

پیش‌بینی شعاع تزریقی فرایند بهسازی خاک با استفاده از دوغاب زیستی (MICP)

افشین قبادیان^۱، محمد شریفی پور^{۲*}، رسول قبادیان^۳

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، ghobadian.afshin@gmail.com

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، sharifipour@razi.ac.ir

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران، rsghobadian@gmail.com

چکیده

بهسازی بیولوژیکی خاک با استفاده از رسوب میکروبی کلسیم کربنات (MICP) برای خاک‌های عمدتاً ماسه‌ای، روشی نوین در شاخه علوم بهسازی خاک محسوب می‌شود. این روش به علت سازگاری با محیط زیست در دسته‌بندی روش‌های سبز بهسازی قرار گرفته و در سالیان اخیر مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است. از طرف دیگر به علت جدید بودن این شاخه، اکثریت پژوهش‌های صورت گرفته در مقیاس آزمایشگاهی هستند و فقدان مدل‌های فیزیکی واقعی در مطالعات احساس می‌شود.

در پژوهش حاضر فرایند تزریق در خاک برای سیال‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا تزریق آب در خاک با استفاده از روش حجم محدود مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است و نتایج حاصله با نتایج مدل‌سازی صورت گرفته در نرم‌افزار *Seep/w* مورد ارزیابی قرار گرفته است که صحت عملکرد روش حجم محدود در برآورد نحوه حرکت آب در اطراف لوله تزریق را نشان می‌دهد. در گام بعدی تزریق دوغاب زیستی و نحوه حرکت آن در ماتریس خاک مورد شبیه‌سازی روش حجم محدود قرار گرفته است و نتایج حاصله با نتایج مدل فیزیکی ساخته شده در شرایط آزمایشگاهی مقایسه شده است. اصلاح معادله ریچارد در برآورد ضریب نفوذپذیری در راستای شعاعی اطراف محل تزریق، سبب شبیه‌سازی نزدیک به واقعیت تزریق دوغاب زیستی در خاک شده است. نرخ پیشروی جبهه اشباع برای سیال دوغاب زیستی کندتر از سیال آب است که با گذشت زمان اختلاف موقعیتی شعاع تزریقی بین این دو سیال نمایان تر می‌شود.

کلمات کلیدی

معادله ریچارد، شعاع تزریق، جبهه اشباع، دوغاب زیستی، روش حجم محدود، *Seep/w*، MICP

باتوجه به موضوع پژوهش حاضر که به بررسی نحوه حرکت سیال دوغاب زیستی (ترکیب محلول باکتریایی و محلول سیمانی) در اثر تزریق درون ماتریس خاک پرداخته است، بررسی پیشینه علمی پژوهش‌های گذشته، در دو بخش کلی مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۱ کاربردهای روش MICP در بهسازی خاک

روند رسوب زایی کربنات کلسیم ناشی از میکروبی‌ها (MICP) یک تکنیک نوآورانه است که به دلیل قابلیت بهبود ویژگی‌های مقاومتی خاک، توجه زیادی به خود جلب کرده است. این تکنولوژی شامل استفاده از باکتری‌ها برای تحریک رسوب زایی کربنات کلسیم است که می‌تواند به طور مؤثری خاک‌های ماسه‌ای سست و فرسایش پذیر را تقویت کرده و عملکردهای مهندسی آن‌ها را بهبود ببخشد. مطالعات اخیر روش MICP را در زمینه‌های مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند و افق‌های روشنی را درباره ی پتانسیل آن، ارائه داده‌اند.

لی^۱ و همکاران میزان بهبود پارامترهای مقاومتی ماسه‌های بهسازی شده توسط MICP در محیط‌های دریایی را از طریق مطالعات آزمایشگاهی و میدانی بررسی کرده‌اند [۵-۱]. مطالعه‌ای اخیر درمورد عملکرد بلندمدت ماسه‌های ساحلی بهسازی شده با MICP در محیط‌های دریایی، افق‌های روشنی پیش روی محققان ترسیم کرده است که در پروژه‌های مهندسی ساحل و پروژه‌های حفاظت از ساحل بسیار حیاتی است. به همین طریق، داگلیا^۲ و همکاران یک مطالعه آزمایشی در مورد کاهش فرسایش پذیری بادی ماسه‌های کلسیمی بیابانی بهسازی شده با MICP از طریق روش اسپری محلول باکتریایی و سیمانی، انجام دادند که اثربخشی MICP در حل مسائل فرسایش ناشی از باد در محیط‌های خشک را نشان داد [۲]. در مطالعات جدید، پتانسیل MICP در حل مسائل زنگ زدگی محیط‌های خورنده را نیز مورد مطالعه قرار داده‌اند [۶].

کارکومار^۳ و همکاران به بررسی کاربرد تکنیک‌های MICP برای حذف فلزات سنگین در محیط‌های طبیعی پرداختند و دامنه‌ی کاربرد را فراتر از کاهش نفوذپذیری ماسه گسترش دادند [۷]. وانگ^۴ و همکاران ویژگی‌های مکانیکی و مدل تشکیلی ماسه کلسیمی بهسازی شده توسط MICP را مورد بررسی قرار دادند و درک ارزشمندی از رابطه‌ی تنش- کرنش ماسه، تحت تأثیر آن را ارائه کردند [۳]. در مطالعه‌ای، زمانی و مونتویا^۵ کاهش نفوذپذیری ناشی از رسوب کلسیت میکروبی را در ماسه مورد بررسی قرار دادند. این کار نگرش‌های ارزشمندی را در خصوص تأثیر مستقیم MICP بر نفوذپذیری ماسه ارائه می‌دهد و به‌عنوان یک قطعه اساسی در درک پیامدهای عملی این تکنیک عمل می‌کند [۸].

مطالعه انجام شده توسط ال وی^۶ و همکاران، توزیع و مقدار کلسیت در ماسه‌های بهسازی شده با فناوری تولید کربنات کلسیم میکروبی را به کمک یک تکنیک پردازش تصویر μ -XRF مشخص و اندازه‌گیری کرد، جزئیات نمایش داده شده، بینش‌های دقیقی از توزیع کربنات کلسیم در داخل ماسه‌های بهسازی شده ارائه می‌دهد که برای درک ویژگی‌های ساختاری این روش حیاتی است [۴]. کاربردهای گسترده و پتانسیل فراوان تکنولوژی تولید کربنات کلسیم میکروبی (MICP) در مطالعه انجام شده توسط لیو^۷ و همکاران نیز نشان داده شده است که ماسه‌های بادی سست از طریق فناوری MICP قوام یافته و کاربردهای آن در پیشگیری از گردوغبار و ثابت‌سازی ماسه، می‌تواند کارساز باشد [۵]. بطور کلی می‌توان گفت مطالعات اخیر در زمینه MICP کاربردهای متنوع از تصحیح شرایط محیطی تا بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی را نشان می‌دهند. این گروه مطالعات، به طور کلی به درک عمیق‌تری از MICP و کاربردهای بالقوه آن در افزایش کارایی و کاهش نفوذپذیری ماسه، کمک می‌کند [۹]. آکوگوز^۸ و همکاران نشان دادند که روش MICP به علت سازگاری‌های زیست‌محیطی در شرایط بهتری نسبت به سایر روش‌های تثبیت متداول خاک دارد و در آینده‌ای نزدیک جایگزین آنها خواهد شد [۱۰]. لذا باتوجه به نو بودن این شاخه از علم بهسازی خاک، انجام پژوهش‌های بیشتر در این زمینه امری اجتناب‌ناپذیر و مرتقی است [۱۱].

¹ Li, Y
² Dagliya
³ Kumar

⁴ Wang
⁵ Zamani, A. and B.M. Montoya
³ Lv, C

⁷ Liu
⁸ Akoğuz

۲-۱ حرکت آب در خاک

حرکت آب در خاک، یک فرایند پیچیده است که از دیرباز موضوع تحقیقات گسترده‌ای در زمینه هیدرولوژی و مهندسی ژئوتکنیک بوده است. یکی از معادلات اساسی برای پیش‌بینی جابه‌جایی آب در خاک، معادله ریچاردز^۱ است که جریان غیراشباع در خاک را توصیف می‌کند. روش‌های عددی مختلفی برای حل این معادله توسعه‌یافته است، از جمله روش‌های تفاضل محدود، المان محدود و حجم محدود را می‌توان نام برد. روش حجم محدود به دلیل توانایی پیش‌بینی دقیق حرکت آب در خاک، توجه زیادی را به خود جلب کرده است آرامپاتزیس^۲ و همکاران روش عددی حل معادله ریچاردز را بر اساس مکانیزم حجم کنترل محدود، ارائه دادند که مزایایی نسبت به روش‌های عددی دیگر دارد، از جمله مهمترین این مزایا می‌توان حفظ‌کنندگی سیستم و انعطاف‌پذیری در فواصل شبکه را نام برد. در مطالعه آن‌ها، مدل عددی از طریق نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی، مورد اعتبارسنجی قرار گرفت و بررسی مقایسه‌ای، توافق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی عددی و داده‌های تجربی آزمایشگاهی را نشان می‌دهد [۱۲].

