



## بررسی آزمایشگاهی سرعت زهکشی آب منفذی از خاک تحت اعمال مکش

علی احمدی<sup>۱</sup>، جعفر بلوری بزازی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکترای مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

:

bolouri@um.ac.ir

### خلاصه

بررسی جریان آب درون خاک همواره یکی از مسائل با اهمیت در حوزه مهندسی ژئوتکنیک است. پژوهش حاضر، به ارزیابی اثر تراز فشار مکشی اعمالی و درصد رطوبت خاک بر سرعت تخلیه آب منفذی از طریق نصب لوله زهکش فیلتردار در محیط پرداخته است. آزمون‌ها بر روی نمونه‌های اشباع ماسه، رس و مصالح باطله ریزدانه مربوط به معدن مس سونگون در یک مخزن استوانه‌ای انجام شده است. اعمال مکش در محیط سبب ایجاد گرادیان هیدرولیکی و در نتیجه، جریان افقی از دیواره‌ها به سمت زهکش می‌شود که سرانجام، آب منفذی طی یک جریان قائم داخل لوله، از محیط تخلیه می‌گردد. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می‌دهند که شدت جریان با تقریب بسیار خوبی از یک تابع نمایی پیروی می‌کند به طوری که با افزایش زمان مکش، نرخ تغییر حجم آب تخلیه شده کاهش می‌یابد. همچنین، با افزایش فشار اعمالی و درصد رطوبت نمونه، بسته به مشخصات خاک شدت جریان به طور غیرخطی افزایش پیدا می‌کند.

**کلمات کلیدی:** شدت جریان، حجم تخلیه، فشار مکش، درصد رطوبت، زهکشی

### ۱. مقدمه

بررسی مسیر عبور یک ذره آب درون یک محیط متخلخل نظیر توده خاک یا در اصطلاح تحلیل خط جریان، یکی از مسائل قابل توجه در حوزه مهندسی ژئوتکنیک است. از نظر علم مکانیک خاک، اگر خطوط جریان به صورت مستقیم و موازی باشند، جریان از نوع خطی است. جریان آب رو به پایین داخل یک لایه بستر افقی متشکل از مصالح درشت دانه نظیر شن و ماسه، نمونه‌ای از جریان خطی است. از سوی دیگر، چنانچه ذرات آب درون محیط در امتداد منحنی‌هایی به صورت صفحات موازی حرکت کنند، جریان از نوع دو بعدی در نظر گرفته می‌شود. به عنوان نمونه، جریان آب از بالا دست به سمت پایین دست در خاک زیر پی یک سد به صورت یک شبکه جریان دوبعدی تعریف می‌شود. بدین ترتیب، سایر انواع جریان‌ها در محیط متخلخل، مانند حرکت آب درون یک توده خاک به سمت چاه، در زمره جریان‌های سه بعدی قابل طبقه بندی هستند [۱، ۲].

به طور کلی، به منظور جریان یافتن آب میان دو نقطه، ایجاد یک گرادیان هیدرولیکی در محیط ضروری است. مقدار آب خارج شده از یک توده متخلخل در واحد زمان به صورت عمود بر یک سطح مقطع معین از محیط، به کمک پارامتری به نام سرعت تخلیه قابل ارزیابی است. برای ماسه‌ها و خاک‌های ریزدانه نظیر لای و رس، رابطه میان پارامترهای جریان را می‌توان مطابق قانون داریسی به صورت رابطه (۱) بیان نمود [۳]:

$$v = ki \quad (1)$$

که در آن  $v$  سرعت تخلیه،  $k$  ضریب نفوذپذیری خاک و  $i$  گرادیان هیدرولیکی ایجاد شده در محیط است.

طبق قانون داریسی، مقدار آبی که درون یک نمونه در واحد زمان جریان دارد، به کمک رابطه (۲) قابل محاسبه است [۳]:

$$q = vA = kiA \quad (2)$$

که در آن  $q$  شدت جریان عبوری از خاک و  $A$  سطح مقطع عمود بر راستای جریان است.

پژوهش حاضر به اندازه گیری سرعت تخلیه آب منفذی از درون نمونه‌های مختلف خاک، تحت اعمال مکش در حین اجرای فرایند پیش بارگذاری خلأ از طریق انجام آزمون‌های کوچک مقیاس پرداخته است. بدین منظور، روابطی برای محاسبه سرعت زهکشی بر اساس تغییرات حجم آب تخلیه شده بر حسب مدت زمان مکش ارائه خواهد شد.

