

## تعیین ظرفیت نفوذ در محیط غیراشباع با استفاده از تلفیق ترانسه نفوذ و لوله تراوا در محیط آزمایشگاهی

مجتبی حسن پور<sup>۱</sup>، حسین خزیمه نژاد<sup>۲\*</sup> و ابوالفضل اکبر پور<sup>۳</sup>

### چکیده

از مشکلات پیش رو روش های تغذیه مصنوعی مناطق کویری می توان به بارش کم، منابع آبی محدود، دمای بالا و تبخیر زیاد، آورد رسوب بالا به دلیل پوشش گیاهی فقیر و ... اشاره کرد. روش های تغذیه مصنوعی در این مناطق باید به گونه ای طراحی شود که حداکثر بهره وری را از منابع آب موجود داشته باشد. در این پژوهش سعی شده است با ارائه یک روش جدید تغذیه مصنوعی متناسب با مناطق کویری، مشکلات مذکور کاهش یابد. برای طراحی یک روش مناسب تغذیه مصنوعی نیاز به اطلاعات کافی از نحوه توزیع جریان آب در خاک است. از طرفی پژوهش درباره نحوه توزیع جریان آب در محیط متخلخل بدون مدل سازی شرایط میدانی، وقت گیر و هزینه بر است. در پژوهش حاضر به موضوع تعیین ظرفیت نفوذ در محیط غیراشباع با استفاده از تلفیق ترانسه نفوذ و لوله تراوا در محیط آزمایشگاهی پرداخته شد. برای این منظور مدل فیزیکی ساخته شد که در آن آب از طریق لوله تراوا و ترانسه به محیط غیراشباع تزریق شد. دبی ورودی به مدل فیزیکی شامل ۵ دبی ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ لیتر بر دقیقه بود. با شروع آزمایش و تزریق دبی های ذکر شده درون مدل فیزیکی، هر ۵ دقیقه مقدار پیشرفت جبهه رطوبتی اندازه گیری شد. این عمل تا زمان رسیدن جبهه رطوبتی به سطح ایستابی ادامه یافت. همزمان با خارج شدن آب از مدل فیزیکی، دبی های خروجی هر ۵ دقیقه اندازه گیری شد. بیشترین میزان ظرفیت نفوذ مدل فیزیکی، ۲/۰۴۹ لیتر بر دقیقه تعیین شد. عملکرد مدل فیزیکی براساس  $V_{out}$  در طول آزمایش در دو حالت بررسی شد. بهترین عملکرد مدل فیزیکی مربوط به دبی ۲ لیتر بر دقیقه بود که نزدیک ترین دبی به دبی متناسب با ظرفیت نفوذ مدل فیزیکی است. نتایج نشان داد عملکرد در دبی ۲ لیتر بر دقیقه در حالتی که  $V_{out}$  نسبت به  $V_{out\ max}$  سنجیده شد (آب ورودی به مدل فیزیکی کمتر از ظرفیت نفوذ مدل فیزیکی)، ۹۶ درصد و در حالتی که  $V_{out}$  نسبت به  $V_{in}$  مدنظر قرار گرفت (دبی آب ورودی به مدل فیزیکی بیشتر از ظرفیت نفوذ مدل فیزیکی)، عملکرد آن ۹۸ درصد تعیین شد. در روش تغذیه مصنوعی ارائه شده نیز بایستی دبی ورودی از طریق لوله تراوا متناسب با ظرفیت نفوذ ترانسه طراحی شود تا از بیشینه ظرفیت ترانسه استفاده شده و هدررفت آب به کمینه برسد.

**واژه های کلیدی:** آب زیرزمینی، تغذیه مصنوعی، جبهه رطوبتی، مدل فیزیکی.

**ارجاع:** حسن پور م، خزیمه نژاد ح. و اکبر پور ا. ۱۴۰۲ تعیین ظرفیت نفوذ در محیط غیراشباع با استفاده از تلفیق ترانسه نفوذ و لوله تراوا در محیط آزمایشگاهی. مجله پژوهش آب ایران. ۵۱: ۱۰-۱. <https://dx.doi.org/10.22034/TWRJ.2023.14365.2523>

۱- دانشجوی دکترای منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند.

۲- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بیرجند.

۳- استاد گروه عمران، دانشگاه بیرجند.

\* نویسنده مسئول: [hkhozaymeh@birjand.ac.ir](mailto:hkhozaymeh@birjand.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۰۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۷

## مقدمه

زیرساخت‌های آبی موجود، مقدار برداشت آب و مهارت‌های افراد بستگی دارد. کریم (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای به روشی برای استفاده از چاه‌های تزریق با هدف تغذیه منابع آب زیرزمینی و استفاده مجدد از آن در فصول خشک می‌پردازد. نتایج نشان داد اعمال تغذیه مصنوعی در مجاورت ۳۰ حلقه چاه باعث شد سطح ایستابی تا ۲۰ متر افزایش یابد. حسن‌پور و خزیمه‌نژاد (۲۰۱۸) در پژوهشی بیان کردند با استفاده از مکان‌یابی مناطق مستعد تغذیه مصنوعی، راهکاری ارائه شد که ضمن تغذیه مناطقی از آبخوان که کیفیت نامناسبی دارد، کیفیت آن را نیز افزایش می‌دهد. این امر سبب می‌شود آب آبخوان برای مصارف کشاورزی، مناسب و کارا شود. این راهکار منابع باکیفیت بالاتر را برای مصارف شرب و بهداشتی حفظ می‌کند. کابزا و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی گرفتگی را مشکل اصلی در ارتباط با سیستم‌های تغذیه مصنوعی عنوان کردند. یانگ و همکاران (۲۰۱۷) در پژوهشی با عنوان آزمایش فیزیکی و شبیه‌سازی عددی اثر تغذیه مصنوعی بر مخزن آب زیرزمینی، دو عامل ظرفیت ذخیره‌سازی مؤثر و سرعت ذخیره مؤثر را به‌عنوان اصلی‌ترین پارامترها برای تجزیه و تحلیل ارتباط بین حجم آب قابل تغذیه و ظرفیت ذخیره‌سازی در نظر گرفتند. اگرچه افزایش شدت تغذیه به افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی مؤثر کمک می‌کند، اما از سوی دیگر می‌تواند سرعت ذخیره‌سازی مؤثر را کاهش دهد. هنگامی که از تغذیه متناوب استفاده می‌شود، بایستی به شدت تغذیه و مدت‌زمان تغذیه توجه کرد. توکلی و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهشی با عنوان اصلاح معادلات تجربی برآورد نشت به بررسی نشت و نفوذ از کانال خاکی بلداجی، واقع در شهرستان بروجن استان چهارمحال و بختیاری، با بافت خاک لومی، با استفاده از مدل فیزیکی و روابط تشابه ابعادی، در محدوده دبی‌های ۴۰ تا ۱۰۰ لیتر در ثانیه پرداختند. نتایج نشان داد پیش از اصلاح ضرایب معادلات، نتایج روش اینگهام بیشترین مقدار  $R^2$  را به میزان ۰/۹۱۷ نشان داد. در این روش، متغیرهای مستقل، عمق آب، طول کانال و محیط خیس شده هستند؛ اما پس از واسنجی معادلات تجربی برای کانال مورد نظر و اصلاح ضرایب آن‌ها، روش موریتز و اینگهام، با بیشترین مقدار  $R^2$  ( $< 0/9$ ) و کمترین مقدار RMSE ( $> 3/2$  لیتر) به‌عنوان روابط برتر تخمین نشت در منطقه مورد مطالعه تشخیص