در مطالعه‌ای انجام شده توسط لی^۳ و همکاران، یک الگوریتم نقطه‌ای محدود برای حل معادله جابجایی آب و نمک در خاک پیشنهاد شد که نشان از علاقه‌ی مداوم به توسعه روش‌های عددی برای پیش‌بینی جابجایی آب در خاک دارد [۱۳]. در ضمن، ماژود و عدنان^۴ نیز حرکت آب در خاک را توسط قانون دارسی، قانون دارسی-باکینگهام^۴ و معادله ریچاردز مورد مقایسه قرار دادند و اهمیت معادله ریچاردز را در مدل‌سازی دقیق جابجایی آب در خاک‌های غیراشباع را مورد تأکید قرار دادند [۱۴]. علاوه بر روش‌های عددی، مدل‌های فیزیکی نیز برای مطالعه حرکت آب در خاک توسعه یافته‌اند.

قبادیان و همکاران به بررسی نحوه جابجایی آب ناشی از بارش باران، و حرکت آب درون ماتریس خاک مسلح شده به زهکش‌های زیرسطحی پرداختند و نشان دادند که حین بارش باران، هرچقدر یکی از زهکش‌ها به سطح زمین نزدیکتر باشد سرعت تخلیه آب باران به داخل زهکش‌ها و همچنین دبی تخلیه افزایش می‌یابد [۱۵].

به‌طور کلی، پژوهش‌های سالیان اخیر نشان‌دهنده یک دامنه گسترده از تلاش‌های تحقیقاتی متنوع و متمرکز بر توسعه و اعتبارسنجی روش‌های عددی و آزمایشی برای پیش‌بینی حرکت آب در خاک است. بویژه اینکه استفاده از معادله ریچاردز به‌عنوان یک چارچوب اساسی برای درک جریان در خاک‌های غیراشباع، اهمیت توسعه روش حجم محدود به‌عنوان یک رویکرد امیدبخش برای شبیه‌سازی دقیق حرکت آب در خاک احساس می‌شود.

روش MICP یک روش بهسازی بیولوژیکی نوین و سبز (سازگار با محیط‌زیست) است که در سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است و پتانسیل بالایی برای جایگزینی با روش‌های دیگر بهسازی سنتی نظیر بهسازی با سیمان و آهک دارد؛ اما با توجه به نوین بودن این روش و اینکه تقریباً تمام مطالعات صورت‌گرفته در این زمینه محدود به تست‌های آزمایشگاهی است، لزوم بررسی عملکرد این روش در شرایط نزدیک به واقعیت نظیر نمونه‌های فیزیکی کوچک‌مقیاس شرایط محل، احساس می‌شود.

در این پژوهش فرآیند بهسازی تزریقی با دوغاب زیستی (MICP) مورد مدل‌سازی فیزیکی قرار گرفته است و روند افزایش شعاع نفوذ محلول زیستی در محیط خاکی اطراف لوله تزریق با گذشت زمان (نحوه حرکت محلول زیستی درون ماتریس خاک) با استفاده از روش عددی حجم محدود و زبان برنامه‌نویسی متلب، پیش‌بینی و با نتایج حاصل از مدل فیزیکی مقایسه شده است.

به‌منظور اطمینان از صحت عملکرد کدنویسی صورت‌گرفته به روش حجم محدود، در ابتدا نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرکت آب در اطراف لوله تزریق با نتایج حاصل از نرم‌افزار *Seep/w* که از فرمول‌بندی المان محدود بهره می‌برد، مقایسه شده است که اطمینان‌پذیری روش عددی حجم محدود مورد استفاده در پژوهش را تصدیق می‌نماید.

¹ Richard
² Arampatzis, G

³ Li, F
⁴ Mawlood, D.K. and K.N. Adnan

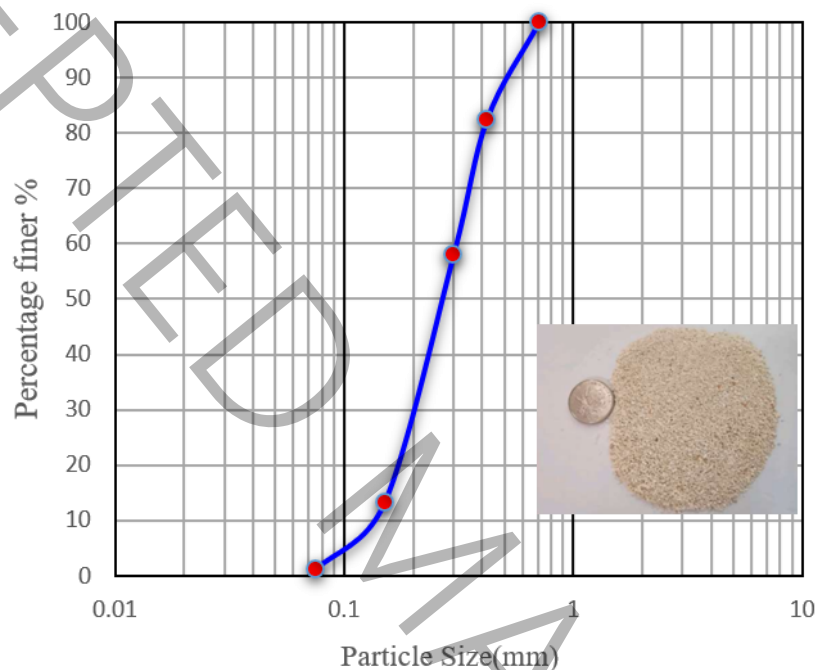
⁵ Buckingham-Darcy

۲- الگوسازی نظری یا تجربی

۱-۲ مصالح

۱-۱-۲ ماسه فیروزکوه

در پژوهش حاضر از ماسه استاندارد سیلیسی شکسته فیروزکوه با دانه بندی یکنواخت (SP) در سیستم طبقه بندی یونیفاید، که به اختصار ماسه ۱۶۱ نامیده می شود، استفاده شده است. شکل ۱ نمودار دانه بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه طبق استاندارد ASTM D-422 را نشان می دهد که در ادامه در جدول ۱ سایر خصوصیات فیزیکی بر اساس استانداردهای ASTM D4318 و ASTM D4254 و ASTM D854 آورده شده است [۱۶-۱۸].



شکل ۱- نمودار دانه بندی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

Figure 1 - Particle size distribution curve of Firoozkooch 161 sand

جدول ۱- مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروزکوه

Table 1 - Specifications of Firoozkooch 161 Sand

$D_{10} (mm)$	$D_{30} (mm)$	$D_{60} (mm)$	C_c	C_u	G_s	e_{min}	e_{max}
0.136	0.202	0.308	0.969	2.261	2.650	0.612	0.910

۲-۱-۲ محلول باکتریایی و سیمانی

در بسیاری از پژوهش‌ها در زمینه سمنتاسیون زیستی از باکتری اسپوروسارسینا پاستوری^۱ به دلیل فعالیت اوره آزی بالا، گرم مثبت بودن و توانایی رشد در pH بالای ۸٫۵ و غلظت بالای کلسیم استفاده می‌شود. سویه این باکتری از مرکز کلکسیون قارچ‌ها و

^۱ *Sporosarcina pasteurii*

باکتری‌های صنعتی به شماره PTCC1645 به‌صورت پودر خشک و منجمد شده لیوفیلیزه تهیه شد و سپس مطابق دستورالعمل استاندارد فعال شده است [۱۹-۲۱]. کشت اولیه در محیط جامد نوترینت برات بعلاوه ۲ درصد اوره انجام پذیرفت که کلونی باکتری‌های کشت داده شده در تصویر مطابق شکل ۲-الف مشخص است. در مرحله بعد محیط کشت مایع تحت شرایط هوازی مطابق فرمول‌بندی خاص منطبق بر جدول ۲ در pH برابر ۹ تهیه شد (برای رساندن pH به مقدار ۹ از هیدروکسید سدیم استفاده شده است) در مرحله دوم کشت در محیط مایع به‌صورت کشت چهارمرحله‌ای از محیط جامد در درون محیط مایع صورت پذیرفت. در ادامه محیط کشت مایع روی دستگاه شیکر انکوباتور با سرعت ۱۸۰ دور در دقیقه به مدت ۲۴ ساعت در دمای 25 ± 2 درجه قرار داده شد (شکل ۲ ب) [۲۲].

برای تعیین جمعیت و میزان رشد باکتری در محیط مایع از معیار چگالی نوری (OD) که توسط دستگاه اسپکتروفتومتر شکل ۲-ج در طول موج ۶۰۰ نانومتر اندازه‌گیری می‌شود، استفاده گردیده است. میزان چگالی نوری بلافاصله پس از اتمام کشت محیط مایع عدد ۰٫۸۴ را نشان می‌دهد که باتوجه به مقدار ماکزیمم ۱، مطلوب به نظر می‌رسد [۲۳]. دوغاب زیستی از ترکیب محلول زیستی و محلول سیمانی با نسبت حجمی یکسان بدست می‌آید. در این پژوهش از تزریق یک مرحله ای دوغاب زیستی استفاده شده است. درصد وزنی مواد تشکیل‌دهنده محلول زیستی و سیمانی در جدول ۲ آورده شده است.



