



## شبیه‌سازی فیلتر شنی در جلوگیری از ماسه‌دهی چاه‌های آبدۀ با استفاده از نرم‌افزار PFC<sup>3D</sup>

فرین جباری بالدرلو<sup>۱</sup>، حسین رضایی<sup>۲\*</sup>، منیژه اسدپور قره قشلاق<sup>۳</sup>، سید مهدی عصمت ساعتلو<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آب زمین‌شناسی، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۲- استاد تمام گروه علوم مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۳- استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.

۴- دکتری مهندسی عمران-آب، سرپرست معاونت بهره‌برداری شرکت آب و فاضلاب استان آذربایجان غربی، ارومیه، ایران.

\*نویسنده مسئول: [h.rezaie@urmia.ac.ir](mailto:h.rezaie@urmia.ac.ir)

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۱۰/۱۵

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۶/۱۴

### چکیده

منابع آب زیرزمینی به‌عنوان یکی از منابع حیاتی تأمین آب شرب و کشاورزی، در معرض پدیده ماسه‌دهی قرار دارند که موجب کاهش بهره‌وری چاه‌ها و آسیب به تجهیزات می‌شود. این پژوهش به بررسی و طراحی بهینه فیلتر شنی برای کنترل ماسه‌دهی در چاه‌های آبدۀ جنوب شهرستان ارومیه پرداخته است. در این پژوهش، طراحی و مدلسازی بسته‌شدن با بهره‌گیری از نرم‌افزار PFC<sup>3D</sup> و تحلیل جریان سیالات محاسباتی (CFD) انجام شد. نرم‌افزار PFC<sup>3D</sup> که مبتنی بر روش المان گسسته (DEM) عمل می‌کند، قابلیت شبیه‌سازی برهم‌کنش ذرات مجزا، محاسبه نیروهای تماس بین آن‌ها و بررسی اثر نیروهای خارجی همچون نیروی درگ ناشی از جریان سیال را داراست. در ابتدا لاگ‌های زمین‌شناسی چاه‌ها با نرم‌افزار لاگ‌پلات تحلیل شد تا لایه‌های ماسه‌ای مستعد ماسه‌دهی و ذرات غالب هر چاه شناسایی گردد. سپس دبی بحرانی جریان بر اساس عدد رینولدز و معیار شیلدز محاسبه و با دبی واقعی بهره‌برداری مقایسه شد تا چاه‌های دارای ریسک بالا مشخص شوند. در ادامه، بر این اساس داده‌های لاگ چاه‌ها تحلیل گردید و رسوبات بر اساس ذرات غالب، به چهار دسته اصلی شامل ماسه دانه‌درشت، ماسه دانه‌متوسط، ماسه دانه‌ریز و ماسه بسیار ریز طبقه‌بندی شدند. متناسب با هر یک از این دسته‌ها، چهار طرح مجزا از بسته‌شدن طراحی و شبیه‌سازی گردید. و ابعاد بهینه‌شدن در شبیه‌سازی عددی بدست آمد. چاه A: ماسه دانه‌درشت (بسته‌شدن با ابعاد ۱۴/۵-۱۸ میلی‌متر)، چاه B: ماسه دانه‌متوسط (بسته‌شدن با ابعاد ۵/۲-۷/۵ میلی‌متر)، چاه C: ماسه دانه‌ریز (۱-۴/۳ میلی‌متر) و چاه D: ماسه بسیار دانه‌ریز (۱/۱-۰/۶۵ میلی‌متر) طراحی گردید. نتایج شبیه‌سازی عددی نشان داد که انتخاب اندازه دانه مناسب و آرایش تدریجی بسته‌بندی شنی، پایداری ذرات و جلوگیری از مهاجرت ماسه به داخل چاه را افزایش می‌دهد. طراحی بهینه فیلتر شنی جریان سیال را کنترل کرده و از ورود ذرات ماسه جلوگیری می‌کند، که باعث افزایش طول عمر چاه و بهره‌وری آبدۀ می‌شود. این مطالعه اهمیت تلفیق داده‌های زمین‌شناسی، تحلیل هیدرودینامیکی و شبیه‌سازی عددی در طراحی پایدار چاه‌های آبدۀ را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** آب زیرزمینی، بسته‌شدن، دبی بحرانی، شبیه‌سازی عددی PFC<sup>3D</sup>.

### مقدمه

شرب، کشاورزی و صنعت محسوب می‌شوند. بهره‌برداری مؤثر از این منابع نیازمند شناخت دقیق ویژگی‌های زمین‌شناسی، رفتار هیدرودینامیکی و طراحی مهندسی مناسب چاه‌ها است (Freeze and Cherry, 1979; Todd and Mays, 2005).

منابع آب زیرزمینی به دلیل ظرفیت بالای ذخیره‌سازی و توانایی تأمین پایدار آب، یکی از منابع حیاتی برای تأمین آب

آبیاری قطره‌ای و بارانی را کاهش می‌دهد، بلکه هزینه‌های هنگفتی برای تصفیه یا تله‌اندازی ماسه تحمیل می‌کند. پدیده ماسه‌دهی در سازندهای سست و تحکیم‌نیافته، طی دهه‌های اخیر به‌طور گسترده در مطالعات تجربی، عددی و میدانی مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که ماسه‌دهی نتیجه برهم‌کنش پیچیده نیروهای هیدرودینامیکی جریان سیال و مقاومت مکانیکی محیط متخلخل است و پارامترهایی نظیر دانه‌بندی سازند، فشار محصور، ویسکوزیته سیال و سرعت جریان نقش تعیین‌کننده‌ای در آغاز و شدت آن دارند (Civan, 2007; Pham, 2017). در مقیاس منطقه‌ای، در یک پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های میدانی در استان البرز، ارتباط معناداری بین ماسه‌دهی، افت سطح ایستابی و پدیده فرونشست شناسایی گردید. نتایج این مطالعه نشان داد که آبخوان‌های ریزدانه مستعد ماسه‌دهی بیشتری هستند و بهره‌برداری ناپایدار از چاه‌ها می‌تواند این پدیده را تشدید کند (فکوری و بی‌جن‌خان، ۱۴۰۱). مطالعات نشان می‌دهند که مدیریت آب زیرزمینی نیازمند رویکردی دوگانه است: پایش دقیق و شبیه‌سازی معتبر است. در حالی که ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از تکنیک<sup>۱</sup> InSAR نشان دادند که فرونشست آبخوان دشت عباس حتی با بازگشت آب، تا حد زیادی غیرقابل بازگشت است، جعفرزاده و همکاران (۱۴۰۲) در مطالعه‌ای دیگر بر محدودیت‌های روش‌های عددی کلاسیک در شبیه‌سازی چنین پدیده‌های پیچیده‌ای تأکید کردند. آن‌ها نشان دادند که روش‌های مبتنی بر مش مانند  $FD^2$  و  $FE^3$  در شرایط ناهمگن دقت پایینی دارند، اما روش‌های بدون شبکه (Mfree)<sup>۴</sup> می‌توانند با دقت بالاتری (شاخص  $RMSE^5$  حدود ۰.۲۶ متر) رفتار آبخوان را شبیه‌سازی کنند. در پژوهشی دیگر، شبیه‌سازی عددی آبخوان کهورستان با مدل MODFLOW<sup>۶</sup> انجام شد که نتایج آن دقت بالای مدل در پیش‌بینی تراز آب و تحلیل ضریب نفوذپذیری را در شرایط پایدار و ناپایدار تأیید کرد. این مطالعه نشان داد که تلفیق داده‌های میدانی با مدل‌سازی هیدرولوژیکی، ابزاری قابل‌اعتماد برای مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی و پیش‌بینی اثرات سناریوهای مختلف مدیریتی و اقلیمی است (خارا و همکاران، ۱۴۰۴). در مقابل، سمیعی دستجردی و همکاران (۱۴۰۳) با رویکردی نوین‌تر، از شبکه‌های عصبی

دهه‌های اخیر، افزایش برداشت از منابع آب زیرزمینی در اثر رشد جمعیت، توسعه کشاورزی و صنعتی و تغییرات اقلیمی، باعث کاهش سطح ایستابی و ظرفیت تأمین چاه‌ها شده است. در ایران، با میانگین بارش سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر، بخش عمده نیازهای آب شرب و کشاورزی به منابع آب زیرزمینی وابسته است. آل‌شیخ و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی به بررسی رابطه بین برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و پدیده فرونشست در آبخوان دشت مرودشت پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش زمین‌آمار نشان دادند که بین افت تراز آب و نشست زمین رابطه مستقیمی وجود دارد؛ به‌طوری که تقریباً به ازای هر ۴۵ سانتی‌متر افت آب، یک سانتی‌متر نشست زمین اتفاق می‌افتد. در پژوهشی خسروپناه و همکارانش (۱۳۹۰) به بررسی پیامدهای زیست‌محیطی برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی در دشت سملقان پرداختند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که افت سطح آب‌ها منجر به پدیده فرونشست زمین و ایجاد شکاف‌های عمیق شده که علاوه بر آسیب به زیرساخت‌های عمرانی، باعث تغییر مسیر جریان‌های آب و کاهش کیفیت منابع آبی گردیده است. پدیده ماسه‌دهی، یکی از چالش‌های اصلی در بهره‌برداری از چاه‌های آبد در آبخوان‌های سست و تحکیم‌نیافته است؛ در این پدیده، ذرات ماسه و سیلت از لایه‌های اطراف وارد جریان آب چاه می‌شوند. عواملی همچون دانه‌بندی ریز سازند، طراحی نادرست چاه، انتخاب نامناسب پمپ و برداشت بی‌رویه خطر وقوع آن را تشدید می‌کنند. شدت ماسه‌دهی به خصوصیات زمین‌شناسی، مشخصات چاه و شیوه بهره‌برداری بستگی دارد (Civan, 2007). تعیین دبی بحرانی، عامل کلیدی در مهار ماسه‌دهی است؛ این دبی نشان‌دهنده آستانه‌ای است که نیروهای هیدرودینامیکی قادر به جابه‌جایی ذرات ماسه می‌شوند (Pham, 2017). رسوب ماسه در خطوط جریان می‌تواند منجر به کاهش قابل توجه فشار، آسیب لوله و تاسیسات و موانعی شود که بهره‌وری را کاهش می‌دهد (Gantt, 2024). ذرات ماسه با گذشت زمان با اجزای لوله مانند دیواره داخلی لوله، زانوها و دریچه‌ها برخورد می‌کنند (Vieira et al., 2016) و در نهایت باعث خرابی‌های فرسایشی در سیستم لوله شده و منجر به خسارات اقتصادی زیادی می‌گردد (Pereira, 2014). این مسئله نه‌تنها رضایت مصرف‌کنندگان آب شرب یا سیستم‌های