در سال‌های اخیر، به دلیل افزایش فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و همچنین رشد چشمگیر جمعیت شهری، سطح آب‌های زیرزمینی کاهش یافته است (فوننتس و همکاران، ۲۰۲۰). نیاز فوری و فزاینده انسان به منابع آبی در سراسر جهان، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پژوهش درباره روش‌های جدید برای ذخیره و استفاده مجدد از آب‌های زیرزمینی و سطحی را بیش‌ازپیش مورد توجه قرار داده است (کریم، ۲۰۱۸). به‌طور خاص، تغذیه مصنوعی آب‌های زیرزمینی را می‌توان به‌عنوان ابزاری برای مدیریت منابع آب تعریف کرد که شامل یک سری فن‌هایی است که با ورود غیرطبیعی آب به آبخوان، چه با ورود مستقیم آب یا القای آن، باعث افزایش آب در دسترس، حفظ سطح ایستابی آب و بهبود کیفیت آب‌های زیرزمینی شود. این امر از طریق کارهای ساختمانی ویژه برنامه‌ریزی شده برای این منظور انجام می‌شود (پور، ۲۰۰۲؛ سریس، ۲۰۰۴). منابع آبی متنوعی در فرایند تغذیه مصنوعی استفاده می‌شود؛ این منابع شامل آب باران، رودخانه‌های فصلی و دائمی، مخازن آب طبیعی مانند دریاچه‌ها، تالاب‌ها، آب حاصل از سفره‌های آب دیگر، فاضلاب، زهاب کشاورزی، نشت آب در شبکه‌های آبرسانی و... می‌شود (سننت-آلونسو، ۱۹۸۴؛ موریلو دیاز، ۲۰۰۴). بسته به نوع منبع آب، تغذیه مصنوعی با روش‌های سطحی یا در زیر زمین انجام می‌شود. معمولاً روش‌های سطحی گران‌تر هستند (فرمن، ۲۰۱۴). مدل‌های جعبه‌شن سابقه طولانی برای مطالعه جریان آب زیرزمینی و فرایندهای انتقال املاح در محیط‌های متخلخل دارند (پریانک و همکاران، ۲۰۲۲). کاوری و همکاران (۲۰۱۱) در پژوهشی با عنوان روش‌های جدید تغذیه مصنوعی سفره‌های آب، روش‌های موجود درباره تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی مانند حوض‌ها و کانال‌های نفوذی، تله‌های آب، چاه‌های زهکشی و... را با کمک مطالعات موردی که در گذشته اجرا شده است، بررسی کردند. نتایج نشان داد که تغذیه مصنوعی به بهبود عملکرد و ظرفیت طبیعی سفره‌های آب زیرزمینی کمک می‌کند. این امر تأمین دائمی آب مورد نیاز را حتی در دوره‌های خشک تضمین می‌کند. دیلون (۲۰۰۵) به این موضوع اشاره کرده است که اثر مدیریت تغذیه آبخوان برای تأمین آب به عواملی همچون درک توانایی‌ها و محدودیت‌های فن‌های مختلف برای استفاده در آبخوان،

اسلامی (۱۹۹۷) در پژوهشی گزارش کرد روش‌های مستقیم اندازه‌گیری نشت آب از کانال‌ها، کاربردی‌تر و دقیق‌تر هستند، اما نسبت به روش‌های غیرمستقیم نیاز به صرف هزینه و وقت بیشتری دارند. انتقاد اصلی وارد بر روش‌های غیرمستقیم، فرض شرایط طبیعی همگن است که در طبیعت به‌ندرت روی می‌دهد. با این حال، این روش‌ها می‌توانند تلفات نشت را به‌صورت کمی پیش‌بینی کنند.

در مناطق کویری با توجه به بارش کم و نبود منابع آبی محدود، دمای بالا و تبخیر زیاد و همچنین آورد رسوب بالا (که خود از عوامل اصلی شکست پروژه تغذیه مصنوعی است) توسط سیلاب به دلیل پوشش گیاهی فقیر، برخی از روش‌های تغذیه مصنوعی مانند پخش سیلاب، روش کرتی، روش چاهک‌های تشدید به دلیل نبودن رودخانه و ... بازده مناسبی ندارد؛ بنابراین روش‌های تغذیه مصنوعی در این مناطق باید به‌گونه‌ای طراحی شود که مشکلات مذکور را به حداقل برساند.

مشکلات تغذیه مصنوعی آب زیرزمینی در مناطق کویری حادث‌تر است و دلایل آن از قبیل کم‌بودن نزولات جوی و به‌دنبال آن منابع آب محدودتر برای استفاده در طرح‌های تغذیه مصنوعی است. از طرفی اجرای روش‌های سطحی در مناطق کویری مشکلات عدیده‌ای را به‌وجود آورده است. از جمله این مشکلات، آورد رسوب بالا در ایجاد سیلاب‌های احتمالی به دلیل پوشش ضعیف گیاهی است که خود باعث گرفتگی منافذ خاک شده و به‌دنبال آن سبب کاهش عمر طرح اجراشده تغذیه مصنوعی می‌شود. از طرفی تبخیر بالا در این مناطق خود یکی از موارد هدررفت همین منابع آبی است.

