

تأثیر شیب بستر آبخوان آزاد بر تغییرات سطح آب زیرزمینی در اثر بارش با مدل سازی عددی

محدثه خیری^۱، مهدی زمانی لنجانی^۲، مسعود رابطی مقدم^{۳*}، حسین منتصری^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

۴- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

* نویسنده مسئول: rabeti@yu.ac.ir

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۹/۲۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۶

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی تأثیر شیب بستر آبخوان آزاد بر تغییرات سطح آب زیرزمینی در اثر بارش می‌پردازد. بدین منظور طرح شماتیک از مسئله به همراه پارامترهای مربوطه در حالتی که جریان در جهت شیب بستر دارد در دو حالت با بارش و بدون بارش با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW PMWIN مدل سازی شد. پس از صحت‌سنجی نتایج مدل سازی عددی، از طریق یک مطالعه پارامتری به بررسی تأثیر شیب بستر، شدت بارش و ضریب هدایت هیدرولیکی خاک در حین بارش بر تغییرات سطح آب آبخوان آزاد پرداخته شد. نتایج نشان داد که تأثیر شیب بستر بر سطح آب زیرزمینی در بارش‌های شدیدتر مشهودتر است و با کاهش شدت بارش از تأثیر شیب بر تغییرات پروفیل سطح آب زیرزمینی کاسته می‌شود. تحلیل ضرایب هدایت هیدرولیکی مختلف در حالت بارش در تمام شیب‌ها، مطابقت خوبی نسبت به یکدیگر داشت که بیانگر بی‌بعد بودن نسبت شدت بارش به ضریب هدایت هیدرولیکی (R/K) است. نتایج حاکی از آن است که پروفیل سطح آب در تمام شیب‌ها از یک معادله درجه سه تبعیت می‌کند. در پژوهش حاضر برای ضرایب این معادله روابطی ارائه گردید که در نهایت می‌توان سطح آب زیرزمینی در اثر بارش را در حالتی که جریان در جهت شیب بستر قرار دارد، تعیین نمود.

واژه‌های کلیدی: بستر شیب‌دار، تغذیه سطحی، شدت بارندگی، تراز آب، مادفلو.

مقدمه

نفوذ به درون زمین را دارا است، در صورتی که اگر بارش حالت سیلابی داشته باشد، این امکان وجود ندارد. قاعدتا سطح آب‌های زیرزمینی در فصل‌های مرطوب بالا آمده و برعکس در فصل‌های خشک پایین می‌رود. سفره آب زیرزمینی یک لایه آبدار زیرزمینی است که در لایه‌های تحکیم نیافته (شن، ماسه و سیلت) یا در سنگ‌های دارای درز و شکاف ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه اغلب سازه‌ها روی خاک یا درون خاک قرار دارند ارتفاع سطح آب در سفره‌های زیرزمینی در ساخت و پایداری انواع سازه‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. افزایش سطح آب زیرزمینی علاوه بر افزایش وزن مخصوص خاک، باعث افزایش فشار آب حفره‌ای و تضعیف پارامترهای مقاومت برشی خاک می‌گردد.

شیب بستر نفوذناپذیر از جمله عوامل تأثیرگذار بر حرکت آب‌های زیرزمینی می‌باشد زیرا جریان آب‌های زیرزمینی بر روی بستری با شیب بیشتر با سهولت بیشتری صورت می‌گیرد. در واقع جریان از طریق یک لایه خاک که بر روی یک بستر شیب‌دار قرار دارد برای هیدرولوژی حوضه‌های آب‌خیزداری امری ضروری است و به جریان میانی مرتبط است. از اصلی‌ترین منشأ آب‌های زیرزمینی بارش‌های جوی است. میزان آب زیرزمینی صرفاً به میزان بارش بستگی ندارد بلکه به شیب بستر، نوع خاک، ضریب هدایت هیدرولیکی، پوشش گیاهی و یا رطوبت قبلی موجود در میان ذرات بستگی دارد. در بارش‌های آرام، آب فرصت بیشتری برای

$$H(X, T) = \frac{R}{2H_0} \left[(1 - X^2) + \frac{32}{\pi^3} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{(2i+1)^3} \cos\left(\frac{2i-1}{2}\pi X\right) \exp\left(-\frac{(2i-1)^2}{4}\pi^2 T\right) \right] \quad (2)$$

$$\rho = r/K, \sigma = S(1 - \rho), S = \sin\phi, X = x/L, H = h/L\sigma, H_0 = h_0/L\sigma, T = tK\sigma/R = r\cos\phi/K\sigma^2$$

که در آن h, H عمق جریان به عنوان ارتفاع ستون آب نرمال نسبت به بستر، h_0, H_0 عمق خطی شدن جریان در لایه متخلخل، K هدایت هیدرولیکی لایه متخلخل، L طول لایه متخلخل، n تخلخل لایه متخلخل، r, R شدت جریان، S شیب پایه خاک، t, T زمان، x, X فاصله اندازه گیری شده در امتداد پایه لایه خاک، ρ نسبت شدت جریان به ضریب هدایت هیدرولیکی، σ شیب کاهش یافته و ϕ زاویه شیب پایه خاک است. در سال بعد (Akylas and Koussis (2007) اثر متقابل یک رودخانه را با یک آبخوان در سه شیب ۰، ۳ و ۳۰ درجه را با روش تحلیلی مورد ارزیابی قرار دادند و به بررسی اثر شیب بر روی سطح ایستایی پرداختند. در همان سال (Koussis et al. (2007) نیز تحقیقات مشابهی از جمله اثر رودخانه و آبخوان را در شیبهای ۰، ۲/۵ و ۲۵ درجه مورد بررسی قرار دادند. به دنبال آن، (Ya and Hund (2007) راه حل تحلیلی برای جریان آب زیرزمینی در یک آبخوان آزاد شیب دار ناهمسانگرد با وجود چندین کانال تحت شرایط تغذیه گذرا ارائه نمودند. نتایج نشان داد که پروفیل سطح آب به طور قابل توجهی تحت تأثیر تغذیه گذرا، ناهمسانگردی و شیب آبخوان قرار می گیرد. در یک تحقیق آزمایشگاهی (Kamanbedast and Shafai Bejestan (2008) بر روی مدلی به ابعاد ۸ متر در ۰/۶ متر و ارتفاع ۰/۶ متر که در کف آن شبکه ای تعبیه شده بود که امکان خروج آب از آن وجود داشت، آزمایش نمودند و اثر شیب را بر روی میزان آب خروجی از شبکه و میزان رسوب گذاری بررسی نمودند و عنوان کردند که شبکه موجود در کف شیب ۳۰ درجه حداکثر میزان آبدی و حداقل رسوب گذاری را خواهد داشت. آن ها نتیجه گرفتند که آب با افزایش شیب، تمایل بیشتری به جاری شدن پیدا خواهد کرد. (Bansal and Das (2009) اثر شیب بستر بر روی تراز آب و شدت جریان عبوری از آبخوان را در شرایط متغیر بودن سطح آب بالادست و پایین دست بررسی کردند. آن ها نتیجه گرفتند که آب با افزایش شیب، تمایل بیشتری به جاری شدن پیدا خواهد کرد. Mizumura

در نهایت نفوذ آب حاصل از بارندگی، افزایش سطح آب زیرزمینی و فشار آب منفذی شیب را به همراه دارد. به همین دلیل مشکلات جریان آب زیرزمینی در زمین های شیب دار، اهمیت قابل توجهی از سوی مهندسان را به خود جلب کرده است. تحقیقات مربوط به هد و میزان جریان آب در یک سفره آبخوان شیب دار، که در آن آبخوان با آب های مجاور در تماس است، توسط تعدادی از محققین مورد مطالعه قرار گرفته است. (Henderson and Wooding (1964) مطالعه جریان زمینی و جریان آب زیرزمینی ناشی از بارش مداوم در مدت زمان محدود را به صورت تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. آن ها برای حل این مسئله با استفاده از معادله جریان روابطی را پیشنهاد نمودند. در پژوهش دیگری، (Chapman (1980) بر روی مدل سازی جریان آب زیرزمینی بر روی بسترهای شیب دار به تجزیه و تحلیل پرداخت. وی یک تقریب جدید برای جریان دوبعدی دوپویی-فرشه ایمر^۱ از آب های زیرزمینی بر روی یک بستر شیب دار ارائه نمود که در مقایسه با نتایج شناخته شده برای دو وضعیت جریان ثابت، تا زوایای شیب حداقل ۳۰ درجه قابل قبول است. به دنبال آن (Verhoest and Troch (2000) راه حل های تحلیلی برای آبخوان شیب دار با شرایط تغذیه را پیشنهاد نمودند. رابطه ۱ شدت جریان خروجی را در $x=0$ بیان می کند.