<sup>4</sup> MeshFree

<sup>5</sup> Root Mean Square Error

<sup>6</sup> Modular Finite-Difference Ground-Water Flow

<sup>1</sup> Interferometric synthetic aperture radar

<sup>2</sup> Finite Difference-FD

<sup>3</sup> Finite Element- FE

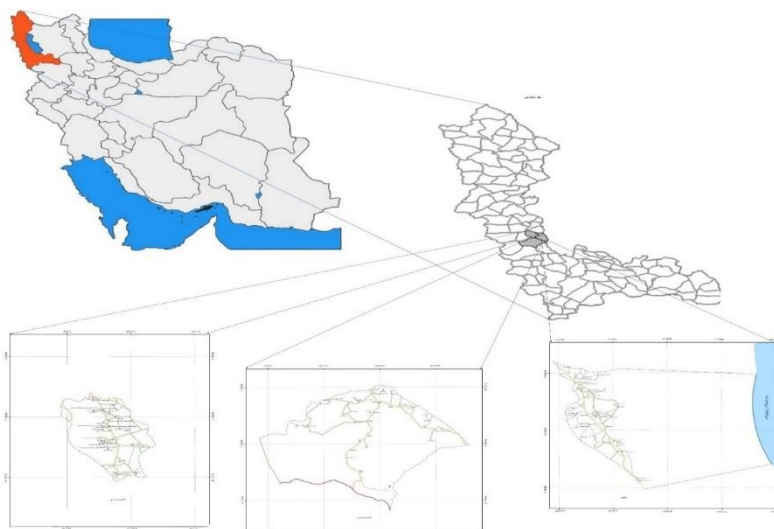
اگرچه عوامل متعددی در بروز ماسه‌دهی نقش دارند، اما تعیین دبی بحرانی، شناخت رفتار هیدرومکانیکی سازند و طراحی بهینه فیلتر شنی بر اساس ویژگی‌های فیزیکی و هیدرولیکی آبخوان، مؤثرترین رویکرد برای کنترل پایدار این پدیده محسوب می‌شود. هدف از پژوهش حاضر، توسعه و بررسی کارایی فیلتر شنی در چاه‌های آبدۀ است که با در نظر گرفتن خصوصیات فیزیکی-مکانیکی رسوبات مجاور چاه، بر پایه شرایط بحرانی پمپاژ چاه و استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی انجام می‌گیرد.

### مواد و روش‌ها

#### محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی در استان آذربایجان غربی و در بخش جنوبی شهرستان ارومیه واقع شده و سه دهستان ترکمان، باراندوز شمالی و باراندوز جنوبی را دربر می‌گیرد. این محدوده از نظر موقعیت جغرافیایی در بازه طول‌های جغرافیایی  $37^{\circ}15'$  تا  $45^{\circ}31'$  شرقی و عرض‌های جغرافیایی  $35^{\circ}31'$  تا  $37^{\circ}15'$  شمالی قرار دارد. فاصله این محدوده تا مرکز شهر ارومیه حدود ۲۵ کیلومتر است و دسترسی آسان به آن از طریق محورهای اصلی ارومیه-مه‌آباد و ارومیه-اشنویه امکان‌پذیر است (شکل ۱). شهرستان ارومیه از شمال به سلماس، از جنوب به نقده، از غرب به مرز بین‌المللی ایران و ترکیه و از شرق به دریاچه ارومیه محدود می‌شود (Statistical Center of Iran, 2016).

مصنوعی (MLP<sup>1</sup>) برای پیش‌بینی تراز آب زیرزمینی در حوزه آبخیز کمه استفاده کردند و نتیجه گرفتند که پارامترهای اقلیمی مانند بارش، تأثیر بیشتری نسبت به دبی در مدل‌سازی هوشمند دارند. فیلتر شنی<sup>۲</sup>، روشی مؤثر در صنایع نفت، گاز و آب است که از ورود ذرات خارجی به چاه جلوگیری می‌کند. این سیستم با ایجاد لایه‌ای از شن‌های درشت در اطراف بخش‌های مشبک لوله‌گذاری، به گونه‌ای طراحی شده که عبور آب به داخل چاه را تسهیل کرده و همزمان مانع از نفوذ ذرات ناخواسته می‌شود و عمر مفید چاه را افزایش می‌دهد (Johnson, 1963). همچنین، بهینه‌سازی تدریجی تولید و افزایش گام‌به‌گام آن، آسیب ناشی از سرعت بالای سیال حامل ماسه را کاهش داده و بهره‌وری چاه را افزایش می‌بخشد (Driscoll, 1986). در یک مطالعه آزمایشگاهی، با شبیه‌سازی فیزیکی تولید ماسه در ماسه‌سنگ‌های تحکیم‌نیافته دلتای نیجر نشان دادند که تولید ماسه تنها پس از عبور سرعت جریان از یک مقدار بحرانی آغاز می‌شود. نتایج آن‌ها بیانگر آن است که در صورت ثابت ماندن سرعت زیر حد بحرانی، تولید ماسه افزایش نمی‌یابد، مطالعات میدانی و تجربی مرتبط با فیلتر شنی نشان داده‌اند که انتخاب صحیح دانه‌بندی شن، نقش کلیدی در عملکرد این سیستم دارد. بر اساس نتایج، نسبت اندازه دانه میانه بسته‌شن به اندازه دانه میانه سازند در محدوده ۵ تا ۶، عملکرد حفاظتی بهینه‌ای ایجاد می‌کند (Samir et al., 2021). در مجموع، مطالعات نشان می‌دهد که



شکل ۱- موقعیت محدوده مطالعاتی.

Figure 1. Location of the study area.

<sup>1</sup> Multi-Layer Perceptron

<sup>2</sup> Gravel Pack

## روش گردآوری داده‌ها

نرم‌افزار لاگ‌پلات<sup>۲</sup> به‌عنوان یکی از ابزارهای تخصصی در حوزه زمین‌شناسی حفاری، قابلیت نمایش، پردازش و تفسیر گرافیکی اطلاعات چاه‌ها را فراهم می‌سازد (RockWare Inc., 2023). در این پژوهش، به‌منظور پشتیبانی از طراحی بهینه فیلتر شنی در چاه‌های آب، لاگ‌های زمین‌شناسی چاه‌ها با استفاده از این نرم‌افزار ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفتند.

بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، ویژگی‌های فیزیکی لایه‌ها شامل ضخامت، توالی و دانه‌بندی استخراج گردید. این داده‌ها مبنای شناسایی لایه‌های ماسه‌ای مستعد ماسه‌دهی و تعیین قطر متوسط ذرات<sup>۳</sup> (d<sub>50</sub>) هر لایه قرار گرفت. با بهره‌گیری از این اطلاعات، لایه‌های فعال هیدرولیکی مشخص شدند و پارامترهای هیدرولیکی محاسبه گردید. در نهایت، با تعیین دبی بحرانی و ارزیابی ریسک ماسه‌دهی، طراحی بهینه فیلتر شنی با دانه‌بندی مناسب انجام پذیرفت.

به منظور ارزیابی احتمال وقوع پدیده ماسه‌دهی در چاه‌های آبد، دبی بحرانی جریان به‌عنوان شاخص پایداری ذرات ماسه تعیین گردید و با دبی واقعی بهره‌برداری هر چاه مقایسه شد. این تحلیل بر پایه عدد رینولدز به‌عنوان معیار رفتار هیدرودینامیکی جریان در محیط چاه و اطراف ذرات انجام پذیرفت (Bear, 1972). عدد رینولدز جریان برای هر چاه با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید (۱):

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (1)$$

در این رابطه،  $\rho$  چگالی سیال،  $V$  سرعت جریان،  $d$  قطر مؤثر چاه و  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی آب است. این معیار برای شناسایی شرایط انتقال ذرات و تعیین حداقل سرعت لازم جهت تحرک ذرات ماسه در جریان پایدار به کار گرفته شد (Wang and Chen, 2010). در گام بعد، سرعت جریان واقعی  $V$  بر اساس دبی بهره‌برداری واقعی جریان هر چاه (به‌دست‌آمده از آزمایش‌های پمپاژ امور آب و فاضلاب شهرستان ارومیه) سطح مقطع مؤثر جریان ( $A_{eff}^4$ ) محاسبه شد. سرعت واقعی جریان از رابطه زیر حاصل شد (رابطه ۲):

$$V = \frac{Q_{real}}{A_{eff}} = \frac{Q_{real}}{\pi(d/2)^2 \alpha} \quad (2)$$

که در آن  $Q_{real}$  دبی واقعی<sup>۵</sup> بهره‌برداری بر حسب متر مکعب بر ثانیه ( $m^3/s$ )،  $A$  سطح مقطع مؤثر جریان،  $d$  قطر

این مطالعه با هدف بررسی پدیده ماسه‌دهی در چاه‌های آبد، بر اساس داده‌های موجود در امور آب و فاضلاب شهرستان ارومیه انجام شد. همچنین، داده‌های مورد استفاده، شامل لاگ‌های حفاری، گزارش‌های فنی تکمیل چاه و نتایج آزمایش‌های پمپاژ، اخذ گردیدند. این اطلاعات شامل عمق و قطر چاه، مشخصات اسکرین (قطر و طول)، حداکثر دبی بهره‌برداری و اطلاعات زمین‌شناسی سازند در اعماق مختلف می‌باشد. لاگ‌های زمین‌شناسی امکان شناسایی لایه‌های ماسه‌ای مستعد ماسه‌دهی و تعیین ذرات غالب<sup>۱</sup> در هر چاه را فراهم ساختند. در نهایت، این داده‌ها به‌عنوان مبنایی برای محاسبه پارامترهای هیدرولیکی، تحلیل ریسک ماسه‌دهی و طراحی بهینه فیلتر شنی به کار گرفته شدند.

