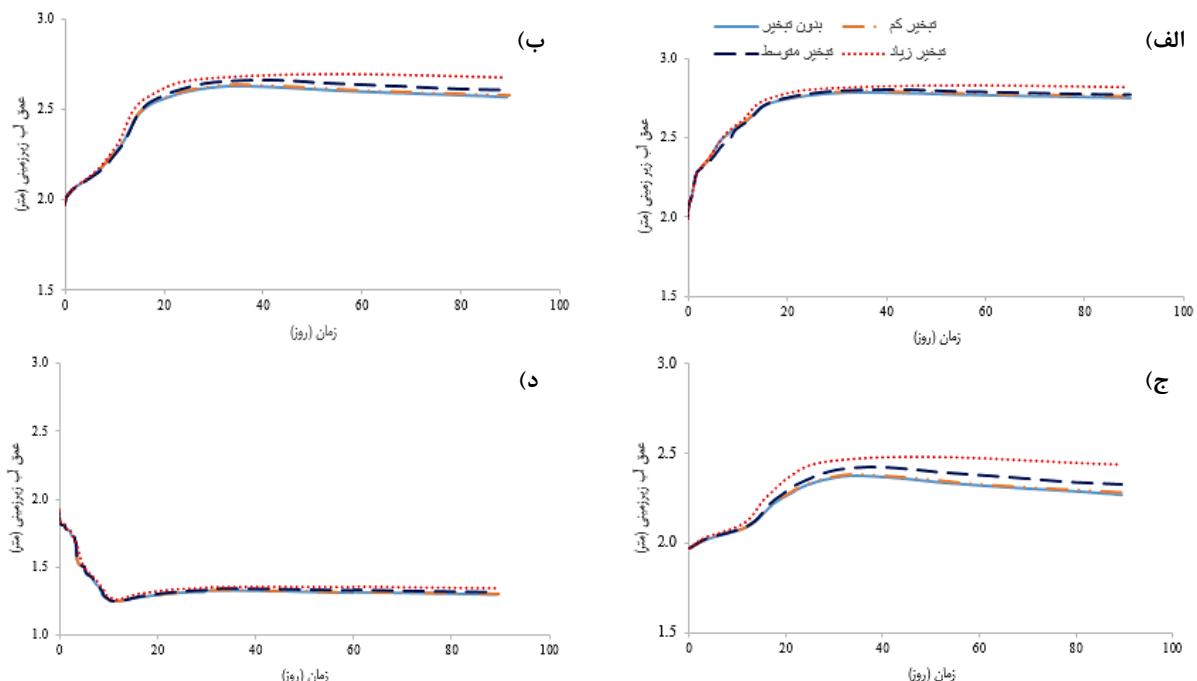
ضریب زهکشی در خاک رسی

با توجه به شکل ۸ در خاک رسی، تبخیر در کاهش ضریب زهکشی نیز مؤثر است. در پایان مدل‌سازی در تیمارهای بدون تبخیر و نرخ تبخیرهای $1/0$ ، $2/5$ و $2/5$ میلی‌متر در روز، ضریب زهکشی به ترتیب برابر با $0/034$ ، $0/027$ ، $0/014$ و $0/010$ میلی‌متر بر روز بوده است؛ بنابراین درصد کاهش ضریب زهکشی در مقادیر تبخیر کم، متوسط و زیاد نسبت به حالت بدون تبخیر به ترتیب $20/6$ ، $58/8$ و 71 درصد است.

