

Amirkabir Journal of Civil Engineering

Prediction of Injection Radius for Soil Improvement Processes with Biogrout (MICP)

Afshin Ghobadian¹, Mohammad Sharifipour^{1*}, Rasool ghobadian²

¹ Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. ² Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Razi University, Kermanshah, Iran.

ABSTRACT: Microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) is an innovative method in soil improvement, primarily applied to sandy soils. This technique is classified as a sustainable (green) method of soil improvement due to its environmental compatibility and has garnered significant attention from researchers in recent years. However, the novelty of this field means that most research has been conducted at the laboratory scale, highlighting the need for realistic physical models. This research investigates the soil injection process for different fluids. Firstly, the injection of water into the soil is simulated using the finite volume method, and the results are validated against those obtained from simulations performed in Seep/w software. This comparison confirms the accuracy of the finite volume method in predicting water movement around the injection pipe. Next, the injection of bio-grout and its movement within the soil matrix is simulated using the finite volume method, with these results compared to a physical model constructed under laboratory conditions. The modification of the Richards equation to estimate permeability in the radial direction around the injection point results in a simulation that closely approximates the actual injection of bio-grout into the soil. The rate of advance of the saturation front for bio-grout is slower than that for water, and the positional difference in the injection radius between these two fluids becomes more pronounced over time.

Review History:

Received: Apr. 14, 2024 Revised: Nov. 09, 2024 Accepted: Apr. 02, 2025 Available Online: May, 25, 2025

Keywords:

Richard's Equation Injection Radius Saturation Front Bio-grout Finite Volume Method

1- Introduction

Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) is an innovative technique that uses bacteria to induce calcium carbonate precipitation, effectively enhancing the mechanical properties of loose sandy soils[1]. This method has shown promising results in improving soil stability and shear strength, particularly in marine environments[2]. However, the durability of MICP-treated sands under conditions such as wet-dry cycling and seawater exposure poses challenges, with jute fiber reinforcement proposed as a possible solution[3]. Additionally, studies have explored MICP's effectiveness in mitigating wind erosion and addressing heavy metal contamination[1, 2]. The reduction in soil permeability through MICP is influenced by factors including solution concentration and sand structure[4]. Overall, MICP presents extensive applications in environmental remediation and soil improvement, making further research essential in this emerging[5].

2- Methodology

2-1-Materials

In this study, Firoozkooh 161 sand, a uniform silicafractured sand, was used. physical properties are summarized in Table 1[3, 6, 7].

*Corresponding author's email: sharifipour@razi.acir

2-2-Bacteria and Cement Solution

Pasteuric sporosarcina bacteria were selected due to their high urea activity, Gram-positive nature, and ability to thrive at pH levels above 8.5 and in high calcium concentrations [6, 8, 9]. Primary cultivation was performed in solid nutrient broth supplemented with 2% urea. The subsequent liquid culture medium was prepared under aerobic conditions with a pH of 9 using sodium hydroxide for adjustment. The liquid culture was incubated at 25 ± 2 degrees Celsius and stirred at 180 rpm for 24 hours. Optical density measurements, taken at a wavelength of 600 nm to assess bacterial growth, indicated

Table 1. Specifications of the sand 161 firoozkooh

D ₁₀ (mm)	0.136	Cc	0.969
D ₃₀ (mm)	0.202	Cu	2.261
D ₆₀ (mm)	0.308	e _{max}	0.910
Gs	2.65	e _{min}	0.612

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Solution	Substance	amount
Culture	Yeast Extract	20 gr/liter
medium	NH4Cl	10 gr/liter
	NiCl2	10 micro.mol/liter
Cementation solution	CaCl2	1 mol/liter
	Urea	1 mol/liter

 Table 2. Composition of culture medium and injection solutions



Fig. 1. Normalized permeability in radial line

an optimal value of 0.84[10]. Bio-grout was prepared by combining the culture medium and cement solution in equal volumetric ratios, as detailed in Table 2.

3- Discussion and Results

Immediately after the completion of the injection process, the permeability coefficient was measured under bio-grout, and the normalized results of the permeability of 161 firoozkooh sand for bio-grout are plotted in Figure 1.

Figure 2 shows that the radius penetration of liquids for water and biogrout over time. Water displays a higher saturation front volume and saturation rate than biogrout, and this difference increases significantly as time passes after injection.