در این پژوهش سعی شده است با ارائه یک روش جدید تغذیه مصنوعی متناسب با مناطق کویری، مشکلات مذکور کاهش یابد. با توجه به منابع محدود آبی در مناطق کویری، پساب تصفیه‌شده فاضلاب در این مناطق قابل توجه است. منبع آبی در روش ارائه‌شده، فاضلاب تصفیه‌شده است. منبع مذکور یک منبع پایدار محسوب می‌شود. همچنین با توجه به اینکه فاضلاب پس از فرایند تصفیه مورد استفاده قرار می‌گیرد، مشکل رسوب و گرفتگی به حداقل می‌رسد. آب مازاد منابع آبی دیگر مانند قنوات نیز می‌تواند در فصول سرد به‌عنوان منبع مقطعی نیز استفاده شود. با توجه به مکانیسم روش ارائه‌شده

داده شدند. همه معادلات نشت، در ابتدا کم برآوردی نشان دادند که اصلاح ضرایب، منجر به رفع این مشکل شد. استفاده از تشابه ابعادی و انتقال شرایط کانال به آزمایشگاه سبب کاهش هزینه و صرفه‌جویی در وقت شد که با حصول نتایج قابل قبول و قابل مقایسه با مطالعات پیشین، می‌توان به‌کارگیری این روش را در شرایط کنترل‌شده آزمایشگاه برای مناطق مشابه نیز پیشنهاد کرد. افضلی و همکاران (۱۳۸۸) به پژوهشی با عنوان شبیه‌سازی جریان آب در محیط متخلخل با سطح آزاد با بهره‌گیری از مدل شبکه ترکیبی-آنالیز شبکه ترکیبی پرداختند. در پژوهش ایشان مدل ترکیبی تحت فشار- سطح آزاد متشکل از شبکه‌ای از مجاری به هم پیوسته به‌منظور شبیه‌سازی جریان توصیه شده است. در مدل مزبور به دلیل اینکه لوله‌ها در اطراف شبکه باز و در ارتباط با اتمسفر هستند، امکان ایجاد فشار منفی در کل شبکه وجود ندارد و به محض اینکه در نقطه‌ای از جریان، فشار منفی شود، هوا وارد سیستم می‌شود. با توجه به این ویژگی، آنالیز چنین شبکه‌ای با استفاده از روش‌های معمول مقدور نبوده؛ بنابراین هدف از پژوهش آن‌ها، تدوین و ارائه روشی برای آنالیز این نوع شبکه‌های ترکیبی است. در ادامه به‌منظور ارزیابی و بررسی صحت و سقم فرض‌های به‌کاررفته در روش پیشنهادی و مدل کامپیوتری مربوط، مبادرت به ساخت مدل آزمایشگاهی شبکه نظیر در آزمایشگاه هیدرولیک دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز شد. مقادیر گذر حجمی و پروفیل سطح آب در شرایط ماندگار برای مقادیر مختلف عمق بالادست پایش شده و از بانک اطلاعاتی به‌دست آمده برای واسنجی و ارزیابی اعتبار مدل تبیینی استفاده مؤثر به عمل آمده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دلالت بر انطباق نسبتاً مناسب مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌شده و نهایتاً صحت روش پیشنهادی دارد. علی (۲۰۱۱) روش‌های مستقیم شامل انواع روش‌های میدانی (روش ورودی-خروجی، روش حوضچه، اندازه نفوذ) و روش‌های غیرمستقیم که شامل روش‌های مبتنی بر روابط تجربی از جمله روش اینگهام، دیویس-ویلسون، موریتز، روش هندوستان، مولسورس و ینیدومیا، آفنگندن، ودرنیکف، موسکات، کوستیاکف، سوبرامانیا، میسرا، روش‌های حل تحلیلی و روش‌های حل قیاسی را به‌عنوان روش‌های کمی‌کردن و تخمین نشت و نفوذ از کانال‌ها معرفی کرد. مقازی و

به دلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی ثابت در نظر گرفته شدند. در همین راستا توصیه می‌شود این روش در مقیاس میدانی نیز مورد بررسی قرار گیرد. با این توضیح در پژوهش حاضر به موضوع تعیین ظرفیت نفوذ در محیط غیراشباع با استفاده از تلفیق ترانسه نفوذ و لوله تراوا با استفاده از مدل فیزیکی پرداخته شد.

### مواد و روش‌ها

برای رسیدن به اهداف پژوهش حاضر یک مدل فیزیکی در آزمایشگاه هیدرولیک دانشگاه بیرجند ساخته شد. مدل فیزیکی ارائه شده، الگو گرفته از قنات و لوله‌های زهکشی است. این روش، مکانیسمی عکس قنات دارد به طوری که در قنات آب موجود در لایه‌های خاک از ارتفاع بالاتر به گالری قنات زهکش می‌شود، در صورتی که در این روش از طریق لوله (لوله‌های) تراوا، آب، وارد لایه‌های خاک زیر ناحیه لوله شده و تغذیه مصنوعی صورت می‌پذیرد. میزان آب خروجی از مدل به عواملی همچون دبی ورودی به مدل، ابعاد مدل، فاصله کف ترانسه تا سطح ایستابی، بافت خاک، طول ترانسه، عرض ترانسه، ارتفاع لوله تراوا تا کف ترانسه و قطر متوسط مصالح نفوذپذیر بستگی دارد. در آزمایش‌های انجام شده، دبی ورودی به مدل متغیر بوده و سایر عوامل ثابت در نظر گرفته شدند.

### مدل آزمایشگاهی

برای این منظور مدل فیزیکی با استفاده از شیشه ۱۰ میلی‌متر و در ابعاد  $100 \times 80 \times 80$  سانتی‌متر ساخته شد (شکل ۱). ابتدا خاک به صورت لایه‌ای در محفظه مدل فیزیکی قرار گرفت. ماسه شسته (رسوبات غیرچسبنده) به عنوان محیط غیراشباع در مدل فیزیکی مورد استفاده قرار گرفت. آنالیز مصالح مورد استفاده در جدول ۱ آمده است.

