



مدلسازی اجرای طرح شهر اسفنجی در مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی (مطالعه موردی دشت قزوین)

داود بهرامی^۱، مجید گلوئی^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - آب و سازه‌های هیدرولیکی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ع) قزوین، قزوین، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ع) قزوین، قزوین، ایران.

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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۲۶

چکیده

افزایش سطوح غیر قابل نفوذ شهری مانند پیاده‌روها، سنگ‌فرش‌ها، خیابان‌ها، ساختمان‌ها و غیره، باعث کاهش نفوذ بارش‌ها به درون زمین و افزایش رواناب در سطوح شهری شده است و ممکن است منجر به وقوع سیلاب‌های ناگهانی گردد. یکی از چالش‌های اساسی در مدیریت سیلاب‌های شهری، نحوه مدیریت رواناب‌های سطحی می‌باشد. در سال‌های اخیر از راهکارهای مختلفی مانند بهترین روش‌های مدیریتی (Best Management Practices)، روش‌های توسعه کم‌اثر (Low Impact Development) و همچنین ترکیبی از این روش‌ها جهت مدیریت رواناب شهری استفاده شده است. یکی از این راهکارها که امروزه در کشورهایی مانند آلمان و چین استفاده شده است، راهکاری با عنوان "شهرهای اسفنجی" می‌باشد. در این روش مدیریت رواناب شهری به‌گونه‌ای صورت می‌گیرد که آب به راحتی از فضای شهری خارج نشده و بتواند به دورن آب‌های زیرزمینی نفوذ یابد. در این مطالعه به بررسی عملکرد مجراهای نفوذپذیر زیرزمینی در زمینه پیاده‌سازی طرح شهر اسفنجی پرداخته شده است. همچنین تاثیر آب نفوذ یافته در افزایش تراز آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این کار، از نرم‌افزار Visual MODFLOW Flex جهت شبیه‌سازی سه بعدی آب زیرزمینی استفاده شده است تا بتوان تغییرات تراز آب زیرزمینی در تمام جهات را بررسی نمود. منطقه مورد مطالعه، ناحیه شمال شرقی شهر قزوین به مساحت حدوداً ۳۰۰ هکتار می‌باشد. در این مطالعه با توجه عدم دسترسی به نوسانات سطح آب زیرزمینی، میانگین تراز آب زیرزمینی در منطقه به عنوان تراز اولیه انتخاب شده است و اثر تغذیه سیلاب در افزایش تراز مذکور مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدلسازی بیانگر کاهش ۲۲ درصدی حجم رواناب سالانه و افزایش سطح آب زیرزمینی به میزان ۵ سانتی‌متر در سال می‌باشد. در واقع نتایج حاصله نشان دهنده کارایی روش ارائه شده در کاهش حجم رواناب شهری و همچنین افزایش سطح آب زیرزمینی است که با صرف نظر کردن از نوسانات سطح آب زیرزمینی در بازه زمانی ۱۰ ساله و صرفاً با توسعه روش مذکور، می‌توان حدود نیم‌متر افزایش سطح آب زیرزمینی را انتظار داشت.

واژه‌های کلیدی: تغذیه سفره آب زیرزمینی، رواناب شهری، شهرهای اسفنجی، مجاری نفوذپذیر زیرزمینی، مدلسازی سه بعدی آب زیرزمینی.

مقدمه

عمده‌ای از نیازها باشند. لذا کشورهای مختلف همواره راهکارهایی را در این جهت مورد استفاده قرار می‌دهند. در کشور ایران معمولاً از روش‌های سنتی جهت کنترل رواناب‌های شهری استفاده می‌شود. رواناب‌های شهری معمولاً مسیرهای طولانی را طی می‌کنند و ضمن اختلاط با آلاینده‌های سطوح در بیشتر مناطق با فاضلاب شهری مخلوط شده و در نهایت

آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نیازهای بشر، همواره مورد بحث و بررسی بوده است. سیلاب‌های شهری بخش عمده‌ای از منابع آبی هستند که در اکثر مواقع به صورت صحیح مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. اگر این سیلاب‌ها به‌خوبی مدیریت شوند و مورد استفاده قرار گیرند، می‌توانند پاسخگوی بخش



افزایش خدمات اکوسیستمی و رفاه شهری: پیاده‌سازی زیرساخت‌های سبز-آبی نه تنها به تأمین آب پایدار و کنترل سیلاب کمک می‌کند، بلکه خدمات اکوسیستمی دیگری را نیز به همراه دارد. به‌عنوان مثال، پارک‌ها و باغ‌های بارانی فضایی دلپذیر برای شهروندان فراهم می‌کنند و به افزایش زیبایی‌شناسی شهری کمک می‌کنند. این فضاها می‌توانند به بهبود سلامت عمومی و افزایش ارزش زمین‌های اطراف نیز منجر شوند.

در این طرح رواناب‌های شهری دیگر از طریق رودخانه‌ها مستقیم وارد دریا نمی‌شوند. راهکار شهر اسفنجی در کشور چین نیز اجرا شده است و عملکرد مناسبی داشته است (Wan and Zhang, 2026). در کشور هلند با استفاده از دشت‌های سیلابی و اجرای مخازن آب باران در سطوح شهری، اقدام به مدیریت رواناب‌های شهری شده است (Wals, 2022). در کشور کانادا از روش پشت بام‌های سبز استفاده گردیده است و روش‌های توسعه شهرهای اسفنجی بعنوان یک استراتژی موثر در کنترل سیلاب، بسیار مورد استقبال قرار گرفته است (Jiang and McBean, 2021; Yang, 2025). همچنین در بسیاری از کشورهای توسعه یافته، از راهکارهای مختلفی در این زمینه استفاده شده است. اساس کار اکثر این روش‌ها این است که سیلاب‌های شهری قبل از اینکه آلوده شوند و یا از دسترس خارج گردند، جهت تغذیه منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در تحقیق حاضر، عملکرد مجراهای نفوذ زیرزمینی جهت نفوذ رواناب به منابع آب زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از این مجراها بسیار مقرون به‌صرفه است، زیرا اجرای ساده و کارایی بالایی دارند و به‌دلیل اجرای سرپوشیده در زیرزمین، فضای قابل توجهی را اشغال نکرده و مشکلی را برای عبور و مرور ایجاد نخواهند کرد (شکل ۱). این مجراها رواناب شهری را قبل از اینکه آلوده شود، از کانال‌های مربوطه دریافت کرده و با استفاده از منافذی که در سطح خود دارند، آن را به داخل زمین نفوذ می‌دهند. این روش علاوه بر مزایای بسیار، شامل محدودیت‌هایی نیز می‌باشد که باید مورد توجه قرار گیرد. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها، گرفتگی و انسداد منافذ است. برای این منظور در اجرای این مجراهای نفوذ پذیر، باید فیلترهای مناسبی در اطراف آن‌ها ایجاد نمود. این فیلترها مانع گرفتگی منافذ می‌شوند و به‌عنوان یک لایه پوششی در اطراف منافذ عمل می‌کنند. اجرای این فیلترها نیاز به نیروی متخصص دارد و در صورتیکه به خوبی اجرا شوند، محدودیت

وارد آب‌های سطحی می‌شوند. علاوه‌براین، در مناطق شهری به‌دلیل وجود سطوح غیرقابل نفوذ، بارندگی و رواناب حاصله به داخل زمین نفوذ پیدا نمی‌کند. افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی به همراه کاهش نزولات جوی، موجب افت تراز آبخوان‌ها شده است. اجرای پروژه تغذیه مصنوعی در جبران کسری و تقویت آبخوان‌ها اهمیت زیادی دارد (خدایاری و همکاران، ۱۴۰۲). بنابراین روش‌های سنتی عملاً کمک‌چندانی به مدیریت منابع آب نمی‌کنند و باعث بروز مشکلات جانبی نیز می‌گردند. امروزه استفاده از روش‌های نوین جهت کنترل سیلاب‌های شهری، راهکاری مناسب در این امر می‌باشد که در برخی از کشورهای توسعه یافته مورد استفاده قرار می‌گیرند. در کشور ژاپن با استفاده از مخازن زیرزمینی، رواناب‌های شهری به درون این مخازن منتقل می‌شوند و ضمن تغذیه آب زیرزمینی، در فصول پرمصرف سال از این منابع مجدداً استفاده می‌کنند. در کشور آلمان از یک روش به نام «شهر اسفنجی» استفاده شده است. در این روش فضای سبز در نواحی شهری باید به‌قدری باشد که آب به راحتی از آن خارج نشده و به درون آب‌های زیرزمینی نفوذ یابد. پیاده‌سازی رویکرد شهر اسفنجی چندین کارکرد حیاتی و چندجانبه را به همراه دارد:

کنترل سیلاب و رواناب شهری: یکی از مهم‌ترین اهداف این رویکرد، کاهش آسیب‌پذیری شهرها در برابر سیلاب‌های شهری است. با جذب و کند کردن جریان رواناب‌های سطحی، فشار از روی سیستم‌های فاضلاب و زهکشی سنتی برداشته می‌شود و خطر آب‌گرفتگی معابر به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد.