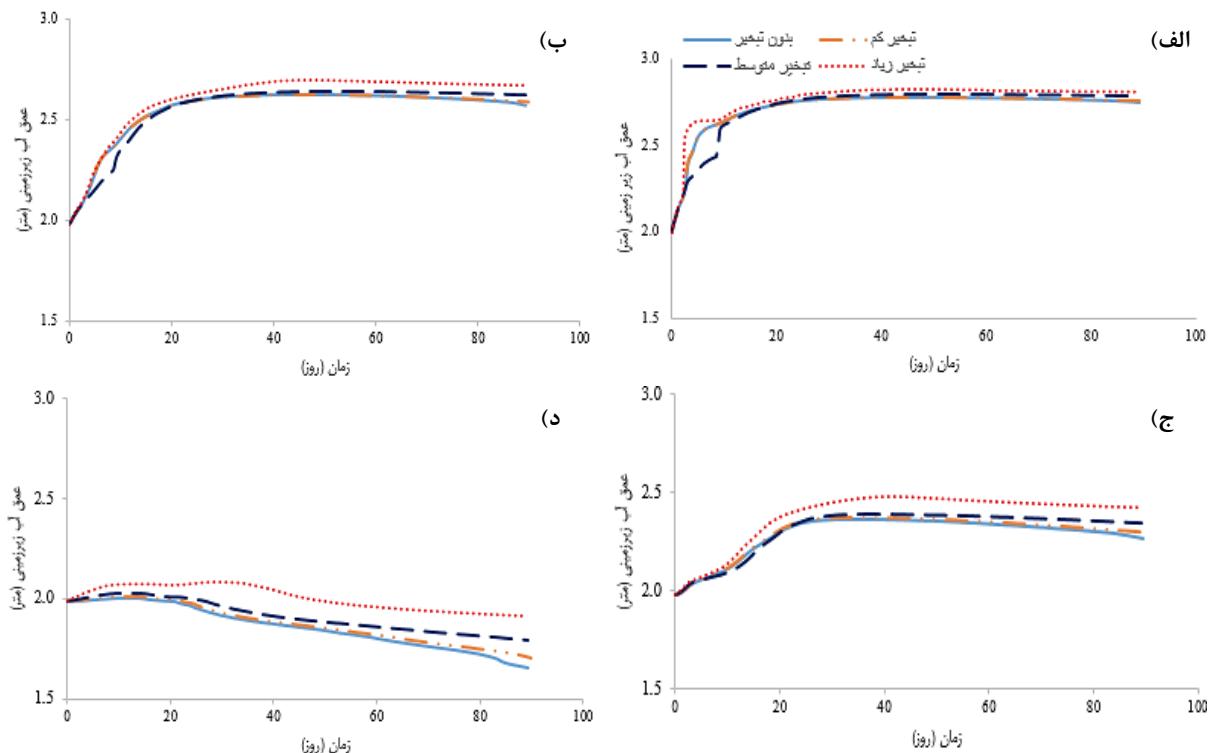
سطح آب زیرزمینی در خاک شنی

در خاک شنی تبخیر تأثیر چندانی در پایین‌انداختن سطح ایستابی ندارد و بخش اعظم پایین‌افتادگی سطح ایستابی به دلیل وجود زهکش حائل در منطقه می‌باشد، در شکل ۶ و شکل ۷ نیز منحنی تیمارهای بی‌تبخیر، با تبخیر کم، متوسط و یا زیاد تقریباً بر یکدیگر منطبق بوده و یا فاصله ناچیزی دارند. نتایج چاهک BD3 (منحنی ج) نشان می‌دهد وقتی تبخیر اتفاق نمی‌افتد سطح ایستابی در عمق $2/27$ متری $2/5$ میلی‌متر تبخیر اتفاق بیافتد، سطح آب زیرزمینی به ترتیب در $2/28$ ، $2/33$ و $2/44$ متری سطح زمین قرار می‌گیرد؛ که باعث افزایش $2/5$ ، $0/4$ و $6/9$ درصدی افت نسبت به حالت اول می‌شود.

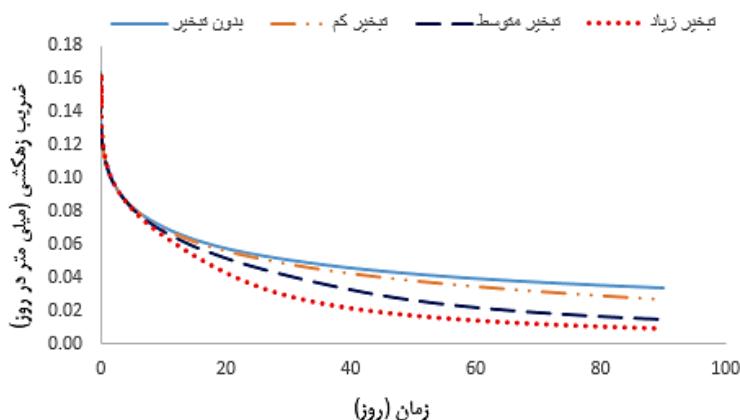
در چاهک واقع در 100 متری بالادست و پایین‌دست زهکش (منحنی د) در شکل ۶ و ۷ روند بر عکسی طی شده و سطح آب زیرزمینی به سطح زمین نزدیک‌تر شده است. علت این