ج- دستگاه اسپکتروفتومتر



ب- دستگاه شیکر انکوباتر



الف- کلنی باکتری در محیط کشت جامد

شکل ۲- وسایل آزمایشگاهی کشت باکتری

A- Bacterial colony on solid culture medium B- Shaker incubator C- Spectrophotometer
Figure 2- Bacterial Culture Laboratory Equipment

جدول ۲: ترکیب محیط کشت و محلول های تزریق

Table 2: Composition of Culture Media and Injection Solutions

مقدار	عنصر تشکیل دهنده	محلول تزریقی
۲۰ گرم در لیتر	Yeast Extract	محلول زیستی (محیط کشت مایع)
۱۰ گرم در لیتر	NH ₄ Cl	
۱۰ میکرومول در لیتر	NiCl ₂	
۱ مولار	CaCl ₂	محلول سیمانی
۱ مولار	Urea	

معادله (۱)، معادله حاکم بر مسئله ریچارد [۲۴] در شرایط جریان ناپایدار، ناهمگن و ناهمسان در فضای دو بعدی است. در این معادله هوا نقش ناچیزی در حرکت آب در ماتریس خاک دارد. این معادله در مختصات دکارتی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial \theta(\psi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(Kx(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Ky(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} + Ky(\psi) \right) \pm \frac{q_s}{\Delta x \Delta y} \quad (1)$$

که در آن θ رطوبت حجمی $[L^3/L^3]$ ، ψ بار فشاری مثبت یا منفی $[L]$ ، K هدایت هیدرولیکی $[K/T]$ ، y مختصات عمودی $[L]$ ، x مختصات افقی $[L]$ ، t زمان $[T]$ و q_s دبی تزریق (+) یا زهکشی (-)، Δx و Δy به ترتیب ابعاد مش در جهت x و y هستند $[L]$.

یکی از پارامترهای مهم در معادله ریچارد تابع هدایت هیدرولیکی غیراشباع است که با زمان و مکان تغییر می‌کند. از این رو، دقت انتخاب درست پارامترهای ورودی در مدل‌هایی با جریان زهکشی یا تزریقی حساسیت بالایی دارند. در ادامه پژوهشگران به سمت استفاده از تابع هدایت هیدرولیکی بر مبنای تابع‌نمایی گاردنر علاقه نشان دادند که لیچ و همکاران نشان دادند که تابع هدایت هیدرولیکی بر مبنای تابع‌نمایی گاردنر عملکرد ضعیفی در پیش‌بینی نزدیک به واقعیت پتانسیل فشاری دارد [۲۵].

نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عددی جریان آب در خاک نظیر *Hydrus* و *Seep/w* از توابع متنوعی از جمله تابع ونگنوختن و فردلاند و زینک، برای بیان تابع هدایت هیدرولیکی استفاده می‌کنند که عملکرد به‌مراتب بهتری نسبت به تابع‌نمایی گاردنر دارد [۲۶]. توابع انتقالی مورد استفاده در این تحقیق توابع ونگنوختن (روابط ۲، ۳، ۴ و ۵) و بروکز-کوری (۶، ۷ و ۸) می‌باشند [۲۷].

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\psi_p}{\psi_b} \right)^{1+\lambda}} \right]^{\frac{1}{1+\lambda}} \quad (2)$$

$$\frac{K_\psi}{K_s} = \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^l * \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1+\lambda}{\lambda}} \right]^{\frac{\lambda}{1+\lambda}} \quad (3)$$

$$f(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = m * (\theta_s - \theta_r) * \left[\frac{1}{1 + (\alpha \psi)^n} \right]^{m-1} * \left[\frac{-n \alpha (\alpha \psi)^{n-1}}{(1 + (\alpha \psi)^n)^2} \right] \quad (4)$$

$$\alpha = 1/\psi_b, n = 1 + \lambda, m = 1 - 1/n \quad (5)$$

که در آن S_e رطوبت مؤثر، K_s هدایت هیدرولیکی اشباع $[L/T]$ ، θ_r و θ_s رطوبت حجمی باقیمانده و رطوبت حجمی اشباع $[L^3/L^3]$ ، l پارامتر توزیع خلل و فرج، α $[1/L]$ ، m و n پارامترهای تجربی هستند. پارامتر l به عنوان تابعی از هدایت هیدرولیکی توسط موآلم

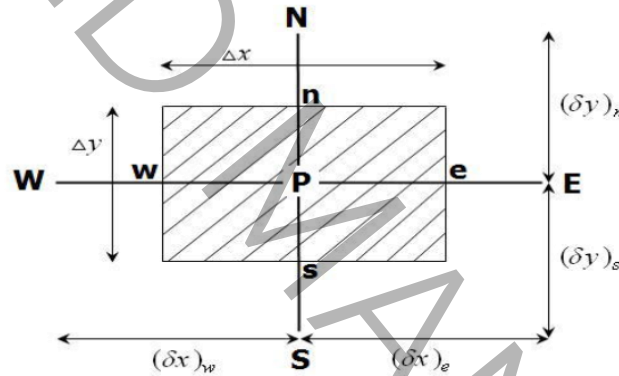
۱۹۷۶ به طور متوسط ۰.۵، برای اکثر خاک ها برآورد شد. در روابط فوق، پارامترهای θ_r ، θ_s ، K_s و α برای هر بافت بافت متفاوت است. علاوه بر این، ضرایب η و λ تجربی و برای هر بافت خاکی متفاوت است [۲۴].

$$\theta = \begin{cases} \theta_s & \text{if } \psi < \psi_b \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda & \text{if } \psi > \psi_b \end{cases} \quad (۶)$$

$$K(\psi) = \begin{cases} K_s & \text{if } \psi < \psi_b \\ K_s * \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^\eta & \text{if } \psi > \psi_b \end{cases} \quad (۷)$$

$$f(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \begin{cases} 0 & \text{if } \psi < \psi_b \\ \lambda * (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_b}{\psi} \right)^{\lambda-1} \left(\frac{\psi_b}{\psi^2} \right) & \text{if } \psi > \psi_b \end{cases} \quad (۸)$$

در ادامه از روش حجم کنترل (F.V) برای منفصل کردن معادله دیفرانسیل حاکم ۱ استفاده شده است [۲۶]. گام اول در این روش انتگرال گیری از معادله ۱ روی حجم کنترل نمایش داده شده روی شکل ۳ می باشد [۲۷].



شکل ۳. شبکه بندی حجم کنترل برای منفصل سازی رابطه ریچاردز

Figure 3. Control volume mesh for discretizing Richards' equation.

$$\int_s^n \int_w^e \int_t^{t+dt} \frac{\partial \theta(\psi_p)}{\partial t} dx dy dt = \int_t^{t+dt} \int_s^n \int_w^e \left(Kx(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) dx dy dt + \int_t^{t+dt} \int_w^e \int_s^n \left(Ky(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial y} + Ky(\psi) \right) dy dx dt + \int_t^{t+dt} \int_w^e \int_s^n \pm \frac{q_s}{\Delta x \Delta y} dy dx dt \quad (۹)$$

پس از جداسازی ضمنی، معادله دیفرانسیل ۱ در نهایت به معادله جبری زیر تبدیل می شود:

$$A_E \psi_E^{t+dt} + A_W \psi_W^{t+dt} + A_N \psi_N^{t+dt} + A_S \psi_S^{t+dt} + A_P \psi_P^{t+dt} = Fp \quad (۱۰)$$

$$A_E = \phi K(\psi)_e \frac{dy dt}{\delta x_e} \quad (۱۱)$$

$$A_W = \phi K(\psi)_w \frac{dy dt}{\delta x_w} \quad (۱۲)$$

$$A_N = \phi K(\psi)_N \frac{dxdt}{\delta y_n} \quad (13)$$

$$A_S = \phi K(\psi)_S \frac{dxdt}{\delta y_s} \quad (14)$$

$$A_P = -(A_E + A_W + A_N + A_S) - f(\psi) dxdy \quad (15)$$

$$F_P = (K(\psi)_S - K(\psi)_N) dxdy \psi_P^t + (1-\phi) K(\psi)_e \frac{dydt}{\delta x_e} (\psi_P^t - \psi_E^t) + (1-\phi) K(\psi)_w \frac{dydt}{\delta x_e} (\psi_P^t - \psi_W^t) + (1-\phi) K(\psi)_n \frac{dxdt}{\delta y_e} (\psi_P^t - \psi_N^t) + (1-\phi) K(\psi)_s \frac{dxdt}{\delta y_s} (\psi_P^t - \psi_S^t) \pm q_s dt \quad (16)$$

q_s برای همه گره‌ها به جز گره‌های چاه تزریق برابر صفر است.

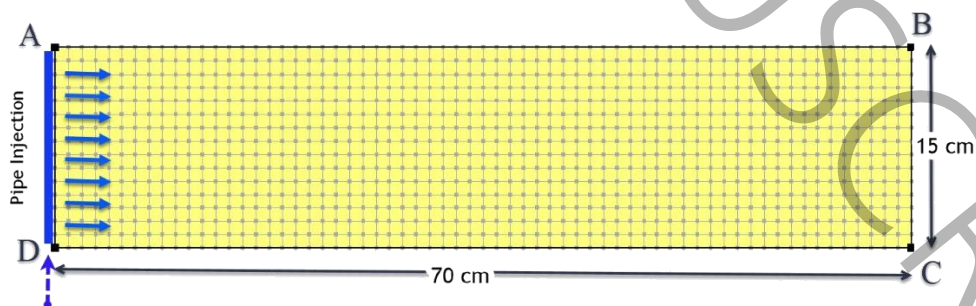
$Ky(\psi)_n$ ضریب نفوذپذیری در وجه بالایی حجم کنترل است که به صورت میانگین هارمونیک ضریب نفوذپذیری P و N در نظر گرفته می‌شود. گفتنی است که برای سایر وجوه کناری نقطه P یعنی E, W نیز این رابطه برقرار است.

$$Ky(\psi)_n = \frac{2Ky(\psi)_P * Ky(\psi)_N}{Ky(\psi)_P + Ky(\psi)_N} \quad (17)$$

۳- بررسی نحوه حرکت آب درون ماتریس خاک بر اثر تزریق (صحت سنجی)

به منظور اطمینان از صحت عملکرد کد نرم‌افزاری نوشته شده به روش حجم محدود (حجم کنترل) مبتنی بر معادله ریچارد در برآورد صحیح نحوه حرکت آب در خاک، نتایج حاصل از شبیه‌سازی تزریق درون محیط خاکی مطابق شکل ۴، با نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار $seep/w$ (که از فرمولبندی المان محدود بهره می برد) مورد مقایسه قرار گرفته است.