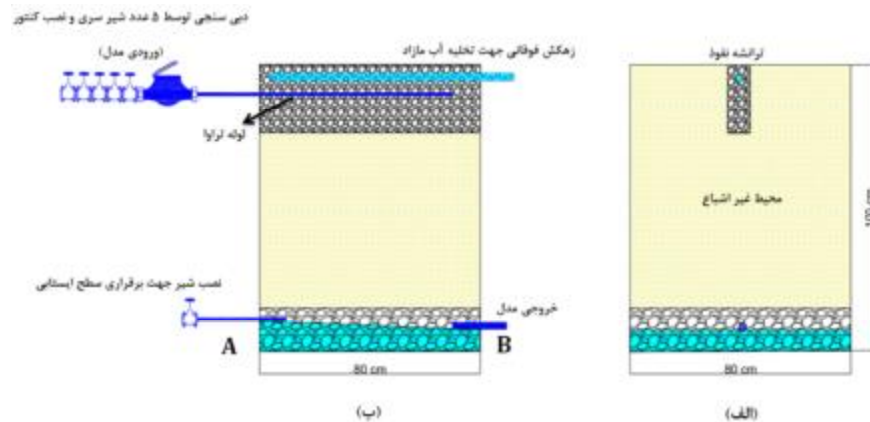
جدول ۱- آنالیز خاک مورد استفاده در مدل فیزیکی	
D <sub>10</sub>	۰/۱ میلی‌متر
D <sub>30</sub>	۰/۳۷ میلی‌متر
D <sub>60</sub>	۰/۹ میلی‌متر
ضریب یکنواختی (Cu)	۹
ضریب انحنای (Cc)	۱/۵۲

در مرحله بعد ترانسه‌های با ابعاد مناسب در محیط متخلخل ایجاد و توسط مصالح با نفوذپذیری بالا (دانه‌بندی ۶ تا ۱۲

تلفات ناشی از تبخیر نیز به حداقل می‌رسد. از دیگر مشکلاتی که در مناطق کویری با آن مواجه هستند، کم شدن کیفیت آب‌های زیرزمینی است، به طوری که برای مصارف کشاورزی نیز مشکلاتی به وجود آورده است؛ بنابراین با تزریق پساب تصفیه شده در قسمت‌هایی از آبخوان که مشکل کیفیت در آن حادث است، می‌تواند به بهبود کیفیت محدوده‌ای از آبخوان که با این مشکل مواجه است، کمک کند. از دیگر مشکلات طرح‌های تغذیه مصنوعی، محدودیت کاربری اراضی است که در تصمیم‌گیری مسئولان مربوط مشکلاتی را به وجود می‌آورد. از طرفی گاهی محدودیت کاربری اراضی باعث می‌شود مناطقی با استعداد مناسب طرح تغذیه مصنوعی از حیز ارتفاع ساقط شود. در روش ارائه شده، سایت‌های تغذیه مصنوعی در چندین نقطه مناسب با مقیاس کوچک قابل اجرا است. از طرفی به دلیل اینکه طرح مذکور در زیر سطح زمین و در عمق اجرا می‌شود، پس از عملیات اجرایی احداث طرح، سطح زمین به حالت اولیه برگشت می‌کند. همچنین به دلیل تشکیل بیوفیلم‌ها روی مصالح درشت‌دانه عمل تصفیه و حذف نیترات نیز انجام می‌پذیرد. مسئله مهم دیگر اینکه در طرح‌های تغذیه متداول و اجرا شده در سطح منطقه، راندمان بالایی به دلایل بالا مشاهده نمی‌شود؛ در این روش با تنظیم و کنترل دبی متناسب با ظرفیت نفوذ ترانسه، تلاش می‌شود تا هدررفت آب به حداقل رسانده شود و راندمان افزایش یابد. حال با توجه به مسائلی که در بالا ذکر شد، ضروری است پژوهشی در این زمینه انجام پذیرد تا با ارائه راهکارهای کارآمد و مناسب، نسبت به کم شدن مشکلات گامی برداشته شده تا بتوان از منابع آب محدود مناطق کویری به صورت بهینه استفاده کرد.

برای طراحی یک روش مناسب تغذیه مصنوعی نیاز به اطلاعات کافی از نحوه توزیع جریان آب در خاک است. این نوع اطلاعات در انتخاب دبی ورودی آب به خاک و به حداکثر رساندن میزان نفوذ تأثیرگذار است. پژوهش درباره نحوه توزیع جریان آب در محیط متخلخل و ارائه یک سیستم مناسب برای تغذیه مصنوعی بدون مدل‌سازی محیط، کاری وقت‌گیر و هزینه‌بر است. همچنین به دلیل عدم امکان ایجاد شرایط یکسان در آزمایش‌های متعدد در مقیاس میدانی از مدل‌سازی فیزیکی استفاده شد. از طرفی پارامترهای متعددی بر کارایی این روش مؤثر هستند؛ اما

کالیبره شده بود، انجام شد. همچنین علاوه بر دبی‌سنجی به وسیله شیرهای کالیبره شده، با استفاده از نصب کنتور در مسیر لوله ورودی، حجم آب عبوری نیز با دقت کافی تعیین می‌شد. برای ایجاد سطح ایستابی ثابت در طول آزمایش جریان به صورت دائمی و با دبی ثابت (دبی پایه) از نقطه A (شکل ۱ ب)) وارد مدل فیزیکی شده و از نقطه B طرف دیگر (شکل ۱ ب)) خارج می‌شود.



شکل ۱- شماتیک ساده‌ای از مدل آزمایشگاهی (الف) دید از روبه‌رو (ب) دید از راست

با توجه به اینکه هدف از انجام آزمایش بررسی تعیین ظرفیت نفوذ مدل فیزیکی است، دبی ورودی به مدل فیزیکی ( $Q_{in}$ ) با دبی‌های ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ لیتر بر دقیقه (مقدار دبی ورودی با توجه به نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌های اولیه حاصل شده است) وارد مدل فیزیکی شد. در طول آزمایش نیز آب از نقطه A (شکل ۱ قسمت ب)) برای ایجاد و شبیه‌سازی سطح ایستابی (دبی پایه مدل)، وارد مدل فیزیکی شده تا دبی‌های خروجی با دقت بالاتری اندازه‌گیری شود. منبع آبی مورد استفاده، شبکه آب شهری بود (به منظور اطمینان از ثبات فشار شبکه، فشارسنج دائماً روی شبکه نصب بوده است).