Figure 3 displays the radial penetration versus time plot for both the physical laboratory model and the developed finite volume method for biogrout. The results indicate that the finite volume method closely resembles those of the physical laboratory model in estimating radial penetration for biogrout.



Fig. 2. Surface radial penetration in soil for two different fluids (bio-grout and water)



Fig. 3. Time History of radial permeability of bio-grout around the injection pipe

4- Conclusions

The study attempted to investigate the penetration radius in the process of injecting bio-grout in a soil environment using the Finite volume method.

The laboratory results of the physical model developed for the injection of bio-grout were also compared with the results of the simulation of the finite volume method developed based on the modification of the radial permeability diffusion coefficient. The main results are as follows:

• For non-Newtonian fluids such as bio-grout that react with the soil, the use of Richard's theory alone is not used to solve the equation of fluid movement in the soil.

• In order to develop the Richard equation to solve the differential equation of the finite volume method, it is necessary to measure the values of calcium carbonate and permeability along the radius, and the effect of these is considered as a correction coefficient in the Richard equation.

• The predicted values for the penetration radius at any time of the beginning of the injection, if the fluid is of water type, it is greater than if the fluid is of bio-grout type.

• A comparison of the results of the laboratory penetration

radius measurement with the results of the finite volume method simulation shows a small difference, which indicates the accuracy of the method used.

References

- Dagliya, M., et al., 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, 2022. 14(5): p. 1556-1567.
- [2] Peng, S., et al., Factors affecting permeability reduction of MICP for fractured rock. Frontiers in Earth Science, 2020. 8: p. 217.
- [3] Imran, M.A., et al., Durability improvement of biocemented sand by fiber-reinforced MICP for coastal erosion protection. Materials, 2022. 15(7): p. 2389.
- [4] Chen, Y., et al., Experimental study on permeability and strength characteristics of MICP-treated calcareous sand. Biogeotechnics, 2023. 1(3): p. 100034.
- [5] Zou, Y., et al., Experimental investigation on effects of bacterial concentration, crack inclination angle, crack roughness, and crack opening on the fracture permeability

using microbially induced carbonate precipitation. Advances in Civil Engineering, 2021(1): p. 4959229.

- [6] Mohseninia, M. and H. Salehzadeh, Enhancing strength parameters of Firoozkooh sandy soil improved with Persian herbal gum. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 2023. 55(6): p. 1123-1136.
- [7] Nagy, B., S. Baptist, and A. Kustermann. A novel approach for the consolidation of sand by micp single treatment. in MATEC Web of Conferences. 2022. EDP Sciences.
- [8] Okwadha, G.D. and J. Li, Optimum conditions for microbial carbonate precipitation. Chemosphere, 2010. 81(9): p. 1143-1148.
- [9] Meyer, F., et al., Microbiologically-induced soil stabilization: application of Sporosarcina pasteurii for fugitive dust control, in Geo-frontiers 2011: advances in geotechnical engineering. 2011. p. 4002-4011.
- [10] Omoregie, A.I., et al., Low-cost cultivation of Sporosarcina pasteurii strain in food-grade yeast extract medium for microbially induced carbonate precipitation (MICP) application. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2019. 17: p. 247-255.

نشريه مهندسي عمران اميركبير





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

افشین قبادیان ٬٬ محمد شریفی پور ٬۰ 🔍 رسول قبادیان٬

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی ،دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. ۲-گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی ،دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

خلاصه: 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 محیطزیست در دستهبندی روشهای سبز بهسازی قرار گرفته و در سالیان اخیر موردتوجه 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 فرآیند 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 مدل سازی 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 فرآید تزریق دوغاب زیستی و نحوه حرکت آن در ماتریس خاک مورد شبیهسازی روش حجم محدود قرار گرفته است و نتایج حاصله با نتایج مدل فرای ورفته 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 شبیه سازی روش حجم محدود قرار گرفته است و نتایج مورد ارزیابی شیاری روش حجم محدود قرار گرفته است و نتایج حاصله با نتایج مدل سازی صورت گرفت است و نتایج در راستای شعاعی اطراف محل تزریق، سبب شبیه سازی نزدیک به واقعیت تزریق دوغاب زیستی در باک شده است. نرخ پیشروی جبهه اشباع برای سیال دوغاب زیستی کندتر از سیال آب است که باگذشت زمان اختلاف موقعیتی شعاع تزریقی بین این دو سیال نمایان ترمیشود.