## موقعیت مکانی و تحلیل فضایی چاه‌های آبد بر روی نقشه ماهواره‌ای منطقه مطالعاتی

موقعیت مکانی چاه‌های آبد در منطقه مطالعاتی (حوضه آبریز باراندوزچای) بر روی تصویر ماهواره‌ای پایه، با بهره‌گیری از اطلاعات مکانی استخراج‌شده از امور آب و فاضلاب شهرستان ارومیه، تعیین گردید (شکل ۲). در این شکل، محدوده جغرافیایی مطالعه با کادر قرمز رنگ و موقعیت دقیق چاه‌ها با نقاط آبی‌رنگ مشخص شده‌اند.



شکل ۲- تصویر ماهواره‌ای نشان‌دهنده موقعیت جغرافیایی و محدوده منطقه مطالعاتی واقع در جنوب شهرستان ارومیه. Satellite image showing the geographical location and extent of the study area located in the south of Urmia City.

## تحلیل لاگ‌های زمین‌شناسی با نرم‌افزار LogPlot برای طراحی بسته‌شن

<sup>4</sup> Effective Area

<sup>5</sup> Real Flow Rate

<sup>1</sup> Dominant Grain Size

<sup>2</sup> LogPlot

<sup>3</sup> Median Particle Size

بحرانی است و استفاده از اسکرین مناسب و طراحی فیلتر شنی برای کاهش سرعت جریان و تثبیت ذرات ماسه ضروری است (Tsuji et al., 1993).

در نهایت، ضخامت نظری<sup>۲</sup> معادل بسته‌شدن بر اساس مساحت جانبی مؤثر جریان و شعاع اسکرین با استفاده از رابطه ۷ محاسبه شد (Saucier, 1974; García, 2008):

$$t_{\text{theoretical}} = \frac{A_{\text{eff}}}{2\pi RL} \quad (7)$$

که در آن R شعاع اسکرین و L طول لایه فعال می‌باشد. با توجه به غیرعملی بودن ضخامت نظری، ضخامت عملی بسته‌شدن برابر با ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. حجم تقریبی گراول مورد نیاز بر اساس این ضخامت عملی و از رابطه ۸ محاسبه شد:

$$V_{\text{gravel}} = 2\pi RLt \quad (8)$$

که در آن R شعاع اسکرین، t ضخامت عملی بسته‌شدن (۰/۵ متر) و L طول لایه فعال اسکرین می‌باشد (Davis and Anderson, 1996).

همچنین جرم حجمی مصالح (بسته‌شدن) با فرض چگالی حجمی  $\rho = 1650 \text{ kg/m}^3$  برآورد شد و جرم تقریبی شن از رابطه ۹ به‌دست آمد:

$$m_{\text{gravel}} = V_{\text{gravel}} \cdot \rho_{\text{bulk}} \quad (9)$$

در این پژوهش، محاسبات مبتنی بر عدد شیلدز صرفاً به‌عنوان تخمین اولیه آستانه حرکت ذرات سازند به‌کار گرفته شد و دبی بحرانی نهایی سیستم اسکرین-شن-سازند از طریق شبیه‌سازی کوپل CFD-DEM در نرم‌افزار PFC<sup>3D</sup> تعیین گردید (Anderson and Jackson, 1967; Cundall and Strack, 1979; Di Felice, 1994). بدین منظور، دبی جریان به‌صورت افزایشی در مدل اعمال شد و دبی‌ای که در آن مهاجرت پایدار ذرات و افزایش نرخ خروج ماسه مشاهده گردید، به‌عنوان دبی بحرانی طراحی در نظر گرفته شد.

#### شبیه‌سازی سه‌بعدی فیلتر شنی با استفاده از PFC<sup>3D</sup>

در این پژوهش، رفتار مکانیکی و هیدرودینامیکی بسته‌شدن در چاه‌های آبدی با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی PFC<sup>3D</sup> شبیه‌سازی شد. این نرم‌افزار بر پایه روش دینامیک گسسته (DEM) بنا شده و امکان مدل‌سازی حرکت ذرات

اسکرین بر حسب متر (m) و  $\alpha$  ضریب مساحت مؤثر جریان (با توجه به باز بودن شکاف‌های اسکرین و طول اسکرین) می‌باشد. عدد رینولدز بحرانی به‌منظور تعیین سرعت مرزی جریان برای شبیه‌سازی عددی استفاده شد. مقایسه بین دبی واقعی و دبی بحرانی، امکان شناسایی چاه‌های با ریسک ماسه‌دهی بالا را فراهم نمود و داده‌های حاصل به‌عنوان مبنای طراحی فیلتر شنی در مراحل بعدی مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

#### محاسبات دبی بحرانی و طراحی فیلتر شنی

به‌منظور تعیین ابعاد مناسب فیلتر شنی و ارزیابی ریسک ماسه‌دهی، ابتدا سرعت بحرانی جریان در اطراف ذرات لایه ماسه‌ای محاسبه شد. سرعت بحرانی ( $V_c$ ) با استفاده از عدد شیلدز بحرانی ( $\theta_c$ ) و قطر متوسط ذرات غالب (d) هر لایه تعیین گردید (Shields, 1936).

تنش برشی بحرانی ( $\tau_c$ ) که نقطه شروع حرکت ذرات ماسه است، از رابطه ۳ به‌دست آمد:

$$\tau_c = \theta_c (\rho_s - \rho) g d \quad (3)$$

در این رابطه  $\rho_s$  چگالی ذرات ( $\text{kg/m}^3$ )،  $\rho$  چگالی آب ( $\text{kg/m}^3$ )، g شتاب گرانش ( $\text{m/s}^2$ ) و d قطر متوسط ذرات ماسه (m) است. مقدار  $\theta_c = 0.045$  به‌عنوان معیار محافظه‌کارانه برای کنترل ماسه‌دهی در نظر گرفته شد (Shields, 1936; Vanoni, 2006). سپس سرعت بحرانی جریان بر اساس تنش برشی بحرانی از رابطه ۴ محاسبه شد (Chow, 1959).

$$V_c = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \quad (4)$$

در نهایت، با در نظر گرفتن شعاع اسکرین (R) و طول لایه فعال (L)، مساحت جانبی مؤثر اسکرین برای عبور جریان از رابطه ۵ تعیین گردید:

$$A_{\text{eff}} = 2\pi RL \cdot \alpha \quad (5)$$

که در آن  $\alpha$  ضریب مؤثر جریان (معمولاً ۱۵ تا ۲۰ درصد شکاف‌های باز اسکرین) می‌باشد (Davis and Anderson, 1996).

سپس با داشتن سرعت بحرانی ( $V_c$ ) و مساحت مؤثر ( $A_{\text{eff}}$ )، دبی بحرانی چاه<sup>۱</sup> ( $Q_c$ ) از رابطه ۶ به‌دست آمد:

$$Q_c = V_c A_{\text{eff}} \quad (6)$$

مقایسه  $Q_c$  با دبی واقعی بهره‌برداری ( $Q_{\text{real}}$ ) نشان داد که در بسیاری از چاه‌ها، دبی واقعی به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از دبی

<sup>1</sup> Critical Real Flow Rate

<sup>2</sup> Theoretical Thickness

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (11)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} + \sum \mathbf{F}_d \quad (12)$$

که در آن  $\mathbf{u}$  بردار سرعت جریان،  $p$  فشار،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی،  $\rho$  چگالی سیال،  $\mathbf{f}$  نیروی حجمی (شامل گرانش) و  $\sum \mathbf{F}_d$  مجموع نیروهای درگ ناشی از ذرات می‌باشد.

جریان سیال و حرکت ذرات به صورت کوپل شده (CFD-DEM) شبیه‌سازی شد تا اثرات متقابل بین ذرات و سیال به شکل دقیق بازتولید گردد (Tsujii et al., 1993). ضرایب درگ برای ذرات دانه‌ریز، متوسط و درشت به ترتیب ۰.۱، ۰.۳۵ و ۰.۴۵ در نظر گرفته شد (Di Felice, 1994; Beetstra et al., 2007).

پارامترهای مکانیکی شامل چگالی ذرات، سختی نرمال و برشی (ذره-ذره و ذره-دیواره)، ضرایب اصطکاک و پارامترهای هیدرودینامیکی شامل چگالی و ویسکوزیته سیال و ضرایب

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = F_{c,i} + F_{g,i} + F_{d,i} \quad (10)$$

درگ، همگی از آزمایش‌های تک‌ذره و داده‌های تجربی معتبر استخراج شدند (Gidaspow, 1994; Di Felice, 1994). عدد رینولدز جریان نیز متناسب با شرایط واقعی جریان در چاه اعمال گردید (Crowe et al., 2011). تمامی این پارامترها در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱- پارامترهای مکانیکی و هیدرودینامیکی به‌کاررفته در شبیه‌سازی طراحی بسته‌ش.ن.

Table 1- Mechanical and hydrodynamic parameters used in gravel pack design simulation.