تغذیه منابع آب زیرزمینی: برخلاف رویکردهای سنتی که آب باران را به سرعت از شهر خارج می‌کنند، شهر اسفنجی با تسهیل نفوذ آب به خاک، به تغذیه سفره‌های زیرزمینی کمک می‌کند. این امر نه تنها به کاهش اثرات خشکسالی کمک می‌کند، بلکه امنیت ذخایر آبی شهر را نیز به میزان زیادی افزایش می‌دهد.

بهبود کیفیت محیط زیست شهری: زیرساخت‌های سبز شهر اسفنجی نقش فیلترهای طبیعی را ایفا می‌کنند و آلاینده‌های موجود در رواناب‌های سطحی مانند فلزات سنگین، روغن و کودهای شیمیایی را تصفیه می‌نمایند. علاوه‌براین، این رویکرد با افزایش فضای سبز، به کاهش اثر جزیره گرمایی شهری، بهبود کیفیت هوا، کاهش آلودگی صوتی و افزایش تنوع زیستی کمک می‌کند.

امکان را فراهم میسازد تا رفتار آبخوان در پاسخ به شرایط مختلف هیدروژئولوژیکی، اقلیمی و مدیریتی مورد بررسی قرار گیرد (خارا و همکاران، ۱۴۰۴). در کشورهای مختلف، اخیراً مطالعات بیشتر در زمینه مدیریت رواناب‌های شهری با استفاده از روش‌های غیر سازه‌ای انجام گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد.

عملکرد دو نوع از تالیسات کنترل رواناب شهری یعنی روسازی نفوذپذیر و لوله‌های نفوذی در منطقه مسکونی شهر یوکوباما، مورد بررسی قرار گرفت (Watanabe, 1995). نتایج مطالعه نشان داد که با استفاده از تالیسات کنترل رواناب، دبی اوج رواناب به میزان ۱۵ تا ۲۰ درصد کاهش یافته است. در پژوهشی به مطالعه یک طرح که در آن قسمتی از یک لوله سوراخ‌دار توسط ضایعات چمنی محصور شده و در یک ترانشه نفوذی قرار گرفته است، پرداخته شد (Abida and Sabourin, 2006). در نهایت به این نتیجه رسیدند که بر اساس یک برنامه نظارت میدانی ۳ ماهه، میزان دبی رواناب کل برای یک سیستم لوله سوراخ‌دار با طراحی مناسب، ۱۳ برابر کمتر از یک سیستم آب باران معمولی است که نشان دهنده تأثیر مطلوب سیستم لوله سوراخ شده از نظر هیدروژئولوژیکی و بارگذاری آلاینده است. صباح نیا و همکاران (۱۴۰۳) به مدل‌سازی کمی آب زیرزمینی با استفاده از نرم‌افزار *GMS-MODFLOW* پرداختند. نتایج بیانگر دقت قابل قبول مدل ساخته شده است و همچنین پیش‌بینی مدل از رفتار آبخوان با ادامه روند جاری در ده سال آینده حاکی از میزان افت تراز آب زیرزمینی به میزان ۰.۴ متر در هر سال می‌باشد.

(Ahiablame et al., 2013)، به بررسی عملکرد دو روش بشکه (مخزن) باران و روسازی نفوذپذیر به‌عنوان روش‌های مدیریت رواناب شهری در دو حوضه شهری با مساحت‌های ۷۰ و ۴۰ کیلومتر مربع در نزدیکی ایندیاناپولیس در ایندیانا، پرداختند. نتایج نشان داد که سطوح مختلف کاربرد بشکه (مخزن) و روسازی متخلخل منجر به کاهش ۲-۱۲ درصدی رواناب و بارهای آلاینده برای دو حوضه می‌گردد. در سال ۲۰۱۶، ارزیابی اثربخشی چاه‌های خشک به‌عنوان ابزاری برای مدیریت رواناب و تغذیه آبخوان و پتانسیل آلودگی آب‌های زیرزمینی، پرداخته شد (Edwards et al., 2016) و به این نتیجه رسیدند که اثربخشی چاه‌های خشک برای تغذیه آبخوان به محیط هیدروژئولوژیکی و کاربری اراضی اطراف یک سایت و همچنین کمیت و کیفیت رواناب نفوذی بستگی دارد. در همان سال محققینی دیگر به تجزیه و تحلیل و طراحی تغذیه آب

مذکور را به حداقل کاهش می‌دهند. خوشبختانه با توجه به سابقه کشور در اجرای شبکه زهکشی در بسیاری از مناطق ایران، اجرای فیلتر و جلوگیری از گرفتگی منافذ لوله‌ها و همچنین بستر سازی مناسب توسط نیروهای متخصص، عملیاتی خواهد بود و دستورالعمل‌های لازم اجرایی نیز در کشور وجود دارد. از دیگر محدودیت‌های اجرای این روش، هزینه عملیات حفر و جایگذاری مجاری زیرزمینی، طراحی و ساخت این مجاری و غیره می‌باشد. در صورتیکه اجرای این سیستم و فیلترهای مربوطه به خوبی صورت گیرد، این روش در سطوح شهری قابلیت اجرای بسیار بالایی خواهد داشت و همچنین فضای شهری را اشغال نخواهد کرد. در مناطق پر باران، مزایای بهره‌مندی از طرح در افزایش سطح آبهای زیرزمینی، در مقایسه با هزینه‌های اجرایی قابل توجیه خواهد بود.



شکل ۱- مجرای نفوذ زیرزمینی (https://upr.ca/basement-

waterproofing/).

Figure 1- Infiltration gallery (https://upr.ca/basement-waterproofing/).

از گذشته تاکنون، راهکارهای مختلفی جهت کنترل سیلاب-های شهری برنامه‌ریزی و اعمال شده‌اند. بسیاری از این راهکارها بر مبنای جمع‌آوری و هدایت رواناب به خارج از محدوده شهری می‌باشند که در اکثر مواقع عملکرد مناسبی نداشته و همچنین باعث مشکلاتی برای مناطق پایین‌دست می‌گردند (تیموری پور و ملازاده، ۱۳۹۹). لذا امروزه راهکارهای نوین مدیریت رواناب شهری که بر مبنای نفوذ رواناب در محل می‌باشند، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. شبیه‌سازی آب زیرزمینی با استفاده از مدل‌های ریاضی این

زیرزمینی می‌تواند تأثیر دوچندانی در کنترل سیلاب داشته باشد. مدیریت رواناب در مناطق شهری با استفاده از سیستم‌های نفوذی گالری‌های خشک مورد بررسی قرار گرفت (Marazuela et al., 2022). آن‌ها به این نتیجه رسیدند که سریع‌ترین پیشروی جبهه مرطوب در اولین زمان‌های نفوذ (۲۶ ساعت)، با سرعت‌های انتشار قابل قبول و نرخ نفوذ بالا، صورت می‌گیرد و نفوذ یک فرآیند بسیار گذرا است. (Uyeno et al., 2023)، به معرفی یک رویکرد طراحی نوآورانه برای سیستم‌های زهکشی، تحت عنوان "تسهیل تغذیه آبخوان‌های کم عمق و کاهش سیل" پرداختند. نتایج نشان داد که طراحی پایدار سیستم‌های زهکشی می‌تواند به احیای چشمه‌های داخل پارک شهری کمک کند و همچنین باعث بهبود تغذیه دریاچه موجود در پارک اینگا گردد. مطالعات صورت گرفته در زمینه مدیریت رواناب شهری با استفاده از روش‌های نوین، بیانگر کارایی این روش‌ها جهت کنترل رواناب شهری و همچنین تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی می‌باشد. با استفاده از این روش‌ها و ترکیبی از آن‌ها می‌تون مناطق شهری را به شهرهای اسفنجی تبدیل نمود و ضمن کنترل رواناب شهری، از آن استفاده مناسبی کرد. برای این منظور در این مطالعه از مجراهای نفوذ پذیر زیرزمینی جهت کنترل رواناب شهری و نفوذ آن به درون زمین استفاده شده است و اثرات آن مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق، یک مدل‌سازی عددی به منظور شبیه سازی سه بعدی فرآیند انتقال رواناب سطحی به داخل زمین با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری می‌باشد. در ابتدا داده‌های اولیه مورد نیاز شامل داده‌های هواشناسی در بازه ۴۰ ساله، داده‌های خاکشناسی، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، تهیه و مرتب سازی شده‌اند و در نهایت مدل‌سازی انجام گرفته است.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی، محدوده شمال شرقی شهر قزوین می‌باشد. شهر قزوین از نظر جغرافیایی در بین ۴۸ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۰ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. ناحیه شرقی مورد مطالعه در این پژوهش دارای مساحتی در حدود ۳۰۰ هکتار می‌باشد (شکل ۲).