شکل ۵- عمق سطح آب زیرزمینی در چاهک‌های مشاهداتی پایین‌دست. (الف) فاصله 10 متری، (ب) فاصله 25 متری، (ج) فاصله 50 متری و (د) فاصله 100 متری.



شکل ۶- عمق سطح آب زیرزمینی در چاهک‌های مشاهداتی بالادست. (الف) فاصله ۱۰ متری، (ب) فاصله ۲۵ متری، (ج) فاصله ۵۰ متری و (د) فاصله ۱۰۰ متری.



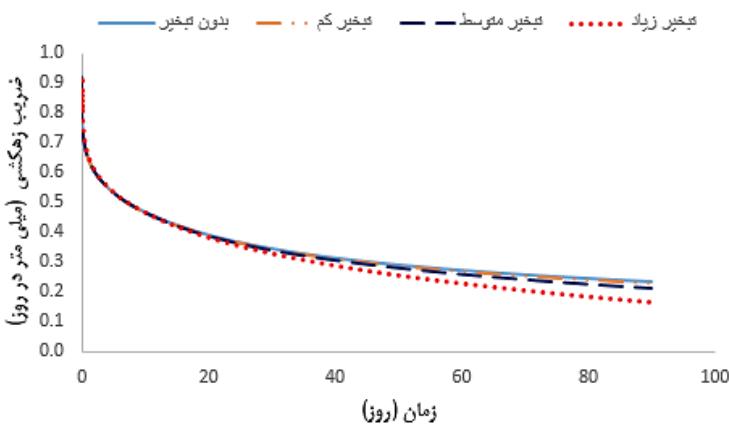
شکل ۸- ضریب زهکشی در بافت خاک رسی برای نرخ تبخیرهای مختلف

تبخیر، نرخ تبخیر کم، متوسط و زیاد به ترتیب ۰/۲۳۳،

۰/۲۲۹، ۰/۲۱۰ و ۰/۱۶۳ میلی‌متر بر روز بوده و درصد تغییر کاهش نیز به ترتیب ۱/۷، ۱۰ و ۳۰ بوده است.

ضریب زهکشی در خاک لومی

تبخیر در کاهش ضریب زهکشی در خاک لومی نیز مؤثر است. ولی درجه تأثیر آن کمتر از خاک‌های رسی است. با توجه به شکل ۹ در روز ۹۰ ام ضریب زهکشی در حالت‌های بی

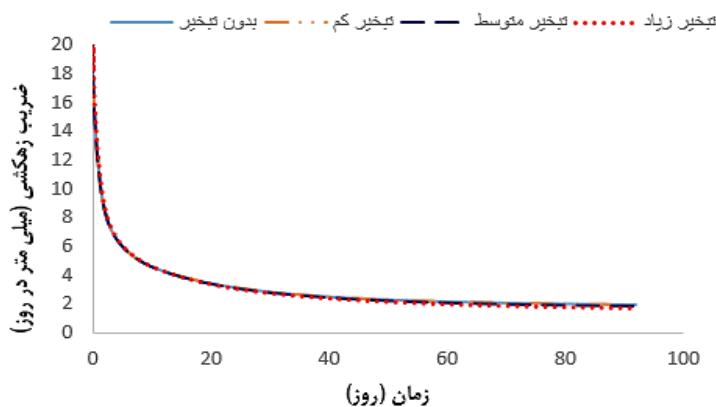


شکل ۷- ضریب زهکشی در بافت خاک لومی برای نرخ تبخیرهای مختلف

zechkshi برای حالت بی تبخیر تا حالت تبخیر زیاد به ترتیب
برابر با $1/91$, $1/82$, $1/94$ و $1/63$ میلی‌متر بر روز بوده است؛
بنابراین درصد کاهش ضریب زهکشی نسبت به حالت بدون
تبخیر به ترتیب $1/3$, $5/9$ و $15/7$ درصد افزایش یافته است.