Parameter	Value	Unit
$\rho_p$	2700	kg/m <sup>3</sup>
$\mu_{pp}$	0.6	-
$k_n$	$1.2 \times 10^8$	N/m
$k_s$	$1 \times 10^7$	N/m
$\mu_{pw}$	0.1	-
$k_{n,w}$	$1.2 \times 10^8$	N/m
$k_{s,w}$	$1 \times 10^7$	N/m
$\rho_f$	1000	kg/m <sup>3</sup>
$\mu_f$	0.001	Pa·s
$C_d$	0.1, 0.35, 0.45	-
$C_d$	1	-

لاگ‌های زمین‌شناسی با استفاده از نرم‌افزار لاگ‌پلات

ترسیم و تفسیر شدند. تحلیل لاگ‌های زمین‌شناسی چاه‌های مورد مطالعه، شناسایی لایه‌های ماسه‌ای مستعد گسیختگی و

## نتایج و بحث

### توصیف لاگ‌های زمین‌شناسی چاه‌ها و ساختار زیرسطحی

<sup>1</sup> Mass of particle

<sup>2</sup> Contact Force

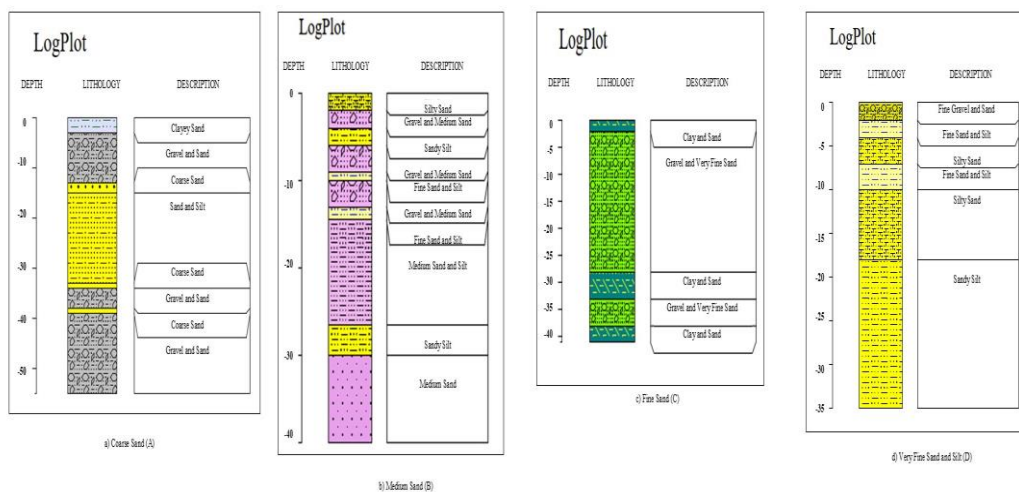
<sup>3</sup> Gravitational Force

<sup>4</sup> Drag Force

اساس این داده‌ها، چاه‌ها به چهار دسته متمایز گروه‌بندی شدند: ماسه دانه‌درشت (گروه A)، ماسه دانه‌متوسط (گروه B)، ماسه دانه‌ریز (گروه C) و ماسه بسیار دانه‌ریز به همراه سیلت (گروه D). با توجه به مشابهت رفتار هیدرودینامیکی و ریسک ماسه‌دهی، سیلت‌ها در کنار ماسه‌های بسیار دانه‌ریز در گروه D قرار گرفتند. این دسته‌بندی چارچوبی یکپارچه برای ارزیابی ریسک ماسه‌دهی و طراحی بسته‌بندی شن فراهم آورد. لازم به ذکر است که در این گروه‌بندی، ذرات رس لحاظ نگردیده‌اند؛ زیرا این ذرات به سبب تراکم و چسبندگی بالای خود، معمولاً جابه‌جا نشده و وارد چاه نمی‌گردند و بنابراین پدیده ماسه‌دهی ایجاد نمی‌نمایند. در نهایت، تمامی چاه‌های منطقه به گروه‌های A، B، C و D تقسیم‌بندی گردیدند که به ترتیب از ترکیب دانه‌های ماسه دانه‌درشت تا بسیار دانه‌ریز را نشان می‌دهند (شکل ۳). این گروه‌بندی به عنوان پایه اصلی تحلیل‌های هیدرودینامیکی، تعیین دبی بحرانی و طراحی بسته‌بندی در مراحل آتی پژوهش به کار گرفته شد.

جابه‌جایی ذرات به سمت چاه را ممکن ساخت. تغییرات لیتولوژیکی در عمق‌های گوناگون بررسی گردید و مشخص شد که برخی لایه‌های ماسه‌ای از ضخامت و پیوستگی بالاتری برخوردار بوده و بر عملکرد هیدرولیکی چاه‌ها تأثیر اصلی را اعمال می‌نمایند. ذرات این لایه‌ها به عنوان ذرات غالب هر چاه تعیین شدند.

براساس طبقه‌بندی دانه‌بندی ماسه‌ها (Wentworth, 1922; Driscoll, 1986)، قطر متوسط ذرات غالب هر لایه تعیین گردید. به عنوان مثال، ماسه دانه‌درشت با قطر حدود ۱ تا ۲ میلی‌متر تعریف شده که در پژوهش حاضر قطر متوسط آن با مقدار  $d_{50}=1/5$  میلی‌متر، مبنای طراحی فیلتر شنی و تحلیل پایداری ذرات قرار گرفت. به طور مشابه، قطر متوسط ذرات ماسه دانه‌متوسط (۰/۵-۱ mm)، دانه‌ریز (۰/۲۵-۰/۵ mm) و بسیار دانه‌ریز (۰/۱۲۵-۰/۰۶۲۵ mm) برای طراحی‌های مربوطه لحاظ گردید. تفسیر لاگ‌ها نشان داد که چاه‌های منطقه از لحاظ نوع و اندازه ذرات غالب سازند تفاوت‌های معناداری با یکدیگر دارند. بر اساس این یافته‌ها، چاه‌ها بر



شکل ۳- نمونه‌ای از لاگ‌های زمین‌شناسی چاه‌های واقع در منطقه مطالعاتی، (a) ماسه دانه‌درشت -A، (b) ماسه دانه‌متوسط -B، (c) ماسه دانه‌ریز -C، (d) ماسه بسیار دانه‌ریز -D.

Figure 3. An example of geological logs of wells located in the study area: a) Coarse Sand -A, b) Medium Sand -B, c) Fine Sand -C, d) Very Fine Sand and Silt -D.

از ساختار زیرسطحی را فراهم آورد و نتایج آن به عنوان ورودی اصلی شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شد.

### مشخصات هیدروژئولوژیکی و زمین‌شناسی چاه‌های منطقه مطالعاتی

اطلاعات حاصل از این لاگ‌ها به عنوان یکی از داده‌های پایه در تحلیل ریسک ماسه‌دهی و طراحی بهینه بسته‌بندی به کار گرفته شد. ترسیم و تفسیر لاگ‌های زمین‌شناسی، امکان بررسی تغییرات لایه‌ای در اعماق مختلف و ارائه تصویری دقیق

مشخصات هیدرولیکی و زمین‌شناسی چاه‌های واقع در منطقه مطالعاتی در جدول ۲ به طور جامع خلاصه شده است. این جدول شامل دو بخش اصلی داده‌ای است: بخش نخست، اطلاعات خام اخذ شده از امور آب و فاضلاب شهرستان ارومیه را در بر می‌گیرد که شامل شماره شناسایی چاه<sup>۱</sup>، نام و موقعیت مکانی چاه<sup>۲</sup>، عرض جغرافیایی<sup>۳</sup>، طول جغرافیایی<sup>۴</sup>، مختصات

دقیق جغرافیایی بر حسب درجه، دقیقه و ثانیه، عمق چاه<sup>۵</sup> و حداکثر دبی<sup>۶</sup> آزمایشی به مترمکعب بر ساعت می‌باشد این بخش شامل نوع دانه غالب ماسه‌ای در چاه‌ها (ماسه دانه‌درشت، دانه متوسط، دانه ریز یا بسیار دانه ریز) و گروه‌بندی نهایی چاه‌ها به دسته‌های A تا D (از درشت‌ترین تا ریزترین ترکیب دانه‌ای) است.

جدول ۲- مشخصات هیدرولیکی و زمین‌شناسی ۲۰ حلقه چاه واقع در محدوده مطالعاتی.

Table 2- Hydrogeological Characteristics of 20 Wells in the Study Area.

Well No.	Location	Latitude (DMS)	Longitude (DMS)	Depth (m)	Well Diameter (inch)	Max Flow (m <sup>3</sup> /h)	Dominant Grain	Sand Group
1	Balanj	37°23'47"	45°09'53"	57	12	278	Coarse Sand	A
2	Arablu	37°28'24"	45°14'52"	91	12	197	Very Fine Sand	D
3	Naybin	37°24'36"	45°17'21"	67	12	283	Medium Sand	C
4	Bozorg Abad	37°23'30"	45°11'43"	41	10	242	Medium Sand	A
5	Babarud	37°24'04"	45°14'06"	40	10	264	Fine Sand	C
6	Tazeh Kand	37°16'01"	46°12'13"	30	8	82	Very Fine Sand	D
7	Saribglu	37°28'54"	45°10'54"	45	10	153	Medium Sand	B
8	Ghasemlu	37°20'46"	45°09'04"	28	8	198	Coarse Sand	A
9	Arablu	37°23'54"	45°14'52"	26	8	205	Fine Sand	C
10	Dolama	37°22'33"	45°12'47"	34	8	78	Medium Sand	B
11	Torkaman	37°27'25"	45°15'20"	44	10	162	Medium Sand	B
12	Dizaj Tekyeh	37°25'56"	45°09'58"	26	8	65	Fine Sand	C
13	Shams Hajilan	37°27'25"	45°10'09"	35	8	68	Medium Sand	B
14	Qurt Tappeh	37°24'21"	45°12'18"	71	12	312	Fine Sand	C
15	Bozorg Abad	37°23'34"	45°11'09"	120	12	298	Medium Sand	B
16	Qurt Tappeh	37°24'54"	45°12'57"	98	12	226	Medium Sand	B
17	Topuz Abad	37°19'24"	44°16'12"	160	12	158	Medium Sand	B
18	Mir Shekarlu	37°26'34"	45°12'29"	35	8	48	Fine Sand	C
19	Babarud	37°24'13"	45°15'27"	41	10	97	Fine Sand	C
20	Naybin	37°24'55"	45°13'28"	57	12	279	Medium Sand	B

عدد رینولدز بحرانی به منظور تعیین سرعت مرزی جریان در اطراف ذرات ماسه و به عنوان شرط ورودی در شبیه‌سازی عددی استفاده شد. با محاسبه سرعت واقعی جریان از دبی بهره‌برداری چاه‌ها و مقایسه آن با سرعت بحرانی، چاه‌های دارای پتانسیل بالای ماسه‌دهی شناسایی گردیدند. نتایج این تحلیل به عنوان مبنای تعریف شرایط مرزی جریان و طراحی بسته‌شن در شبیه‌سازی‌های عددی بعدی مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین شرایط بحرانی جریان به عنوان ورودی مدل‌سازی عددی طراحی بسته‌بندی‌شن، ابتدا سرعت بحرانی جریان در اطراف ذرات ماسه‌ای سازند محاسبه شد. در چاه شماره ۱ جدول ۱ (بالانج)، بر پایه تفسیر لاگ‌های زمین‌شناسی، محیط متشکل از ماسه دانه‌درشت شناسایی شد

بررسی جدول نشان می‌دهد که چاه‌های گروه A (ماسه دانه‌درشت) عمدتاً دارای دبی‌های بالا ( $>250 \text{ m}^3/\text{h}$ ) و عمق متوسط هستند، در حالی که چاه‌های گروه D (ماسه بسیار دانه ریز و سیلت) با دبی‌های پایین‌تر ( $<100 \text{ m}^3/\text{h}$ ) مرتبط می‌باشند.