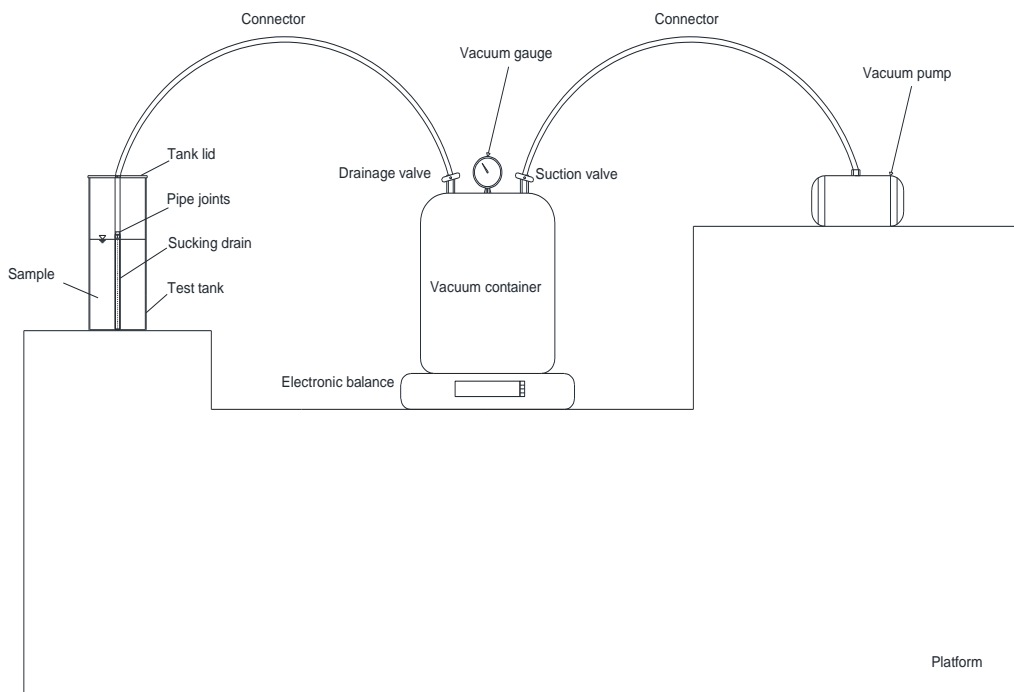
## ۲. اصول پیش‌بارگذاری خلأ

اعمال مکش یا فشار خلأ به زمین، یکی از روش‌های متداول پیش‌بارگذاری به منظور تسریع فرایند زهکشی آب منفذی و تحمیل نشست نهایی به یک خاک دارای میزان رطوبت بالا در یک دوره زمانی کوتاه مدت است که نخستین بار توسط Kjellman [۴] ابداع گردید. در این روش با اعمال فشار مکشی به محیط خاک، آب از میان حفرات خارج می‌شود و در نتیجه، مقداری تغییر حجم به صورت نشست سطحی رخ می‌دهد [۵]. استفاده از تکنیک پیش‌بارگذاری خلأ می‌تواند از بروز نشست‌های بزرگ بلندمدت و غیریکنواخت در زمین‌های سست و با ظرفیت باربری پایین جلوگیری کند [۶]. اعمال فشار خلأ فقط سبب نمو جزئی تنش‌های همسانگرد در زمین می‌شود. نمونه‌های جزئی عموماً منجر به ایجاد نشست و تغییر مکان جانبی درون‌سو در زمین، در امتداد مرکز ناحیه‌ای از خاک که تحت بار خلأ واقع شده می‌گردند [۷]. علاوه بر آن، اثر شرایط مرزی زهکشی به طور کلی در هر دو حالت متفاوت است. برای یک لایه خاک با امکان زهکشی دو طرفه، معمولاً فشار خلأ فقط از طرف مرز بالایی و به صورت یک فشار درونی از طریق زهکش‌های نصب شده در زمین اعمال می‌گردد [۸، ۹]. در مرز پایینی زهکشی، هیچ فشار خلأی به طور مؤثر قابل اعمال نیست. بنابراین، همواره یک اختلاف هد میان مرزهای بالایی و پایینی لایه خاک وجود خواهد داشت و شرایط نهایی به ازای ۱۰٪ تحکیم متناظر است با جریان پایدار آب در لایه به طرف مرز بالایی زهکش که در آن فشار خلأ اعمال می‌شود [۱۰].