زیرزمینی کارآمد برای پرديس موسسه ملی فناوری (NIT)، پرداختند (Yadav & Setia, 2016). نتایج نشان داد که این روش می‌تواند هدف دوگانه مقابله با تهدید قطع آب در محوطه دانشگاه و همچنین غنی‌سازی سفره آب زیرزمینی را برآورده کند. امکان سنجی افزایش نفوذ رواناب (جهت مدیریت سیلاب شهری) در مناطق شهری گرمسیری واقع در سنگاپور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با تبدیل ۵ درصد از حوضه آبریز به چنین سازه‌هایی، نفوذ کل حوضه افزایش می‌یابد اما همچنان به سطح طبیعی نخواهد رسید (Chui & Trinh, 2016). استفاده از چاه‌های با قطر کوچک را به صورت تجربی و عددی برای یک سایت واقع در جنوب اشتایر در اتریش مورد ارزیابی قرار گرفت (Händel et al., 2016) و به این نتیجه رسیدند که چاه‌های با قطر کوچک یک رویکرد تغذیه مقرون‌به‌صرفه در این سایت و سایر سایت‌های مشابه هستند. در مطالعه‌ای مشابه، به بررسی تأثیر سطوح نفوذپذیر بر کاهش حجم رواناب در مناطق شهری پرداخته شد. نتایج نشان داد که استفاده از پوشش‌های متخلخل می‌تواند تا ۵۰ درصد رواناب سطحی را کاهش داده و نرخ نفوذ آب را افزایش دهد (Zhang et al., 2018). خیری و همکاران (۱۴۰۴) به بررسی تأثیر شیب بستر آبخوان آزاد بر تغییرات سطح آب زیرزمینی در اثر بارش با مدل‌سازی عددی پرداختند. 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. مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی فرآیند نفوذ آب از طریق سوراخ‌های زهکشی موجود در اطراف مجرای فاضلاب مورد بررسی قرار گرفت (Cao et al., 2022). نتایج نشان داد که این روش علاوه بر اینکه امکان نفوذ سیلاب به درون زمین را فراهم می‌کند، همچنین می‌تواند شرایط خشکسالی طولانی مدت را تغییر دهد. ایقبال و همکاران به تجزیه و تحلیل پتانسیل برداشت آب از طریق ایجاد روسازی‌های نفوذپذیر در استرالیا، پرداختند. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد که با استفاده از روسازی نفوذپذیر به ضخامت ۱۲۰ میلی‌متر، ۴۰ تا ۸۰ درصد از رواناب بارندگی قابل برداشت است و حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد نیاز آب خانگی را برآورده می‌کند (Iqbal et al., 2022). در سال ۲۰۲۲ با استفاده از مدل SWMM، تأثیر سطوح نفوذپذیر در کاهش دبی اوج سیلاب شهری را مورد بررسی قرار گرفت (Kumar et al., 2022). آن‌ها دریافتند که ترکیب این سطوح با سیستم‌های زیرسطحی مانند گالری‌های



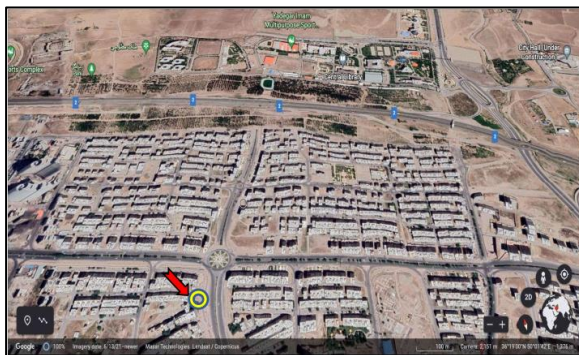
شکل ۴- مجرای دوم (بلوار شهید چگینی).
Figure 4- Second conduit (Chegini Boulevard).

داده‌های هواشناسی

برای انجام تحقیق حاضر، داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل داده‌های بارش (بارندگی ۶ ساعته روزانه) برای منطقه مورد مطالعه در یک بازه‌ی زمانی طولانی مدت (۴۰ساله) مورد بررسی قرار گرفت. این اطلاعات از اداره هواشناسی استان قزوین اخذ گردیده و پس از ترمیم داده‌های مجهول و انجام آنالیزهای آماری، مرتب سازی شده است و در نهایت برای سایر مراحل انجام پژوهش، مورد استفاده قرار گرفت.

داده‌های خاکشناسی

داده‌های خاکشناسی مورد نیاز با استفاده از داده‌های حاصل از یکی از گمانه‌های حفر شده در منطقه مورد مطالعه به دست آمده است. این گمانه توسط آزمایشگاه معتبر خاک در شهر قزوین حفر شده و مربوط به پی‌سازی یک برج مسکونی مستقر در منطقه مطالعاتی می‌باشد. گمانه در منطقه پونک در نقطه‌ای به عرض جغرافیایی ۴۱۲۶۲۷.۷۰ و طول جغرافیایی ۴۰۱۹۲۹۱.۴۸ حفر گردیده است، بیانگر این است که خاک منطقه تا عمق ۱۸ متری از نوع شن لای دار همراه با ماسه است (شکل ۵). سایر داده‌های خاکشناسی مورد نیاز از طریق داده‌های حاصل از این گمانه به دست می‌آیند.



شکل ۵ - تصویر محل گمانه احداث شده در منطقه مورد مطالعه.
Figure 5- Borehole location in the study area.

مدل‌ها و نرم‌افزارهای مورد استفاده



شکل ۲- نقشه منطقه مورد مطالعه (محدوده شمال شرقی شهر قزوین).

Figure 2- The Map of the study area (Northeastern area of Qazvin city).

همچنین مجاری نفوذ زیرزمینی در مسیر بلوار شهید چگینی و بلوار نخبگان-خیابان دانشگاه در نظر گرفته شده‌اند (جدول ۱). طول هریک از این مجراها، در جدول ۱ مشخص است. در شکل‌های ۳ و ۴ تصاویر مربوط به این خیابان‌ها مشخص می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی مجراهای نفوذ زیرزمینی.

Table 1- Geographical characteristics of infiltration Gallery.

Conduit Length (m)	Location	Name of the underground infiltration conduit
2132	Nokhbegan Boulevard- Shahid Babaei	First Channel
1757	Shahid Chegini Boulevard	Second Channel



شکل ۳- مجرای اول (بلوار نخبگان-خیابان دانشگاه).
Figure 3- First conduit (Nokhbegan Boulevard- Daneshgah Street).

با استفاده از قانون بقای جرم، تغییر خالص در عمق d در واحد زمان t به سادگی از تفاوت بین نرخ ورودی و خروجی در زیرحوضه حاصل می‌گردد (راهنمای مدل):

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (1)$$

که در آن:

i : شدت بارندگی و ذوب برف ($\frac{m}{s}$)

e : شدت تبخیر ($\frac{m}{s}$)

f : شدت نفوذ ($\frac{m}{s}$)

q : شدت رواناب ($\frac{m}{s}$)

توجه داشته باشید که شارهای i ، e ، f و q به صورت نرخ

$$\text{جریان در واحد سطح بیان می شوند } (\frac{m^3/s}{m^2}) = \frac{m}{s}$$

با فرض اینکه جریان در سطح زیرحوضه طوری رفتار می‌کند که گویی جریان یکنواخت در یک کانال مستطیلی به عرض $W(m)$ ، ارتفاع $d - d_s$ و شیب S است، می‌توان از معادله مانینگ برای بیان دبی حجمی رواناب (Q (m^3/s)) به شکل زیر استفاده نمود (Lewis A. Rossman, ۲۰۱۷):

$$Q = \frac{1}{n} S^{1/2} R_X^2 A_X \quad (2)$$

در این معادله، n ضریب زبری سطح، S شیب ظاهری یا متوسط زیرحوضه (m/m)، A_X مساحتی است در عرض زیرحوضه که رواناب از آن عبور می‌کند (m^2) و R_X شعاع هیدرولیکی مرتبط با این ناحیه است (m).

نرم‌افزار Visual MODFLOW Flex 10.0

نرم‌افزار Visual MODFLOW Flex 10.0 محصول شرکت Waterloo Hydrogeologic و Schlumberger، یکی از تخصصی‌ترین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی سه بعدی و آنالیز آب‌های زیرزمینی و انتقال پسماند می‌باشد. این نرم‌افزار نخستین بار در سال ۱۹۸۴ توسط USGS توسعه داده شد (مک دونالد و هاربا، ۱۹۸۴). نرم‌افزار Visual MODFLOW Flex (VMOD) یک بسته نرم‌افزاری قدرتمند است که ابزارهایی را برای ساخت مدل‌های مفهومی و عددی سه بعدی آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های خام GIS، فراهم می‌کند (User's Manual, Visual MODFLOW Flex 10.0, Waterloo Hydrogeologic, 2024). این مدل، یک مدل شبیه‌سازی سه بعدی می‌باشد که به زبان فرتن بوده و قابلیت اجرا در اکثر کامپیوترها را دارد.