$$q_d = \int_L^0 \left(N - f \frac{\partial h}{\partial t} \right) dx = -NL + \int_0^L f \frac{\partial h}{\partial t} dx \quad (1)$$

تغذیه ثابت، N ، $x=0$ شدت جریان خروجی در q_d که در آن ارتفاع عمودی سطح آب و h زمان، t تخلخل زهکشی شده، f (Chapuis در نتیجه طول سطح شیب دار می باشد. L جریان حالت پایدار در آبخوان آزاد شیب دار را مورد (2002) بررسی قرار داد. وی برای حل این مسئله با در نظر گرفتن فرضیاتی ابتدا راه حل های تحلیلی را پیشنهاد و سپس با ، مورد SEEP/W استفاده از روش المان محدود و نرم افزار یک (Akylas et al. (2006) صحت سنجی قرار گرفت. راه حل تحلیلی برای جریان گذرا در یک لایه خاک شیب دار با وجود تغذیه را ارائه نمودند. رابطه ۲ عمق جریان نسبت به بستر شیب دار را بیان می کند:

¹ Dupuit-Forchheimer

همکاران (۱۳۹۱) اثر گرادیان هیدرولیکی آب‌های زیرزمینی و شیب بستر نفوذناپذیر آبخوان بر روی میزان آبدی چاه با انجام آزمایش‌هایی بر روی دستگاه هیدرولوژی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش بر روی شیب‌های ۱، ۳، ۵ و ۷ درجه صورت گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش گرادیان هیدرولیکی، آبدی چاه کاهش می‌یابد ولی آهنگ این تغییرات با افزایش گرادیان هیدرولیکی کاهش می‌یابد. همچنین اثر ضریب هدایت هیدرولیکی خاک نیز نشان می‌دهد که با افزایش ضریب هدایت هیدرولیکی، آبدی چاه در ابتدا افزایش سپس کاهش می‌یابد. Pathak and Singh, 2014 تغذیه و تحلیل جریان آب زیرزمینی در محیط متخلخل شیب‌دار را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه سه حالت با شرایط مرزی و شیب‌های مختلف مورد بحث قرار گرفت. به دنبال آن راه‌حل تحلیلی ارائه گردید که قادر است سطح آزاد آب زیرزمینی در محیط متخلخل شیب‌دار در فواصل مختلف اندازه‌گیری کند. در سال بعد، Wang et al. (2015) به بررسی تأثیر شدت بارندگی بر تغذیه آب زیرزمینی در شرایط بدون شیب پرداختند. برای بررسی این موضوع از روش تفاضل محدود و نرم‌افزار MODFLOW استفاده شد. نتایج نشان داد که شدت بارندگی تأثیر زیادی بر تغذیه آب‌های زیرزمینی دارد. به دنبال آن Li and Ju (2016) به بررسی تأثیر وجود لایه‌بندی‌های مختلف خاک بر روی شیب بستر سنگی در شرایط بارندگی پرداختند. بدین منظور چهار آزمایش ژئومکانیکی انجام شد. در این مدل ویژگی‌های جابجایی، محتوای آب و فشار رانشی لغزشی نیز بررسی و مورد بحث قرار گرفت. در یک تحلیل آزمایشگاهی به بررسی تأثیر شیب خاک و شدت بارندگی بر انتقال محلول در خاک توسط اجل تاران و همکاران (۱۳۹۵) انجام گرفت. نتایج نشان دادند که شیب خاک موجب افزایش انتقال محلول در جهت عرضی می‌شود. همچنین افزایش شدت تزریق باعث تسریع حرکت محلول به سمت عمق خاک شده و با افزایش مقدار محلول در اعماق خاک موجب افزایش غلظت بیشینه در آنجا می‌گردد. به دنبال آن Ming and Ping (2020) تغییرات جریان آب زیرزمینی ناشی از هر نوع تغذیه متفاوت مکانی و زمانی را مورد بررسی قرار دادند. هدف از این مطالعه ارائه یک

(2009) به بررسی پروفیل سطح آب در زمان‌های مختلف پرداخت و شیب سنگ بستر را برای آبخوان اعمال نمود. وی نتایج تحلیلی خود را با نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط Mizushima (2006) مقایسه کرد و به بیان هماهنگی نتایج آزمایش‌ها با مقادیر تحلیلی به وجود اثر شیب بستر در پروفیل سطح اشاره نمود. به دنبال بررسی‌های تحلیلی Das and Bansal (2010) نوسانات سطح آب در سفره‌های زیرزمینی با وجود شیب‌های مختلف بستر و موقعیت مکانی حوضه تغذیه پرداختند. در واقع آن‌ها یک راه‌حل تحلیلی از معادله بوسینسک خطی شده ارائه کردند. با توجه به روابط ارائه شده مقدار سطح آب را در آبخوان افقی و آبخوان شیب‌دار ۲ و ۴ درجه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌داد با افزایش شیب بستر، پروفیل سطح آب کاهش پیدا می‌کند همچنین در زمان بارش ارتفاع سطح آب زیرزمینی در آبخوان افقی به طور مداوم در حال رشد است اما در آبخوان شیب‌دار ارتفاع سطح آب کاهش و در ارتفاع کمتری تثبیت اتفاق می‌افتد. مطالعه موردی نشت آب زیرزمینی توسط Chapuis (2011) در یک آبخوان آزاد شیب‌دار در حالت پایدار به این صورت بود که برای تحلیل یک آبخوان شیب‌دار در ساحل شمالی رودخانه سنت-لارنس^۲، سه راه‌حل تحلیلی (Verhoest and Troch, 2000; Chapuis, 2002; Loa'iciga, 2005) را مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد روابط (Chapuis (2002) به عنوان یک تقریب مناسب برای میانگین نشت آب زیرزمینی است. در یک تحقیق آزمایشگاهی رئوف و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی تأثیر شیب زمین روی میزان نفوذ و برخی از مشخصه‌های فیزیکی خاک پرداختند. به منظور نشان دادن روند تغییرات مقادیر نفوذ و مشخصات تخلخل خاک با شیب اراضی، آزمایش‌های نفوذ در پنج شیب ۱۰۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه در منطقه‌ای با بافت خاک لومی به انجام رسید. نتایج نشان داد که مقادیر چگالی حقیقی خاک در پنج شیب ذکر شده تقریباً ثابت ولی چگالی ظاهری با افزایش شیب به صورت جزئی افزایش می‌یابد. مقادیر تخلخل کل، تخلخل درشت و تخلخل متوسط با افزایش شیب روند کاهشی نشان دادند اما مقدار تخلخل ریز با افزایش مقدار شیب افزایش یافت. همچنین وزیریان و

² Saint-Lawrence

$$i^2x = ih - \frac{c_1}{K} + \left(\frac{c_1}{K} - ih_1\right) e^{\frac{K_i}{c_1}(h_1-h)}$$

که در آن h_1 ارتفاع سطح آب در کانال شماره ۱، h_2 ارتفاع سطح آب در کانال شماره ۲، K ضریب هدایت هیدرولیکی، x فاصله تا مبدأ، L فاصله بین دو کانال، α زاویه شیب که $i = \tan \alpha$ است.