ضریب زهکشی در خاک شنی

در خاک شنی فقط مقادیر زیاد تبخیر تأثیر کمی در
کاهش ضریب زهکشی دارند؛ زیرا منحنی‌های ضریب زهکشی
قریباً بر هم منطبق‌اند و در پایان مدل‌سازی میزان ضریب



شکل ۸- ضریب زهکشی در بافت خاک شنی برای نرخ تبخیرهای مختلف

درصد تخلیه‌ی آب از آبخوان نیز در اثر تبخیر بوده است که با نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر تطابق دارد. همچنین در تحقیقی که هو و همکاران (2018) برای مقایسه‌ی تبخیر از سطح زمین و از سفره‌های آب آزاد در ۶ بافت خاک مختلف انجام داده بودند نتایج نشان داد که میزان تبخیر از سفره‌های آزاد، به همان اندازه که به پتانسیل تبخیر بستگی دارد به بافت خاک، هدایت و ظرفیت حرارتی، رنگ و ضریب آلبیدوی خاک و زبری سطح تبخیر نیز وابسته است که این مورد نیز با نتایج تحقیق حاضر کاملاً همخوانی دارد.

نتایج تحقیق حاضر با مطالعه‌ای که آروین و همکاران (۱۳۹۵) برای بررسی اثر نوسانات اقلیمی و برداشت آب بر تغییرات تراز آب زیرزمینی در دشت دامنه اصفهان انجام داده بودند کاملاً مطابقت داشت، آن‌ها بر این باور بودند که علاوه بر برداشت بی‌رویه، ارتباط تبخیر و دمای هوا نیز با تغییر تراز آب زیرزمینی معنادار است. به علاوه نتایج شبیه‌سازی هو و همکاران (2016) در بررسی اثرات ذخیره آب در تعادل آب زیرزمینی در منطقه شمال غربی چین، نشان داد که ۹۲ درصد تغذیه‌ی آب زیرزمینی در اثر نفوذ آب حاصل از آبیاری و بارندگی و ۹۲

نتیجه‌گیری

در خاک‌های رسی نرخ تبخیر در ایجاد افت در سطح آب زیرزمینی بسیار مؤثر است. درنتیجه از کوچکترین مقدادر تبخیر نیز نمی‌توان صرفنظر کرد. برای کارهای تحقیقاتی و مدل‌سازی‌هایی که در خاک‌های رسی انجام می‌شود لازم است نرخ تبخیر روزانه از سطح خاک با دقت مناسبی اندازه‌گیری شده و در شبیه‌سازی‌ها اعمال شود. در خاک‌لومی تأثیر تبخیر کمتر است و می‌توان از نرخ تبخیر کم در این خاک‌ها چشم‌پوشی کرد. در خاک‌شنی این تأثیر کمتر بوده و فقط نرخ تبخیر زیاد، در افزایش افت آب زیرزمینی مؤثر است. تفاوت رفتار بافت‌های مختلف، ناشی از اختلاف اندازه حفره‌ها و درنتیجه تغییرات اثر مویینگی در آن‌ها است. با کاهش عمق ناحیه‌ی مویینگی در خاک‌های درشت‌بافت، میزان اثر تبخیر نیز در این خاک کم و بی‌اثر است ولی در خاک‌های ریز‌بافت به‌دلیل تجمع لوله‌های مویین و بزرگ بودن ناحیه‌ی مویینگی، اثر تبخیر نیز معنی‌دار است. همچنین اثر تبخیر در کاهش ضربی زهکشی در خاک‌های رسی بیشتر از خاک‌های لومی و در خاک‌های لومی بیشتر از خاک‌های شنی است. به‌علاوه تفاوت در مقدادر ضربی زهکشی در این خاک‌ها به علت تفاوت در هدایت هیدرولیکی آن‌هاست.