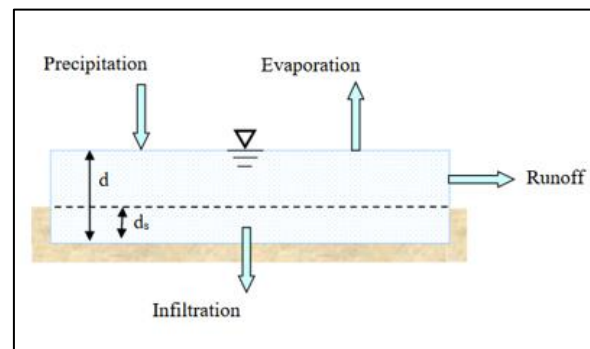
در این پژوهش از نرم‌افزار SWMM^۱ برای مدل‌سازی رواناب استفاده شده است. همچنین جهت شبیه‌سازی سه بعدی نفوذ جریان به داخل زمین از طریق مجراهای نفوذ پذیر از نرم‌افزار Visual ModFlow Flex 10.0 استفاده شده است. علاوه بر این جهت آماده‌سازی داده‌های مورد نیاز از نرم‌افزارهای ArcGIS و Surfer استفاده گردیده است.

نرم‌افزار SWMM 5.2

نرم‌افزار SWMM 5.2^۲ یک مدل شبیه‌سازی بارش-رواناب دینامیک می‌باشد که برای شبیه‌سازی موقت یا طولانی مدت (دائمی) کمیت و کیفیت رواناب حاصل از مناطق عمدتاً شهری، مورد استفاده قرار می‌گیرد (راهنما مدل). این نرم‌افزار اولین بار در سال ۱۹۷۱ توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA^۳) ارائه گردید و از آن زمان تاکنون، چندین مرتبه ارتقاء یافته است.

SWMM یک مدل شبیه‌سازی بارش-رواناب می‌باشد که برای مدل‌سازی از اصول بقای جرم، انرژی و تکانه (اندازه حرکت) بهره می‌گیرد. این مدل از طریق روش‌هایی، مدل‌سازی کمیت و کیفیت رواناب شهری را توسط فرآیندهای فیزیکی انجام می‌دهد.

SWMM از یک مدل مخزن برای تخمین رواناب سطحی تولید شده توسط بارندگی در یک زیرحوضه استفاده می‌کند. رواناب سطحی Q ، تنها زمانی رخ می‌دهد که عمق آب d در "مخزن" از حداکثر ذخیره فرورفتگی d_s ، بیشتر شود که در این صورت جریان خروجی با استفاده از معادله مانینگ به دست می‌آید (شکل ۶).



شکل (۶) - تصویر مخزن مفروض در مدل SWMM.
Figure 6- Image of the assumed reservoir in the SWMM Model.

³ United States Environmental Protection Agency

¹ Storm Water Management Model

² Storm Water Management Model

روش عرض مستطیل معادل مطابق با راهنمای مدل استفاده شده است و مقدار آن محاسبه شده است. درصد مناطق نفوذ پذیر و نفوذناپذیر بر اساس نقشه‌های کاربری اراضی، نقشه‌های اتوکد شهری و نقشه‌های هوایی و همچنین بازدید میدانی، تعیین و در نهایت مقادیر مربوطه به صورت دستی وارد مدل شده است. همچنین با استفاده از نقشه کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیک خاک منطقه مورد مطالعه، شماره منحنی (CN) براساس راهنمای مدل تعیین می‌گردد و در نهایت با توجه به مساحت مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر در هر یک از زیرحوضه‌ها، مقدار CN از طریق صورت میانگین‌گیری وزنی، اصلاح می‌گردد (وانی لیستا و همکاران، ۱۹۹۷). در نهایت شماره منحنی (CN) برای زیرحوضه‌های منطقه مطالعاتی برابر با ۸۰ در نظر گرفته شده است. برای تعیین ضریب زبری مانینگ از جداول و استانداردهای راهنمای مدل استفاده شده است و در نهایت برای تعیین ضریب زبری مربوط به هر یک از زیرحوضه‌ها، از روش میانگین‌گیری وزنی براساس مساحت سطوح مختلف استفاده شده است. با توجه به جداول مربوطه ضریب زبری مانینگ برای مناطق نفوذ پذیر برابر با ۰/۰۵ و برای مناطق نفوذناپذیر برابر با ۰/۰۲ است. همچنین ضریب زبری مانینگ برای کانال‌های جمع آوری سیلاب شهری (کانال‌های بتنی) برابر با ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است. ارتفاع ذخیره سطحی (چالابی) در مناطق نفوذپذیر و نفوذناپذیر براساس جداول مربوطه در راهنمای مدل محاسبه شده است که این ارتفاع برای مناطق نفوذپذیر برابر با ۳ میلیمتر و برای مناطق نفوذناپذیر برابر با ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. پس از فراهم نمودن تمامی اطلاعات مورد نیاز، مدل برای منطقه مورد نظر در نرم‌افزار SWMM ایجاد می‌گردد. در ابتدا شمای کلی از منطقه مطالعاتی و زیر حوضه‌ها ترسیم می‌شود و در ادامه زیرحوضه‌ها، اتصالات و کانال‌ها مشخص می‌شوند. سپس اطلاعات مربوط به هر یک از بخش‌ها وارد مدل می‌گردد. با تکمیل نمودن اطلاعات، مدل اجرا می‌گردد و در نهایت انواع خروجی‌های حاصل به دست خواهد آمد. با توجه به هدف تحقیق، می‌توان به تحلیل نتایج مختلف پرداخت و از نتایج مد نظر برای ادامه پژوهش استفاده نمود.

مدل Visual MODFLOW Flex

جهت مدل‌سازی در این نرم‌افزار از نقشه‌های مختلفی متناسب با هدف مدل‌سازی، استفاده می‌گردد. این نقشه‌ها

این نرم‌افزار از معادلات اساسی حاکم بر جریان آب زیرزمینی جهت شبیه‌سازی استفاده می‌کند. معادله کلی حاکم بر جریان آب‌های زیرزمینی از ترکیب سه معادله داری، پیوستگی و برنولی حاصل می‌گردد که رابطه کلی به صورت معادله ۳ خواهد بود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(-K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \\ = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \pm Q_s \end{aligned} \quad (3)$$

که در آن:

h : بار هیدرولیکی (m)

t : زمان (s)

K : ضریب هدایت هیدرولیکی ($\frac{m}{s}$)

S_s : ذخیره مخصوص ($\frac{1}{m}$)

Q_s : حجم آب تغذیه شده یا تخلیه شده در واحد حجم آبخوان ($\frac{m^3}{s}$)

روند شبیه‌سازی

مدل SWMM

برای انجام شبیه‌سازی در نرم‌افزار SWMM در ابتدا باید رابطه شدت-مدت-دوره بازگشت (IDF) استخراج گردد. با استخراج این رابطه، سری زمانی مورد نیاز برای مدل‌سازی رواناب سطحی حاصل می‌گردد. برای این منظور، با استفاده از داده‌های تهیه شده از سازمان هواشناسی در دوره زمانی مدنظر جدول شدت-مدت-دوره بازگشت تهیه می‌گردد. سپس با استفاده از جدول حاصل، نمودار شدت-مدت-دوره بازگشت ترسیم می‌گردد. در نهایت با توجه به نمودار به دست آمده، رابطه IDF تعیین می‌گردد. در مرحله بعد باید منطقه مورد مطالعه به زیرحوضه‌ها یا واحدهای هیدرولوژیکی تقسیم گردد. هر یک از زیرحوضه‌ها محدوده‌ای از سطح منطقه مورد مطالعه می‌باشد که براساس شیب زمین و وضعیت توپوگرافی، زهکشی طبیعی از این محدوده صورت می‌گیرد و در نهایت به یک خروجی منتهی می‌گردد. در این پژوهش جهت تقسیم زیرحوضه‌ها، از نرم‌افزار GIS و الحاقیه HEC-GeoHMS استفاده شده است. برخی از پارامترهای فیزیکی زیرحوضه‌ها شامل مساحت و شیب متوسط، با استفاده از الحاقیه HEC-GeoHMS به دست می‌آیند، بنابراین نیازی به محاسبه مجدد آن‌ها نیست. سایر پارامترها باید براساس روابط و استانداردهای مربوطه تعیین گردند. برای تعیین عرض معادل زیرحوضه‌ها از

رقوم هد هیدرولیکی اولیه در محدوده مطالعاتی برابر با ۱۳۲۵ متر می‌باشد.

شرایط مرزی

شرایط مرزی در حالت کلی به دو دسته شرایط مرزی فیزیکی و شرایط مرزی هیدرولیکی تقسیم می‌گردد.