## ۳. روش پژوهش

### ۱.۳. دستگاه آزمون

مطالعه حاضر به بررسی آزمایشگاهی سرعت تخلیه آب از نمونه‌های اشباع چند نوع از مصالح می‌پردازد. دستگاه آزمایش از شش بخش اصلی شامل مخزن مصالح، پمپ مکش، کپسول خلأ، زهکش مکشی، شیرهای تنظیم کننده و شلنگ‌های اتصال تشکیل شده است. مخزن آزمایش یک استوانه شیشه‌ای دارای قطر داخلی ( $D$ ) و ارتفاع کل ( $h_i$ ) به ترتیب، معادل ۱۵۰ و ۴۵۰ میلی‌متر است. به نظر می‌رسد درجه رطوبت بالای نمونه‌ها تنها سبب ایجاد پیوستگی (Adhesion) بسیار ناچیزی میان مصالح و دیواره‌های داخلی مخزن گردد، به گونه‌ای که بتوان فرض عدم تأثیر قابل توجه اصطکاک دیواره‌ها بر نتایج را پذیرفت. شکل ۱ نمای شماتیک سیستم آزمایش را نشان داده است.



شکل ۱ - نحوه پیکربندی تجهیزات آزمایش

پمپ خلأ آزمون از نوع یک مرحله‌ای، رانش مستقیم، پره لغزشی و پایه روغنی است که قادر به تولید مکش تا حداکثر فشار خلأ نسبی معادل ۹۹/۹ کیلوپاسکال می‌باشد و برای عملکرد قابل اعتماد و طولانی مدت طراحی شده است. کپسول خلأ یک سیلندر گاز کاملاً خالی با ظرفیت داخلی ۸

لیتر از جنس فولاد و دارای مقاومت کافی برای تحمل فشارهای مکشی بالا است که میان پمپ و مخزن آزمایش نصب می‌شود. در صورت اتصال مستقیم پمپ خلأ به مصالح، آب زهکشی شده وارد فضای پمپ می‌شود و سبب اختلال در عملکرد مکشی آن خواهد شد. از این رو، با نصب کپسول خلأ میان پمپ و مخزن آزمایش، اولاً می‌توان فشار مکشی تولید شده را در یک تراز دلخواه درون کپسول حبس کرد و ثانیاً، به جمع‌آوری آب تخلیه شده از میان حفرات مصالح پرداخت. جرم آب تخلیه شده با استفاده از یک ترازوی الکترونیکی واقع در زیر کپسول خلأ اندازه‌گیری می‌شود. به جای بهره‌گیری از زهکش قائم پیش ساخته (PVD) برای زهکشی آب منفذی، در این پژوهش از یک لوله مشبک فیلتردار استفاده شده است. بدین منظور، تعداد معینی سوراخ دایره‌ای به قطر ۲ میلی‌متر در فواصل قائم ۱۰ میلی‌متر از یکدیگر، دور تا دور جداره یک لوله پلی اتیلن تعبیه شده است. ضمناً، هر دو دیواره داخلی و خارجی لوله کاملاً با دو قطعه پارچه الک فلزی ضد زنگ با بعد چشمه ۳۸ میکرون (معادل مش #۴۰۰) به عنوان لایه‌های فیلتر پوشانده شده است. چشمه‌های فیلتر فقط به آب منفذی اجازه زهکشی می‌دهد و از ورود ذرات جامد به داخل کپسول خلأ جلوگیری می‌کند. بر روی بخش فوقانی کپسول خلأ، دو شیر تنظیم کننده شامل شیرهای زهکشی و مکش به ترتیب، برای ورود آب تخلیه شده به داخل ظرف و تنظیم فشار خلأ نصب گردیده است. برای مشاهده ساده حرکت آب در حین تخلیه، شلنگ‌های استفاده شده برای اتصال پمپ و سیستم زهکش، به صورت کاملاً شفاف انتخاب شده‌اند.