این داده‌های ترکیبی نه تنها پایه‌ای برای تحلیل‌های هیدرودینامیکی و محاسبه دبی بحرانی فراهم می‌آورد، بلکه امکان مقایسه بین‌چاهی، شناسایی الگوهای منطقه‌ای و بهینه‌سازی طراحی فیلتر شنی را نیز میسر می‌سازد. محدوده تنوع قطر چاه‌ها (8-12 اینچ) و عمق‌ها (26-160 متر) در جدول، تأثیر پارامترهای هندسی بر رفتار جریان و ریسک ماسه‌دهی را برجسته می‌کند.

#### تحلیل پایداری ذرات بر اساس عدد رینولدز بحرانی

<sup>4</sup> Longitude

<sup>5</sup> Depth

<sup>6</sup> Max Flow Rate

<sup>1</sup> Well No

<sup>2</sup> Location

<sup>3</sup> Latitude

سرعت محاسبه شده به عنوان سرعت مرزی جریان برای شبیه سازی عددی در نرم افزار PFC<sup>3D</sup> در نظر گرفته شد. بر اساس تحلیل لاگ زمین شناسی و شناسایی لایه های ماسه فعال، طول مؤثر اسکرین برابر با ۰/۶۷۵ متر تعیین گردید. با فرض چاهی به شعاع اسکرین برابر با  $R = 0.1524$  m (چاه با قطر ۱۲ اینچ) در نظر گرفته شد. به منظور لحاظ نمودن شرایط واقعی عبور جریان، تنها ۱۵ تا ۲۰ درصد از سطح جانبی اسکرین به عنوان سطح مؤثر عبور جریان فرض گردید که بیانگر ناحیه فعال هیدرولیکی پشت اسکرین است. همچنین، اندازه منافذ اسکرین

و قطر متوسط دانه ها  $d_{50} = 1.5$  mm در نظر گرفته شد. برای سیال آب، چگالی برابر با  $\rho = 1000$  کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته دینامیکی  $\mu = 0.001$  پاسکال ثانیه در نظر گرفته شد. همچنین، برای توصیف آغاز ناپایداری هیدرودینامیکی پیرامون ذرات ماسه، عدد رینولدز بحرانی  $Re_c = 1$  به عنوان یک مقدار محافظه کارانه و رایج در تعیین آستانه حرکت ذرات در مطالعات ماسه دهی انتخاب شد. سرعت بحرانی جریان اطراف ذرات ماسه با استفاده از تعریف عدد رینولدز در رابطه ۱ محاسبه گردید که با جایگذاری مقادیر فوق، سرعت بحرانی برابر با:

$$v_c \approx 2.76 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

تحرك ذرات بوده و ضرورت طراحی و به کارگیری اسکرین و بسته شدن مناسب به منظور کاهش سرعت جریان و تثبیت ذرات ماسه را تأیید می نماید. داده های هیدرولیکی و زمین شناسی چهار چاه مورد مطالعه شامل چاه شماره ۱ (بالانچ) با ماسه دانه درشت ( $d_{50} = 1.5$  میلی متر)، چاه شماره ۷ (ساری بیگلو) با ماسه دانه متوسط ( $d_{50} = 1.21$  میلی متر)، چاه شماره ۱۴ (قورت تپه) با ماسه دانه ریز ( $d_{50} = 0.25$  میلی متر) و چاه شماره ۶ (تازه کند) با ماسه بسیار دانه ریز ( $d_{50} = 0.11$  میلی متر) و نتایج آن ها در جدول ۲ ارائه شده است. محاسبات سایر چاه ها با همین روند محاسبه شد.

<sup>۱</sup> برابر با ۲ میلی متر انتخاب شد تا از ورود مستقیم ذرات ماسه به داخل چاه جلوگیری گردد.

مساحت جانبی مؤثر اسکرین برای عبور جریان به صورت زیر با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد:

$$A_{eff} \approx 0.0971 \text{ m}^2$$

به دست آمد. در ادامه، دبی متناظر با سرعت بحرانی (دبی بحرانی) با استفاده از رابطه (۶) به صورت زیر محاسبه گردید:

$$Q_c = v_c \times A_{eff} \approx 0.09576 \text{ m}^3/\text{h}$$

مقایسه دبی بحرانی محاسبه شده با دبی واقعی بهره برداری چاه ( $Q_{real} = 278 \text{ m}^3/\text{h}$ ) موجود در جدول ۱، نشان داد که دبی واقعی به طور قابل توجهی بزرگ تر از دبی بحرانی است. این اختلاف بیانگر قرارگیری جریان در شرایط ناپایدار از نظر

جدول ۲- محاسبه دبی بحرانی، سرعت بحرانی جریان و مقایسه با دبی واقعی چاه ها.

Table 2- Calculation of critical well discharge, critical flow velocity, and comparison with actual well discharge.

Well No.	Sand Type	$d_{50}$ (m)	Well D (inch)	Well D (m)	$Q_{real}$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	$Q_{real}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$v_{real}$ (m/s)	Re	$Q_c$ ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	$v_c$ (m/s)	$v_{real} / v_c$
1	A	1.50	12	0.304	278	0.0772	0.119	1	0.09576	$2.74 \times 10^{-4}$	436.5
7	B	1.21	10	0.254	153	0.0425	0.065	1	0.09576	$3.29 \times 10^{-4}$	199.9
14	C	0.25	12	0.304	312	0.0867	0.134	1	0.558	$1.60 \times 10^{-3}$	83.9
6	D	0.11	8	0.203	82	0.0228	0.035	1	0.10584	$4.55 \times 10^{-3}$	7.8

به عنوان داده های ورودی شرایط مرزی جریان در شبیه سازی عددی مورد استفاده قرار گرفتند.

### بررسی تنش برشی بحرانی ذرات با استفاده از معیار شیلدز

برای تعیین ضخامت مناسب بسته شنی در چاه های مورد مطالعه، از معیار شیلدز برای محاسبه تنش برشی بحرانی ( $\tau_c$ ) استفاده شد. این معیار با در نظر گرفتن تفاوت چگالی بین ذرات ماسه و سیال استخراجی، حداقل سرعت جریان را که

لازم به ذکر است که پارامترهای قطر اسکرین، طول اسکرین و اندازه منافذ آن نقش مستقیم در تعیین سطح مؤثر عبور جریان و شرایط بحرانی هیدرولیکی دارند و برای تمامی چاه ها بر اساس تحلیل لاگ زمین شناسی و منابع استاندارد طراحی اسکرین انتخاب شده اند. همچنین، قطر متوسط ذرات ماسه برای هر چاه بر مبنای طبقه بندی دانه بندی سازند و منابع علمی معتبر تعیین گردیده است. نتایج حاصل از این محاسبات

<sup>1</sup> slot size

$$A_{eff} = 0.0772/0.037 = 2.08m^2$$

با توجه به شعاع اسکرین  $R=0.1524m$  و طول لایه فعال  $L=0.675m$ ، ضخامت نظری بسته شن به دست آمد:

$$t_{theoretical} = \frac{2.08}{2\pi \times 0.1524 \times 0.675} = 3.24m$$

با توجه به غیرعملی بودن ضخامت نظری، ضخامت عملی بسته شن برابر ۵۰ میلی‌متر انتخاب شد. حجم گراول مورد نیاز برای ضخامت عملی محاسبه گردید:

$$V = 2\pi \times 0.1524 \times 0.05 \times 0.675 = 0.3223m^3$$

جرم حجمی مصالح با فرض چگالی  $\rho_{bulk} \approx 1650kg/m^3$  برآورد شد:

$$m = 0.323 \cdot 1650 = 533 kg$$

باعث حرکت ذرات می‌شود، تعیین می‌کند. به عنوان مثال، محاسبات برای چاه شماره ۱ (بالانچ) با فرض قطر دانه مؤثر  $d=1.5 mm$  به شرح زیر انجام شد:

ابتدا تنش برشی بحرانی با استفاده از رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\tau_c = 0.045 \times (2650 - 1000) \times 9.81 \times 0.0015 \approx 1.38 Pa$$

سپس سرعت برشی بحرانی به صورت زیر تعیین شد:

$$vc = \sqrt{\frac{1.38}{1000}} = 0.0371m/s$$

مساحت جانبی مؤثر اسکرین برای عبور جریان محاسبه شد:

جدول ۳- محاسبه تنش برشی ذرات ماسه بر اساس معیار شیلدز در چاه‌های مورد مطالعه.

Table 3- Determination of Critical Shear Stress of Sand Particles for Gravel Pack Design Based on the Shields Criterion.