شرایط مرزی فیزیکی: فیزیکی بیانگر شرایط واقعی منطقه از نظر مشخصات زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی می‌باشند که شامل مرز ناحیه مورد مطالعه، موقعیت مکانی مجراها و مرز فوقانی و تحتانی می‌باشند که برای منطقه مورد مطالعه تعیین شده‌اند.

شرایط مرزی هیدرولیکی: بیانگر شرایط مصنوعی می‌باشند که به مدل داده می‌شوند که شامل بار هیدرولیکی در مرز ناحیه و بار هیدرولیکی در مجاری می‌باشند. با توجه به اینکه مرز ناحیه مورد مطالعه یک مرز با بار هیدرولیکی مشخص (دیریکله) است، مقدار بار هیدرولیکی در مرزها ثابت و متناسب با هد هیدرولیکی اولیه داده شده به مدل، در نظر گرفته می‌شود. بار هیدرولیکی در مجاری از نوع مرز با جریان وابسته به بار هیدرولیکی (مرز ناپایدار یا نیوتن یا کوشی) می‌باشد (نشریه شماره ۳۳۷- الف وزارت نیرو). در این پژوهش جهت انجام مدلسازی مجاری نفوذ پذیر از بسته رودخانه (River) استفاده شده است و شرایط مرزی و هیدرولیکی مورد نیاز در این بسته وارد نرم‌افزار شده است. بنابراین سایر مشخصات مجراها با توجه به بسته رودخانه استفاده شده به صورت جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳ - مشخصات مورد نیاز براساس بسته رودخانه در مدل.

Table (3) Required specifications based on required inputs in the model

Hydraulic conductivity of beds and walls (m/s)	Width (m)	thickness (m)	Duct name
0.000004	1	0.1	First channel
0.000004	1	0.1	Second channel

مشخصات آبخوان

مشخصات آبخوان شامل ضریب هدایت هیدرولیکی (ضریب نفوذ پذیری)، ضریب ذخیره ویژه، ضریب عملکرد ویژه، تخلخل موثر و تخلخل کل، می‌باشند که باید برای منطقه مورد مطالعه مشخص گردند. با توجه به منطقه مورد مطالعه و مشخصات خاکشناسی این منطقه و همچنین با استفاده از

شامل نقشه محدوده مورد مطالعه، نقشه DEM (ارتفاعی) منطقه، نقشه خاک‌شناسی، نقشه کاربری اراضی، نقشه مکان چاه‌ها، نقشه مکان رودخانه‌ها و غیره، می‌باشد. در این پژوهش، نقشه‌های اولیه دانلود شده است و سپس برای تهیه سایر نقشه‌های مورد نیاز، از نرم‌افزارهای ArcGIS و Surfer استفاده شده است. با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS می‌توان نقشه‌های با فرمت shape را به دست آورد که شامل نقشه مربوط به محدوده مورد مطالعه، چاه‌ها، رودخانه‌ها، مجاری و غیره می‌باشد. همچنین با استفاده از نرم‌افزار Surfer می‌توان نقشه‌های با فرمت grd. مانند نقشه‌های لایه‌های مختلف ارتفاعی از منطقه مورد مطالعه را تهیه نمود. محدوده مورد مطالعه جهت مدلسازی در نرم‌افزار Visual MODFLOW Flex از عرض جغرافیایی ۴۰۱۴۵۱۵ تا ۴۰۲۳۴۸۵ و طول جغرافیایی ۴۰۸۵۰۵ تا ۴۱۷۴۷۵ می‌باشد. با توجه به منطقه مورد مطالعه و مطالعات میدانی صورت گرفته، از دو مجرای زیرزمینی جهت تغذیه سفره آب زیرزمینی استفاده می‌گردد. این مجاری زیرزمینی در مسیر بلوار شهید چگینی و بلوار نخبگان-شهید بابایی (خیابان دانشگاه) در نظر گرفته شده‌اند، زیرا فضای کافی در کنارها و حاشیه این مسیرها جهت احداث آن‌ها در این مناطق وجود دارد. با توجه به فضای موجود و محدودیت‌های مکانی ابعاد مجاری به صورت جدول ۲ است. همچنین ضریب زبری مانینگ برای مجاری براساس جداول موجود در راهنمای مدل تعیین گردیده و در جدول ۲ ذکر شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی مجراها.

Table 2- Physical characteristics of conduits.

Manning roughness coefficient	Width (m)	Length (m)	Name of permeable channel
0.025	1	2132	First channel
0.025	1	1757	Second channel

یکی از پارامترهای اساسی در راستای مدلسازی، رقوم سطح آب در هریک از مجاری می‌باشد که از طریق رابطه مانینگ تعیین شده است. در واقع برای هریک از روزهای سال آبی مدنظر، دبی رواناب مربوط به مجراها مشخص است و در نتیجه با استفاده از رابطه مانینگ عمق آب مربوط به هریک از دبی‌ها در این مجاری تعیین می‌گردد. در نرم‌افزارهای مدلسازی، باید برای شروع کار مقادیر اولیه به مدل داده شود تا نرم‌افزار با توجه به این مقادیر، از یک نقطه محاسبات را شروع کند و در نهایت به نتیجه برسد. با توجه به مطالعات صورت گرفته مقدار

راهنمای مدل، تخلخل مرثر برابر با ۱۶ درصد در نظر گرفته شده است.

برای ناحیه مورد مطالعه، اندازه سلولها برابر ۹۰ متر در ۹۰ متر در نظر گرفته شده است و بنابراین محدوده مطالعاتی به ۱۰۰ ستون و ۱۰۰ ردیف تقسیم شده است. سری زمانی برای انجام این مطالعه سری زمانی یک سال یا ۳۶۵ روز می باشد و گام زمانی برای انجام شبیه سازی برابر با ۱ مرحله در نظر گرفته شده است. پس از تهیه داده ها و اطلاعات مورد نیاز و همچنین دریافت نتایج حاصل از شبیه سازی رواناب سطحی در نرم افزار SWMM، تمامی داده ها وارد نرم افزار Visual MODFLOW Flex می گردد و تنظیمات مربوطه اعمال شده و مدلسازی آب زیرزمینی صورت می گیرد. در نهایت با استفاده از داده های بارش مربوط به یک سال آبی مشخص (سری زمانی سالانه) مدلسازی رواناب سطحی در مدل SWMM انجام شده است و در نتیجه رواناب سطحی مربوط به هر یک از مجراها به دست می آید. در نهایت رواناب هر یک از مجراها به صورت یک سری زمانی سالانه وارد نرم Visual MODFLOW Flex می شود و مدلسازی آب زیرزمینی در این نرم افزار صورت می گیرد و نتایج حاصل هم به صورت بصری (تصاویر مختلف) و هم به صورت عددی دریافت می گردد و در نهایت این نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرند.

نتایج و بحث

با توجه به روند پژوهش که در قسمت های قبل ارائه شد، پارامترهای ورودی تعیین و وارد مدل ها شده اند و در نهایت نتایج مربوط به هر یک از مدل ها و نتایج کلی حاصل شده است.

مدل SWMM

رابطه (IDF)

با استفاده از داده های هواشناسی مربوط به بازه زمانی ۴۰ ساله (از سال آبی ۱۳۶۰-۱۳۶۱ تا سال آبی ۱۳۹۹-۱۴۰۰)، رابطه IDF حاصل به صورت معادله ۴-۱ می باشد:

$$i = \frac{95 \times T_p^{0.16}}{t^{0.67}} \quad (1-4)$$

که در آن i : شدت بارش ($\frac{mm}{hr}$)، t : مدت بارش (min)، Tr : دوره بازگشت ($Year$)، می باشند.

تعیین زیر حوضه های موجود در محدوده مطالعاتی با استفاده از

نرم افزار HEC-GeoHMS

با توجه به شیب منطقه و مسیر رودخانه های حاصل از مدل HEC-GeoHMS، زیرحوضه هایی که به منطقه مورد مطالعه منتهی می گردند، مشخص می شوند (شکل ۷).

اطلاعات موجود در سایر مطالعات انجام گرفته در این محدوده، می توان مقادیر این پارامترها را تعیین نمود.

ضریب هدایت هیدرولیکی (K)

در این مطالعه با استفاده از داده های خاکشناسی حاصل از گمانه حفر شده در منطقه مورد مطالعه و همچنین براساس جداول مربوطه، ضریب هدایت هیدرولیکی تعیین شده است. با توجه به اینکه ضریب هدایت هیدرولیکی در جهت افقی و عمودی برابر نیست (هدایت هیدرولیکی ناهمسانگرد)، معمولاً مقدار این ضریب در جهت عمودی ده درصد مقدار آن در جهت افقی در نظر گرفته می شود. با توجه به اینکه خاک منطقه ی مورد مطالعه تا عمق ۱۸ متری از نوع شن لای دار همراه با ماسه می باشد، ضریب هدایت هیدرولیکی براساس مقادیر شن و ماسه و لای در اعماق مختلف مطابق جدول ۴ است.