داشتن اطلاعات دقیق از وضعیت منابع آب زیرزمینی جهت برنامه‌ریزی و توسعه پایدار در مناطق خشک و نیمه‌خشک اهمیت دوچندانی دارد. طبق مطالعه‌ای که توسط جعفرزاده و همکاران (۱۳۹۹) صورت گرفت عملکرد روش‌های عددی در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور شبیه‌سازی آب زیرزمینی در مناطق خشک بر اساس روش‌های تفاضل محدود، اجزای محدود و بدون شبکه گسسته شد و عملکرد آن‌ها در یک آبخوان فرضی و مطالعه میدانی مورد بررسی قرار گرفت. ارزیابی نتایج عددی به دست آمده در آبخوان فرضی و مقایسه با جواب تحلیلی حاکی از آن است که عملکرد سه مدل عددی قابل قبول است. برای مدیریت منابع آب زیرزمینی نیاز به شناخت و عملکرد آبخوان در شرایط طبیعی است. در این راستا، بررسی روند و تغییرات تراز آب زیرزمینی موجب ایجاد مدیریتی پایدار از آن می‌شود. به همین منظور شیخ‌بگم قلعه و همکاران (۱۴۰۲) از کد MODFLOW در نرم‌افزار GMS برای شبیه‌سازی آب زیرزمینی آبخوان مهاباد در دو حالت پایدار و ناپایدار استفاده کردند. همچنین عملکرد آن با معیارهای خطای جذر میانگین مربعات، میانگین خطای مطلق و ضریب تبیین مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این مطالعه بیانگر وضعیت نامطبوع آبخوان مهاباد است به گونه‌ای که با افزایش برداشت و کاهش بارش‌ها به‌ویژه در سال‌های اخیر وضعیت آن بدتر نیز خواهد شد. برای آگاهی از میزان تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی بر اثر عملیات آبخوانداری مطالعه‌ای بود که توسط پاک‌پرور و همکاران (۱۴۰۲) مورد بررسی قرار گرفت. به این صورت که سه چاه با عمق تقریبی ۳۰ متر در کاربری‌های مختلف حفر و ویژگی‌های هیدرولیکی لایه غیراشباع خاک در تمام نیمرخ آبخوان به‌صورت میدانی و آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد همچنین مقدار تغذیه با راه‌حل معکوس به‌وسیله مدل Hydrus یک بُعدی شبیه‌سازی گردید صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی جریان با مدل واسنجی شده Hydrus در

راه‌حل تحلیلی کامل برای تعیین اثر هرگونه شدت بارندگی متفاوت بر جریان آب زیرزمینی در یک آبخوان آزاد شیب‌دار بود. برای عملی بودن راه‌حل حاضر، شبیه‌سازی تحت بارندگی‌های مختلف انجام گرفت و نتایج در مقایسه با داده‌های مشاهده شده، رضایت‌بخش بود. Soon et al. (2020) یک سیستم ارزیابی سطح آب زیرزمینی در پاسخ به بارندگی روزانه برای پیش‌بینی پایداری شیب را ارائه نمودند. عملکرد سیستم ارزیابی با استفاده از مطالعه موردی در Putrajaya، مالزی انجام شد. این سیستم از سه جزء مهم تشکیل شده است. در نهایت برای تحلیل جریان نشت به کمک روش المان محدود و نرم‌افزار SEEP/W استفاده گردید. در پژوهشی دیگر (Ping and Pin (2021) به مدل‌سازی تحلیلی جریان آب زیرزمینی در سفره آب محصور شده با لایه‌های عمودی مختلف پرداختند. در ابتدا راه‌حل تحلیلی که می‌توانست هرگونه لایه‌بندی چند لایه خاک را با شدت بارندگی‌های مختلف در بازه زمانی تحلیل کند، ارائه نمودند و در نهایت جهت صحت‌سنجی با استفاده از نرم‌افزار MODFLOW مورد تایید قرار گرفت. در واقع این مطالعه یک راه‌حل تحلیلی توسعه‌یافته برای پاسخ‌های سطح آب زیرزمینی به هر شدت بارش در بازه زمانی مختلف در یک آبخوان شیب‌دار چند لایه ارائه می‌کند. به دنبال آن Saxena et al. (2021) یک مدل عددی با استفاده از تفاضل محدود برای تقریب تغییرات سطح آب در یک آبخوان آزاد شیب‌دار که در معرض تغذیه و نشت موضعی چندگانه قرار داشت، ارائه نمودند. نتایج به‌دست آمده نقش پارامترهای مختلف آبخوان را در تشکیل سطح آب زیرزمینی نشان داد. به این صورت که ارتفاع سطح آب تا حد زیادی تحت تأثیر شیب اولیه آبخوان و مدت زمانی که طول می‌کشد تا سطح آب توسعه یابد، بستگی دارد. در نتیجه (Zamani Lenjani (2022 به بررسی تحلیلی جریان آب زیرزمینی برای آبخوان‌های شیب‌دار پرداخت. وی با در نظر گرفتن چهار حالت آبخوان شیب‌دار روابطی را برای تغییرات سطح آب زیرزمینی در حالت بدون بارش ارائه داد. رابطه ۳ روابط کلی برای سطح آب زیرزمینی به صورت زیر می‌باشد:

$$c_1 = Kih_2 - Ki^2l + (c_1 - Kih_1)e^{\frac{K_i}{c_1}(h_1-h_2)} \quad (3)$$

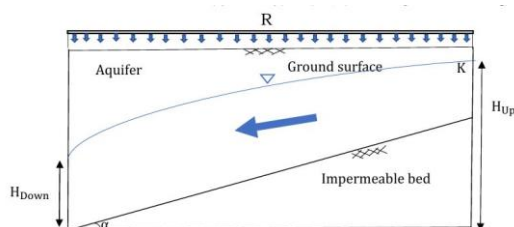
این آبخوان را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. به این صورت که از مدل MODFLOW و نرم افزار مدل سازی آب زیرزمینی GMS استفاده گردید. نتایج حاصل از مدل در دو حالت پایدار و ناپایدار، حاکی از این بود که نواحی شمالی، مرکزی و جنوبی آبخوان دارای بیشترین ضریب هدایت هیدرولیکی هستند.

با مرور بر مطالعات پیشین، بیشترین راه حل ها بر اساس روابط تحلیلی و تعداد محدودی مطالعه آزمایشگاهی در زمینه عوامل تاثیرگذار بر تغییرات سطح آب آبخوان آزاد انجام شده است و مطالعه وسیع تری در رابطه با پارامترهایی از جمله تأثیر شیب بستر، شدت بارش، ضریب هدایت هیدرولیکی خاک و جهت جریان آبخوان نسبت به بستر نفوذناپذیر به صورت مدل سازی عددی مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین با توجه به محدودیت های مدل های تحلیلی و آزمایشگاهی، مطالعه حاضر به دنبال بررسی دامنه وسیعتری از پارامترهای تأثیرگذار می باشد. در گام اول مدل عددی بر مبنای مطالعات تحلیلی صحت سنجی شده و سپس تأثیر پارامترهایی نظیر شیب بستر، ضریب هدایت هیدرولیکی خاک و شدت بارش روی مسئله مورد تحلیل قرار گرفته است و در نهایت رابطه ای برای سطح آب زیرزمینی در اثر بارش در حالتی که جریان در جهت شیب بستر قرار دارد، ارائه شده است.

مواد و روش ها

معرفی مدل عددی

پژوهش حاضر به دنبال بررسی تأثیر شیب بستر آبخوان آزاد بر تغییرات سطح آب زیرزمینی در اثر بارش با مدل سازی عددی می باشد. شکل ۱ طرح شماتیک از هندسه کلی مسئله به همراه پارامترهای مربوطه را به تصویر کشیده است.



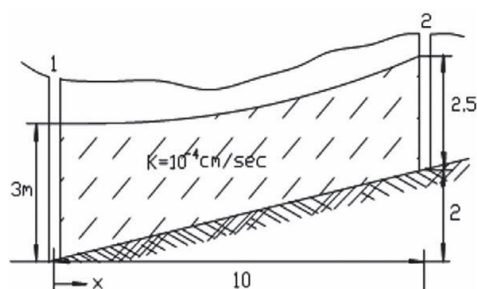
شکل ۱- طرح شماتیک از هندسه کلی مسئله و پارامترهای مربوطه (R شدت بارش، H_{up} ارتفاع آب بالادست، H_{down} ارتفاع آب پایین دست، K ضریب هدایت هیدرولیکی آبخوان و α زاویه بستر نفوذناپذیر می باشد).

Figure 1- Schematic design of the general geometry of the problem and the related parameters a and b: R is the rainfall intensity, H_{up} is the height of the upstream water, H_{down} is the height of the downstream water, K is the hydraulic conductivity of the aquifer, and α is angle of the bed slope.