مطابق شکل ۴، محدوده مورد مطالعه محیط خاکی دوبعدی به طول ۷۰ سانتی متر و عمق ۱۵ سانتی متر است. لوله تزریق در سمت چپ محیط در نظر گرفته شده و میزان شعاع نفوذ آب درون خاک (موقعیت لحظه ای خط آزاد جریان) از مرز سمت چپ اندازه گیری شده است. جنس خاک از نوع ماسه ۱۶۱ فیروزکوه است که پیش تر به آن اشاره شده بود.



شکل ۴- محدوده مورد مطالعه

Figure 4 - Study domain

تمام گره‌های واقع بر مرز AB و CD دارای شرایط گرادیان فشار افقی صفر هستند $\frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$ از این رو به عنوان نمونه برای مرز AB معادله عمومی (۱۰) به صورت زیر می‌باشد:

$$A_E \psi_E^{t+dt} + A_S \psi_S^{t+dt} + A_N \psi_N^{t+dt} + A_P \psi_P^{t+dt} = F_P \quad (18)$$

$$A_E = \phi K(\psi)_E \frac{dydt}{2\delta x_E} \quad (19)$$

$$A_N = \phi K(\psi)_N \frac{dxdt}{\delta y_n} \quad (20)$$

$$A_S = \phi K(\psi)_S \frac{dxdt}{\delta y_S} \quad (21)$$

$$A_P = -(A_E + A_S + A_N) - 0.5 * f(\psi) dx dy \quad (22)$$

$$F_P = (K(\psi)_S - K(\psi)_N) dx dt - 0.5 * f(\psi) dx dy \psi_P^t + (1 - \phi) K(\psi)_E \frac{dydt}{\delta x_e} (\psi_P^t - \psi_E^t) + (1 - \phi) K(\psi)_N \frac{dydt}{2\delta x_n} (\psi_P^t - \psi_N^t) + (1 - \phi) K(\psi)_S \frac{dxdt}{\delta y_s} (\psi_P^t - \psi_S^t) \quad (23)$$

برای تمام گره‌های واقع بر مرزهای قائم AD و BC شرط گرادیان فشار مشخص جهت عمودی $\frac{\partial \psi}{\partial y} = -1$ برقرار است، از این رو معادله جبری (۱۰) به عنوان نمونه برای مرز AD به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$A_E \psi_E^{t+dt} + A_W \psi_W^{t+dt} + A_N \psi_N^{t+dt} + A_P \psi_P^{t+dt} = F_P \quad (24)$$

$$A_W = \phi K(\psi)_W \frac{dydt}{2\delta x_w} \quad (25)$$

$$A_E = \phi K(\psi)_E \frac{dydt}{2\delta x_w} \quad (26)$$

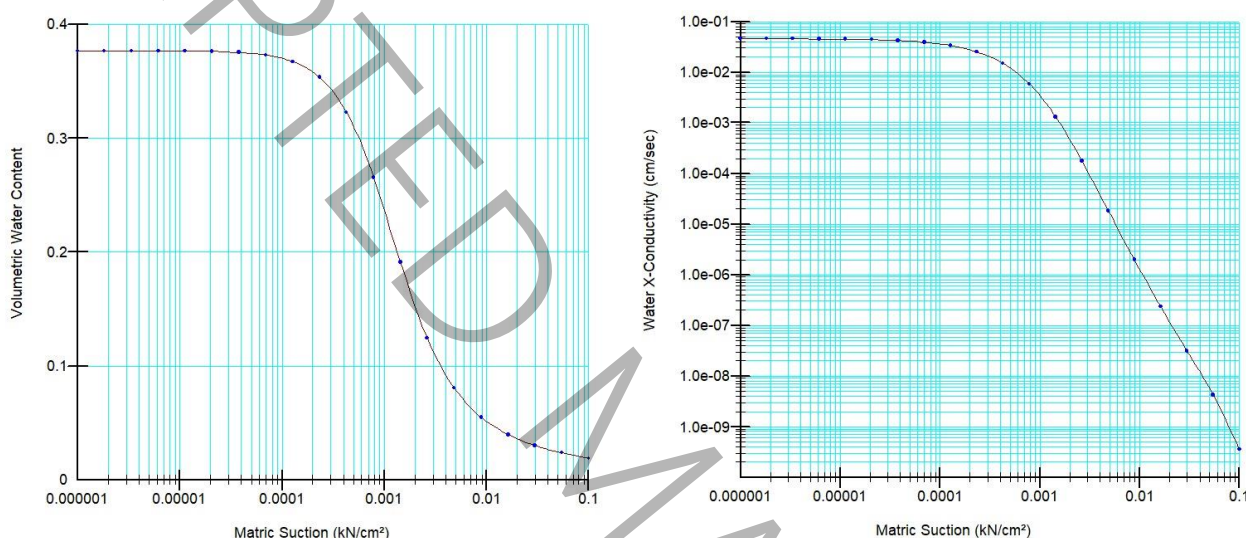
$$A_N = \phi K(\psi)_N \frac{dxdt}{\delta y_n} \quad (27)$$

$$A_P = -(A_E + A_W + A_N) - 0.5 * f(\psi) dx dy \quad (28)$$

$$F_P = (K(\psi)_S - K(\psi)_N) dx dt - 0.5 * f(\psi) dx dy \psi_P^t + (1 - \phi) K(\psi)_E \frac{dydt}{2\delta x_e} (\psi_P^t - \psi_E^t) + (1 - \phi) K(\psi)_W \frac{dydt}{2\delta x_e} (\psi_P^t - \psi_W^t) + (1 - \phi) K(\psi)_N \frac{dxdt}{\delta y_e} (\psi_P^t - \psi_N^t) - q_s dt \quad (29)$$

به منظور اطمینان از عملکرد صحیح روش حجم محدود مورد استفاده در پژوهش حاضر، نتایج حاصله با نتایج به دست آمده از شبیه سازی با نرم افزار $Seep/w$ مقایسه شده است. $Seep/w$ یکی از شناخته شده ترین نرم افزارهای ژئوتکنیکی در مدل سازی جریان آب به صورت ماندگار و غیرماندگار است که از فرمول بندی اجزای محدود و تئوری خاک های غیراشباع فردلاند و زینک^۱ [۲۶] جهت بررسی جریان استفاده می کند.

شکل ۵ نمودار تابع لگاریتمی هدایت هیدرولیکی و رطوبت حجمی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه بر حسب ماتریس مکش (بر اساس فرمول بندی فردلاند و زینک)، معرفی شده در نرم افزار $Seep/w$ نشان می دهد. این توابع بر حسب پارامترهای K_s هدایت هیدرولیکی اشباع، θ_r و θ_s رطوبت حجمی باقیمانده و رطوبت حجمی اشباع و هم چنین خصوصیات فیزیکی دانه بندی D_{10} , D_{60} , LL در نرم افزار $Seep/w$ ترسیم می شوند.