جدول ۴- ضریب هدایت هیدرولیکی لایه های خاک.
Table 4- Hydraulic conductivity coefficient in different soil layers.

Vertical hydraulic conductivity coefficient $K_z (\frac{m}{s})$	Horizontal hydraulic conductivity coefficient $K_y (\frac{m}{s})$ و $K_x (\frac{m}{s})$	Soil depth (m)
0.000004	0.00004	0-8
0.0000036	0.000036	8-18

ضریب ذخیره ویژه (S_y)

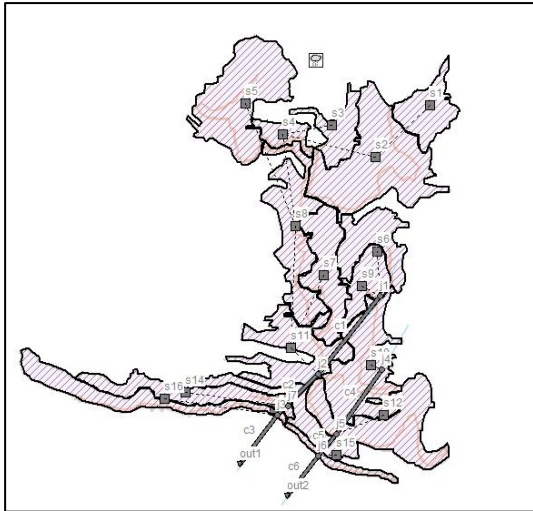
ضریب ذخیره ویژه، حجم آبی است که یک واحد حجم آبخوان در اثر یک واحد کاهش و یا افزایش سطح آب (هد هیدرولیکی)، رهاسازی و یا ذخیره می کند. جهت برآورد این پارامتر از جداول و داده های خاکشناسی استفاده می شود. در نتیجه مقدار ضریب ذخیره ویژه برای این منطقه برابر با $7.87 \times 10^{-5} (\frac{1}{m})$ می باشد.

ضریب آبدهی (عملکرد) ویژه (S_y)

به حجم آبی که می توان از واحد حجم آبخوان از طریق پمپاژ یا تحت اثر گرانش استخراج نمود، آبدهی (عملکرد) ویژه می گویند. برای مطالعه حاضر، ضریب آبدهی ویژه آبخوان برابر با ۲۸.۹۷۶ درصد می باشد که براساس جداول و پارامترهای خاکشناسی به دست آمده از گمانه حفر شده، تعیین می گردد.

تخلخل کل (n یا T_p) و تخلخل مؤثر (e یا E_p)

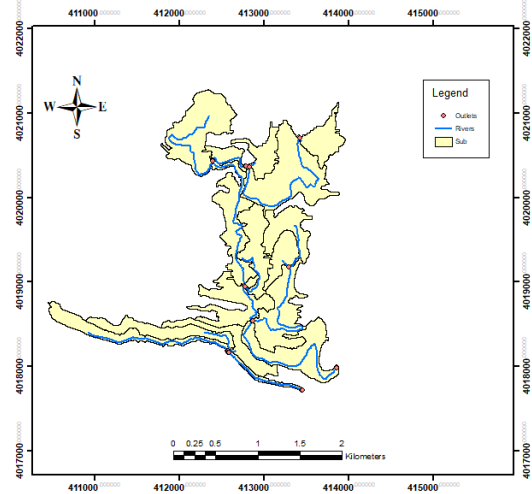
براساس جداول استاندارد و مطالعات خاکشناسی صورت گرفته، مقدار تخلخل کل برای آبخوان برابر با ۳۶.۵۵۷ درصد می باشد. تخلخل مؤثر معمولاً به قسمتی از تخلخل کل اطلاق می شود که در این مطالعه براساس تخلخل کل و همچنین



شکل ۸- نمای کلی مدلسازی در نرم افزار SWMM.
Figure 8- SWMM Overview.

با اجرای مدل مشخص شد که حجم کل رواناب سالانه (مربوط به سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸) که در ناحیه شرقی شهر قزوین ایجاد می گردد، برابر با ۱۱۲۷۰۵۰ متر مکعب است که حجم رواناب ورودی به مجرای اول برابر با ۸۹۲۷۸۲ متر مکعب و رواناب ورودی به مجرای دوم برابر با ۲۳۴۲۶۸ متر مکعب می باشد. هیدروگراف مربوط به رواناب سالانه برای هر یک از مجراها در شکل های ۹ و ۱۰ آمده است.

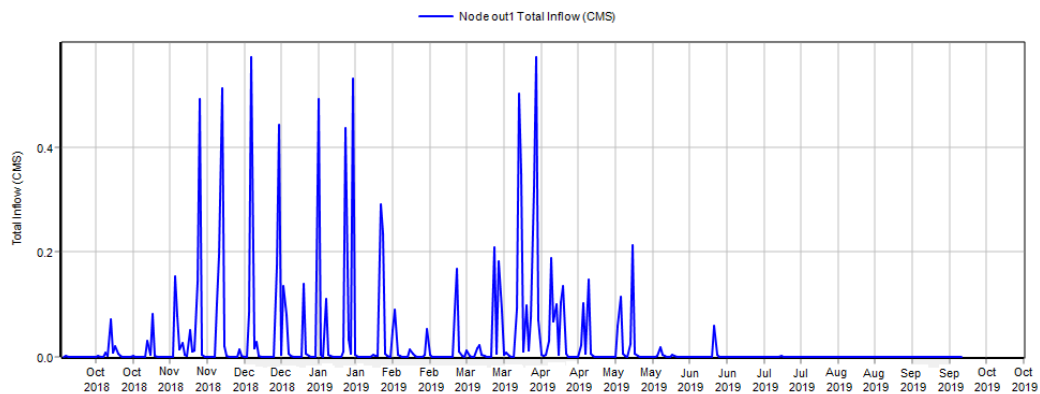
همانگونه که در هیدروگرافها مشاهده می گردد مجرای اول به دلیل اینکه رواناب حاصل از تعداد زیرحوضه های بیشتری را تحویل می گیرد، دارای سیکل های بزرگتری نسبت به مجرای دوم در طول سال می باشد.



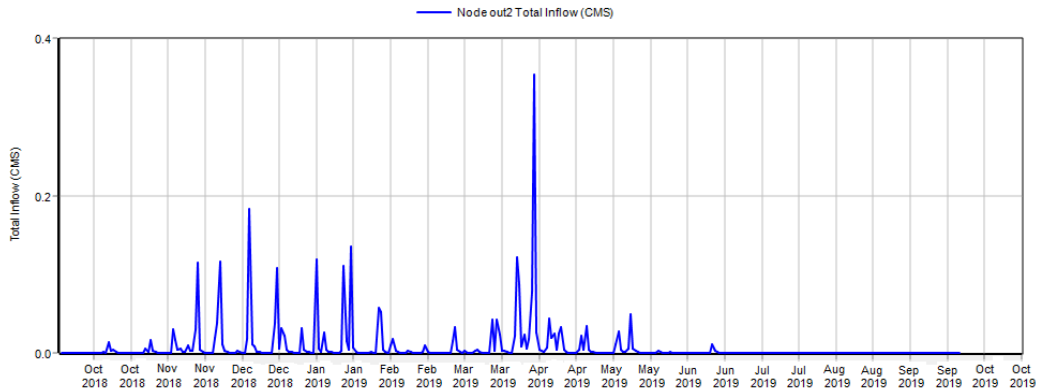
شکل ۷- زیرحوضه های مرتبط با منطقه مطالعاتی.
Figure 7- Sub-catchments in the study area.

تعیین رواناب سطحی با استفاده از نرم افزار SWMM

پس از مشخص نمودن زیرحوضه های موثر در منطقه مورد مطالعه، شمای کلی مدل SWMM ایجاد شده است که به صورت شکل ۸ می باشد. همان گونه که مشاهده می گردد، خروجی های ۱ و ۲ (out1 و out2) مطابق بر مجراهای نفوذ سیلاب می باشند. بنابراین رواناب سطحی منتهی به خروجی اول باید برای نفوذ وارد مجرای اول گردد و همچنین رواناب سطحی منتهی به خروجی دوم باید وارد مجرای دوم گردد.



شکل ۹- هیدروگراف رواناب سالانه (۱۳۹۷-۱۳۹۸) مربوط به مجرای اول.
Figure 9- Runoff hydrograph (2018-2019) -first conduit.