از نرم افزار مادفلو پی ام وین^۳ که قادر به مدل سازی دوبعدی

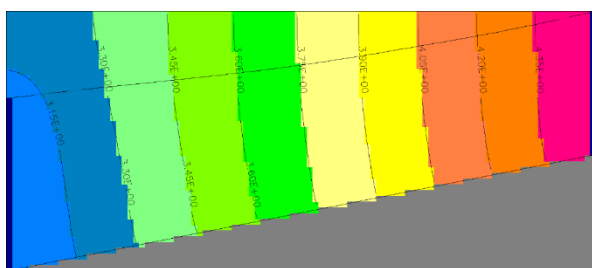
³ Processing Modflow for Windows (PMWIN)

۳ و ۴ به ترتیب مدل سازی در پی ام وین و مقایسه نتایج را به تصویر کشیده است که نشان دهنده صحت سنجی حاصل از مدل سازی عددی با مطالعه تحلیلی می باشد.

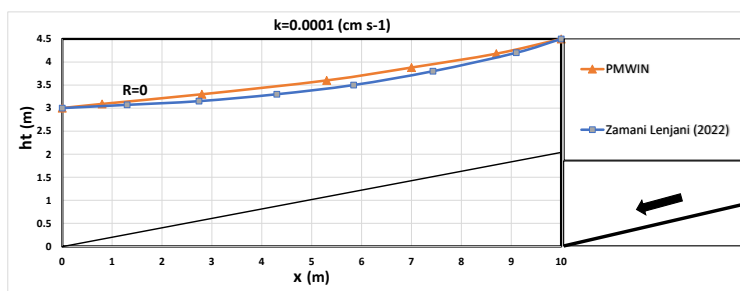


شکل ۲- هندسه آبخوان آزاد بر روی لایه شیب دار نفوذناپذیر (Zamani Lenjani, 2022).

Figure 2- Unconfined aquifer geometry on an impermeable sloping layer (Zamani Lenjani, 2022).



شکل ۳- نمایش تغییرات هد و سطح آب در نرم افزار پی ام وین.
Figure 3- Display of head and water level changes in PMWIN software.



شکل ۴- مقایسه نتایج مدل سازی عددی پی ام وین با مطالعه (Zamani Lenjani (2022).

Figure 4- Comparison of PMWIN numerical modeling results with Zamani Lenjani's study (2022).

که در آن: k_{sat} ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع خاک، N شدت تغذیه و α زاویه شیب می باشد.

با توجه به مقدار $|a|$ سه جواب حاصل می گردد. در این مطالعه برای صحت سنجی این روابط با روش المان محدود دو مثال صورت گرفته است که نشان از تطابق راه حل تحلیلی با مدل سازی عددی دارد. به عنوان مثال شکل ۵ مشخصات آبخوان و نتایج حاصل از مدل سازی سطح آب در اثر بارش در

جریان آب زیرزمینی بر مبنای روش تفاضل محدود می باشد، جهت انجام مطالعه استفاده شد. در این نرم افزار، منطقه مورد مطالعه به تعدادی سلول تقسیم شده که به مجموعه ای از این سلول ها شبکه مدل گفته می شود. یک شبکه می تواند یکنواخت یا غیریکنواخت باشد. سپس با افزودن سطر و ستون های بیشتر، شبکه ی غیریکنواخت ایجاد می شود. محل برخورد خطوط افقی و عمودی شبکه را گره می گویند. با شبکه بندی منطقه مورد مطالعه محاسبات آب زیرزمینی از یک محیط پیوسته در یک محیط گسسته و در محل گره ها انجام شده و معادله دیفرانسیلی حاکم بر آب زیرزمینی به معادله جبری تبدیل می شود.

صحت سنجی نتایج مدل عددی

جهت صحت سنجی مدل عددی، از مطالعه Zamani Lenjani (2022) و Chapuis (2002) استفاده شده است.

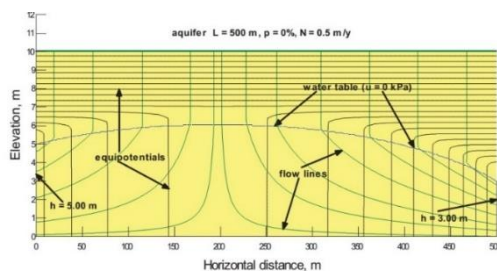
صحت سنجی با (Zamani Lenjani (2022)

در این مدل با توجه به شکل ۲ شیب آبخوان ۰/۲، هدکل در کانال های شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۳ و ۴/۵ متر، فاصله بین دو کانال ۱۰ متر، ضریب هدایت هیدرولیکی 10^{-4} سانتی متر بر ثانیه و همچنین جریان در جهت شیب بستر و بدون بارش می باشد. برای صحت سنجی مسئله، ابتدا مدل در نرم افزار پی ام وین تحلیل و در نهایت نتایج حاصله با مطالعه Zamani Lenjani (2022) مورد مقایسه قرار گرفت. شکل های

صحت سنجی با مطالعه (Chapuis (2002)

Chapuis (2002) یک راه حل تحلیلی برای جریان حالت پایدار در آبخوان آزاد شیب دار را مورد بررسی قرار می دهد. به این صورت که ابتدا رابطه ۴ را پیشنهاد داد و سپس با استفاده از روش المان محدود و نرم افزار SEEP/W صحت سنجی صورت گرفته است.

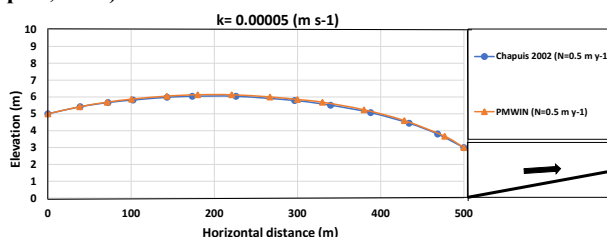
$$YY' + aY + X = 0, \quad a = -\sqrt{\frac{k_{sat}}{N}} \tan \alpha \quad (4)$$



شکل ۵- نتایج حاصل از مدل سازی سطح آب در نرم افزار

.SEEP/W

Figure 5- Results of water level modeling in SEEP/W software (Chapuis, 2002).



شکل ۶- تأثیر شدت بارش بر سطح آب (نتایج حاصل از پی ام وین و چاپیوس (۲۰۰۲)).

Figure 6- Comparison of the results obtained from PMWIN and the study of Chapuis (2002).

هیدرولیکی ۵، ۰/۰۵ و ۰/۰۰۰۱ سانتی متر بر ثانیه (cm s^{-1})

با توجه به جدول ۱ بر اساس محدوده درشت دانه تا ریزدانه ها در نظر گرفته شده است.

همچنین برای هر یک از ضرایب هدایت هیدرولیکی در حالت بدون بارش و بارش با در نظر گرفتن ضریبی از ضریب هدایت هیدرولیکی در هندسه کلی آبخوان آزاد، تحلیل ها در نرم افزار مادفلو پی ام وین مورد بررسی قرار گرفت. ارتفاع آب در کانال های شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۵ و ۷/۵ متر می باشد و مدل سازی ها برای شیب های ۰ تا ۶۰ درصد به صورت مجزا تحلیل و نتایج حاصل مورد مقایسه قرار گرفت.

نتایج و بحث

بعد از صحت سنجی مدل عددی، مطالعه گسترده ای در مورد تغییرات پارامترهایی از جمله شیب بستر، ضریب هدایت هیدرولیکی و شدت بارش بر پروفیل سطح آب زیرزمینی صورت گرفت. در نهایت خروجی های حاصل از مدل سازی عددی تحلیل و نتایج ارائه شده است.

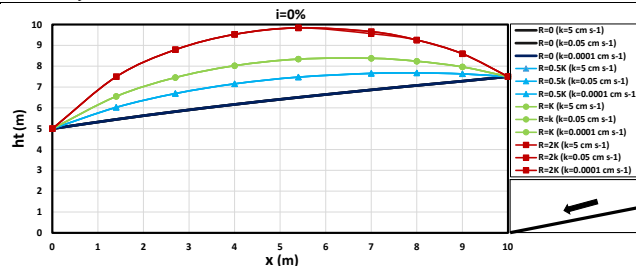
تأثیر شدت بارش و ضریب هدایت هیدرولیکی بر سطح آب زیرزمینی

برای بررسی تأثیر شدت بارش و ضریب هدایت هیدرولیکی بر سطح آب زیرزمینی، سه ضریب هدایت

جدول ۱- محدوده ضریب هدایت هیدرولیکی خاک ها (Das and Sobhan, 2014).