سپاسگزاری

این تحقیق با استفاده از نسخه دوم بسته نرم‌افزاری HYDRUS-2D و لاینس اخلاقی گروه علوم و مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) انجام شد. بدین ترتیب از حمایت و همکاری انجام‌شده، سپاسگزاری می‌گردد.

منابع

- همزه، س، ناصری، ع، کشکولی، ح، ۱۳۸۹. تأثیر تبخیر و تعرق بر میزان افت سطح ایستابی و فاصله زهکش‌های پلکانی، سومین همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- سلطانی، م، رحیمی خوب، م، ستوده نیا، ع، اکرم، م، ۱۳۹۶. کاربرد نرم‌افزار HYDRUS-2D برای شبیه‌سازی سامانه زهکشی خشک. پژوهش آب در کشاورزی (علوم خاک و آب)، ۳۱(۴): ۵۹۵-۶۰۷.
- سلمان‌پور، ح، صالحی، آ، محمدی، م، محنت کش، ج، طباطبایی، ع، ۱۳۹۷. مدل‌سازی تغییرات شوری خاک به‌منظور پیش‌بینی تغییرات تناسب سرزمنی در برخی مزارع گندم و جو در منطقه‌ی ریز استان فارس. مهندسی زراعی، ۴۱(۱): ۸۹-۱۰۳.
- سازمان جهاد کشاورزی استان قزوین، ۱۳۸۹. مطالعات زهکشی حاشیه شوره‌زار قزوین. شرکت مهندسین مشاور سامان آبراه-کاماب پارس.
- شمسایی، ا، ۱۳۷۷. هیدرولیک جریان آب در محیط‌های متخال-مهندسی آب‌های زیرزمینی (جلد دوم)، ۵۶.
- شمسی‌پور، ح، محمدی، ع، ۱۳۸۵. تأثیر خشکسالی‌های اخیر در افت منابع آب زیرزمینی دشت‌های شمال همدان. پژوهش‌های جغرافیایی، ۴۵(۳۵): ۱۱۵-۱۳۰.
- محمدی، ا، دلبری، م، ۱۳۹۴. شبیه‌سازی حرکت آب و نمک در خاک با استفاده از نرم‌افزار HYDRUS-1D. دانش آب‌وخاک، ۲۵(۱): ۶۷-۷۸.
- میرعباسی نجف‌آبادی، ر، ستاری، م، برقی ولینجق، و، ۱۳۹۵. شبیه‌سازی و مدیریت بهره‌برداری از آب زیرزمینی دشت عجب‌شیر. هیدروژئولوژی، ۱(۱): ۵۷-۷۵.
- نخعی، م، ۱۳۹۸. تعیین پارامترهای جریان، انتقال مواد محلول و حرارت با انجام آزمایش‌های نفوذ در خاک‌های سیلیتی و ماسه‌ای. هیدروژئولوژی، ۴(۲): ۱۵۷-۱۷۰.
- نیکبخت، ج، ذوالفاراری، م، نجیب، م، ۱۳۹۵. پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی دشت تسوج-آذربایجان شرقی با کمک

- Shunjun, H., Gan, Y., Chen, Y., 2018. Comparing Phreatic Evaporation at Zero Water Table Depth with Water Surface Evaporation. *Journal of Arid Land*, 10(6): 968–976.
- Sejna, M., Simůnek, J., Genuchten, M.V., 2011. User Manual. SpringerReference: 322 p.
- Weifeng, Y., Liu, X., Wang, T., Chen, X., 2016. Impacts of Water Saving on Groundwater Balance in a Large-Scale Arid Irrigation District, Northwest China. *Irrigation Science*, 34(4): 297–312.
- شبکه‌های عصبی مصنوعی. هیدروژئولوژی، ۱(۲) : ۹۹ - ۱۱۵
- Balugani, E., Lubczynski, M., Reyes-Acosta, L., Van Der Tol, C., Francés, A., Metselaar, K., 2017. Groundwater and Unsaturated Zone Evaporation and Transpiration in a Semi-Arid Open Woodland. *Journal of Hydrology*, 547: 54–66.
- Ebrahimian, H., Noory, H., 2015. Modeling Paddy Field Subsurface Drainage Using HYDRUS-2D. *Paddy and water environment*, 13(4): 477–485.