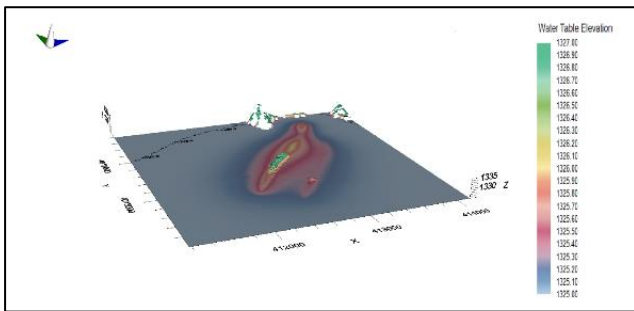
شکل ۱۰- هیدروگراف رواناب سالانه (۱۳۹۷-۱۳۹۸) مربوط به مجرای دوم.
Figure 10- Runoff hydrograph (2018-2019) -Second conduit.

سمت کناره‌ها حرکت نموده است که این امر بیانگر تاثیر نفوذ رواناب در سفره آب زیرزمینی می‌باشد. در واقع همانگونه که در شکل مشخص است تراز آب اولیه که در کل منطقه برابر با ۱۳۲۵ متر بوده است، به تدریج به سمت کناره‌ها حرکت می‌نماید و در محل احداث مجراهای نفوذپذیر زیرزمینی به دلیل نفوذ رواناب به درون زمین، تراز آب افزایش یافته است.

مدل Visual MODFLOW Flex

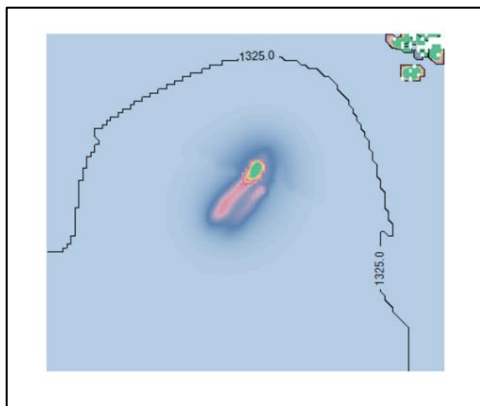
بر اساس نتایج مدلسازی مشخص شد که در یک سال آبی، از میزان ۱۱۲۷۰۵۰ متر مکعب حجم کل رواناب سالانه در منطقه مورد مطالعه، میزان ۲۵۰۵۲۳.۸۷۵ متر مکعب حجم رواناب به درون زمین نفوذ پیدا کرده است. این حجم نفوذ یافته به طور میانگین معادل ۵ سانتی‌متر افزایش تراز آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه می‌باشد که این افزایش تراز آب زیرزمینی در قسمت‌هایی که مجاری احداث شده‌اند، مقدار بیشتری دارد و در فواصل دورتر از محل احداث این مجاری، مقدار کمتری خواهد داشت.

در ابتدای مدلسازی، رقوم تراز آب زیرزمینی برای منطقه مورد مطالعه برابر با ۱۳۲۵ متر در نظر گرفته شد، تا مادامی که روانابی در منطقه نفوذ پیدا نکرده است، تراز آب در تمام قسمت‌ها برابر با رقوم اولیه می‌باشد (شکل ۱۱).



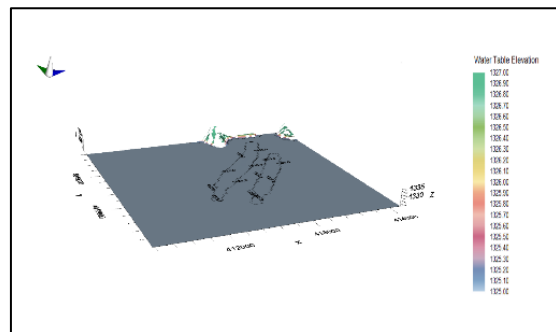
شکل ۱۲- نمای سه بعدی سطح آب زیرزمینی در روز ۲۳۰ام از مدلسازی.

Figure 12- 3D view of groundwater level (Day 230 in the model).



شکل ۱۳- نمای دو بعدی سطح آب زیرزمینی در روز ۲۳۰ام از مدلسازی.

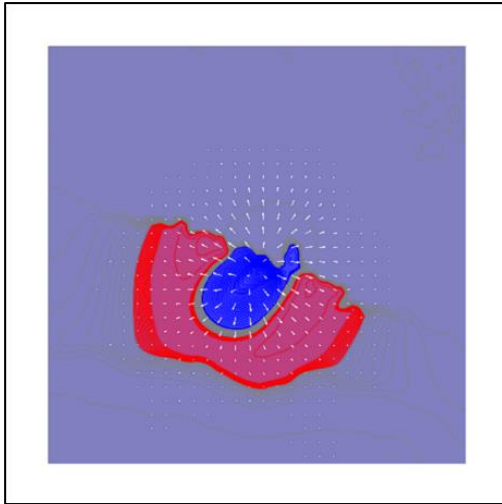
Figure 13- 2D view of groundwater level (Day 230 in the model).



شکل ۱۱- نمای سه بعدی سطح آب زیرزمینی در روز اول از مدلسازی.

Figure 11- 3D view of groundwater level (Day 1 in the model).

پس از گذشت ۲۳۰ روز از مدلسازی، تراز آب زیرزمینی در محل احداث مجاری تا میزان ۲ متر افزایش داشته است (شکل ۱۲ و ۱۳). همچنین خط تراز مربوط به تراز ۱۳۲۵ متر به

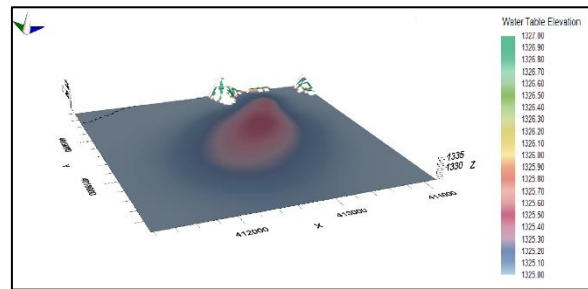


شکل ۱۵- جهت حرکت آب زیرزمینی در روز ۳۶۵م مدلسازی.

Figure 15- Groundwater Direction on the 365th day of modeling.

با توجه به نتایج به دست آمده، مشخص شد که حجم کل رواناب سالانه (مربوط به سال آبی ۱۳۹۷-۱۳۹۸) که در ناحیه شرقی شهر قزوین ایجاد می‌گردد، برابر با ۱۱۲۷۰۵۰ متر مکعب است. از این میزان، حجم رواناب ورودی به مجرای اول برابر با ۸۹۲۷۸۲ متر مکعب و رواناب ورودی به مجرای دوم برابر با ۲۳۴۲۶۸ متر مکعب می‌باشد. همچنین حجم کل رواناب نفوذ یافته در مدت زمان یک سال برابر با ۲۵۰۵۲۳۰۸۷۵ متر مکعب می‌باشد این حجم نفوذ یافته معادل ۲۲ درصد از حجم کل رواناب سالانه می‌باشد. در واقع اجرای این روش می‌تواند تاثیر مطلوبی در کاهش حجم رواناب داشته باشد. در اثر نفوذ رواناب سالانه در محدوده مورد مطالعه، تراز آب زیرزمینی تقریباً برابر با ۵ سانتی‌متر افزایش خواهد یافت. در صورتیکه این راهکار هرساله در این منطقه اجرا گردد، پس از ۱۰ سال تقریباً ۰/۵ متر سطح آب زیرزمینی افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین در صورتیکه از تعداد مجراهای بیشتری در این منطقه استفاده گردد، میزان کاهش حجم رواناب شهری و افزایش تراز آب زیرزمینی قابل توجه خواهد بود. بنابراین اجرای این راهکار در بلند مدت می‌تواند تاثیرات بسیار مطلوبی در کاهش حجم رواناب شهری و همچنین در افزایش تراز آب زیرزمینی داشته باشد و این موضوع بیانگر بازدهی بالای این روش می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده، این کار به تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی کمک قابل توجهی خواهد نمود و تراز آب زیرزمینی در بلند مدت افزایش پیدا خواهد کرد. اهمیت این موضوع در شرایط امروز به وضوح مشخص است؛ چراکه امروزه بهره برداری از منابع آب زیرزمینی به شدت افزایش

در انتهای سال آبی (روز ۳۶۵) افزایش تراز آب زیرزمینی به مناطق کناری محل احداث مجاری تعمیم داده می‌شود (شکل ۱۴). در واقع خط تراز ۱۳۲۵ متر کاملاً به کناره‌های محدوده مطالعاتی نزدیک شده است و این امر نشان‌دهنده افزایش تراز آب زیرزمینی در قسمت عمده‌ای از منطقه می‌باشد. در اثر نفوذ رواناب در طول یک سال، بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه تحت تاثیر رواناب نفوذ یافته قرار خواهد گرفت. همان‌گونه که در شکل ۱۲ مشخص است، تراز آب زیرزمینی در ناحیه صورتی رنگ کاملاً افزایش یافته است و هرچه به کناره‌ها نزدیک می‌شویم، افزایش تراز کمتری مشاهده می‌گردد. همچنین این افزایش تراز متناسب با شیب لایه‌های زمین می‌باشد که این موضوع نیز در تصویر سه بعدی به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۱۴- نمای سه بعدی سطح آب زیرزمینی در روز ۳۶۵م از مدلسازی.