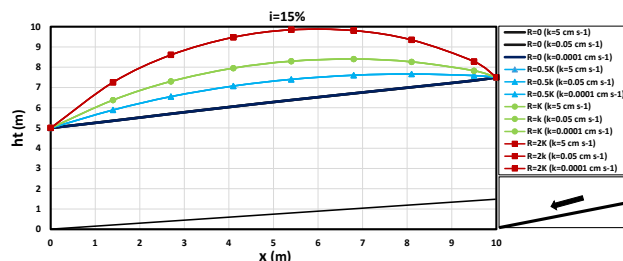
Table 1- Typical values of hydraulic conductivity of saturated soils.

Soil type	K (cm s^{-1})	K (cm s^{-1})	K (cm s^{-1})
	Das & Sobhan		Zamani (2022)
Clean gravel	100-1	5	-
Coarse sand	1-0.01	0.05	-
Fine sand	0.01-0.001	0.005	-
Silty clay	0.001-0.00001	0.00005	0.0001
Clay	<0.000001	0.0000005	-



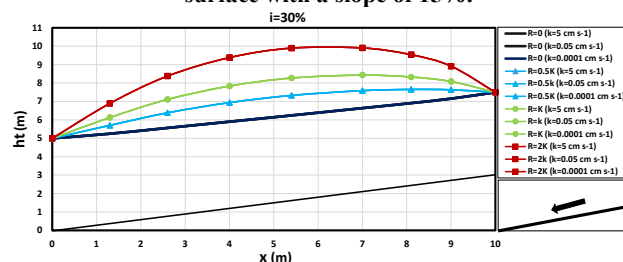
شکل ۷- تأثیر شدت بارش و ضریب هدایت هیدرولیکی بر سطح آب زیرزمینی برای سطح افقی.

Figure 7- The effect of precipitation rate and hydraulic conductivity coefficient on the groundwater level for the horizontal surface.



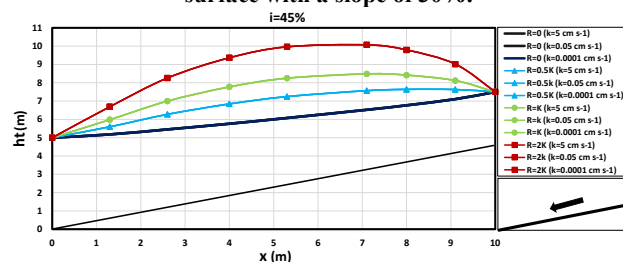
شکل ۸- تأثیر شدت بارش و ضریب هدایت هیدرولیکی بر سطح آب زیرزمینی برای سطح شیب‌دار با شیب ۱۵ درصد.

Figure 8- The effect of precipitation rate and hydraulic conductivity coefficient on the groundwater level for a sloping surface with a slope of 15%.



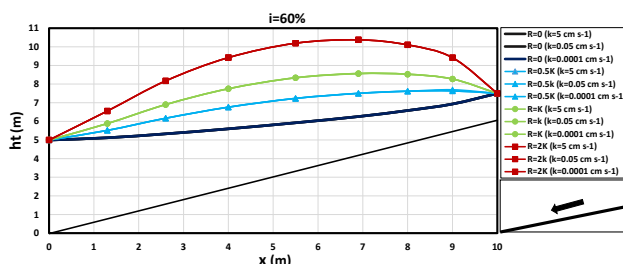
شکل ۹- تأثیر شدت بارش و ضریب هدایت هیدرولیکی نفوذپذیری بر سطح آب زیرزمینی برای سطح شیب‌دار با شیب ۳۰ درصد.

Figure 9- The effect of precipitation rate and hydraulic conductivity coefficient on the groundwater level for a sloping surface with a slope of 30%.



شکل ۱۰- تأثیر شدت بارش و ضریب هدایت هیدرولیکی بر سطح آب زیرزمینی برای سطح شیب‌دار با شیب ۴۵ درصد.

Figure 10- The effect of precipitation rate and hydraulic conductivity coefficient on the groundwater level for a sloping surface with a slope of 45%.



شکل ۱۱- تأثیر شدت بارش و ضریب هدایت هیدرولیکی بر سطح آب زیرزمینی برای سطح شیب‌دار با شیب ۶۰ درصد.

Figure 11- The effect of precipitation rate and hydraulic conductivity coefficient on the groundwater level for a sloping surface with a slope of 60%.

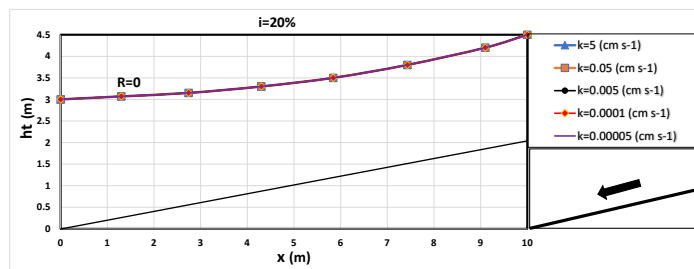
نتایج حاصل از شکل‌های ۷ تا ۱۱ نشان می‌دهد در حالت بدون بارش با افزایش شیب بستر، سطح آب کاهش پیدا خواهد کرد. همچنین تحلیل‌های حاصل از نفوذپذیری‌های مختلف نسبت به یکدیگر در حالت بدون بارش و بارش مطابقت ضرایب هدایت هیدرولیکی مختلف نسبت به یکدیگر را در تمام شیب‌ها نشان می‌دهد. در واقع تأثیر نفوذپذیری بر سطح آب زیرزمینی بی‌اثر است. در تحلیل‌های بارش نیز

نتایج حاکی از آن است که به طور کلی افزایش شدت بارش باعث افزایش سطح آب زیرزمینی می‌گردد. باتوجه به اینکه تحلیل‌های سه ضریب هدایت هیدرولیکی در تمام شیب‌ها مطابقت خوبی نسبت به یکدیگر دارند که این مورد نشان می‌دهد نسبت شدت بارش به ضریب هدایت هیدرولیکی (R/K) یک پارامتر بی‌بعد است. به منظور بررسی بی‌اثر بودن پارامتر ضریب هدایت هیدرولیکی با روابط تحلیلی موجود، از

پارامترهای شکل ۲ و رابطه ۳ از مطالعه Zamani Lenjani (2022) به همراه جدول ۱ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. به دنبال آن شکل ۱۲ نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده که همگی بیانگر بی‌اثر بودن پارامتر ضریب هدایت هیدرولیکی است را نشان می‌دهد.

$$c_1 = 0.005 + (c_1 - 0.006)e^{\frac{-0.003}{c_1}}, c_1 = 0.00408$$

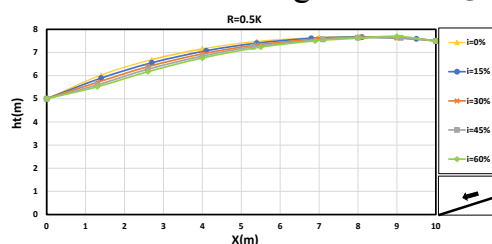
$$\text{then } 0.04x = 0.2h - 40.8 - 19.2e^{0.004902(300-h)}$$



شکل ۱۲- نتایج حاصل از تأثیر ضرایب هدایت هیدرولیکی مختلف بر اساس جدول ۱.

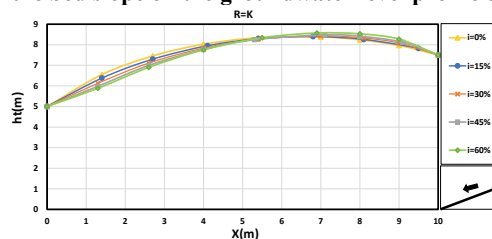
Figure 12- Results of the effect of different hydraulic conductivity coefficients based on Table 1.