با شروع آزمایش که با دبی‌های ذکر شده وارد مدل فیزیکی شد، هر ۵ دقیقه مقدار پیشرفت جبهه رطوبتی مشخص شد. این عمل تا زمان رسیدن جبهه رطوبتی به سطح ایستابی ادامه یافت (شکل ۲). در ادامه با استفاده از نرم‌افزار Plot Digitizer و AutoCAD خطوط جبهه رطوبتی ترسیم شدند (شکل ۳). برای بررسی چگونگی حرکت جبهه رطوبتی در هر مرتبه انجام آزمایش، خاک از مدل فیزیکی خارج شده، خشک شده و مجدداً وارد مدل فیزیکی شد.

میلی‌متر) تا عمق مناسب پر شد. لوله تراوا (لوله‌ای شامل ۶ روزنه با قطر ۲ میلی‌متر با فواصل ۱۵ سانتی‌متر) نیز در ترانشه نصب شد. یک زهکش نیز در بالای ترانشه برای خارج کردن آب اضافه نصب شد. فاصله کف ترانشه تا محل ورود آب به ناحیه سطح ایستابی ایجاد شده ۶۱ سانتی‌متر است. آب با دبی مشخص وارد لوله تراوا شد. دبی‌سنجی توسط ۵ شیر سری که قبلاً با استفاده از روش حجمی

### نحوه انجام آزمایش

در این روش پس از تزریق آب از طریق لوله تراوا و ترانشه به محیط متخلخل به بررسی دو نکته پرداخته شد. در گام اول چگونگی گسترش جبهه رطوبتی در زمان‌های مختلف تا زمانی که جبهه رطوبتی به سطح ایستابی ایجاد شده برخورد کرد، از نحوه حرکت آب در محیط غیر اشباع و تشکیل جبهه رطوبتی تصویربرداری و با استفاده از نرم‌افزار Plot Digitize و AutoCAD، تصاویر مورد بررسی قرار گرفت. در گام بعدی پس از ایجاد جریان در محیط متخلخل، در زمان مشخص به اندازه‌گیری حجم آب خروجی از مدل فیزیکی در شرایط مختلف پرداخته شد.

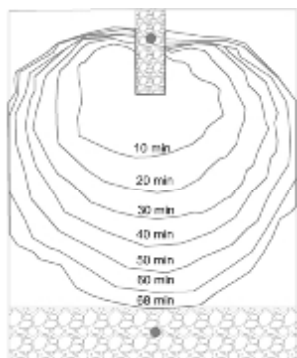
میزان آب خروجی از مدل فیزیکی به عواملی همچون دبی ورودی به مدل فیزیکی، ابعاد مدل فیزیکی، شیب سطح ایستابی، فاصله کف ترانشه تا سطح ایستابی، بافت خاک، طول ترانشه، عرض ترانشه، ارتفاع لوله تراوا تا کف ترانشه، قطر متوسط مصالح نفوذپذیر، زمان ورود آب به مدل فیزیکی تا رسیدن آن به سطح ایستابی و زمان رسیدن آب به سطح ایستابی تا انتهای آزمایش بستگی دارد. در آزمایش‌های انجام شده دبی ورودی به مدل فیزیکی متغیر بوده و سایر عوامل ثابت در نظر گرفته شد.

مدل فیزیکی است. عملکرد مدل فیزیکی براساس  $V_{out}$  نسبت به حجم آب خروجی از مدل فیزیکی بدون محاسبه دبی پایه به صورت بیشینه ( $V_{out\ max}$ ) و همچنین  $V_{out}$  نسبت به  $V_{in}$  محاسبه شد.

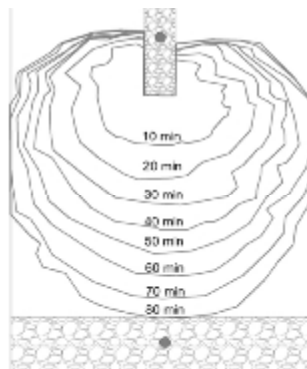


شکل ۲- ترسیم خطوط جبهه رطوبتی در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه بر دیواره مدل فیزیکی

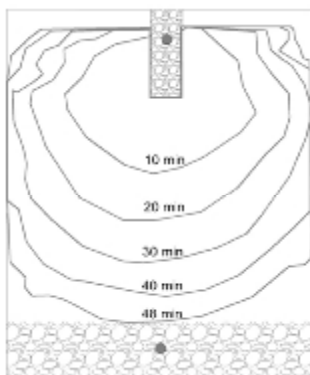
پس از رسیدن آب به سطح ایستایی در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه به مدت ۶۰ دقیقه (زمان ثابتی که مدت آن با توجه به رسیدن به دبی اوج خروجی از مدل فیزیکی و آزمایش‌های اولیه برای کمترین دبی به دست آمده است) دبی خروجی (که از نقطه B (شکل ۱ ب)) خارج می‌شود) برای همه دبی‌های ورودی مدل فیزیکی، اندازه‌گیری شد. در ادامه پس از اتمام زمان ۶۰ دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه دیگر میزان حجم آب خروجی از مدل فیزیکی اندازه‌گیری شد. در دبی‌های ۲/۵ و ۳ لیتر بر دقیقه با توجه به اینکه دبی ورودی بیشتر از ظرفیت مدل فیزیکی بود، حجم آب اضافی از مدل فیزیکی سرریز شد. سپس دبی ورودی قطع و به مدت ۱۲۰ دقیقه دیگر دبی خروجی از مدل فیزیکی ( $Q_{out}$ ) در بازه‌های ۵ دقیقه اندازه‌گیری شد. حجم آب ورودی به مخزن ( $V_{in}$ ) و حجم آب خروجی بدون محاسبه دبی پایه که پیش‌تر عنوان شده بود، برای شبیه‌سازی سطح ایستایی ( $V_{out}$ ) تأمین شده بود، اندازه‌گیری شد ( $V_{out} = \Delta V = (V_B - V_A)$ ، که  $V_A$  حجم آب ورودی برای شبیه‌سازی سطح ایستایی و  $V_B$  حجم آب خروجی از



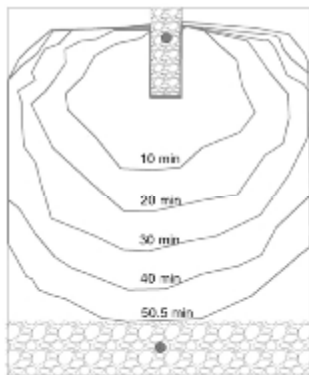
(ب)