Well No.	Well d(inch)	Sand Type	d <sub>50</sub> (mm)	Q <sub>real</sub> (m <sup>3</sup> /s)	τ <sub>c</sub> (Pa)	V <sub>c</sub> (m/s)	A <sub>eff</sub> (m <sup>2</sup> )	t <sub>theoretical</sub> (m)	t <sub>practical</sub> (mm)	V <sub>gravel</sub> (m <sup>3</sup> )	Mass-gravel(kg)
1	12	A	1.50	0.0772	1.38	0.0371	2.08	3.24	50	0.323	533
7	10	B	1.21	0.0425	1.38	0.0371	1.15	1.43	50	0.269	444
14	12	C	0.25	0.0867	1.38	0.0371	2.34	3.64	50	0.323	533
6	8	D	0.11	0.0228	1.38	0.0371	0.61	0.76	50	0.215	355

عددی امکان اصلاح این ضرایب و تعیین بازه‌های بهینه‌تر متناسب با شرایط واقعی هیدرودینامیکی چاه‌ها را فراهم می‌کند.

#### فیلتر شنی نوع A: طراحی و تحلیل عددی برای چاه‌های با ماسه دانهدرشت

برای ارزیابی عملکرد فیلتر شنی در چاه‌های گروه A، شبیه‌سازی کوپل CFD-DEM در محیط PFC<sup>3D</sup> انجام شد؛ در این تحلیل، اگرچه در مرحله اولیه سرعت بحرانی با استفاده از  $d_{50}$  و معیار شیلدز-رینولدز برآورد شد، اما در مدل نهایی  $d_{85}$  به عنوان قطر نماینده سازند برای شرایط محافظه‌کارانه‌تر انتخاب گردید. پس از لحاظ دادن پارامترهای ورودی شامل خواص مکانیکی ذرات، ویژگی‌های سیال و مشخصات لایه آبخوان، چندین سناریوی عددی با اندازه‌های مختلف دانه‌شن در محدوده‌های توصیه‌شده منابع کلاسیک و با رعایت معیارهای زهکشی و عدم فرسایش‌پذیری آزمون شدند. نتایج خروجی شبیه‌سازی شکل ۴-b نشان داد که بسته‌شن با

مقادیر به‌دست‌آمده از تحلیل شیلدز به‌عنوان مقادیر اولیه و محدوده‌بندی پارامترها در شبیه‌سازی عددی مورد استفاده قرار گرفتند.

#### شبیه‌سازی عددی جریان و طراحی بهینه بسته‌شنی برای مهار ماسه‌دهی در چاه‌های آبده

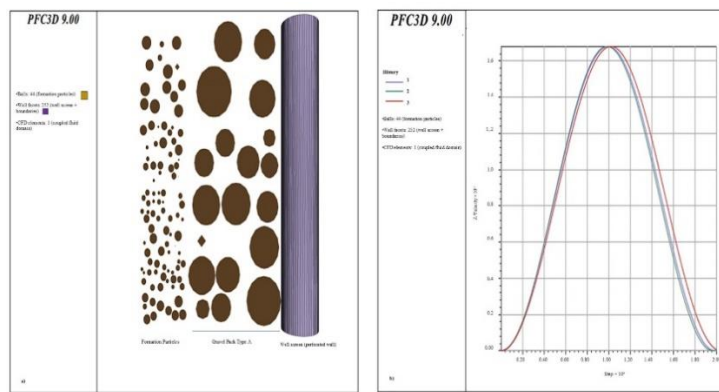
در این پژوهش، به‌دلیل محدودیت داده‌های آزمایشگاهی، منحنی‌های دانه‌بندی ماسه سازند بر اساس گروه‌بندی لیتولوژیکی چاه‌ها (دانه‌درشت، متوسط، ریز و بسیار ریز) و بازه‌های استاندارد منابع معتبر بازسازی شدند. پیش از شبیه‌سازی، محدوده مجاز اندازه شن با استفاده از معیارهای کلاسیک (عدم عبور ذرات سازند و تأمین نفوذپذیری کافی) کنترل شد تا دامنه نظری اولیه برای سناریوهای عددی مشخص گردد. سپس، شبیه‌سازی‌های کوپل CFD-DEM<sup>۱</sup> برای ارزیابی رفتار دینامیکی ذرات در شرایط نزدیک به سرعت بحرانی انجام شد. نتایج نشان داد که اگرچه ضرایب کلاسیک (مانند ۶ تا ۹ برابر اندازه متوسط ذرات) معتبرند، اما شبیه‌سازی

<sup>2</sup> Particle Flow Code

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamics / Discrete Element Method

نسبتاً یکنواخت و کمی درشت‌تر از ماسه سازند برای افزایش پایداری چاه توصیه می‌گردد. نتایج نهایی نشان داد که بسته‌ش‌ن نوع A از پایداری هیدرومکانیکی مناسبی تحت شرایط جریان نزدیک به دبی بحرانی برخوردار است؛ پایداری سیستم با عدم مشاهده مهاجرت پیشرونده ذرات سازند، حفظ آرایش دانه‌های بسته‌ش‌ن و نبود مسیرهای ترجیحی جریان در طول شبیه‌سازی تأیید شد. رفتار نوسانی سرعت ذرات و کاهش تدریجی دامنه حرکت آن‌ها پس از برخورد با دانه‌های فیلتر شنی، نشان‌دهنده میرایی انرژی جنبشی و عملکرد مؤثر بسته‌ش‌ن در جذب تنش‌های هیدروپنماتیکی است و بیانگر آن است که بسته‌ش‌ن طراحی‌شده نه‌تنها از ورود ذرات به داخل چاه جلوگیری می‌کند، بلکه از نظر پایداری دانه‌های نیز در شرایط بهره‌برداری پایدار باقی می‌ماند.

دانه‌هایی کمی درشت‌تر از ذرات سازند و دور از مقادیر بسیار درشت، کارایی بالاتری در کنترل ماسه‌دهی و حفظ پایداری جریان دارد؛ به‌طوری‌که پلات‌های PFC<sup>3D</sup> تمرکز ذرات ماسه در پشت لایه شن و عدم نفوذ آن‌ها به داخل چاه را به‌عنوان یک سد مکانیکی مؤثر تأیید می‌کنند. تحلیل تاریخیچه سرعت قائم ذرات در شکل ۴-ا نیز حاکی از آن است که با وجود رسیدن سرعت‌ها به مقادیر نزدیک به سرعت بحرانی، برخورد با دانه‌های بسته‌ش‌ن موجب افت انرژی جنبشی و مهار حرکت صعودی ذرات می‌شود و این الگوی متناوب شتاب‌گیری و کاهش سرعت در طول شبیه‌سازی تکرار می‌گردد، بدون آنکه انتقال پایدار ذرات به داخل چاه رخ دهد. بر اساس این یافته‌ها، بازه تقریبی ۱۴/۵ تا ۱۸ میلی‌متر برای اندازه دانه‌ش‌ن نوع A به‌عنوان محدوده بهینه پیشنهاد می‌شود و استفاده از شن



شکل ۴- طراحی فیلتر شنی نوع A، (a) پلات تصویری حاصل از شبیه‌سازی و طراحی فیلتر شنی نوع A در مدل عددی-CFD (b). DEM، نمودار سرعت ذرات حاصل از شبیه‌سازی و طراحی فیلتر شنی نوع A.

Figure 4 – Design of Type A Gravel Pack:

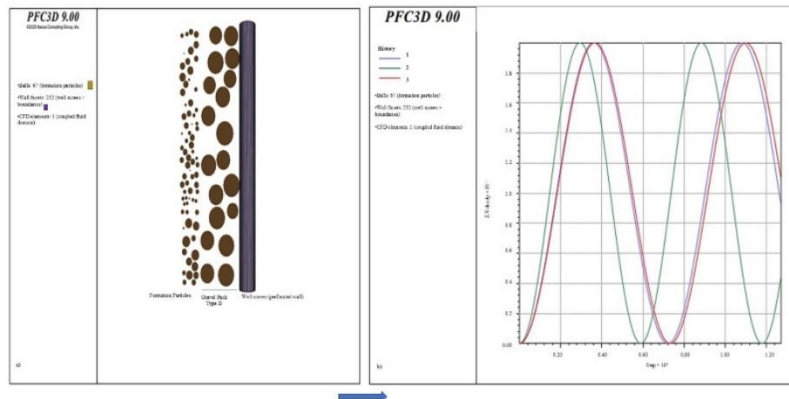
b) Particle a) Visual plot from the simulation and design of Type A gravel pack in the CFD-DEM numerical model; velocity.

می‌کند. تحلیل‌ها حاکی از آن است که در دبی‌های نزدیک به دبی بحرانی، ذرات ماسه متوسط به دلیل جرم کمتر و نسبت سطح به حجم بالاتر، تحت تأثیر نیروی درگ سیال شتاب گرفته و سرعت صعودی آن‌ها به حدود ۱/۸۸ متر بر ثانیه می‌رسد که این مقدار نسبت به ذرات دانه‌درشت بیشتر است؛ با این حال، برخورد این ذرات با لایه بسته‌ش‌ن موجب کاهش چشمگیر انرژی جنبشی آن‌ها و مهار حرکت صعودی می‌شود. پلات‌های فضایی خروجی شبیه‌سازی شکل ۵ نیز تمرکز ذرات ماسه در پشت لایه شن و عدم نفوذ آن‌ها به ناحیه داخلی چاه را به‌وضوح نشان می‌دهند که این امر، عملکرد مؤثر بسته‌ش‌ن

### فیلتر شنی نوع B : طراحی و تحلیل عددی برای چاه‌های با ماسه دانه‌متوسط

برای ارزیابی عملکرد بسته‌ش‌ن در چاه‌های گروه B که دارای ذرات غالب ماسه دانه‌متوسط با قطر متوسط حدود ۱/۲۱ میلی‌متر هستند، شبیه‌سازی‌های عددی CFD-DEM در محیط PFC<sup>3D</sup> انجام شد. در این پژوهش، طراحی بسته‌ش‌ن بر مبنای سرعت بحرانی استخراج‌شده از تحلیل عدد رینولدز ( $Re=1$ ) و شرایط هیدروپنماتیکی واقعی چاه صورت گرفت و نتایج نشان داد که بازه بهینه ۵/۲ تا ۷/۵ میلی‌متر برای اندازه دانه‌های شن، تعادلی ایده‌آل میان تأمین تخلخل مناسب برای عبور جریان و جلوگیری از نفوذ ذرات ماسه به داخل چاه ایجاد

نوع B را به عنوان یک سد مکانیکی پایدار در مهار پدیده ماسه‌دهی تأیید می‌کند.