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۱۳ ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴ **کلمات کلیدی:** معادله ریچارد شعاع تزریق جبهه اشباع

تاريخچه داوري:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۶

دوغاب زیستی روش حجم محدود Seep/w MICP

۱ – مقدمه

باتوجهبه 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

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: sharifipour@razi.acir

روند رسوب زایی کربنات کلسیم ناشی از میکروبها (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 ماسه های بهسازی شده توسط MICP در محیطهای دریایی را از طریق مطالعات آزمایشگاهی و میدانی بررسی کرده اند[۱–۵]. مطالعهای اخیر درمورد عملکرد بلندمدت ماسه های ساحلی بهسازی شده با MICP در محیطهای دریایی، افق های روشنی پیش روی محققان ترسیم کرده است که در پروژه های 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 ماسه های کلسیمی بیابانی بهسازی شده با MICP از طریق روش روش روش روش داند که اثربخشی MICP در

(Creative Commons License) حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) کی این افرینندگی مردمی (Creative Commons License) دیدن فرمائید.

^{1.} *Li*, Y

^{2.} Dagliya

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 داده اند[۶].

کارکومار و همکاران به بررسی کاربرد تکنیکهای MICP برای حذف فلزات سنگین در محیط های طبیعی پرداختند و دامنهی کاربرد را فراتر از کاهش نفوذپذیری ماسه گسترش دادند[۷]. وانگ^۲و 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^۳ 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 وي و همكاران، توزيع و مقدار كلسيت در ماسههای بهسازی شده با فناوری تولید کربنات کلسیم میکروبی را به کمک یک تکنیک پردازش تصویر *µ-XRF* مشخص و اندازه گیری 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^ه 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، می تواند کارساز باشد[۵]. بطور کلی میتوان گفت مطالعات اخیر در زمینه MICP کاربردهای متنوع از تصحیح شرایط محیطی تا بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی را نشان می دهند. این گروه مطالعات، به طور کلی به درک عمیقتری از MICP و کاربردهای بالقوه آن در افزایش کارایی و کاهش نفوذپذیری ماسه، کمک می کند[۹]. آکوگز² 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 باتوجهبه نو بودن این شاخه از علم

بهسازی خاک، انجام پژوهشهای بیشتر در این زمینه امری اجتنابناپذیر و مترقی است[۱۱].

۱- ۲- 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^۷ 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 می توان نام برد. روش حجم محدود به دلیل توانایی پیشبینی دقیق حرکت آب در خاک، توجه زیادی را به خود جلب کرده است آرامپاتزیس^۸ 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 می توان حفظکنندگی سیستم و انعطاف پذیری در فواصل شبکه را نام برد. در مطالعه آن ها، مدل عددی از طریق نتایج آزمایشهای آزمایشگاهی، مورد اعتبارسنجی قرارگرفت و بررسی مقایسه ای، توافق خوبی بین نتایج شبیه سازی عددی و دادههای تجربی آزمایشگاهی را نشان می دهد[۱۲].

در مطالعهای انجام شده توسط لی^{*} 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، ماولود و عدنان^{۱۰} نیز حرکت آب در خاک را توسط قانون دارسی، قانون دارسی–باکینگهام^{۱۱} و معادله ریچارد مورد مقایسه قرار دادند و اهمیت معادله ریچارد 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 زهکش های زیرسطحی پرداختند و نشان دادند که حین بارش باران، هرچقدر یکی از زهکش ها به سطح زمین نزدیکتر باشد سرعت تخلیه آب باران به داخل زهکش ها و همچنین دبی تخلیه افزایش می یابد[۱۵].

10..Mawlood, D.K. and K.N. Adnan

^{1.} Kumar

^{2.} Wang

^{3.} Zamani, A. and B.M. Montoya

^{4.} Lv, C

^{5.} Liu

^{6.} Akoğuz

^{7.} Richars

^{8.} Arampatzis, G

^{9.} Li, F

^{11.} Buckingham-Darcy





Fig. 1. Particle size distribution curve of Firoozkooh 161 sand

بهطورکلی، 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 ریچارد 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 می شود.