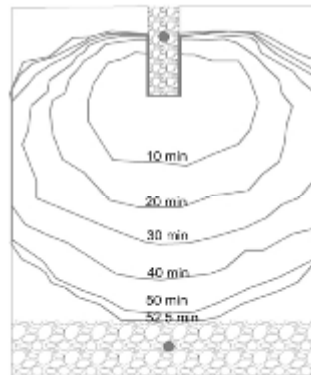
(الف)



(ه)



(د)



(ج)

شکل ۳- نحوه حرکت جبهه رطوبتی در مدل فیزیکی با دبی

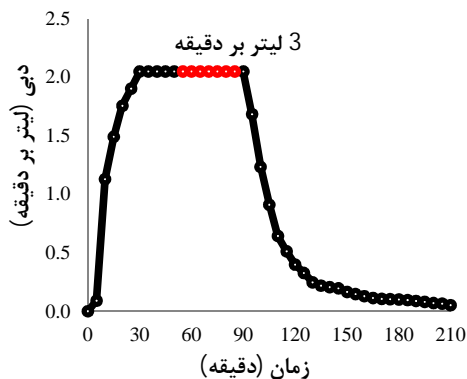
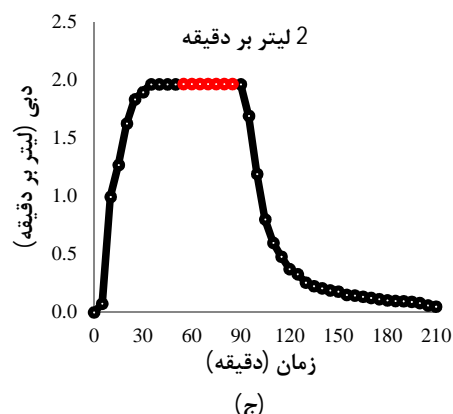
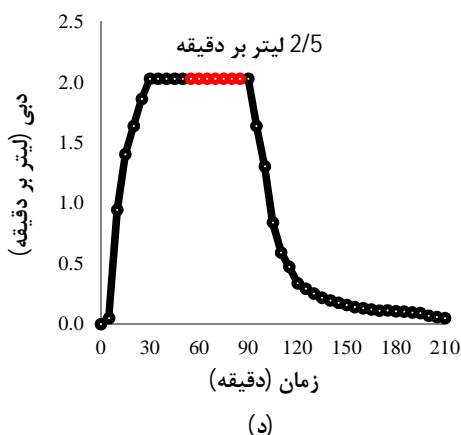
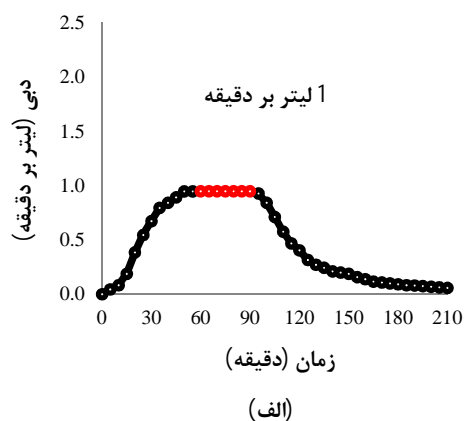
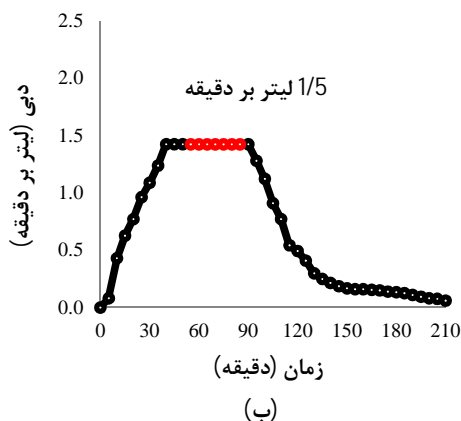
۱ لیتر بر دقیقه (الف)، ۱/۵ لیتر بر دقیقه (ب)، ۲ لیتر بر دقیقه (ج)، ۲/۵ لیتر بر دقیقه (د) و ۳ لیتر بر دقیقه (ه)

## نتایج و بحث

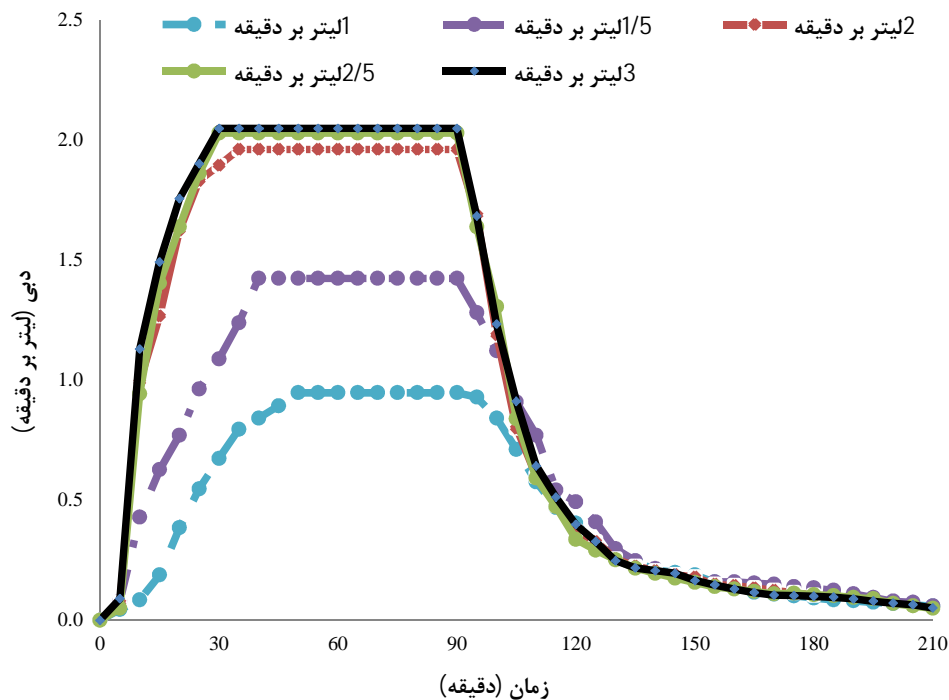
در  $Q_{out}$  در دبی‌های مختلف ورودی در طول دوره آزمایش ترسیم شده است (شکل ۴).