### ۲.۳. آماده سازی نمونه‌ها

مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل مواد ریزدانه مربوط به سد باطله مجتمع مس سونگون، ماسه و رس هستند. روش Slurry deposition که توسط Suazo و همکاران [۱۱] ارائه شده، برای تهیه نمونه‌های آزمون انتخاب شده است و با اندکی اصلاح مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین ترتیب که ابتدا تیلینگ‌ها با همان میزان رطوبت طبیعی موجود به آرامی درون مخزن آزمایش ریخته می‌شوند. سپس، با توجه به مقدار مورد نظر برای درصد رطوبت اولیه ( $\omega_i$ ) نمونه‌های آزمایش، مقدار مشخصی آب به مصالح درون مخزن افزوده می‌گردد تا ارتفاع اولیه ( $h_i$ ) معادل ۳۰۰ میلی‌متر برای مخلوط حاصل شود. در ادامه، ذرات مصالح و آب با استفاده از یک همزن برقی به مدت حدود ده دقیقه با هم مخلوط می‌گردند تا یک توده تک لایه همگن ایجاد شود. سرعت عملکرد همزن بر روی دور کند تنظیم می‌شود تا از حبس حباب‌های هوا درون مخلوط جلوگیری گردد و در نتیجه، یک محیط کاملاً اشباع ایجاد شود. لازم به ذکر است که مخزن به طور کامل با مخلوط پر نمی‌شود ( $h_i < h_c$ )، تا در حین مخلوط شدن مصالح از پرتاب شدن آب و ذرات جامد به بیرون از مخزن اجتناب گردد. برای تولید نمونه‌های همگن ماسه‌ای و رسی، عمل مخلوط کردن ذرات جامد خشک با مقدار آب مورد نیاز به صورت لایه به لایه از پایین مخزن به سمت بالا در ضخامت‌های ۵۰ میلی‌متری تا رسیدن به ارتفاع اولیه ۳۰۰ میلی‌متر صورت می‌پذیرد. جدول ۱ مشخصات هر نمونه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- ویژگی‌های اولیه هر نمونه