روش MICP یک روش بهسازی بیولوژیکی نوین و سبز (سازگار با محیطزیست) است که در سالهای اخیر موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است و پتانسیل بالایی برای جایگزینی با روشهای دیگر بهسازی سنتی نظیر بهسازی با سیمان و آهک دارد؛ اما باتوجهبه 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 باگذشت زمان (نحوه حرکت محلول زیستی درون ماتریس خاک) با استفاده از روش عددی حجم محدود و زبان

برنامهنویسی متلب ، پیش بینی 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 MICP که از فرمول بندی المان محدود بهره می برد، مقایسه شده است که اطمینان پذیری روش عددی حجم محدود مورد استفاده در پژوهش را تصدیق می نماید.

۲ – الگوسازی نظری یا تجربی ۲ – ۱ – مصالح ۲ – ۱ – ۱ – ماسه فیروزکوه

در پژوهش حاضر از ماسه استاندارد سیلیسی شکسته فیروز کوه با دانهبندی یکنواخت(SP در سیستم طبقه بندی یونیفاید)، که بهاختصار ماسه ۱۶۱ نامیده می شود، استفاده شده است. شکل ۱ نمودار دانه بندی ماسه ۱۶۱ فیروز کوه 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 آورده شده است[۱۶–۱۸]. جدول ۱. مشخصات ماسه ۱۶۱ فیروز کوه

Table 1. Specifications of Firoozkooh 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



شکل ۲. وسایل آزمایشگاهی کشت باکتری، الف-کلنی باکتری در محیط کشت جامد، ب-دستگاه شیکر انکوباتر، ج-دستگاه اسپکتروفتومتر Fig. 2. Bacterial Culture Laboratory Equipment. A- Bacterial colony on solid culture medium, B- Shaker incubator, C- Spectrophotometer

۲- ۱- ۲- محلول باکتریایی و سیمانی

در بسیاری از پژوهشها در زمینه سمنتاسیون زیستی از باکتری اسپوروسارسینا پاستوری⁽ به دلیل فعالیت اوره آزی بالا، گرم مثبت بودن و توانایی رشد در PH بالای ۸٫۵ و غلظت بالای کلسیم استفاده می شود. سویه این باکتری از مرکز کلکسیون قارچها و باکتریهای صنعتی به شماره سویه این باکتری از مرکز کلکسیون قارچها و باکتریهای صنعتی به شماره PTCC1645 به صورت پودر خشک و منجمد شده لیوفیلیزه تهیه شد و سپس مطابق دستورالعمل استاندارد فعال شده است[۲۰–۲۱]. کشت اولیه در محیط جامد نوترینت براث 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 فرمول بندی 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 به صورت 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 ۲۵±۲ 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 اندازه گیری می شود، استفاده گردیده است. میزان چگالی نوری بلافاصله پس از اتمام کشت محیط مایع عدد ۰٫۸۴ را نشان می دهد که باتوجه به مقدار ماکزیمم ۱، مطلوب به نظر می رسد[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 تشکیل دهنده محلول زیستی و سیمانی در جدول ۲ آورده شده است.

^{1.} Sporosarcina pasteurii

مقدار	عنصر تشكيلدهنده	محلول تزريقي	
۲۰ گرم در لیتر	Yeast Extract		
۱۰ گرم در لیتر	NH4Cl	محلول زیستی (محیط کشت مایع)	
۱۰ میکرومول در لیتر	NiCl2		
۱ مولار	CaCl2		
۱ مولار	Urea	محلول سيمانى	

جدول ۲. ترکیب محیط کشت و محلول های تزریق Table 2. Composition of Culture Media and Injection Solutions

۲- ۲- معادلات حاکم بر جریان آب در خاک

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:

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

که در آن θ رطوبت حجمی [L3/L3] ، Ψ بار فـشاری 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 (–) ، $x\Delta$ 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. ازاینرو، 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 برمبنای تابع نمایی گاردنر عملکرد ضعیفی در پیش بینی نزدیک به واقعیت پتانسیل فشاری دارد[۲۵].