شکل ۵- طراحی فیلتر شنی نوع B. پلات تصویری حاصل از شبیه‌سازی و طراحی فیلتر شنی نوع B در مدل عددی-CFD (a) و نمودار سرعت ذرات حاصل از شبیه‌سازی و طراحی فیلتر شنی نوع B (b). DEM

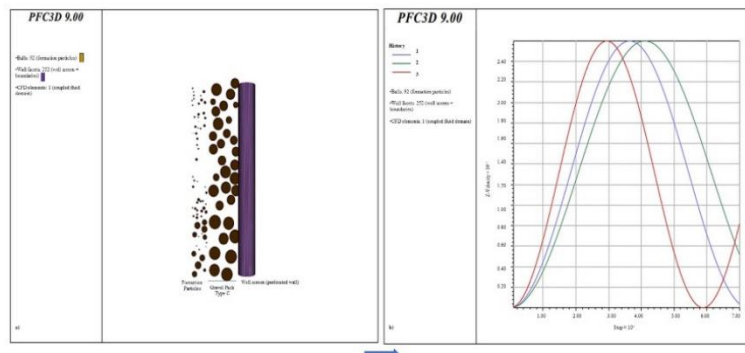
Figure 5 – Design of Type B Gravel Pack:

b) Particle a) Visual plot from the simulation and design of Type B gravel pack in the CFD-DEM numerical model; velocity diagram from the simulation and design of Type B gravel pack.

این بازه، بسته‌شدن با کاهش سرعت موضعی جریان و افزایش برهم‌کنش‌های ذره-ذره، حرکت ماسه‌های ریز را به‌طور مؤثر محدود می‌کند؛ به‌طوری‌که بیشینه سرعت صعودی ذرات ماسه ریز در کوتاه‌ترین زمان به حدود ۲/۴۶ متر بر ثانیه می‌رسد، اما بلافاصله پس از برخورد با لایه گراول‌پک، انرژی جنبشی آن‌ها به‌طور محسوسی کاهش یافته و حرکت صعودی مهار می‌شود. پلات‌های خروجی شکل ۶ تأیید می‌کنند که لایه گراول‌پک نه‌تنها به‌عنوان یک فیلتر مکانیکی عمل می‌کند، بلکه با ایجاد یک سد فیزیکی و افزایش تماس‌های ذره‌ای، مسیر حرکت آزاد ذرات دانه‌ریز را در جریان آب محدود کرده و از ورود آن‌ها به داخل چاه جلوگیری می‌نماید؛ این عملکرد باعث حفظ پایداری ساختار چاه و جلوگیری از انتقال پیشرونده ذرات سازند در شرایط بهره‌برداری پایدار می‌شود.

### فیلتر شنی نوع C: طراحی و تحلیل عددی برای چاه‌های با ماسه دانه‌ریز

برای طراحی فیلتر شنی نوع C در چاه‌های با سازندهای ماسه‌ریز (قطر متوسط حدود ۰/۲۵ میلی‌متر)، شبیه‌سازی‌های عددی CFD-DEM در محیط PFC<sup>3D</sup> با تعریف دقیق پارامترهای مکانیکی ذرات، ویژگی‌های سیال و خصوصیات آبخوان انجام شد؛ در این تحلیل، به‌منظور بررسی شرایط بحرانی‌تر، به‌جای استفاده از  $d_{50}$ ، از  $d_{85}$  سازند به‌عنوان قطر نماینده بهره‌گرفته شد که منجر به انتخاب بازه‌ای از شن‌های ریزتر نسبت به مقادیر کلاسیک گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که بازه بهینه ۱ تا ۴/۳ میلی‌متر برای اندازه دانه‌های بسته‌شدن، با هدف کاهش فاصله مؤثر بین دانه‌ها، جلوگیری از مهاجرت ذرات ریز و حفظ جریان پایدار انتخاب شده است. در



شکل ۶- طراحی فیلتر شنی نوع C. پلات تصویری حاصل از شبیه‌سازی و طراحی فیلتر شنی نوع C در مدل عددی-CFD (a) و نمودار سرعت ذرات حاصل از شبیه‌سازی و طراحی فیلتر شنی نوع C (b). DEM

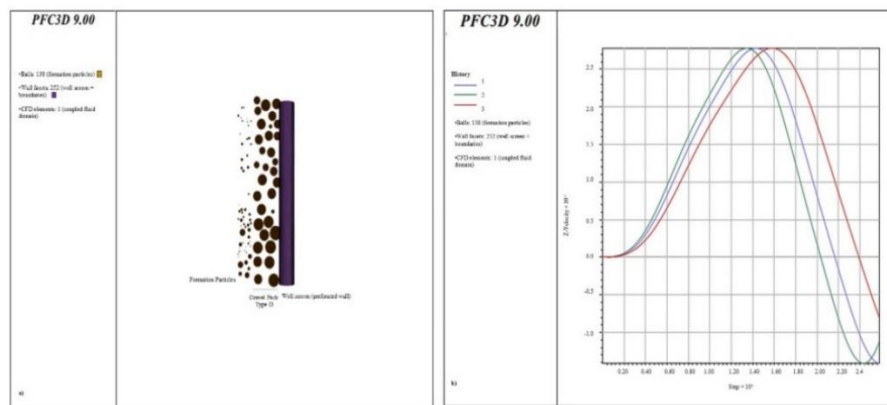
Figure 6 – Design of Type C Gravel Pack:

a) Visual plot from the simulation and design of Type B gravel pack in the CFD–DEM numerical model; b) Particle velocity diagram from the simulation and design of Type C gravel pack.

کلوئیدی عمل می‌کند. تحلیل دینامیک ذرات نشان می‌دهد که در فاز اولیه، ذرات ریز به دلیل جرم حجمی پایین و ضریب درگ بالا، شتابی تا حدود ۲/۵۶ متر بر ثانیه کسب می‌کنند. با این حال، با افزایش زمان و درگیری با دانه‌های گراول، انرژی جنبشی ذرات از طریق برخوردهای غیرالاستیک و اصطکاک سطحی هدر می‌رود. ثبت سرعت‌های منفی در داده‌های شبیه‌سازی، پدیده بازگشت هیدرولیکی را تأیید می‌کند که در آن ذرات به جای نفوذ پایدار به داخل چاه، به سمت سازند رانش داده می‌شوند. این مکانیسم نشان می‌دهد که فیلتر شنی نوع D تنها یک مانع فیزیکی نیست، بلکه با ایجاد یک محیط پراکنش‌دهنده، پایداری مهاجرت ذرات را از طریق افزایش اصطکاک و برخوردهای مکرر، به‌طور رادیکال کاهش داده و پایداری بلندمدت چاه را تضمین می‌کند.

### فیلتر شنی نوع D: طراحی و تحلیل عددی برای چاه‌های با ماسه بسیار دانه‌ریز

فیلتر شنی نوع D با هدف بهینه‌سازی عملکرد در چاه‌های متعلق به سازندهای دارای ماسه‌های بسیار دانه‌ریز ( $d_{50}=0.11$  mm) که مستعدترین لایه‌ها برای ماسه‌دهی هستند، شبیه‌سازی شده است. در این طراحی، از یک سیستم فیلتراسیون درجه‌بندی شده متشکل از دو لایه شن با توزیع دانه‌بندی ۰/۶ تا ۱/۰ میلی‌متر و ۱/۱ تا ۱/۵ میلی‌متر استفاده شده است (شکل ۷). شبیه‌سازی‌های عددی حاکی از آن است که این آرایش دوگانه، یک گرادیان هیدرولیکی و مکانیکی ایجاد می‌کند؛ به‌گونه‌ای که لایه درشت‌تر (لایه بیرونی) با افزایش ضریب اصطکاک، پایداری ساختاری در مجاورت اسکرین را تضمین کرده و لایه ریزتر (لایه داخلی) با کاهش مؤثر اندازه منافذ به‌عنوان سد اصلی در برابر نفوذ ذرات



شکل ۷- طراحی بسته شن نوع D، (a) پلات تصویری حاصل از شبیه‌سازی و طراحی بسته شن نوع D در مدل عددی–CFD

، (b) نمودار سرعت ذرات حاصل از شبیه‌سازی و طراحی بسته شن نوع D، DEM.

Figure 7 – Design of Type D Gravel Pack:

a) Visual plot from the simulation and design of Type B gravel pack in the CFD–DEM numerical model; b) Particle velocity diagram from the simulation and design of Type D gravel pack.

دانه‌بندی سازند، شرایط بهره‌برداری و طراحی سیستم اسکرین-فیلتر شنی است.

• تحلیل زمین‌شناسی: استفاده از نرم‌افزار لاگ پلات امکان شناسایی لایه‌های فعال هیدرولیکی و تعیین ذرات غالب را فراهم کرد و چاه‌ها را به چهار گروه A تا D (از ماسه دانه‌درشت تا سیلت) تقسیم‌بندی نمود. این گروه‌بندی

### نتیجه‌گیری

این پژوهش پدیده ماسه‌دهی در چاه‌های آبدۀ جنوب شهرستان ارومیه را با رویکردی تلفیقی شامل تحلیل لاگ‌های زمین‌شناسی، محاسبات هیدرودینامیکی، معیارهای کلاسیک پایداری ذرات و شبیه‌سازی عددی کوپل CFD–DEM مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل نشان داد که ماسه‌دهی در این منطقه پدیده‌ای فراگیر و وابسته به برهم‌کنش ویژگی‌های

تراز آب زیرزمینی به کمک تکنیک تداخل‌سنجی راداری. نشریه هیدروژئولوژی، ۱۰(۱): ۱۲-۱.