ب- تابع رطوبت حجمی

الف- تابع هدایت هیدرولیکی

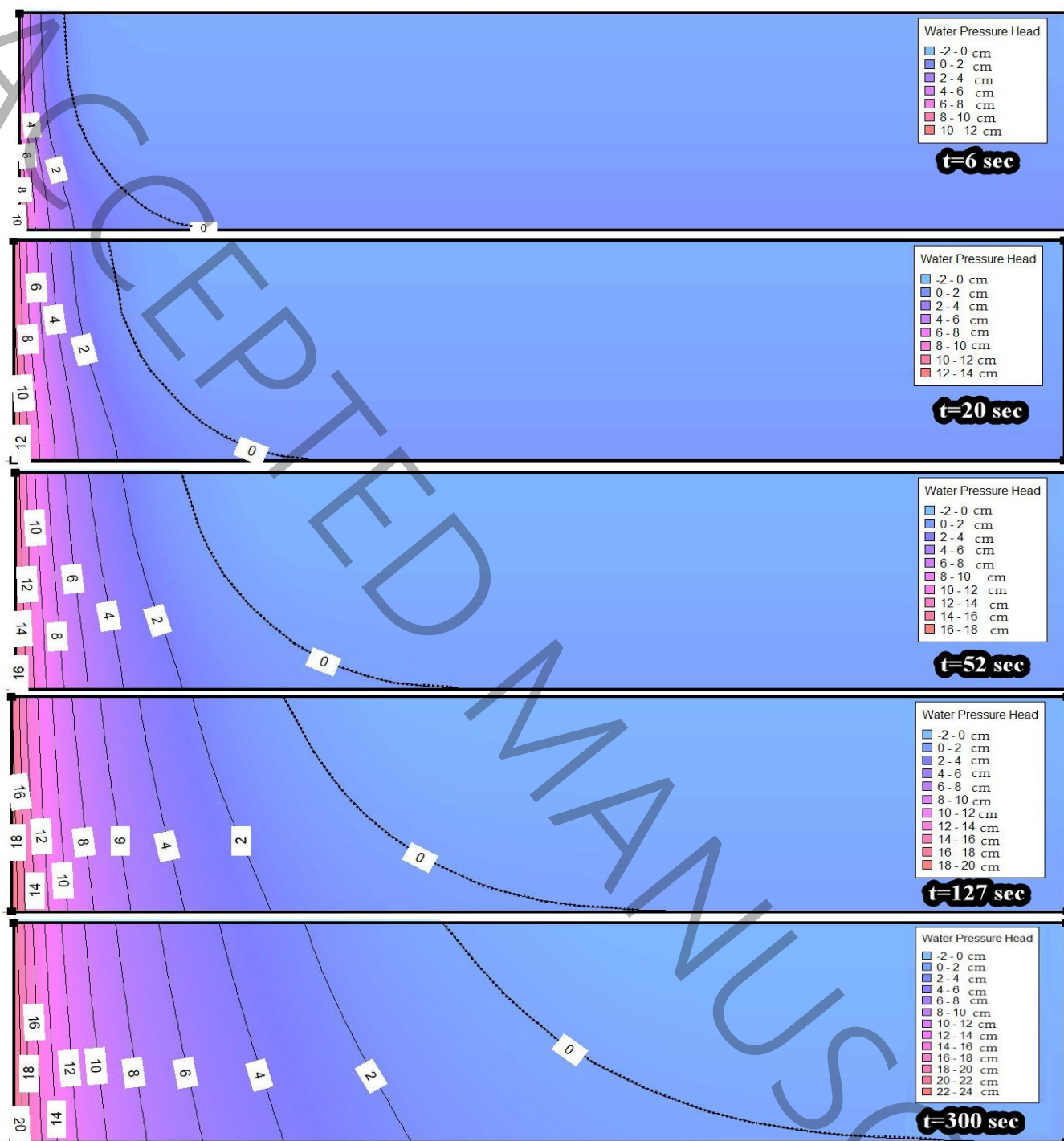
شکل ۵- توابع ورودی نرم افزار $Seep/w$

A- Hydraulic Conductivity Function B- Volumetric Water Content Function
Figure 5- $Seep/w$ Software Input Functions

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت اندازه مش بندی نشان داد که شبکه بندی محیط به صورت منظم و مربعی با ابعاد ۱ در ۱ سانتیمتر مطابق شکل ۴ بهینه ترین حالت را نتیجه می دهد و ریزتر کردن ابعاد مش در نتایج تاثیر قابل اعتنایی ندارد و تنها به طولانی تر شدن حجم محاسبات و زمان حل آن ها خواهد انجامید.

شکل ۶ خروجی خطوط هم پتانسیل فشاری در زمان های ۶ و ۲۰ و ۵۲ را بعنوان نمونه در نرم افزار $Seep/W$ نشان می دهد. خط چین --- محل خط آزاد جریان (فریاتیک- مقدار فشار آب منفذی برابر صفر $PWP=0$) را نشان می دهد که معرف مرز بین ناحیه اشباع و غیر اشباع است. با گذشت زمان و ادامه تزریق آب، خط آزاد جریان به سمت دور شدن از محل تزریق (سمت راست) پیشروی کرده و مقادیر ماکزیمم فشار تولیدی (در نزدیکی لوله تزریق)، روندی صعودی را نشان می دهد.

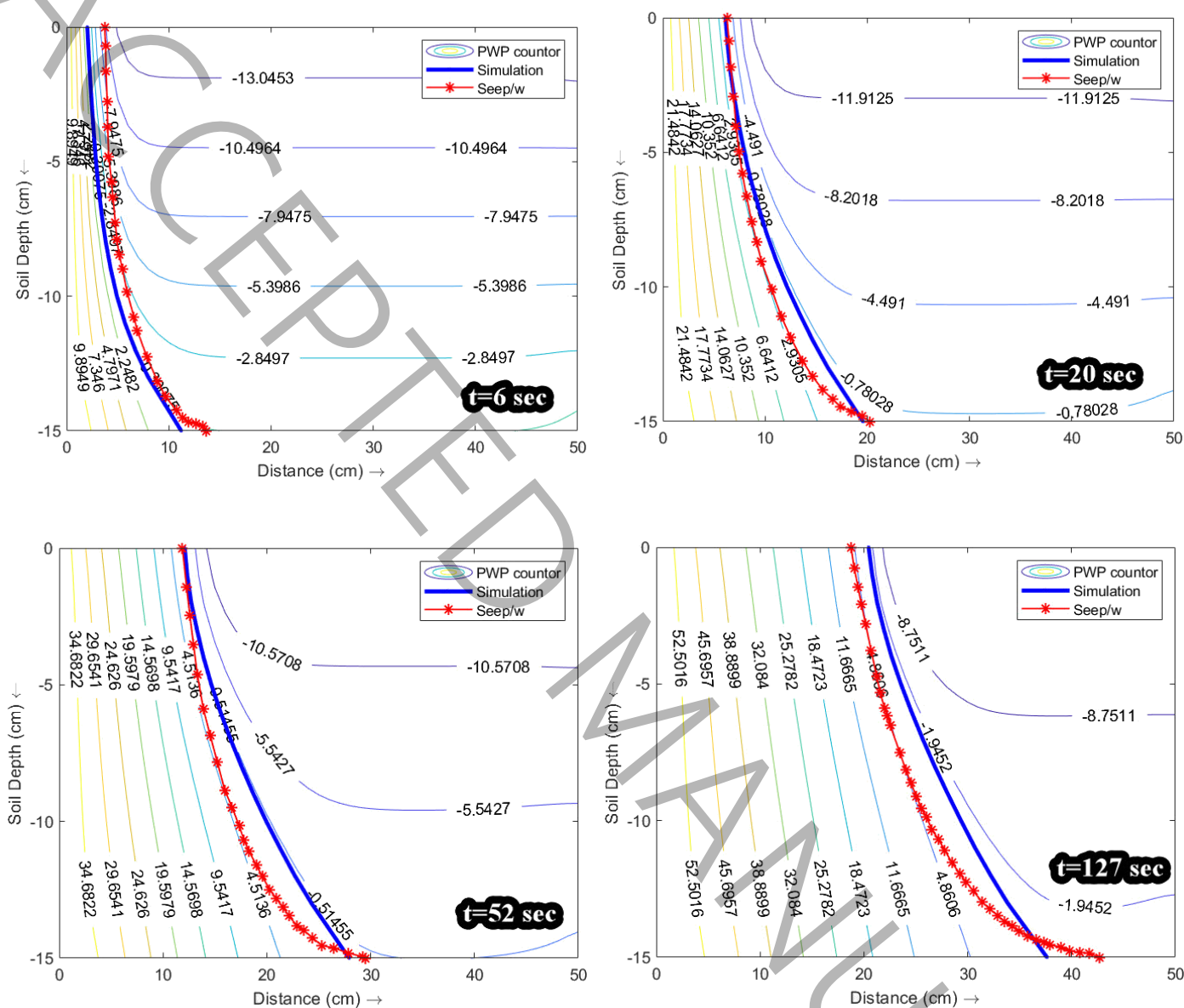
¹ fredlund and xing



شکل ۶: خطوط هم فشار در زمان های ۶، ۲۰، ۵۲، ۱۲۷ و ۳۰۰ ثانیه در *seep/w*.

Figure 6: Pressure equipotential lines at times 6, 20, 52, 127, and 300 seconds in Seep/W

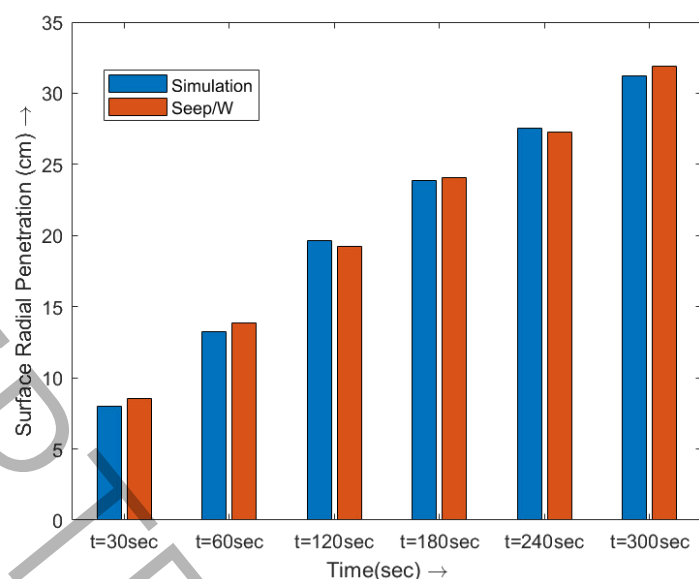
شکل ۷ خطوط هم پتانسیل فشاری حاصل از شبیه سازی روش حجم محدود را نشان می دهد. خط ممتد پررنگ محل خط آزاد جریان بر اساس نتایج شبیه سازی روش حجم محدود است در همین شکل ها خط چین * محل خط آزاد جریان مطابق خروجی های نرم افزار *seep/w* است که فاصله کم بین محل خط آزاد جریان در شبیه سازی روش حجم محدود با نتایج نرم افزار المان محدود *seep/w* صحت و دقت عملکرد مناسب روش حجم محدود برای شبیه سازی حرکت آب در خاک را نشان می دهد.



شکل ۷: خطوط هم فشار در زمان های ۶، ۲۰، ۵۲ و ۱۲۷ ثانیه حاصل از شبیه سازی حجم محدود

Figure 7: Pressure Equipotential Lines at Times 6, 20, 52, and 127 Seconds Obtained from Finite Volume Simulation

شکل ۸ نمودار میله ای شعاع نفوذ آب در سطح محیط خاکی را برای زمان های متفاوت برای حالت شبیه سازی حجم محدود و مدل سازی Seep/w نشان می دهد، همان گونه که از شکل پیداست می توان دریافت که اختلاف بین نتایج ناچیز است که این امر صحت عملکرد شبیه سازی روش حجم محدود را در برآورد صحیح نحوه حرکت آب در خاک را نشان می دهد.