نرمافزارهای شبیه سازی 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 تابع نمایی گاردنر دارد[۲۶]. توابع انتقالی مورداستفاده در این تحقیق توابع ونگنوختن (روابط ۲، ۳، ۴ و ۵) و بروکز-کوری (۶۰ ۷ و ۸) میباشند[۲۷].

$$S_e = \frac{\theta - \theta r}{\theta s - \theta r} = \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{\psi p}{\psi_b}\right)^{1 + \lambda}}\right]^{\frac{1}{1 + \lambda}}$$
(Y)

$$\frac{K_{\Psi}}{K_{s}} = \left(\frac{\theta - \theta r}{\theta s - \theta r}\right)^{l} * \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta r}{\theta s - \theta r}\right)^{\frac{1 + \lambda}{\lambda}}\right)^{\frac{\lambda}{1 + \lambda}}\right]^{2}$$
(٣)

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

$$\alpha = \frac{1}{\psi_b}, n = 1 + \lambda, m = 1 - \frac{1}{n}$$
 (a)

$$\int_{s}^{n} \int_{W}^{e} \int_{t}^{t+dt} \frac{\partial \theta(\psi_{P})}{\partial t} dx dy dt = \\
\int_{t}^{t+dt} \int_{s}^{n} \int_{W}^{e} \left(Kx\left(\psi\right) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) dx dy dt + \\
\int_{t}^{t+dt} \int_{W}^{e} \int_{s}^{n} \left(Ky\left(\psi\right) \frac{\partial \psi}{\partial y} + Ky\left(\psi\right) \right) dy dx dt + \\
\int_{t}^{t+dt} \int_{W}^{e} \int_{s}^{n} \pm \frac{q_{s}}{\Delta x \Delta y} dy dx dt$$
(9)

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

$$A_E \psi_E^{t+dt} + A_W \psi_W^{t+dt} + A_N \psi_N^{t+dt}$$

+
$$A_S \psi_S^{t+dt} + A_P \psi_P^{t+dt} = Fp$$
 (\.)

$$A_E = \phi K(\psi)_e \frac{dydt}{\delta x_e} \tag{11}$$

$$A_W = \phi K(\psi)_w \frac{dydt}{\delta x_w} \tag{17}$$

$$A_N = \phi K(\psi)_N \frac{dxdt}{\delta y_n} \tag{17}$$

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

$$A_P = -(A_E + A_W + A_N + A_S) - f(\psi) dx dy$$
 (1a)

$$F_{P} = \left(K\left(\psi\right)_{s} - K\left(\psi\right)_{N}\right) dxdt - f\left(\psi\right) dxdy \psi_{P}^{t}$$

$$+ (1 - \phi)K\left(\psi\right)_{e} \frac{dydt}{\delta x_{e}} \left(\psi_{P}^{t} - \psi_{E}^{t}\right)$$

$$+ (1 - \phi)K\left(\psi\right)_{w} \frac{dydt}{\delta x_{e}} \left(\psi_{P}^{t} - \psi_{W}^{t}\right) + (1 - \phi)K\left(\psi\right)_{n} \frac{dxdt}{\delta x_{v}} \left(\psi_{P}^{t} - \psi_{N}^{t}\right)$$

$$(1 - \phi)K\left(\psi\right)_{n} \frac{dxdt}{\delta x_{v}} \left(\psi_{P}^{t} - \psi_{N}^{t}\right)$$

$$+(1-\phi)K(\psi)_{s}\frac{dxdt}{\delta y_{s}}(\psi_{P}^{t}-\psi_{S}^{t})\pm q_{s}dt$$

که در آن Se رطوبت مؤثر، Ks هدایت هیدرولیکی اشباع[L/T]، l = (L/T) و δr و δr رطوبت حجمی باقیمانده و رطوبت حجمی اشباع $[L^3/L^3]$ ، $l = \delta r$ و δr رطوبت حجمی اشباع [L/1]، n = 0 پارامتر توزیع خلل و فرج، $\dot{n} = [L/1]$ ، m = 0 پارامترهای تجربی هستند. پارامتر l به عنوان تابعی از هدایت هیدرولیکی توسط موآلم ۱۹۷۶ به طور δr متوسط ۵٫۰ برای اکثر خاک ها برآورد شد. در روابط فوق، پارامترهای δr ، متوسط ۵٫۰ برای اکثر خاک ها برآورد شد. در روابط فوق، پارامترهای δr ، δs مرایب $\eta \in \Lambda$ تجربی و برای هر بافت خاکی متفاوت است. علاوه بر این، ضرایب $\eta \in \Lambda$ تجربی و برای هر بافت خاکی متفاوت است[T].