در شکل ۴ نمودارهای  $Q_{out}$  با دبی ورودی ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ لیتر بر دقیقه به صورت جداگانه آمده است. شاخه صعودی نمودار از لحظه خروج آب از مدل فیزیکی تا زمانی است که  $Q_{out max}$  اتفاق می‌افتد. سپس در قله نمودار تا اتمام زمان ۶۰ دقیقه،  $Q_{out max}$  ادامه داشته و

بعد از آن به مدت ۳۰ دقیقه  $Q_{in}$  و  $Q_{out max}$  اندازه‌گیری شد (قسمت قرمز رنگ نمودار). بخش نزولی نمودار،  $Q_{out}$  پس از توقف  $Q_{in}$  را نشان می‌دهد که با گذشت زمان کاهش یافته است. در شکل ۵ نیز نمودارهای تغییرات  $Q_{out}$  برای دبی ورودی ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ لیتر بر دقیقه به صورت تجمعی برای نشان دادن اختلاف  $Q_{out}$  به‌ازای دبی‌های مختلف رسم شده است.



شکل ۴- نمودار  $Q_{out}$  با دبی ورودی ۱ لیتر بر دقیقه (الف)، ۱/۵ لیتر بر دقیقه (ب)، ۲ لیتر بر دقیقه (ج)، ۲/۵ لیتر بر دقیقه (د) و ۳ لیتر بر دقیقه (ه)



شکل ۵- نمودارهای تغییرات  $Q_{out}$  برای دبی ورودی ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ لیتر بر دقیقه

ایستایی ایجاد شده کاهش یافته است. متوسط سرعت نفوذ با افزایش دبی نیز افزایش یافته است (ستون ۸). نکته دیگر اینکه پس از رسیدن آب به سطح ایستایی، زمان رسیدن به بیشینه دبی خروجی از مدل فیزیکی، کاهش یافته است (ستون ۹). مقادیر ستون (۱۰) بیان می‌دارد شیب خط تخلیه آب از مدل فیزیکی از زمان توقف دبی ورودی با افزایش دبی افزایش یافته که نشان‌دهنده افزایش روند تخلیه آب از محیط غیراشباع است.

پس از انجام آزمایش در هر مرحله و اندازه‌گیری پارامترهای موردنظر، اطلاعات کسب‌شده در جدول ۲ آورده شده است. در جدول ۲، حداکثر دبی خروجی از مدل فیزیکی در طول دوره آزمایش (ستون ۳) با افزایش دبی ورودی، افزایش یافته است. همان‌گونه که در ستون ۵ آورده شده است،  $V_{out}$  نیز با افزایش دبی ورودی افزایش یافته است. همچنین در ستون ۷ با افزایش دبی ورودی به مدل فیزیکی، زمان رسیدن جبهه رطوبتی از ترانسه تا سطح

جدول ۲- اطلاعات کسب‌شده از آزمایش‌های انجام‌شده بر مدل فیزیکی در طول دوره آزمایش

ردیف (۱)	$Q_{in}$ (لیتر بر دقیقه) (۲)	$Q_{out\ max}$ (لیتر بر دقیقه) (۳)	$V_{in}$ (لیتر) (۴)	$V_{out}$ (لیتر) (۵)	$(V_{in} - V_{out})$ (لیتر) (۶)	زمان رسیدن آب به سطح ایستایی (دقیقه) (۷)	سرعت نفوذ متوسط (سانتی‌متر بر دقیقه) (۸)	بازه زمانی رسیدن دبی اوج (دقیقه) (۹)	شیب خط تخلیه مدل (۱۰)
۱	۱	۰/۹۴۸	۱۴۰	۶۸/۹۹	۷۱/۰۱	۸۰	۰/۷۶	۴۵-۵۰	۰/۰۳۷
۲	۱/۵	۱/۴۲۵	۱۹۸/۸	۱۰۱/۹۴	۹۶/۸	۶۸	۰/۹۰	۳۵-۴۰	۰/۰۵۴
۳	۲	۱/۹۶۳	۲۴۰	۱۳۶/۰۶	۱۰۳/۹۴	۵۲/۵	۱/۱۶	۳۰-۳۵	۰/۰۷۳
۴	۲/۵	۲/۰۳۰	۲۸۱/۲۵	۱۳۸/۹۶	۱۴۲/۲۹	۵۰/۵	۱/۲۱	۲۵-۳۰	۰/۰۷۴
۵	۳	۲/۰۴۹	۳۳۱/۵	۱۴۲/۹۸	۱۸۸/۵۲	۴۸	۱/۲۶	۲۵-۳۰	۰/۰۷۵



فیزیکی از همه ظرفیت نفوذ مدل فیزیکی و ظرفیت ترانسه استفاده شده است، بنابراین برای به دست آوردن عملکرد مدل فیزیکی،  $V_{out}$  نسبت به  $V_{in}$  مدنظر قرار گرفت.  $V_{out}$  و  $V_{in}$  در مدت ۳۰ دقیقه پس از رسیدن دبی خروجی به حداکثر دبی اندازه گیری شده است (جدول ۴).  $V_{out\ max}$  در دبی ورودی ۳ لیتر بر دقیقه و به میزان ۱۴۳ لیتر اندازه گیری شد (حداکثر دبی خروجی از مدل فیزیکی ۲/۰۴۹ لیتر بر دقیقه). در دبی ۲ لیتر بر دقیقه با توجه به اینکه دبی نزدیک به ظرفیت نفوذ مدل فیزیکی است، عملکرد آن در دو حالت بالا مشخص شد.