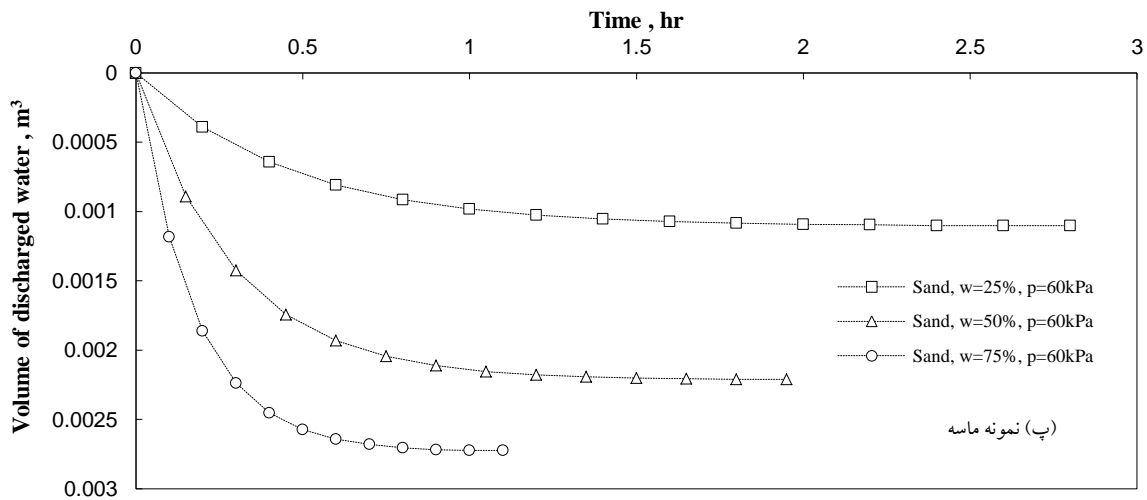
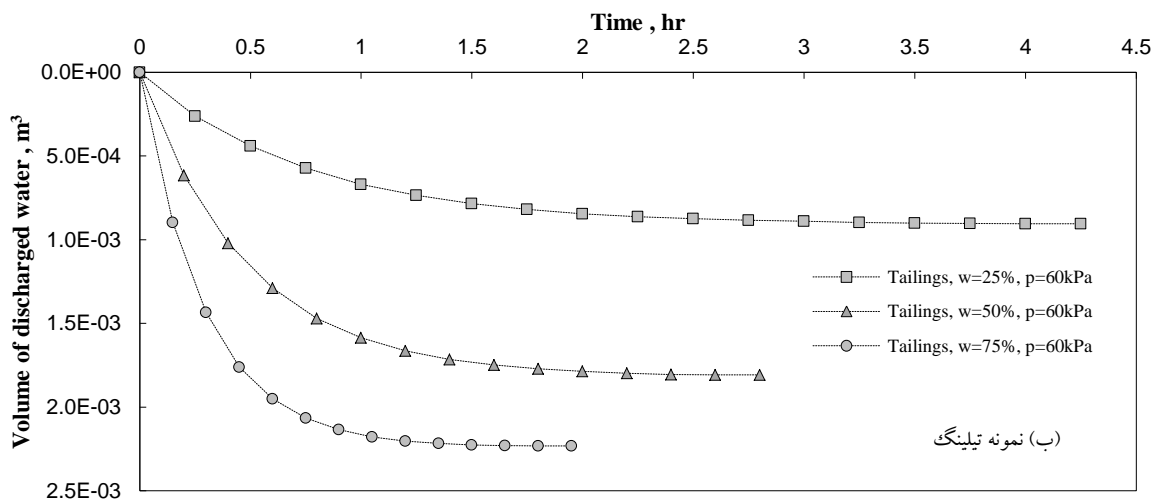
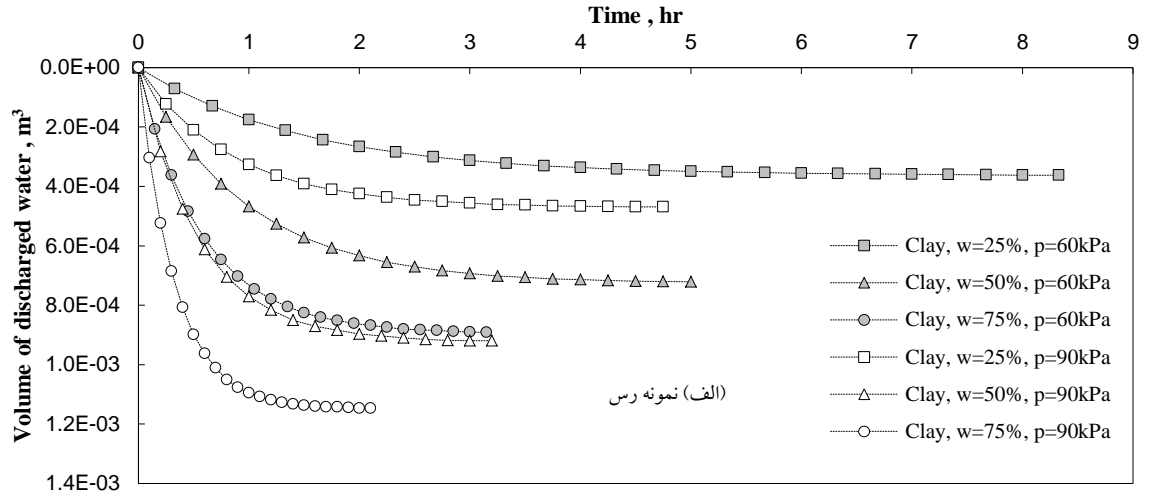
نمونه	نماد گروه بر اساس USCS	چگالی ویژه، $G_s$	وزن مخصوص اشباع، $\gamma_{sat}$ (کیلو نیوتن بر متر مکعب)		
			$\omega_i = 25\%$	$\omega_i = 50\%$	$\omega_i = 75\%$
ماسه	SP	2.65	19.55	16.77	15.23
مصالح ریزدانه باطله (تیلینگ)	ML	2.71	19.81	16.93	15.34
رس	CL	2.74	19.94	17.01	15.40

### ۳.۳. نحوه انجام آزمون

پس از آماده سازی نمونه، قسمت زیرین لوله زهکش به طول ۳۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۲/۷ میلی‌متر (معادل ۰/۵ اینچ) دقیقاً در نقطه مرکزی واقع بر سطح مصالح قرار می‌گیرد و به آرامی بطور کاملاً قائم به داخل توده هدایت شده و در سرتاسر آن نصب می‌شود. پس از قرار دادن درپوش و مهر و موم کردن مخزن، یک خلأ کامل در فضای بین درپوش و رویه فوقانی نمونه ایجاد می‌شود. در مرحله بعد، پمپ روشن می‌شود، در حالی که شیرهای مکش و زهکشی به ترتیب باز و بسته هستند. به محض اینکه گِیج خلأ، فشار مورد نظر را نشان دهد، آزمایش با باز کردن شیر زهکشی آغاز می‌شود به طوری که شدت مکش تولید شده در طول هر آزمون ثابت باقی می‌ماند. در حین آزمایش، جرم آب تخلیه شده از نمونه توسط ترازوی الکترونیکی واقع در زیر کپسول خلأ، اندازه‌گیری و حجم معادل آن بر اساس وزن مخصوص آب معادلسازی می‌شود. تغییر ضخامت نمونه نیز در مدت زمان مذکور به عنوان نشست سطحی قرائت می‌شود. در مطالعه حاضر، نمونه‌ها تحت دو فشار مکشی جداگانه معادل ۶۰ و ۹۰ کیلو پاسکال قرار می‌گیرند. توجه شود که در این پژوهش، جابجایی‌های جانبی نمونه ناچیز فرض می‌شوند. به عبارت دیگر، تغییر حجم نمونه صرفاً نتیجه نشست سطحی آن است. هر زمان که در طول دو ساعت متوالی مقدار نشست سطحی کمتر از ۰/۵ میلی‌متر افزایش پیدا کند، آزمایش با خاموش کردن پمپ مکش به پایان خواهد رسید. در این زمان، عملاً می‌توان توقف جریان تخلیه در شلنگ اتصال زهکش به کپسول خلأ را نیز به وضوح مشاهده کرد.