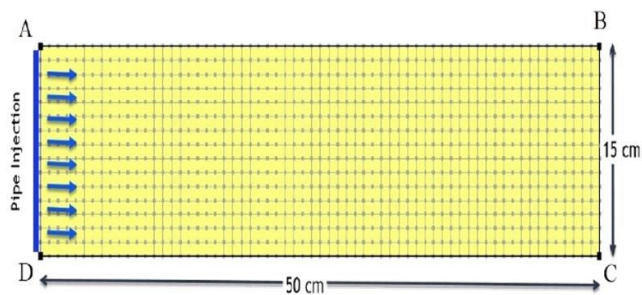


شکل ۸- شعاع نفوذ آب در ماتریس خاک

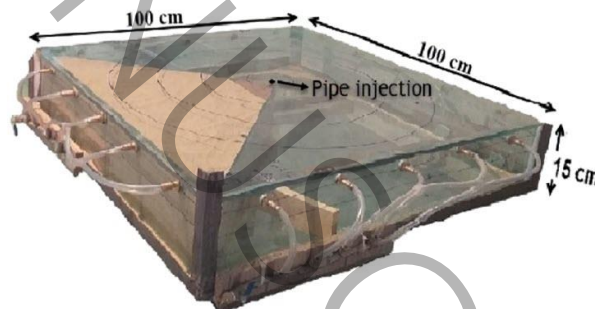
Figure 8-Radius of water penetration in the soil matrix

۴- بررسی نحوه حرکت محلول زیستی (محلول باکتریایی + محلول سیمانی) درون ماتریس خاک بر اثر تزریق

محدوده مورد مطالعه در مدل فیزیکی در شکل ۹-الف نمایش داده شده است. عمق مدل ۱۵ سانتی متر و ابعاد ۱۰۰*۱۰۰ سانتی متری در نظر گرفته شده است. لوله تزریق در مرکز مدل قرار گرفته و میزان شعاع نفوذ از مرکز اندازه گیری شده است. مدل شبیه سازی عددی شامل توده خاکی از جنس ماسه ۱۶۱ فیروزکوه است به عمق ۱۵ سانتی متر و طول ۵۰ سانتی متر است که در شکل ۹-ب یک مقطع از آن بصورت دوبعدی همراه مش بندی و محل لوله تزریق نمایش داده شده است.



ب- محدوده 2D شبیه سازی با متلب



الف-مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه

شکل ۹- محدوده مورد مطالعه

A-physical model built in laboratory

B-2D domain simulation with matlab

Figure 9-Domain of study

۴-۱ اندازه گیری درصد کربنات کلسیم

نسبت کربنات کلسیم تشکیل شده بین دانه‌های خاک، رابطه مستقیم با مقاومت تک‌محوری و نفوذپذیری به‌دست‌آمده از نمونه‌ها دارد. در این پژوهش از روش اسیدشویی برای اندازه‌گیری این پارامتر استفاده شده است که در ادامه توضیح داده شده است.

۴-۱-۱ فرآیند اسیدی شویی

در این روش ابتدا نمونه‌هایی که در راستای شعاع تزریقی از خاک برداشت شده است در کوره خشک شده و توزین می‌شوند (m_1). سپس نمونه‌ها چند بار با هیدروکلریک اسید (HCl) شست و شو داده می‌شوند تا کربنات کلسیم موجود در نمونه‌ها از آن خارج شود و دوباره در درون آن قرار گرفته و بعد از خشک شدن توزین می‌گردند (m_2). درصد کلسیم کربنات با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$CaCO_3 \% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100 \quad (30)$$

روش‌های دیگری نیز مانند تیتراسیون، آنالیز XRD و آنالیز SEM برای اندازه‌گیری درصد کربنات کلسیم وجود دارند [۲۸].

شکل ۱۰ درصد کربنات کلسیم را در راستای شعاعی نشان می‌دهد. مطابق شکل در ناحیه نزدیک به محل تزریق شاهد افت کمتری در مقادیر کلسیم کربنات هستیم بعلاوه بالاتر بودن فشار هیدرولیکی که در ادامه مقادیر روند کاهشی با سرعت تقریباً یکنواخت و بیشتری را نشان می‌دهد.

۴-۲ نفوذپذیری خاک

۴-۲-۱ نفوذپذیری مطلق دوغاب زیستی

مطابق قانون دارسی برای هر سیال غیر آب ضریب نفوذ پذیری مطابق فرمول ۳۱ خواهد بود که در این فرمول $K_{s-biogruit}$ نفوذ پذیری اشباع برای سیال دوغاب زیستی، $K_{s-water}$ نفوذ پذیری اشباع برای سیال آب، $\gamma_{bio-grout}$ وزن مخصوص دوغاب زیستی، $\mu_{bio-grout}$ لزجت سیال زیستی (مطابق استاندارد $ASTM D445$)، γ_{water} وزن مخصوص آب و μ_{water} لزجت آب می‌باشد

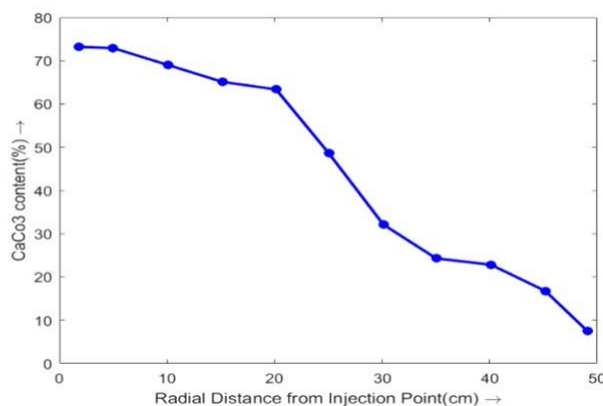
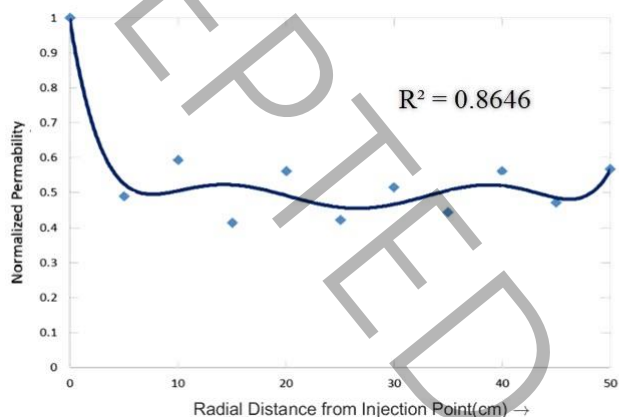
$$K_{s-biogruit} = K_{s-water} * \frac{\mu_{water}}{\mu_{bio-grout}} * \frac{\gamma_{bio-grout}}{\gamma_{water}} \quad (31)$$

۴-۲-۲ نفوذپذیری شعاعی دوغاب زیستی

بلافاصله پس از اتمام فرایند تزریق، در راستای شعاعی و با فواصل مختلف نمونه‌هایی جهت تست نفوذپذیری برداشت شده و ضریب نفوذپذیری آن‌ها تحت دوغاب زیستی (ترکیب محلول باکتریایی و سیمان‌تاسیون) اندازه‌گیری شده است و در ادامه نتایج نرمالایز شده نفوذپذیری ماسه ۱۶۱ فیروزکوه برای دوغاب زیستی در گراف ۱۱ ارائه شده است.

در این گراف مقدار نفوذپذیری نرمالایز شده مطابق فرمول ۳۲ به دست می‌آید که در آن K_r نفوذ پذیری شعاعی اندازه‌گیری شده در فاصله ۲ از محل تزریق بر حسب سانتی متر بر ثانیه (مطابق استاندارد (ASTM D2434) و $K_{s-biogROUT}$ نفوذ پذیری اشباع خاک وقتی که سیال از نوع دوغاب زیستی است می‌باشد. در پژوهش حاضر از مقادیر ضریب نفوذپذیری نرمالایز شده برای اصلاح معادله (۳) ریچارد و در نظر گرفتن وابستگی مکانی مقادیر نفوذپذیری استفاده شده است.