عملکرد مدل فیزیکی براساس  $V_{out}$  در طول آزمایش در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۳). در حالت اول، دبی آب ورودی به مدل فیزیکی کمتر از ظرفیت نفوذ مدل فیزیکی است و در حالت دوم، دبی آب ورودی به مدل فیزیکی بیشتر از ظرفیت نفوذ مدل فیزیکی است. از آنجا که در حالت اول از همه ظرفیت نفوذ مدل فیزیکی و ظرفیت ترانسه استفاده نشد، برای به دست آوردن عملکرد مدل فیزیکی،  $V_{out}$  نسبت به  $V_{out\ max}$  که در طی آزمایش ها اخذ شده است، ملاک قرار گرفت (جدول ۳). در حالت دوم، تعیین عملکرد با توجه به سرریز شدن مدل

جدول ۳- عملکرد مدل فیزیکی برای دبی های ورودی ۱، ۱/۵ و ۲ لیتر بر دقیقه (دبی های کمتر از ظرفیت نفوذ) در مدت ۳۰ دقیقه

ردیف	دبی ورودی (لیتر بر دقیقه)	$V_{out}$ (لیتر)	$V_{out\ max}$ (لیتر)	عملکرد (درصد)
۱	۱	۲۸	۶۲	۴۵
۲	۱/۵	۴۳	۶۲	۶۹
۳	۲	۵۹	۶۲	۹۶

جدول ۴- عملکرد مدل فیزیکی برای دبی های ورودی ۲، ۲/۵ و ۳ لیتر بر دقیقه (دبی های بیشتر از ظرفیت نفوذ) در مدت ۳۰ دقیقه

ردیف	دبی ورودی (لیتر بر دقیقه)	$V_{out}$ (لیتر)	$V_{in}$ (لیتر)	عملکرد (درصد)
۱	۲	۵۹	۶۰	۹۸
۲	۲/۵	۶۱	۷۵	۸۱
۳	۳	۶۲	۹۰	۶۹

### نتیجه گیری

نتایج نشان داد روند تغییرات دبی خروجی از مدل فیزیکی، زمان رسیدن جبهه رطوبتی از ترانسه تا سطح ایستابی، متوسط سرعت نفوذ،  $V_{out}$ ، زمان رسیدن به بیشینه دبی خروجی از مدل فیزیکی و شیب خط تخلیه آب از مدل فیزیکی پس از نزدیک شدن به دبی متناسب با ظرفیت نفوذ مدل فیزیکی، کاهش یافته است. بهترین عملکرد مدل فیزیکی براساس  $V_{out}$  در طول آزمایش مربوط به دبی ۲ لیتر بر دقیقه بود که نزدیک ترین دبی به دبی متناسب با ظرفیت نفوذ مدل فیزیکی است. نتایج نشان داد عملکرد در دبی ۲ لیتر بر دقیقه در حالتی که  $V_{out}$  نسبت به  $V_{out\ max}$  سنجیده شد، ۹۶ درصد و در حالتی که  $V_{out}$  نسبت به  $V_{in}$  مورد سنجش قرار گرفت، ۹۸ درصد بود.

### منابع

- آزاد با بهره گیری از مدل شبکه ترکیبی ۱- آنالیز شبکه ترکیبی. مجله تحقیقات منابع آب ایران. ۵(۲): ۶۲-۷۰.
- توکلی ا. قربانی ب. صمدی بروجنی ح. رادفر م. و قهرمان ب. ۱۳۹۵. اصلاح معادلات تجربی برآورد نشت با استفاده از تشابه ابعادی (کانال خاکی بلداجی، استان چهارمحال و بختیاری). نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۶(۲): ۱۰۵-۱۱۹.
- Ali H. 2011. Practices of irrigation & on-farm water management. Springer Science & Business Media, New York. USA. 546pp
- Bouwer H. 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal. 10 (1): 121-142.
- Cabeza Y. Candela L. Ronen D. and Teijón G. 2012. Monitoring the occurrence of emerging contaminants in treated wastewater and groundwater between 2008 and 2010. The Baix Llobregat (Barcelona, Spain). Journal of Hazardous Materials 240(1): 9-32.
- Dillon P. 2005. Future management of aquifer recharge. Hydrogeology Journal.

- افضلی س.ج. عابدینی م. ج. و منجمی پ. ۱۳۸۸. شبیه سازی جریان آب در محیط متخلخل با سطح

- 13(1): 313-316.
7. Foreman T. L. 2014. Managed Aquifer Recharge (MAR) and Design and Construction of Hydraulic Barriers against Seawater Intrusion: the California Case. *Boletín Geológico y Minero*. 125(2): 133-142.
  8. Fuentes C. Chávez C. Quevedo A. Trejo-Alonso J. and Fuentes S. 2020. Modeling of Artificial Groundwater Recharge by Wells: A Model Stratified Porous Medium. *Mathematics*. 8(10): 1-11
  9. Hassanpour M. and Khozayemnezhad H. 2018. Placement of nutrient wells for artificial nutrition and improvement of aquifer quality in Birjand plain using treated wastewater. *Journal of Research in Environmental Health*. 4(3): 215-226.
  10. Karim I. 2018. Artificial Recharge of Groundwater by Injection Wells (Case Study). *Int. J. Sci. Eng. Technol.* 6(1): 6193-6196.
  11. Kavuri M. Boddu M. and Annamdas V. G. M. 2011. New Methods of Artificial Recharge of Aquifers: A Review. Conference: 4th ASCE-EWRI International Perspective on Water Resources & the Environment, National University of Singapore. January 4-6. Poster on: Artificial Recharge of Aquifer.
  12. Moghazi H. E. M. and Ismail E. S. 1997. A study of losses from field channels under arid region conditions. *Irrigation Science*. 17(3): 105-110.
  13. Murillo-Díaz, J. M. 2004. Recarga de acuíferos. Evaluación y análisis de condicionantes técnicos y económicos. Acuífero aluvial del Bajo Guadalquivir. Doctoral Thesis, Univ. Polytechnic of Madrid, 804 p.
  14. Priyank P. Darshan M. Neeraj Sh. 2022. Water Supply, A review on the application of the DRASTIC method in the assessment of groundwater vulnerability. 22(5): 5190-5205.
  15. Senent-Alonso M. 1984. Problemática de la recarga artificial de acuíferos. Realizaciones españolas y sus posibilidades en el sureste español. Doctoral Thesis, Univ. Polytechnic of Madrid. 429 p.
  16. Serieys, N. 2004. Impacto de Recarga Artificial sobre la Calidad del Agua en Acuíferos Sensibles de la Sabana de Bogotá. Andes University Press. 89 p.
  17. Yang X. Longcang Sh. Yongjie Zh. Peipeng W. 2017. Abunu Atlabachew Eshete and Esther Chifuniro Mabedi, Physical Experiment and Numerical Simulation of the Artificial Recharge Effect on Groundwater Reservoir. *Water*. 9(12): 1-16.