$$\theta = \begin{cases} \theta s & if \psi \prec \psi_b \\ \theta r + (\theta s - \theta r) (\frac{\psi_b}{\psi})^{\lambda} & if \psi \succ \psi_b \end{cases}$$
(\$

$$K(\psi) = \begin{cases} Ks & if \psi \prec \psi_b \\ Ks^* (\psi_b / \psi)^\eta & if \psi \succ \psi_b \end{cases}$$
(Y)

$$f(\psi) = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \begin{cases} 0 & if \psi \prec \psi_b \\ \lambda^* (\theta s - \theta r) (\psi_b / \psi)^{\lambda - 1} (\psi_b / \psi^2) & if \psi \succ \psi_b \end{cases}$$
(A)

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





افقی صفر هستند $0 = \frac{\partial \psi}{\partial x}$ ازاین و به عنوان نمونه برای مرز AB معادله عمومی (۱۰) به صورت زیر می باشد:

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

$$(1A)$$

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

$$A_N = \phi K(\psi)_N \frac{dxdt}{\delta y_n} \tag{(7.)}$$

$$A_{S} = \phi K(\psi)_{S} \, \frac{dxdt}{\delta y_{S}} \tag{(1)}$$

$$A_{P} = -(A_{E} + A_{S} + A_{N}) - 0.5 * f(\psi) dxdy$$
 (YY

$$F_{P} = \left(K\left(\psi\right)_{S} - K\left(\psi\right)_{N}\right) dx dt$$

$$-0.5 * f\left(\psi\right) dx dy \psi_{P}^{t}$$

$$+(1-\phi)K\left(\psi\right)_{e} \frac{dy dt}{\delta x_{e}}\left(\psi_{P}^{t} - \psi_{E}^{t}\right)$$

$$+(1-\phi)K\left(\psi\right)_{N} \frac{dy dt}{2\delta x_{n}}\left(\psi_{P}^{t} - \psi_{N}^{t}\right)$$

$$+(1-\phi)K\left(\psi\right)_{S} \frac{dx dt}{\delta y_{s}}\left(\psi_{P}^{t} - \psi_{S}^{t}\right)$$

$$(YY)$$

 q_s برای همه گرهها به جز گرههای چاه تزریق برابر صفر است. M_s فریب نفوذپذیری در وجه بالایی حجم کنترل است که به صورت میانگین هارمونیک ضریب نفوذپذیری P و N در نظر گرفته می شود. گفتنی است که برای سایر وجوه کناری نقطه P یعنی S, W و Eنیز این رابطه برقرار است.

$$Ky(\psi)_n = \frac{2Ky(\psi)_P * Ky(\psi)_N}{Ky(\psi)_P + Ky(\psi)_N} \tag{1Y}$$

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

بهمنظور 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 ۲۰ 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.

۳- ۱- شرایط مرزی تمام گرههای واقع بر مرز AB و CD دارای شرایط گرادیان فشار



شکل ۵. توابع ورودی نرم افزار Seep/w، الف-تابع هدایت هیدرولیکی ، ب- تابع رطوبت حجمی

Fig. 5. Seep/w Software Input Functions. A- Hydraulic Conductivity Function, B- Volumetric Water Content Function

$$F_{P} = \left(K\left(\psi\right)_{s} - K\left(\psi\right)_{N}\right) dx dt - 0.5 * f\left(\psi\right) dx dy \psi_{P}^{t}$$

$$+ (1 - \phi) K\left(\psi\right)_{e} \frac{dy dt}{2\delta x_{e}} \left(\psi_{P}^{t} - \psi_{E}^{t}\right) +$$

$$(1 - \phi) K\left(\psi\right)_{w} \frac{dy dt}{2\delta x_{e}} \left(\psi_{P}^{t} - \psi_{W}^{t}\right) +$$

$$(1 - \phi) K\left(\psi\right)_{n} \frac{dx dt}{\delta y_{e}} \left(\psi_{P}^{t} - \psi_{N}^{t}\right) - q_{s} dt$$

$$(\Upsilon)$$

برای تمام گردهای واقع بر مرزهای قائم
$$AD$$
 و BC شرط گرادیان
فشار مشخص جهت عمودی $1 = \frac{\partial \psi}{\partial y}$ برقرار است، ازاینرو معادله جبری
(۱۰) بهعنوان نمونه برای مرز AD بهصورت زیر خلاصه میشود:

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

به منظور اطمینان از عملکرد صحیح روش حجم محدود مورداستفاده در پژوهش حاضر، نتایج حاصله با نتایج به دست آمده از شبیه سازی با نرم افزار (های 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 (۲۶] جهت بررسی جریان استفاده میکند.

dydt

(۲۵)

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

$$A_E = \phi K(\psi)_E \frac{dydt}{2\delta x_w} \tag{15}$$

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

 $A_P = -(A_E + A_W + A_N) - 0.5^* f(\psi) dxdy \tag{7A}$

شکل ۵ نمودار تابع لگاریتمی هدایت هیدرولیکی و رطوبت حجمی ماسه ۱۶۱ فیروزکوه بر حسب ماتریس مکش(بر اساس فرمولبندی فردلاند و زینک) ، معرفی شده در نرم افزار Seep/w نشان می دهد. این توابع

1. fredlund and xing



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



برحسب پارامترهای Ks هدایت هیدرولیکی اشباع، θr و θs رطوبت حجمی باقیمانده و رطوبت حجمی اشباع و هم چنین خصوصیات فیزیکی دانه بندی D_{10} , D_{60} , LL در نرم افزار N فزار N_{00} ترسیم می شوند. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت اندازه مش بندی نشان داد که شبکهبندی 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.

۵۲ مکل ۶ خروجی خطوط هم پتانسیل فشاری در زمانهای ۶ و ۲۰ و ۵۲ مکل ۱ بعنوان نمونه در نرمافزار Seep/W نشان میدهد. خط چین --- محل





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

خط آزاد جریان(فریاتیک – مقدار فشار آب منفذی برابر صفر PWP=0) را نشان میدهد 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 میدهد.

شکل ۷ خطوط هم پتانسیل فشاری حاصل از شبیه سازی روش حجم محدود را نشان میدهد. 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 خروجیهای نرمافزار seep/w است که فاصله کمبین محل خط آزاد جریان در شبیه سازی روش حجم محدود با نتایج نرمافزار المان محدود seep/w صحت و دقت عملکرد مناسب روش حجم محدود برای شبیه سازی حرکت آب در خاک را نشان می دهد.

شکل ۸ نمودار میلهای شعاع نفوذ آب در سطح محیط خاکی را برای زمانهای 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 میدهد.

۴– بررسی نحوه حرکت محلول زیستی(محلول باکتریایی+محلول سیمانی) درون ماتریس خاک بر اثر تزریق محدوده موردمطالعه در مدل فیزیکی در شکل ۹–الف نمایش داده شده است. عمق مدل ۱۵ سانتی متر و ابعاد ۱۰۰*۱۰۰ سانتی متری درنظر 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.

۴- ۱- اندازه گیری درصد کربنات کلسیم

نسبت کربنات کلسیم تشکیل شده بین دانههای خاک، رابطه مستقیم با مقاومت تکمحوری و نفوذپذیری بهدست آمده از نمونهها دارد. در این



شکل ۱۰. مقادیر کربنات کلسیم در راستای شعاعی

Fig. 10. Calcium carbonate values in radial lin

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 می شوند (m_1) . سپس نمونه ها چند بار با هیدروکلریک اسید *HCl*)) شست و شو داده می شوند تا کربنات کلسیم موجود در نمونه ها از آن خارج شود و دوباره در درون آون قرار گرفته و بعد از خشک شدن توزین میگردند (m_2) . درصد کلسیم کربنات با استفاده از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$CaCo_3\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100$$
 (°·)

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

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

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 $K_{s-biogrout}$ نفوذ پذیری اشباع برای سیال دوغاب زیستی، $K_{s-water}$ نفوذ پذیری اشباع برای سیال آب، برای سیال دوغاب زیستی، سیال $\mu_{bio-grout}$ لزجت سیال زیستی)مطابق استاندارد (ASTM D445)، γ_{water} وزن مخصوص آب و μ_{water}

$$K_{s-biogrout} = K_{s-water} * \frac{\mu_{water}}{\mu_{bio-grout}} * \frac{\gamma_{bio-grout}}{\gamma_{water}}$$
(٣١)