$$\text{Normalized - Permeability} = \frac{K_r}{K_{s-biogROUT}} \quad (32)$$



شکل ۱۱- مقادیر نفوذپذیری نرمالایز شده دوغاب زیستی در راستای شعاعی

شکل ۱۰- مقادیر کربنات کلسیم در راستای شعاعی

Figure 10-Calcium carbonate values in radial line

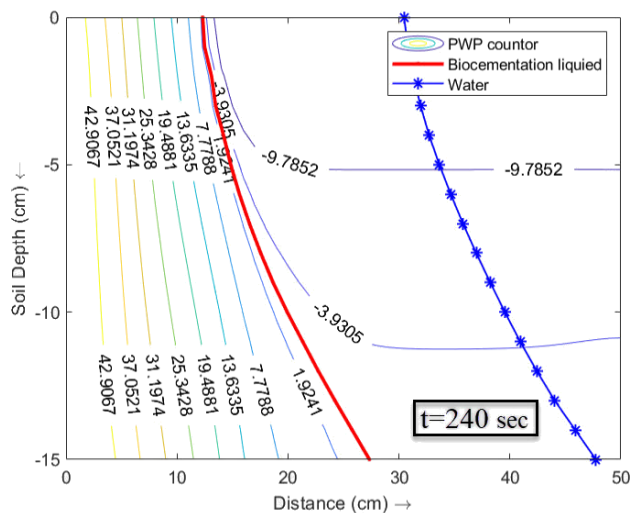
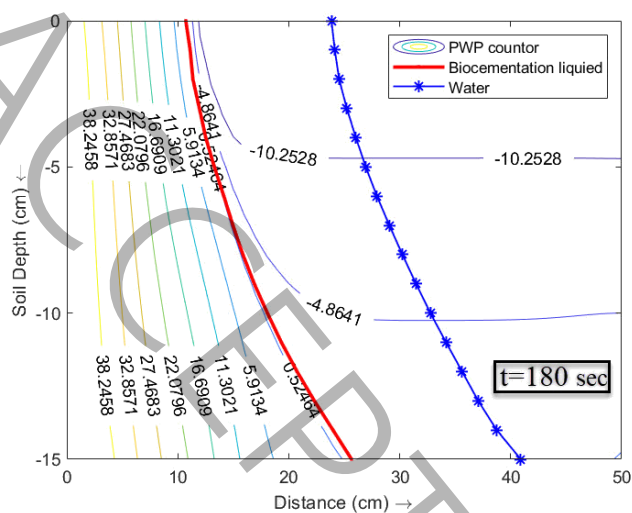
Figure 11-Normalized permeability values of biogROUT in radial line

۲-۴ بحث و نتیجه گیری

شکل ۱۲ کانطور خطوط هم پتانسیل فشاری در ماتریس خاک برای سیال دوغاب زیستی را نشان می‌دهد. خط — موقعیت خط آزاد جریان سیال دوغاب زیستی را نشان می‌دهد که با گذشت زمان به سمت دور شدن از محل لوله تزریق (به سمت راست) پیشروی می‌کند. به منظور درک بهتر تفاوت نحوه پیشروی و حرکت سیالات متفاوت آب و دوغاب زیستی موقعیت خط آزاد جریان در هر کدام از زمان‌های نشان داده شده با فرض سیال از نوع آب با علامت * نشان داده شده است.

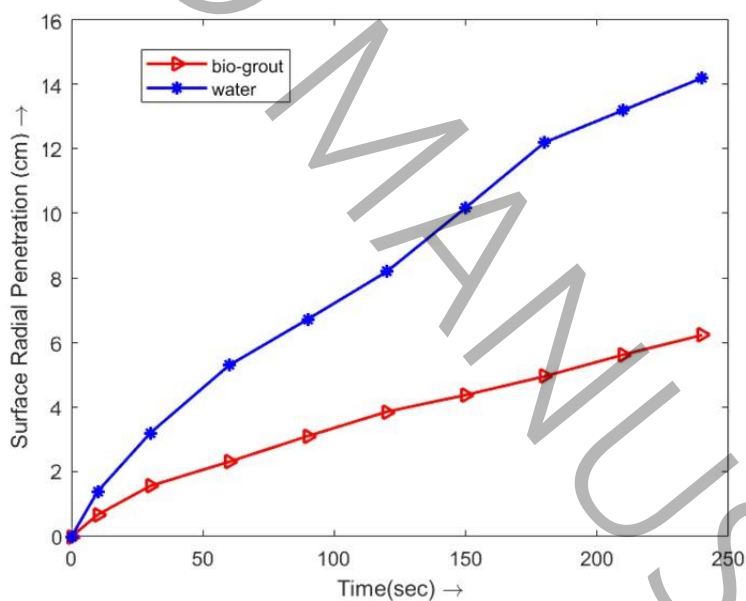
شکل ۱۳ گراف شعاع نفوذپذیری سیال در سطح خاک بر حسب زمان تزریق را برای سیال های متفاوت آب و دوغاب زیستی نمایش می‌دهد. قابل مشاهده است که مقادیر پیشروی حجم جبهه اشباع و سرعت اشباع شدن محیط خاکی برای سیال آب بیشتر از سیال زیستی است و با گذشت هرچه بیشتر از زمان شروع تزریق، این اختلاف نمایان تر و چشمگیرتر می شود.

شکل ۱۴ تصویر فریز شده از پلان دوبعدی (نمای از بالا) مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه جهت شبیه سازی فرآیند تزریق را در زمان های ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه نمایش می‌دهد. خط قرمز ممتد (—) میانگین شعاع نفوذ آزمایشگاهی از مرکز لوله تزریق را نشان می‌دهد. در همین شکل، خط زرد ممتد (—) مقدار شعاع نفوذ حاصل از شبیه سازی روش حجم کنترل توسعه یافته برای سیال زیستی و خط بنفش (—) موقعیت مکانی جبهه اشباع لحظه ای مدل فیزیکی را نمایش می‌دهد. اختلاف کم نتایج مدل فیزیکی و مدل عددی قابل توجه است.



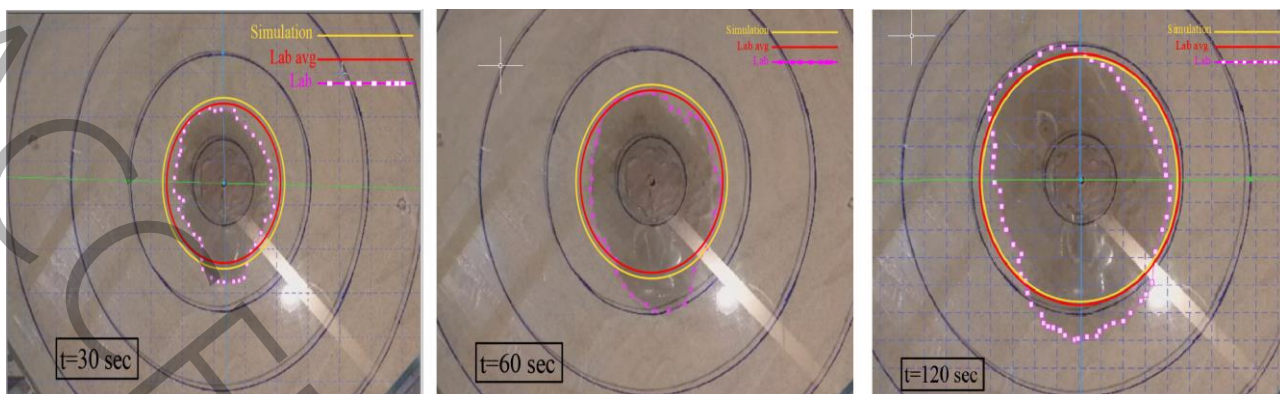
شکل ۱۲- خطوط هم فشار سیال دوغاب زیستی در زمان های ۱۰، ۳۰، ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه حاصل از شبیه سازی حجم محدود

Figure 1-Lines of the compressive potential of the biogROUT fluid at times 10, 30, 60, 120, 180 and 240 seconds resulting from a limited volume simulation



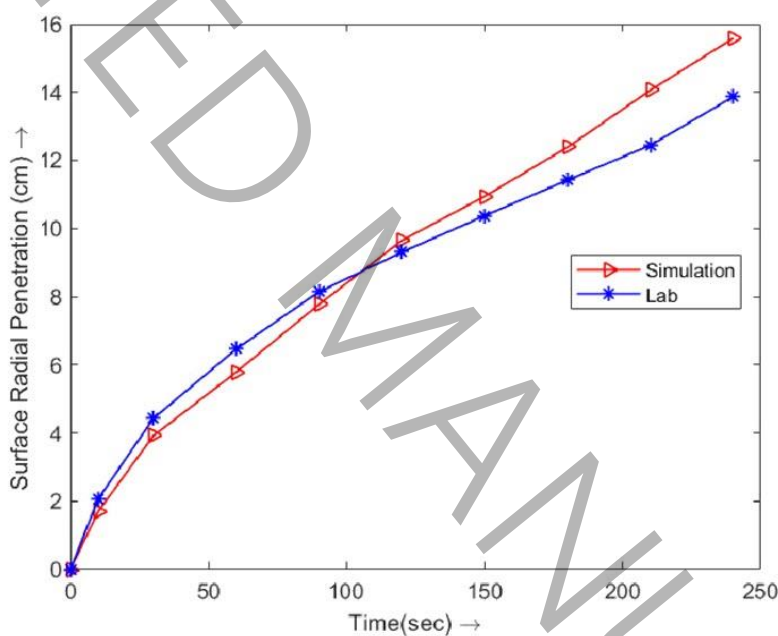
شکل ۱۳- شعاع نفوذ برای دوسیال متفاوت

Figure 13-Radial penetration for two different fluids



شکل ۱۴- نمای مدل فیزیکی فریز شده در زمان های ۳۰، ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه

Figure 14-View of the physical model frozen in 30, 60 and 120 seconds



شکل ۱۵- تاریخچه زمانی نفوذپذیری شعاعی آب در اطراف لوله تزریق

Figure 15-Time History of radial permeability of water around the injection pipe

۵- نتیجه گیری:

در این پژوهش سعی بر آن شده است که شعاع نفوذ در فرایند تزریق سیال های متفاوت آب و دوغاب زیستی در محیط خاکی اشباع و غیراشباع با استفاده از روش حجم محدود مورد بررسی قرار گیرد.

بدین گونه که در ابتدا به منظور کسب اطمینان از کارایی و صحت شبیه سازی روش حجم محدود، نتایج حاصل از شبیه سازی حجم محدود دوی بعدی تزریق آب در خاک با داده های حاصل از نرم افزار المان محدود $Seep/W$ مورد ارزیابی قرار گرفت که ارزیابی حاصله، دقت بکار برده شده در این پژوهش را نشان می دهد.