تأثیر شیب بستر بر پروفیل سطح آب زیرزمینی در اثر بارش
برای بررسی تأثیر شیب بستر بر پروفیل سطح آب زیرزمینی در اثر بارش با در نظر گرفتن نتایج حاصل از شکل‌های ۸ تا ۱۱ به صورت مجزا برای هر شدت بارش، تحلیل‌ها برای شیب‌های ۰ تا ۶۰ درصد به صورت مقایسه‌ای در یک نمودار قرار گرفته است. شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ نتایج



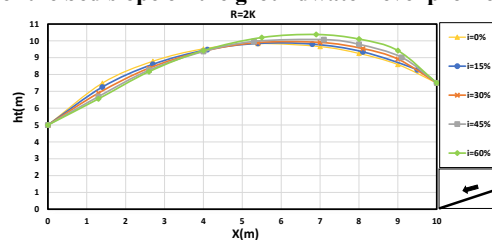
شکل ۱۳- تأثیر شیب بستر بر پروفیل سطح آب زیرزمینی در اثر بارش برای R=0.5K.

Figure 13- The influence of the bed slope on the groundwater level profile due to precipitation for R=0.5K.



شکل ۱۴- تأثیر شیب بستر بر پروفیل سطح آب زیرزمینی در اثر بارش برای R=K.

Figure 14- The influence of the bed slope on the groundwater level profile due to precipitation for R=K.



شکل ۱۵- تأثیر شیب بستر بر پروفیل سطح آب زیرزمینی در اثر بارش برای R=2K.

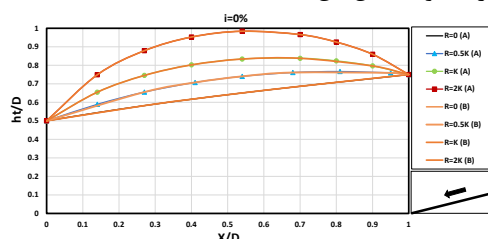
Figure 15- The influence of the bed slope on the groundwater level profile due to precipitation for R=2K.

استفاده از نرم افزار پی ام وین مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سپس محورها نسبت به طول آبخوان (D) بی بعد می گردد. با در نظر گرفتن ضرایب ۰/۵، ۱ و ۲ برابر ضرایب هدایت هیدرولیکی به عنوان شدت بارش، بی بعدسازی مدل ها برای شیب های ۰ تا ۶۰ درصد به صورت مجزا انجام شده و نتایج حاصل مورد مقایسه قرار می گیرد. شکل های ۱۶ تا ۲۰ به ترتیب بیانگر نتایج بی بعدسازی می باشد. با توجه به تحلیل های انجام شده و نتایج بی بعدسازی بین مدل اولیه (A) و مدل با ابعاد دو برابر (B) در تمام شیب ها، بی بعد بودن سطح آب نسبت به طول آبخوان را نشان می دهد.

باتوجه به تحلیل های صورت گرفته نتایج حاکی از آن است که اختلاف های ناشی از تأثیر شیب بستر بر سطح آب زیرزمینی بسیار شدید نیستند. به این صورت که با افزایش شدت بارش تأثیر شیب بر سطح آب زیرزمینی در اثر بارش مشهودتر است. همچنین تأثیر شیب بستر بر سطح آب زیرزمینی به تراز بالادست و پایین دست آبخوان و همچنین شدت بارش ها نیز بستگی دارد.

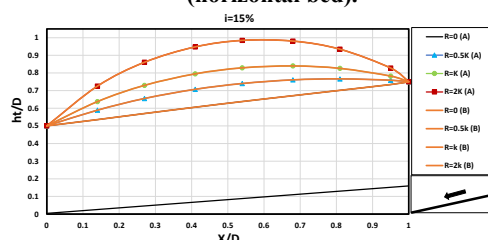
بی بعدسازی مدل ها

باتوجه به اینکه محور افقی و قائم تمام نمودارهای تحلیل شده با بعد هستند جهت بی بعدسازی مدل ها، ابتدا محور افقی و قائم را دو برابر در نظر گرفته و تحلیل آن با



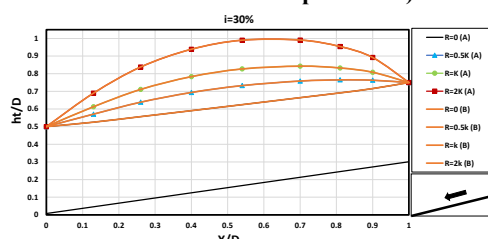
شکل ۱۶- نتایج بی بعدسازی بین مدل اولیه (A) و مدل با ابعاد دو برابر (B) (سطح افقی).

Figure 16- Dimensionless results between the original model (A) and the model with double dimensions (B) (horizontal bed).



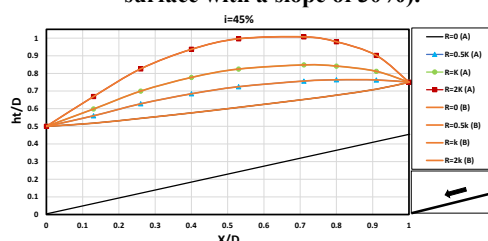
شکل ۱۷- نتایج بی بعدسازی بین مدل اولیه (A) و مدل با ابعاد دو برابر (B) (سطح شیب دار با شیب ۱۵ درصد).

Figure 17- Dimensionless results between the original model (A) and the model with double dimensions (B) (Sloping surface with a slope of 15%).



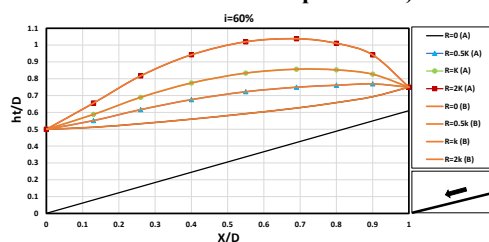
شکل ۱۸- نتایج بی بعدسازی بین مدل اولیه (A) و مدل با ابعاد دو برابر (B) (سطح شیب دار با شیب ۳۰ درصد).

Figure 18- Dimensionless results between the original model (A) and the model with double dimensions (B) (Sloping surface with a slope of 30%).



شکل ۱۹- نتایج بی بعدسازی بین مدل اولیه (A) و مدل با ابعاد دو برابر (B) (سطح شیب دار با شیب ۴۵ درصد).

Figure 19- Dimensionless results between the original model (A) and the model with double dimensions (B) (Sloping surface with a slope of 45%).



شکل ۲۰- نتایج بی بعدسازی بین مدل اولیه (A) و مدل با ابعاد دو برابر (B) (سطح شیب دار با شیب ۶۰ درصد).

Figure 20- Dimensionless results between the original model (A) and the model with double dimensions (B) (Sloping surface with a slope of 60%).

رابطه بین سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن شیب آبخوان در اثر بارش

به منظور ارتباط بین سطح آب زیرزمینی با شیب آبخوان در اثر بارش، نتایج حاصل از مدل سازی ها در نرم افزار متلب^۴ بررسی شد. نتایج حاکی از آن است که پروفیل سطح آب در تمام شیب ها به صورت معادله درجه سه تبعیت می کند. برای ضرایب این معادله نیز روابطی ارائه گردیده که در نهایت از رابطه ۵ می توان سطح آب زیرزمینی در اثر بارش را در حالتی که جریان در جهت شیب بستر قرار دارد، به دست آورد:

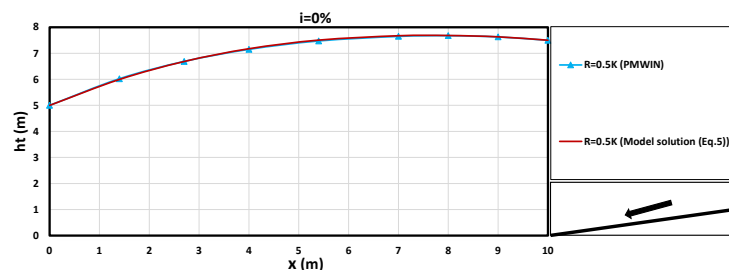
$$P(x) = p_1x^3 + p_2x^2 + p_3x + p_4 \quad (5)$$

$$p_1 = \frac{(h_2 - h_1) - (h_1/h_2) - ih_2}{L^3}, \quad p_2 = \frac{h_2 \frac{R}{K} + e^{-R/K} + (i(h_1 + h_2))}{L^2},$$