۴- ۲- ۲- نفوذپذیری شعاعی دوغاب زیستی

بلافاصله پس از اتمام فرایند تزریق، در راستای شعاعی و با فواصل مختلف نمونههایی جهت اخذ 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 r میآید که در آن K_r نفوذ پذیری شعاعی اندازه گیری شده در فاصله r



شکل ۱۱. مقادیرنفوذپذیری نرمالایزشده دوغاب زیستی در راستای شعاعی

Fig. 11. Normalized permeability values of biogrout in radial line

ASTM) از محل تزریق بر حسب سانتی متر بر ثانیه (مطابق استاندارد (ASTM) از محل تزریق بر حسب سانتی متر بر ثانیه (مطابق استاندارد (D2434 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 ($^{\circ}$) ریچارد و در نظر گرفتن وابستگی مکانی مقادیر نفوذپذیری استفاده شده است.

Normalized – Permability =
$$\frac{K_r}{K_{s-biogrout}}$$
 (°7)

۴– ۳– بحث و نتیجه گیری

شکل ۱۲ کانتور خطوط هم پتانسیل فشاری در ماتریس خاک برای سیال دوغاب زیستی را نشان میدهد. خط محمو 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 می کند. 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 ب

شکل ۱۳ گراف شعاع نفوذپذیری سیال در سطح خاک بر حسب زمان تزریق را برای سیال های متفاوت آب و دوغاب زیستی نمایش می دهد. قابل مشاهده است که مقادیر پیشروی حجم جبهه اشباع و سرعت اشباع شدن محیط خاکی برای سیال آب بیشتر از سیال زیستی است و باگذشت 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 شبیهسازی فرآیند تزریق را در زمانهای 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 می دهد. اختلاف کم نتایج مدل فیزیکی و مدل عددی قابل توجه است.

شکل ۱۵ گراف شعاع نفوذ بر حسب زمان برای نتایج مدل فیزیکی آزمایشگاهی و شبیه سازی حجم محدود توسعه یافته را نشان میدهد،از مشاهده نتایج گراف ۱۴ و ۱۵ قابل مشاهده است که نتایج حاصل از روش حجم کنترل توسعه یافته در برآورد شعاع نفوذ برای سیال زیستی با نتایج نمونه فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه، اختلاف ناچیزی دارد و استفاده از این روش جهت شبیه سازی تزریق، قابل اعتماد است.

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 دوبعدی مازی روش حجم محدود دوبعدی تزریق آب در خاک با دادههای حاصل از نرمافزار المان محدود *Seep/W*



شکل ۱۲. خطوط هم فشار سیال دوغاب زیستی در زمان های ۱۰، ۳۰، ۲۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه حاصل از شبیه سازی حجم محدود

Fig. 12. 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



Fig. 13. Radial penetrationy for two different fluids



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

Fig. 14. View of the physical model frozen in 30, 60 and 120 seconds

مورد ارزیابی قرار گرفت که ارزیابی حاصله، دقت بکار برده شده در این پژوهش را نشان میدهد.

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 می شوند استفاده از تئوری ریچارد به تنهایی 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 اندازه گیری شود و اثر آن به صورت ضریب اصلاحی در معادله ریچارد لحاظ شود.

- مقادیر پیش بینی شده برای شعاع نفوذ در هر زمانی از شروع تزریق،



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

Fig. 15. Time History of radial permeability of water around the injection pipe

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,

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 می شود.

مقایسه نتایج حاصل از اندازه گیری شعاع نفوذ در آزمایشگاه با نتایج
 شبیه سازی 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 ریجارد در نظر گرفته نشده است.

اندازه گیری درصد کلسیم کربنات در مجاورت محل تزریق این
 حقیقت را نشان می دهد که بالاتر بودن فشار تزریق در این نواحی، باعث
 شده تا کاهشی محسوسی در مقادیر کلسیم کربنات مشاهده نشود.

منابع

[1] Y. Li, Y. Li, Z. Guo, Q. Xu, Durability of MICP-reinforced calcareous sand in marine environments: Laboratory and

- [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,

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, Twodimensional 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)

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. 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

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم A. Ghobadiana, M. Sharifipour, R. Ghobadian, Predicting the radius injection of soil improvement process using Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP), Amirkabir J. Civil Eng., 57(4) (2025) 611-632.



DOI: 10.22060/ceej.2025.23110.8110

بی موجعه محمد ا