#### ۴. مشاهدات آزمایشگاهی و تفسیر نتایج

تغییرات مقدار حجم آب تخلیه شده از هر نمونه بر حسب مدت زمان اعمال مکش برای هر یک از مصالح در شکل ۲ رسم شده است.



شکل ۲ - تغییرات حجم آب تخلیه شده بر حسب زمان اعمال مکش

از بررسی نمودارهای موجود در شکل ۲ می‌توان دریافت که به طور کلی با افزایش زمان مکش، حجم آب تخلیه شده از نمونه افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در زمان‌های اولیه، زهکشی با نرخ بیشتری صورت می‌پذیرد، اما به تدریج شیب نمودار کاهش می‌یابد و پس از مدتی، اعمال مکش تأثیر چشمگیری بر روی تخلیه آب منفذی ندارد و نمودار به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند. این مقدار بیانگر حداکثر تغییر حجم قابل تحمیل بر نمونه تحت فرایند پیش بارگذاری خلأ است که به صورت نشست سطحی نهایی نمونه نمایان می‌شود. شکل عمومی همه نمودارها به گونه‌ای است که تغییرات حجم بر حسب زمان را می‌توان به خوبی به کمک یک تابع نمایی تخمین زد. همچنین، روند تغییرات نمودارهای مربوط به همه مصالح نشان می‌دهد که هر چه درصد رطوبت اولیه نمونه تحت فشار مکشی ثابت بیشتر باشد، اولاً تغییر حجم نهایی آن بزرگتر است و ثانیاً، به مدت زمان کوتاهتری برای اعمال مکش به منظور زهکشی آب منفذی نیاز خواهد بود. به علاوه، مقایسه نتایج حاکی از آن است که بیشترین و کمترین تأثیر اعمال مکش بر تخلیه آب منفذی به ترتیب، مربوط به نمونه‌های ماسه‌ای و رسی بوده است که علت آن را می‌توان به عواملی چون دانندگی، نحوه توزیع حفرات ذرات و نفوذپذیری هر یک از مصالح نسبت داد. ضمناً، به ازای یک درصد رطوبت ثابت، افزایش فشار مکشی سبب می‌شود تا نمونه تغییر حجم بزرگتری را در یک مدت زمان کوتاهتر تجربه کند. دلیل این امر را می‌توان به کمک مفهوم گرادیان هیدرولیکی تولید شده در نمونه بر اساس قانون جریان داری توجیه نمود. به عبارت دیگر، از آنجایی که افزایش فشار مکشی منجر به برقراری گرادیان هیدرولیکی شدیدتری در نمونه می‌گردد، سرعت جریان افزایش پیدا می‌کند. بر اساس نمودارهای مربوط به تغییرات حجم تخلیه آب منفذی بر حسب زمان مکش، می‌توان سرعت زهکشی از نمونه‌ها را به کمک رابطه (۳) محاسبه نمود:

$$v_{(t)} = \frac{1}{A_{(t)}} \frac{dV_{(t)}}{dt} \quad (3)$$

که در آن  $v_{(t)}$  و  $A_{(t)}$  به ترتیب، سرعت زهکشی و سطح مقطع عمود بر جریان عبوری در لحظه  $t$  و  $V_{(t)}$  نشان دهنده حجم آب تخلیه شده از نمونه است.

به دلیل عدم دسترسی به تابع دقیق  $V = f(t)$  برای هر نمونه، می‌توان برای محاسبه متوسط سرعت زهکشی، رابطه (۳) را به صورت رابطه (۴) ساده‌سازی نمود:

$$\bar{v}_{(t)} = \frac{1}{A_{(t)}} \frac{\Delta V_{(t)}}{\Delta t} \quad (4)$$

که در آن  $\bar{v}_{(t)}$  و  $\bar{A}_{(t)}$  به ترتیب، مقادیر متوسط سرعت زهکشی و سطح مقطع عمود بر جریان عبوری در هر بازه زمانی معین  $\Delta t$  است.