$$p_3 = \frac{h_2 + e^{-R/K}}{L} - \frac{i}{2} \text{ and } p_4 = h_1$$

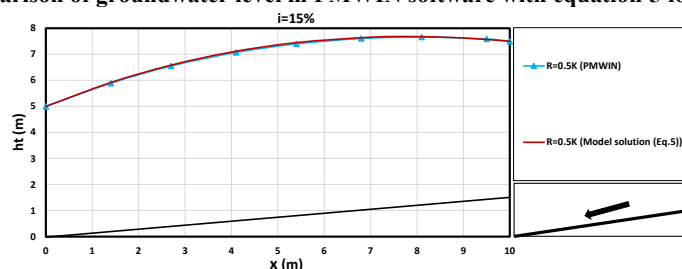
که در آن $p(x)$ ارتفاع سطح آب در فاصله مورد نظر، h_1 ارتفاع سطح آب در کانال شماره ۱، h_2 ارتفاع سطح آب در کانال شماره ۲، k ضریب هدایت هیدرولیکی، x فاصله تا مبدا، R بارش، L فاصله بین دو کانال (طول آبخوان) و α زاویه شیب است ($i = \tan \alpha$). شکل های ۲۱ تا ۲۵ نتایج حاصل از مقایسه سطح آب زیرزمینی در نرم افزار PMWIN و رابطه ۵ برای بارش $0.5k$ در شیب های ۰ تا ۶۰ درصد را نشان می دهد. همچنین ارتفاع آب در کانال های شماره ۱ و ۲ به ترتیب ۵ و ۷/۵ متر می باشد. همانطور که از شکل ها مشخص است، رابطه ۵ به خوبی توانسته است نتایج مدل عددی را پیش بینی نماید.

^۴ Matlab



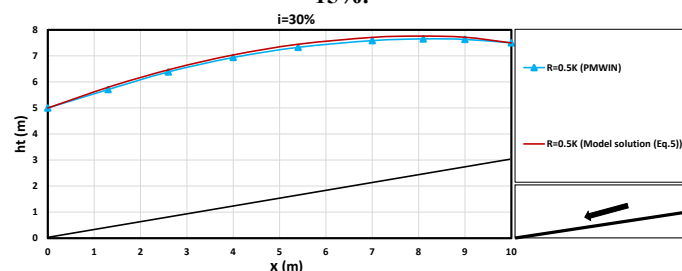
شکل ۲۱- مقایسه سطح آب زیرزمینی در نرم افزار PMWIN با رابطه ۵ برای بستر سنگی افقی.

Figure 21- Comparison of groundwater level in PMWIN software with equation 5 for horizontal bed.



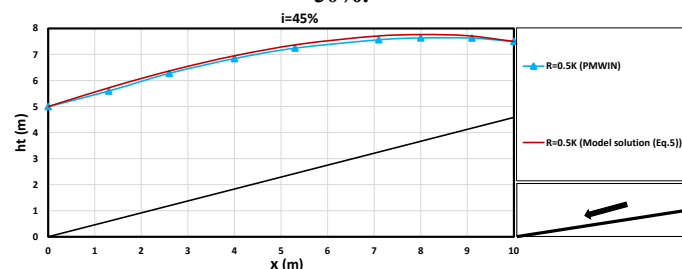
شکل ۲۲- مقایسه سطح آب زیرزمینی در نرم افزار PMWIN با رابطه ۵ برای سنگ بستر شیب دار با شیب ۱۵ درصد.

Figure 22- Comparison of the groundwater level in PMWIN software with equation 5 for a sloping bed with a slope of 15%.



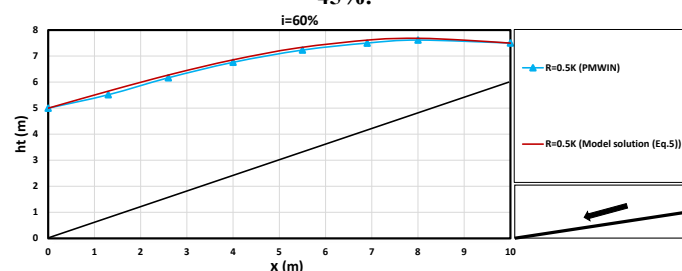
شکل ۲۳- مقایسه سطح آب زیرزمینی در نرم افزار PMWIN با رابطه ۵ برای سنگ بستر شیب دار با شیب ۳۰ درصد.

Figure 23- Comparison of the groundwater level in PMWIN software with equation 5 for a sloping bed with a slope of 30%.



شکل ۲۴- مقایسه سطح آب زیرزمینی در نرم افزار PMWIN با رابطه ۵ برای سنگ بستر شیب دار با شیب ۴۵ درصد.

Figure 24- Comparison of the groundwater level in PMWIN software with equation 5 for a sloping bed with a slope of 45%.



شکل ۲۵- مقایسه سطح آب زیرزمینی در نرم افزار PMWIN با رابطه ۵ برای سنگ بستر شیب دار با شیب ۶۰ درصد.

Figure 25- Comparison of the groundwater level in PMWIN software with equation 5 for a sloping bed with a slope of 60%.

نتیجه گیری

هدف از این پژوهش، مطالعه تأثیر شیب بستر آبخوان آزاد بر تغییرات سطح آب زیرزمینی در اثر بارش با مدل سازی عددی با نرم افزار PMWIN می باشد. نتایج نشان می دهد پارامتر ضریب هدایت هیدرولیکی بر سطح آب زیرزمینی بی اثر است. همچنین تحلیل ضرایب هدایت هیدرولیکی مختلف در حالت بارش در تمام حالات و شیب ها، مطابقت خوبی نسبت به یکدیگر دارند که این مورد نشان می دهد نسبت شدت بارش به ضریب هیدرولیکی (R/K) یک پارامتر بی بعد است. علاوه بر آن اختلاف های ناشی از تأثیر شیب بستر بر سطح آب زیرزمینی بسیار شدید نیستند. به این صورت که با افزایش شدت بارش تأثیر شیب بر سطح آب زیرزمینی مشهودتر و همچنین به تراز بالادست و پایین دست آبخوان و شدت بارش ها نیز بستگی دارد. به دنبال آن نتایج حاصل از بی بعدسازی در تمام شیب ها حاکی از آن است که پروفیل سطح آب زیرزمینی نسبت به طول آبخوان بی بعد است. در نهایت پروفیل سطح آب در تمام شیب ها از یک معادله درجه سه تبعیت می کند. همچنین برای ضرایب این معادله روابطی ارائه گردید که در نهایت می توان سطح آب زیرزمینی در اثر بارش را در حالتی که جریان در جهت شیب بستر قرار دارد، تعیین نمود. در راستای پژوهش حاضر برای مطالعات آتی پیشنهاد می گردد به صورت آزمایشگاهی به بررسی نتایج حاصله به روش تجربی در حالتی که لایه خاک ناهمگن یا ناهمسان بوده یا دارای لایه بندی، همچنین شدت بارش به صورت غیریکنواخت و یا ناحیه ای باشد، پرداخته شود.

منابع

اجل تاران، ف.، ناظمی، ا. ح.، صدرالدینی، س. ع. ا.، دین پژوه، ی.، ۱۳۹۵. بررسی تأثیر شیب خاک و شدت بارندگی بر انتقال محلول با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی و مدل HYDRUS-2D. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری، ۷(۲۱): ۷۶-۹۸.

پاک پرور، م.، نکویان، غ. ع.، قهاری، غ. م.، چراغی، س. ع. م.، مجیدی، ع. ر.، ۱۴۰۲. اندازه گیری مستقیم و شبیه سازی اثر میزان سیلاب بر نرخ تغذیه به آبخوان در سامانه پخش سیلاب گربایگان. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۳): ۲۵۶-۲۷۶.

جعفرزاده، ا.، خاشعی سیوکی، ع.، پوررضا بیلندی، م.، ۱۳۹۹. ارزیابی عملکرد روش ها عددی در شبیه سازی جریان آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان بیرجند). هیدروژئولوژی، ۷(۲): ۶۱-۷۵.

حسین زاده کوهی، ح.، اردستانی، م.، ۱۴۰۳. مدل سازی و بررسی وضعیت کمی آب های زیرزمینی آبخوان مهیار جنوبی-دشت آسمان با استفاده از مدل MODFLOW. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۴(۱): ۱-۱۷.

خدایاری، م.، حصاری، ب.، احمدی، ح.، محمدپور، م.، ۱۴۰۲. ارزیابی کارایی طرح تغذیه مصنوعی بر بهبود وضعیت آب زیرزمینی با مدل ریاضی (مطالعه موردی دشت فیروزق خوی در استان آذربایجان غربی). هیدروژئولوژی، ۸(۱): ۱۷۰-۱۸۶.