Figure 14- 3D view of groundwater level (Day 365 in the model).

با توجه به شکل ۱۵، جهت حرکت جریان آب زیرزمینی و همچنین محدوده‌ای که افزایش تراز در آن رخ می‌دهد، قابل مشاهده است. این تصویر به خوبی حرکت جریان در جهت شیب و همچنین از مجاری به اطراف را نشان می‌دهد. در واقع شکل ۱۵ نشان‌دهنده جهت و نوع حرکت آب نفوذ یافته در زیر زمین است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد، حرکت آب براساس شیب زمین و از طرف مجاری احداثی به سمت نواحی کناری صورت می‌گیرد.

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

تیموری پور، ا.، ملازاده، م. (۱۳۹۹). مدیریت روناب های حاصل از بارش در مناطق شهری و غیرشهری، نهمین همایش ملی سامانه های سطوح آبرگیر باران، تبریز.

خارا، س.، صادقی لاری، ع. و سامانی، س. (۱۴۰۴). شبیه سازی عددی آب زیرزمینی با استفاده از مدل ریاضی (مطالعه موردی: آبخوان کهورستان، استان هرمزگان). هیدروژئولوژی، ۱۰(۱): ۵۰-۶۰.

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

خیری، م.، زمانی لنجانی، م.، رابطی مقدم، م. و منتصری، ح. (۱۴۰۴). تاثیر شیب بستر آبخوان آزاد بر تغییرات سطح آب زیرزمینی در اثر بارش با مدل سازی عددی. هیدروژئولوژی، ۱۰(۱): ۴۹-۳۵.

Reference

- Abida, H., & Sabourin, J. F. (2006). Grass swale-perforated pipe systems for stormwater management. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(1): 55-63.
- Ahiablame, L. M., Engel, B. A., & Chaubey, I. (2013). Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement. *Journal of environmental management*, 119: 151-161.
- Cao, Y., Xu, M., Ni, P., & Mei, G. (2022). Physical and numerical modelling of infiltration from drainage holes for perforated storm sewer. *Acta Geotechnica*, 17(2): 527-543.
- Chui, T. F. M., & Trinh, D. H. (2016). Modelling infiltration enhancement in a tropical urban catchment for improved stormwater management. *Hydrological Processes*, 30(23): 4405-4419.
- Edwards, E. C., Harter, T., Fogg, G. E., Washburn, B., & Hamad, H. (2016). Assessing the effectiveness of drywells as tools for stormwater management and

پیدا کرده است و از سوی یگر به دلیل غیرقابل نفوذ شدن اکثر مناطق شهری، تغذیه به آبخوان ها در این مناطق به شدت کاهش یافته است. نتایج حاصل بیانگر این است که این روش راهکاری مناسب جهت اجرای ایده شهر اسفنجی در محدوده مورد مطالعه است. همچنین می توان از این روش به صورت ترکیبی با دیگر روش های نوین، استفاده نمود و تاثیرات مطلوب تری را حاصل نمود.

نتیجه گیری

امروزه یکی از مهم ترین موضوعاتی که در دنیا توجه ویژه ای به آن می شود، برنامه ریزی و مدیریت مناسب منابع آبی می باشد. همانگونه که در بخش های قبل اشاره شد، رواناب ها و به خصوص رواناب های شهری بخش عظیمی از منابع آبی می باشند که معمولاً برنامه ریزی مناسبی جهت کنترل و استفاده مجدد از آن ها صورت نمی گیرد. بنابراین در این پژوهش راهکاری نوین جهت مدیریت بهتر این رواناب های شهری ارائه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همانگونه که در قسمت قبل اشاره شد، راهکار استفاده از مجاری نفوذ زیرزمینی جهت کنترل رواناب شهری و بهبود تراز آب زیرزمینی (پیاده سازی ایده شهرهای اسفنجی) در منطقه مورد مطالعه، عملکرد بسیار خوبی خواهد داشت. همچنین در این پژوهش از نرم افزار SWMM جهت شبیه سازی رواناب سطحی و از نرم افزار Visual ModFlow Flex جهت شبیه سازی آب زیرزمینی استفاده شد که نتایج حاصل از این نرم افزارها دارای دقت مناسبی می باشد. در نهایت، این تجربیات می تواند به عنوان الگویی برای سایر مناطق مورد استفاده قرار گیرد تا بهبودهای مشابهی در مدیریت منابع آب و مقابله با چالش های ناشی از تغییرات اقلیمی حاصل شود.

در زمینه مطالعه صورت گرفته می توان از سایر نرم افزارهای مدل سازی آب زیرزمینی مانند نرم افزار GMS و FEFLOW و غیره نیز استفاده نمود. در مطالعات آتی می توان این پژوهش را با استفاده از نرم افزارهای مذکور انجام داد و نتایج حاصله را با نتایج این پژوهش مورد مقایسه قرار داد. همچنین می توان هزینه های اجرای گالری های نفوذ زیرزمینی را مورد بحث و بررسی قرار داد. علاوه بر این می توان در آینده در مورد نحوه طراحی گالری های نفوذ و تاثیر طراحی بهینه فیلترهای مربوطه نیز مطالعاتی را دنبال نمود.

منابع

- Recharge and Mitigating Flooding. *Sustainability*, 15(18): 13584.
- Wals, B. J. (2022). Soaking up the realisation of a sponge city. PhD Thesis, Wageningen University & Research (WUR) and Delft University of Technology (TU Delft).
- Wan, Paijie, and Hongjie Zhang. (2026) Enhancing urban water ecological resilience through sponge city initiatives: Evidence from China. *Urban Climate* 65: 102755.
- Watanabe, S. (1995). Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes. *Water science and technology*, 32(1): 25-32.
- Yadav, M., & Setia, B. (2016). Conceptualization and design of an efficient groundwater recharge system for NIT Kurukshetra. *Procedia Technology*, 25: 138-145.
- Yang, S. (2025). Assessing the feasibility of implementing the Sponge City concept as a climate change response in mid-sized Ontario cities: A case study in the City of Kingston, Ontario (Doctoral dissertation). 154.
- Zhang, N., Luo, Y. J., Chen, X. Y., Li, Q., Jing, Y. C., Wang, X., & Feng, C. H. (2018). Understanding the effects of composition and configuration of land covers on surface runoff in a highly urbanized area. *Ecological Engineering*, 125: 11-25.
- aquifer recharge and their groundwater contamination potential. *Journal of Hydrology*, 539: 539–553.
- Händel, F., Liu, G., Fank, J., Friedl, F., Liedl, R., & Dietrich, P. (2016). Assessment of small-diameter shallow wells for managed aquifer recharge at a site in southern Styria, Austria. *Hydrogeology Journal*, 24(8): 2079-2091.
- Iqbal, A., Rahman, M. M., & Beecham, S. (2022). Spatial Analysis of the Water Harvesting Potential of Permeable Pavements in Australia. *Sustainability*, 14: 16282.
- Jiang, A. Z., & McBean, E. A. (2021). Sponge city: Using the “one water” concept to improve understanding of flood management effectiveness. *Water*, 13(5): 583.
- Khara, S., Sadeghi-Lari, A. and Samani, S. (2025). Numerical Simulation of Groundwater Using Mathematical Model (Case Study: Kahorestan Aquifer, Hormozgan Province, Southern Iran). *Hydrogeology*, 10(1): 50-60. (In persian)
- Kheiri, M., Zamani Lenjani, M., Rabeti Moghadam, M. and Montaseri, H. (2025). Effect of Unconfined Aquifer Bed Slope on Groundwater Table due to Precipitation by Numerical Modeling. *Hydrogeology*, 10(1): 33-49. (In persian)
- Khodaiari, M., Hessari, B., Ahmadi, H. and 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)
- Kumar, S., Guntu, R. K., Agarwal, A., Villuri, V. G. K., Pasupuleti, S., Kaushal, D. R., ... & Bronstert, A. (2022). Multi-objective optimization for stormwater management by green-roofs and infiltration trenches to reduce urban flooding in central Delhi. *Journal of Hydrology*, 606: 127455.
- Marazuela, M. Á., García-Gil, A., Santamarta, J. C., Gasco-Cavero, S., Cruz-Pérez, N., & Hofmann, T. (2022). Stormwater management in urban areas using dry gallery infiltration systems. *Science of the Total Environment*, 823: 153705.
- Sabah Nia, D. and 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)
- Teimouripor, A., Mollazadeh, M. (2020). Rainfall runoff management in urban and non-urban areas, 9th National Conference on Rainwater Catchment Surface Systems, Tabriz. 1-14. (In persian)
- Uyeno, M. T., Bairros, L. G. D. S., Lukiantchuki, J. A., Okawa, C. M. P., & Lautenschlager, S. R. (2023). Introducing an Innovative Design Approach for Drainage Systems: Facilitating Shallow Aquifer