بر اساس مشخصات آزمایش، می‌توان پارامترهای سطح مقطع متوسط و تغییرات حجم تخلیه را به ترتیب، به صورت روابط (۵) و (۶) تعریف کرد:

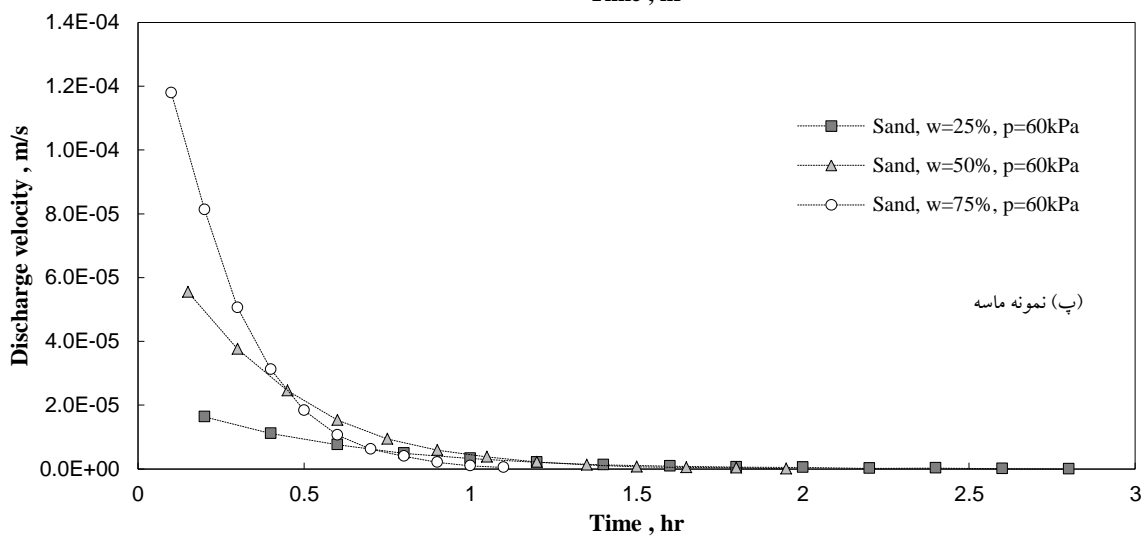
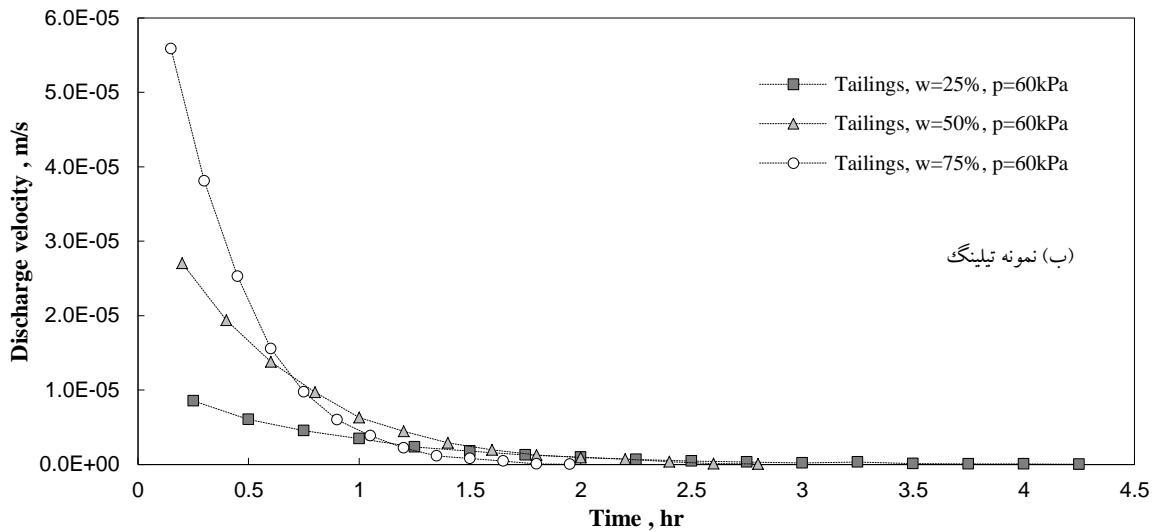
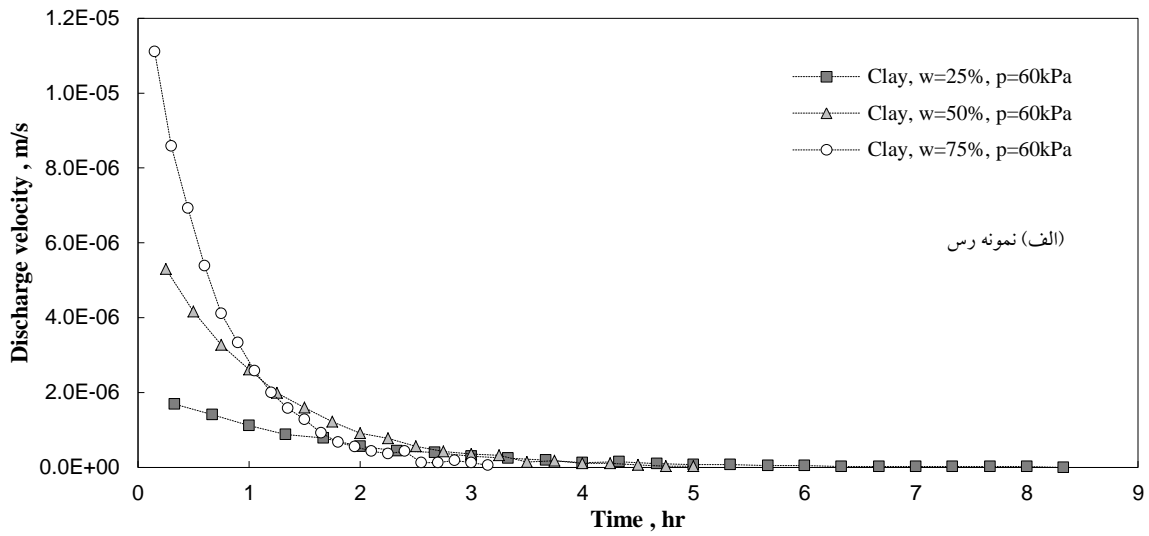
$$\bar{A}_{(t)} = 2\pi r_{eq} \left[ h_i - \frac{V_{(t)}}{\pi(R^2 - r_w^2)} \right] \quad (5)$$