در ادامه برای سیال دوغاب زیستی نیز نتایج آزمایشگاهی مدل فیزیکی ساخته شده برای تزریق دوغاب با نتایج شبیه‌سازی حجم محدود توسعه یافته بر مبنای اصلاح ضریب پخش نفوذپذیری، مورد بررسی قرار گرفت که مهم‌ترین نتایج آن به شرح زیر است:

- برای سیالات غیر نیوتونی نظیر دوغاب زیستی که با خاک وارد واکنش می‌شوند استفاده از تئوری ریچارد به‌تنهایی برای حل معادله حرکت سیال در خاک کاربرد ندارد.
- برای توسعه معادله ریچارد در حل معادله دیفرانسیل روش حجم محدود، لازم است که مقادیر کاهش کلسیم کربنات و نفوذپذیری در امتداد شعاع اندازه‌گیری شود و اثر آن به‌صورت ضریب اصلاحی در معادله ریچارد لحاظ شود.
- مقادیر پیش‌بینی شده برای شعاع نفوذ در هر زمانی از شروع تزریق، اگر سیال از جنس آب است بیشتر از حالتی است که سیال از نوع دوغاب زیستی باشد.
- سرعت افزایش حجم ناحیه ترشونده (پیشروی جبهه اشباع) با زمان در سیال نوع آب بیشتر از سیال دوغاب زیستی است که باگذشت زمان این اختلاف معنادارتر می‌شود.
- مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری شعاع نفوذ در آزمایشگاه با نتایج شبیه‌سازی حجم محدود اختلاف کمی را نشان می‌دهد که موید دقت روش به کار برده شده است.
- با توجه به زمان کم تزریق نسبت به زمان موثر سیمان‌تاسیون *MICP* تزریق دوغاب زیستی، اثر گیرش (سمانتاسیون) ناشی از زمان در ضریب اصلاحی معادله ریچارد در نظر گرفته نشده است.
- اندازه‌گیری درصد کلسیم کربنات در مجاورت محل تزریق این حقیقت را نشان می‌دهد که بالاتر بودن فشار تزریق در این نواحی، باعث شده تا کاهشی محسوسی در مقادیر کلسیم کربنات مشاهده نشود.

مراجع

- [1] Y. Li, Y. Li, Z. Guo, Q. Xu, Durability of MICP-reinforced calcareous sand in marine environments: Laboratory and field experimental study, *Biogeotechnics*, 1(2) (2023) 100018.
- [2] M. Dagliya, N. Satyam, M. Sharma, A. Garg, Experimental study on mitigating wind erosion of calcareous desert sand using spray method for microbially induced calcium carbonate precipitation, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(5) (2022) 1556-1567.
- [3] Z. Wang, X. Zhao, X. Chen, P. Cao, L. Cao, W. Chen, Mechanical properties and constitutive model of calcareous sand strengthened by MICP, *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4) (2023) 819.
- [4] C. Lv, W.-Q. Li, C.-S. Tang, C. Zhu, X.-H. Pan, X. Zhang, B. Shi, Characterization and quantification of calcite distribution in MICP-treated sand using μ -XRF image processing technique, *Acta Geotechnica*, 19(1) (2024) 115-129.
- [5] J. Liu, X.a. Li, X. Liu, W. Dong, G. Li, Mechanical Properties of Eolian Sand Solidified by Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP), *Geomicrobiology Journal*, 40(7) (2023) 688-698.
- [6] M. Kanwal, R.A. Khushnood, F. Adnan, A.G. Wattoo, A. Jalil, Assessment of the MICP potential and corrosion inhibition of steel bars by biofilm forming bacteria in corrosive environment, *Cement and Concrete Composites*, 137 (2023) 104937.
- [7] A. Kumar, H.-W. Song, S. Mishra, W. Zhang, Y.-L. Zhang, Q.-R. Zhang, Z.-G. Yu, Application of microbial-induced carbonate precipitation (MICP) techniques to remove heavy metal in the natural environment: A critical review, *Chemosphere*, 318 (2023) 137894.
- [8] A. Zamani, B.M. Montoya, Permeability reduction due to microbial induced calcite precipitation in sand, in: *Geo-Chicago 2016*, 2016, pp. 94-103.

- [9] Y. Xiao, H. Deng, J. Li, Biomineralization of coral sand by *Bacillus thuringiensis* isolated from a travertine cave, *Scientific Reports*, 13(1) (2023) 8687.
- [10] H. Akoğuz, S. Çelik, Ö. Barış, The effects of different sources of calcium in improvement of soils by microbially induced calcite precipitation (MICP), *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 37(3) (2019) 953-965.
- [11] F. Chen, Z. Xu, Discontinuous finite volume element method of two-dimensional unsaturated soil water movement problem, *Advances in Difference Equations*, 2019 (2019) 1-15.
- [12] G. Arampatzis, C. Tzimopoulos, M. Sakellariou-Makrantonaki, S. Yannopoulos, Estimation of unsaturated flow in layered soils with the finite control volume method, *Irrigation and Drainage: The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 50(4) (2001) 349-358.
- [13] F. Li, G. Hu, T. Abdeljawad, M. Abbas, A finite point algorithm for soil water-salt movement equation, *Advances in Difference Equations*, 2021(1) (2021) 179.
- [14] D.K. Mawlood, K.N. Adnan, Comparison of the water movement by Richard and Darcy.
- [15] A. Ghobadian, M. Sharifipour, R. Ghobadian, Two-dimensional simulation of water movement in soil using finite volume method with emphasis on non-same depth subsurface drains, *Jornal of Structural and Construction Engineering(JSCE)*, 10(10) (2023) 170-193. (In Persian)
- [16] A. Shafiee, R. Dabiri, F. Askari, Dynamic properties of Firoozkooh sand-silt mixtures, *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 19(4) (2017) 273-284.
- [17] M. Mohseninia, H. Salehzadeh, Enhancing strength parameters of Firoozkooh sandy soil improved with Persian herbal gum, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 55(6) (2023) 1123-1136.
- [18] R. Imam, A. Azizi, R. Zandian, Factors affecting sand behavior in constant deviatoric stress loading, in: *GeoHalifax: 62nd Canadian Geotechnical Conference & 10th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Conference*, Halifax, NS, Canada, September 20-24, 2009, Canadian Geotechnical Society, 2009, pp. 95-102.
- [19] F. Meyer, S. Bang, S. Min, L. Stetler, S. Bang, Microbiologically-induced soil stabilization: application of *Sporosarcina pasteurii* for fugitive dust control, in: *Geo-frontiers 2011: advances in geotechnical engineering*, 2011, pp. 4002-4011.
- [20] G.D. Okwadha, J. Li, Optimum conditions for microbial carbonate precipitation, *Chemosphere*, 81(9) (2010) 1143-1148.
- [21] M. Maleki, S. Ebrahimi, F. Asadzadeh, M. Emami Tabrizi, Performance of microbial-induced carbonate precipitation on wind erosion control of sandy soil, *International journal of environmental science and technology*, 13 (2016) 937-944.
- [22] V.S. Whiffin, L.A. Van Paassen, M.P. Harkes, Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, *Geomicrobiology Journal*, 24(5) (2007) 417-423.
- [23] S.C. Bang, S.H. Min, S.S. Bang, Application of microbiologically induced soil stabilization technique for dust suppression, *International Journal of Geo-Engineering*, 3(2) (2011) 27-37.
- [24] M.T. Van Genuchten, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil science society of America journal*, 44(5) (1980) 892-898.
- [25] F.J. Leij, W.B. Russell, S.M. Lesch, Closed-form expressions for water retention and conductivity data, *Groundwater*, 35(5) (1997) 848-858.
- [26] D.G. Fredlund, A. Xing, M. Fredlund, S. Barbour, The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve, *Canadian geotechnical journal*, 33(3) (1996) 440-448.
- [27] H.K. Versteeg, *An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method*, 2/E, Pearson Education India, 2007.
- [28] K. Feng, B. Montoya, Drained shear strength of MICP sand at varying cementation levels, in: *IFCEE 2015*, 2015, pp. 2242-2251.

Predicting the radius injection of soil improvement process using Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP)

Afshin Ghobadian^a, Mohammad Sharifipour^{b*}, Rasoul Ghobadian^c

^a PhD student, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

^b Associate Professor, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

^c Associate Professor, Department of Water Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran

ABSTRACT

Biological soil improvement through Microbially Induced Calcium Precipitation (MICP) is a cutting-edge approach in soil improvement, particularly in sandy soil contexts. This environmentally friendly technique is classified as a sustainable soil improvement method and has attracted considerable attention from researchers. However, as this field is relatively new, most studies have been limited to laboratory experiments, revealing a lack of practical physical models.

The current research focuses on investigating the injection process of various fluids into the soil. Initially, the study simulates water injection using a finite volume model and compares the results with seep/w software modeling, showcasing the accuracy of the finite volume method in predicting water movement around the injection pipe. The next stage involves simulating the injection of biogROUT and its movement in the soil using the finite volume method. The simulation results are then compared with those of a biogROUT injection of physical model created in a laboratory setting. Modifying the Richards equation to calculate the radial permeability coefficient around the injection location results in a simulation that closely simulate the actual process of injecting biogROUT into the soil. It is noted that the increasing volume of the saturation zone for biogROUT injection is slower compared to water injection. This results in a gradual widening of the gap in injection radius between these two fluids over time.

KEYWORDS

Richard's equation, injection radius , BiogROUT, Finite volume method, MICP

^{*} Corresponding Author: Mohammad Sharifipour

Email: sharifipour@razi.ac.ir