رئوف، م.، صدرالدینی، س. ع. ا.، ناظمی، ا. ح.، معروفی، ص.، ۱۳۹۰. بررسی تأثیر شیب زمین روی میزان نفوذ برخی از مشخصه های فیزیکی خاک. دانش آب و خاک، ۲۱(۱): ۵۷-۶۸.

شیخا بگم قلعه، س.، بابازاده، ح.، رضایی، ح.، سرایی تبریزی، م.، ۱۴۰۲. مدل سازی عددی و تحلیل روند وضعیت کمی آبخوان مهاباد. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۳(۲): ۱-۱۷.

صباح نیا، د.، صادقی لاری، ع.، ۱۴۰۳. مدل سازی کمی آب زیرزمینی با استفاده از GMS-MODFLOW (مطالعه موردی: آبخوان شمیل در استان هرمزگان). هیدروژئولوژی، ۹(۱): ۷۱-۸۵.

وزیریان، س. م.، امانیان، ن.، زینی، م.، ۱۳۹۱. اثر شیب بستر نفوذناپذیر و گرا دیان هیدرولیکی بر آبدی نسبی چاه در چند نوع خاک با دانه بندی های مختلف. نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، ۱۹-۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۱، اصفهان، ایران.

Reference

Ajal Taran, F., Nazimi, A., Ashraf Sadradaldini, A., Din Pajoh, A., 2015. Investigating the effect of soil slope and rainfall intensity on solute transport using a laboratory study and HYDRUS-2D model. Irrigation Engineering Research Quarterly, 7(21): 76-98. [In Persian]

Akyas, E., Koussis, A., Yannacopoulos, A., 2006. Analytical solution of transient flow in a sloping

- Khodaiari, M., Hessari, B., Ahmadi, H., Mohammadpour, M., 2023. Evaluation of artificial recharge project efficiency for groundwater recovery with mathematical modeling (A case study on Firuraq of Khoy Plain in West Azerbaijan province). *Hydrogeology*, 8(1): 170-186. [In Persian]
- Li, L.Q., Ju, N.P., 2016. Effect of the inclined weak interlayers on the rainfall response of a bedded rock slope. *Mountain Science*, 13(9): 1663-1674.
- Ming, Ch.W., Ping, Ch.H., 2020. Variation of Groundwater Flow Caused by Any Spatiotemporally Varied Recharge. *Water*, 12(287): 1-17.
- Mizumura, K., 2009. Approximate Solution of Nonlinear Boussinesq Equation. *Hydrologic Engineering*, 14: 1156-1164.
- Mizushima, M., 2006. Unconfined groundwater flow using Hele-Shaw models. MS thesis, Kanazawa Institute of Technology, Kanazawa, Ishikawa Pref, Japan.
- Pakparvar, M., Nekooeian, Gh., Ghahari, Gh., Cheraghi, S.A.M., Majidi, A., 2023. Direct measurement and simulation of flooding amount effect on recharge rate in Gareh Bygone floodwater spreading system. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(3): 256-276. [In Persian]
- Pathak, Sh.P., Singh, T., 2014. An Analysis on Groundwater Recharge by Mathematical Model in Inclined Porous Media. *Hindawi International Scholarly Research Notices*, 1-4.
- Ping, Ch. H., Pin, Ch. L., 2021. Analytical modeling of groundwater flow of vertically multilayered soil stratification in response to temporally varied rainfall recharge. *Applied Mathematical Modelling*, 96: 584-597.
- Rauf, M., Sadradaldini, A., Nazimi, A., Maroufi, P., 2010. Investigating the effect of land slope on infiltration rate and some physical characteristics of soil. *Water and Soil Science*, 21(1): 57-61. [In Persian]
- Sabah Nia, D., Sadeghi Lari, A., 2024. Quantitative Modeling of Groundwater Using GMS-MODFLOW (Case Study: Shamil Aquifer in the Hormozgan Province). *Hydrogeology*, 9(1): 71-85. [In Persian]
- Saxena, Sh., Bansal, R. K., Singh, B., 2021. Numerical Modeling of Water Table Fluctuation in Unconfined Sloping Aquifer in Response to Multiple Localized Recharge. *Applied Science and Technology*, 13-23.
- Sheikha Bagem Ghaleh, S., Babazadeh, H., Rezaei, H., Sarai Tabrizi, M., 2023. Numerical modeling and trend analysis of Mahabad aquifer soil layer with recharge. *Des Sciences Hydrologiques*, 51(4): 624-641.
- Akylas, E., Koussis, A., 2007. Response of sloping unconfined aquifer to stage changes in adjacent stream. I. Theoretical analysis and derivation of system response functions. *Hydrology*, 338: 85-95.
- Bansal, R.K., Das, S.K., 2010. Analytical Study of Water Table Fluctuation in Unconfined Aquifers due to Varying Bed Slopes and Spatial Location of the Recharge Basin. *Hydrologic Engineering*, 15(11): 909-917.
- Bansal, R.K., Das, S.K., 2009. Effects of Bed Slope on Water Head and Flow Rate at the Interfaces between the Stream and Groundwater: Analytical Study. *Hydrologic Engineering*, 14(8): 832-838.
- Chapman, T.G., 1980. Modeling Groundwater Flow Over Sloping Beds. *Water Resources Research*, 16(6): 1114-1118.
- Chapuis, R.P., 2002. Solution analytique de l'écoulement en régime permanent dans un aquifère incliné à nappe libre, et comparaison de cette solution avec des solutions numériques plus complètes. École Polytechnique de Montréal, Rapport Tech EPM-RT-02-03.
- Chapuis, R.P., 2011. Steady state groundwater seepage in sloping unconfined aquifers. *Geological and Mining Engineering*, 70: 89-99.
- Das, B.M., Sobhan, Kh., 2014. Principles of Geotechnical Engineering. Eighth Edition, Shortt, Ch.M., United States of America, 771 p.
- Jafarzadeh, A., Khashei Siwki, A., Purreza Bilondi, M., 2022. Performance Assessment of Numerical Solutions in Groundwater Simulation (case study: Birjand aquifer). *Hydrogeology*, 7(2): 61-75. [In Persian]
- Henderson, F.M., Wooding, R.A., 1964. Overland Flow and Groundwater Flow from a Steady Rainfall of Finite Duration. *Geophysical research*, 69(8): 1531-1540.
- Hosseinzade Kuhi, H., Ardestani, M., 2024. Modeling and quantitative investigation of the groundwater condition of the South Mehvar-Dasht Asman aquifer by using the MODFLOW model. *Water and Soil Management and Modeling*, 4(1): 1-17. [In Persian]
- Kamanbedast, A.A., Shafai Bejestan, M., 2008. Effect of Slope and Area Opening on the Discharge Ratio in Bottom Intake Structures. *Applied Sciences*, 8(14): 2631-2635.
- Koussis, A., Akylas, E., Mazi, k., 2007. Response of sloping unconfined aquifer to stage changes in adjacent stream II. Applications. *Hydrology*, 338: 73-84.

- Wang, H., En Gao, J., Zhang, M.J., Li, X.H., Zhang, Sh.L., Jia, L.Z., 2015. Effects of rainfall intensity on groundwater recharge based on simulated rainfall experiments and a groundwater flow model. *Catena*, 127:80-91.
- Ya, Ch.Ch., Hund, D.Y., 2007. Analytical solution for groundwater flow in an anisotropic sloping aquifer with arbitrarily located multiwells. *Hydrology*, 347: 143- 152.
- Zamani Lenjani, M., 2022. Groundwater Flow Analysis for Inclined Aquifers. *Ground water*, 1-6.
- quantitative status. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2): 1-17. [In Persian]
- Soon, M.N., Ashraf Mohamad Ismail, M., Abustan, I., 2020. Development of Groundwater Level Fluctuation Response System Subjected to Rainfall for Slope Stability Forecasting. *Geological Society of India*, 96: 616-622.
- Vazirian, M., Amanian, N., Zaini, M., 2011. The effect of impervious bed slope and hydraulic gradient on the relative well drainage in several types of soil with different grain sizes. 9th International Congress of Civil Engineering, University of Isfahan. [In Persian]
- Verhoest, N.E.C., Troch, P.A., 2000. Some analytical solutions of the linearized Boussinesq equation with recharge for a sloping aquifer. *Water Resources Research*, 36(3): 793-800.