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

خسروپناه، ا.، کرمی، غ.ج.، جیحونی، س.، ۱۳۹۰. تاثیرات برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و پدیده فرونشست در دشت سملقان. هفتمین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، تهران.

جعفرزاده، ا.، خاشعی سیوکی، ع. و پوررضا بیلندی، م.، ۱۴۰۲. ارزیابی عملکرد روش‌های عددی در شبیه‌سازی جریان آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان بیرجند). نشریه هیدروژئولوژی، ۷(۲): ۶۱-۷۵.

سمیعی دستجردی، ر.، حیات‌زاده، م.، فتح‌الله‌زاده، ع. و فتوحی فیروزآباد، ف.، ۱۴۰۳. شبیه‌سازی آب‌زیرزمینی با استفاده از سیستم هوش مصنوعی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز کمه، استان اصفهان). نشریه هیدروژئولوژی، ۹(۲): ۶۵-۷۶.

فکوری، ح.، بی‌جن‌خان، ع.، ۱۴۰۱. امکان‌سنجی شناسایی چاه‌های با پتانسیل ماسه‌دهی زیاد با استفاده از نقشه‌های فرونشست (مطالعه موردی: استان البرز). مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۱۰): ۲۴۲۲۷-۲۴۱۳.

#### Rrference

Al-Sheikh, A.A., Chatr-Simab, Z., Vosooghi, B., Modiri, M., and Pakdaman, M.S., 2018. Investigation of land subsidence due to excessive groundwater extraction using radar interferometry technique: Marvdasht aquifer. *Journal of Water and Soil Science (Water and Soil Sciences)*, 31(4): 855-868. [In Persian]

Anderson, T.B., Jackson, R., 1967. A fluid mechanical description of fluidized beds. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 6(4): 527-539.

Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. American Elsevier Publishing Company, New York.

Beetstra, R., van der Hoef, M.A., Kuipers, J.A.M., 2007. Drag force of intermediate Reynolds number flow past mono- and bidisperse arrays of spheres. *AICHe Journal*, 53(2): 489-501.

چارچوبی منسجم برای تحلیل ریسک و طراحی بسته‌شدن متناسب با شرایط واقعی ایجاد کرد.

• تحلیل هیدرودینامیکی: محاسبات عدد رینولدز و تنش برشی بحرانی (معیار شیلدز) نشان داد که دبی واقعی بهره‌برداری در اغلب چاه‌ها به مراتب بزرگ‌تر از دبی بحرانی است. این امر بیانگر قرارگیری جریان در محدوده ناپایدار و ضرورت استفاده از طراحی بهینه برای کاهش سرعت موضعی و تثبیت ذرات است. همچنین مشخص شد که روابط تجربی کلاسیک برای طراحی دقیق در شرایط واقعی کافی نیستند.

• شبیه‌سازی عددی (CFD-DEM): نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار PFC<sup>3D</sup> نشان داد که طراحی بسته‌شدنی متناسب با دانه‌بندی سازند، مهاجرت پایدار ذرات را به طور مؤثر مهار می‌کند. بازه‌های بهینه شن برای هر گروه تعیین شد برای ماسه دانه‌درشت (گروه A: ۱۴/۵ تا ۱۸ میلی‌متر)، دانه‌متوسط (گروه B: ۵/۲ تا ۷/۵ میلی‌متر)، دانه‌ریز (گروه C: ۱ تا ۴/۳ میلی‌متر) و بسیار دانه‌ریز و سیلت (گروه D)، استفاده از بسته‌شدن دوگانه به‌عنوان راهکار بهینه پیشنهاد شد. رفتار دینامیکی ذرات در شبیه‌سازی‌ها نشان داد که برخورد ذرات سازند با دانه‌های فیلتر شنی موجب افت انرژی جنبشی، کاهش سرعت صعودی و در بسیاری موارد برگشت ذرات به سمت سازند می‌شود. این مکانیسم، بیانگر عملکرد مؤثر بسته‌شدنی نه‌تنها به‌عنوان یک مانع فیزیکی، بلکه به‌عنوان سامانه‌ای برای میرایی تنش‌های هیدرودینامیکی و افزایش پایداری هیدرومکانیکی چاه است.

#### سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همکاری مؤثر و حمایت‌های ارزشمند امور آب و فاضلاب شهرستان ارومیه در ارائه داده‌های فنی و لاگ‌های چاه که نقش حیاتی در انجام این پژوهش داشتند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

#### منابع

آل‌شیخ، ع.ا.، چترسیماب، ز.، وثوقی، ب.، مدیری، م. و پاکدامن، م.ص.، ۱۳۹۷. بررسی فرونشست سطح زمین در اثر برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی با استفاده از تکنیک تداخل‌سنجی راداری-آبخوان مرودشت. فصلنامه آب و خاک (علوم و فناوری آب)، ۳۱(۴): ۸۶۸-۸۵۵.

براهیمی، ش.، رضایی، ا. و موسوی، ز.، ۱۴۰۳. بررسی فرونشست آبخوان دشت عباس ایلام در دو دوره افت و خیز

- mathematical model (Case study: Kohourstan aquifer, Hormozgan province). *Journal of Hydrogeomorphology*, 10(1): 50–60. [In Persian]
- Khosropanah, I., Karimi, G.H., and Jihouni, S., 2011. Impacts of excessive groundwater extraction and land subsidence phenomenon in Soltanabad plain. 7th Conference on Engineering and Environmental Geology of Iran, Tehran. [In Persian]
- LogPlot, 2023. LogPlot software for borehole log plotting and analysis. RockWare Inc., Golden, CO, USA. <https://www.rockware.com/product/logplot/>
- Pereira, F.A., 2014. Economic impacts of sand production on water well maintenance costs. *Water Resources Research*, 50(6): 4897–4910.
- Pham, D.T., 2017. Critical flow rate determination for sand production control in weak formations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 152: 345–356.
- Samiie Dashtjerdi, R., Hayat-Zadeh, M., Fathollah-Zadeh, A., and Fathouhi Firouzabad, F., 2024. Groundwater simulation using artificial intelligence system (Case study: Komeh watershed, Isfahan province). *Journal of Hydrogeomorphology*, 9(2): 65–76. [In Persian]
- Samir, M.A., El-Sayed, H., Ahmed, K., 2021. Optimal gravel pack design ratios for sand control in water wells. *Groundwater Engineering Journal*, 14(2): 187–201.
- Saucier, A.E., 1974. Considerations in gravel pack design. *Journal of Petroleum Technology*, 26(2): 205–215.
- Shields, A., 1936. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. *Mitt. Preuss. Versuchsanst. Wasserbau Schiffbau*, 26: 5–24.
- Statistical Center of Iran, 2016. National population and housing census. Tehran, Iran: Statistical Center of Iran.
- Todd, D.K., Mays, L.W., 2005. *Groundwater hydrology*. John Wiley and Sons, Hoboken, NJ, USA, 636 p.
- Tsuji, Y., Kawaguchi, T., Tanaka, T., 1993. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. *Powder Technology*, 77(1): 79–87.
- Vanoni, V.A., 2006. *Sedimentation engineering*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54 (Revised), Reston, VA, USA, 418 p.
- Vieira, L.K.P., Damasceno, J.J.R., Barrozo, M.A.S., 2016. Erosive wear in pipelines due to sand particles transport. *Powder Technology*, 288: 112–125.
- Wang, J., and Chen, Z. (2010). “Numerical Modeling of Sand Production in Unconsolidated
- Chow, V.T., 1959. *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York, USA, 680 p.
- Civan, F., 2007. *Reservoir formation damage: Fundamentals, modeling, assessment, and mitigation*. Gulf Professional Publishing, Houston, USA, 1132 p.
- Crowe, C.T., Schwarzkopf, J.D., Sommerfeld, M., Tsuji, Y., 2011. *Multiphase flows with droplets and particles*. CRC Press, Boca Raton, USA, 489 p.
- Cundall, P.A., Strack, O.D.L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1): 47–65.
- Davis, S.N., Anderson, R.S., 1996. Groundwater well design and construction. *Journal of Hydrogeology*, 4(2): 89–104.
- Di Felice, R., 1994. The voidage function for fluid-particle interaction systems. *International Journal of Multiphase Flow*, 20(1): 153–159.
- Driscoll, F.G., 1986. *Groundwater and wells*. Johnson Division, St. Paul, MN, USA, 1089 p.
- Ebrahimi, S., Rezaei, A., and Mousavi, Z., 2024. Investigation of aquifer subsidence in Abbas plain of Ilam during two periods of groundwater level fluctuation using radar interferometry. *Journal of Hydrogeomorphology*, 10(1): 1–12. [In Persian]
- Fakouri, H., and Bigan-Khan, A., 2022. Feasibility of identifying high-sand-yield wells using subsidence maps (Case study: Alborz province). *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 53(10): 2413–2427. [In Persian]
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA, 604 p.
- Gantt, R.E., 2024. Sand deposition effects on pressure drop and equipment damage in water distribution systems. *Journal of Water Resources Engineering*, 29(1): 45–59.
- García, M.H., 2008. *Sedimentation engineering: Processes, measurements, modeling, and practice*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110, Reston, VA, USA, 1132 p.
- Gidaspow, D., 1994. *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions*. Academic Press.
- Jafarzadeh, A., Khashei Siouki, A., and Pourreza Bilandi, M., 2023. Evaluation of numerical methods performance in groundwater flow simulation (Case study: Birjand aquifer). *Journal of Hydrogeomorphology*, 7(2): 61–75. [In Persian]
- Johnson, R.C., 1963. Design criteria for gravel packs in unconsolidated formations. *Journal of Petroleum Technology*, 15(7): 789–797.
- Khara, S., Sadeghi Alireza, A., and Samani, S., 2025. Numerical simulation of groundwater using

Reservoirs". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47(5), 823-832.