$$\Delta V_{(t)} = V_{(t)} - V_{(t-\Delta t)} \quad (6)$$

که در آن  $r_{eq}$  شعاع معادل نمونه برای عبور جریان،  $h_i$  ارتفاع اولیه نمونه،  $R$  شعاع داخلی مخزن آزمایش و  $r_w$  شعاع لوله زهکش است. با توجه به آن که می‌توان  $r_{eq}$  را در حدود دو تا چهار برابر شعاع لوله زهکش در نظر گرفت [۱۳]، با فرض  $r_{eq} = 3r_w$  رابطه (۷) برای محاسبه سرعت زهکشی متوسط قابل تولید است:

$$v_{(t)} = \frac{V_{(t)} - V_{(t-\Delta t)}}{6\pi r_w \left[ h_i - \frac{V_{(t)}}{\pi(R^2 - r_w^2)} \right] \Delta t} \quad (7)$$

بدین ترتیب، با بهره‌گیری از رابطه (۷) می‌توان نمودار تغییرات سرعت زهکشی آب منفذی برای هر یک از مصالح آزمایش را به صورت نمایش داده شده در شکل ۳ رسم نمود.



شکل ۳- تغییرات سرعت زهکشی بر حسب زمان اعمال مکش

بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل ۳، حاکی از آن است که به طور کلی با افزایش زمان اعمال مکش، سرعت تخلیه کاهش پیدا می‌کند؛ به گونه‌ای که هر چه رطوبت اولیه نمونه‌ها بیشتر باشد، نرخ کاهش سرعت زهکشی بزرگتر است. همچنین، به ازای فشار مکشی ثابت، جریان در نمونه‌ای با رطوبت اولیه کمتر، آهسته‌تر از سایر نمونه‌ها صورت می‌پذیرد. به علاوه، از یک لحظه معین به بعد، سرعت جریان به قدری کوچک می‌شود که می‌توان تغییرات آن بر حسب زمان را نسبتاً ثابت در نظر گرفت. زمان متناظر با این رخداد صرف نظر از درصد رطوبت اولیه برای نمونه‌های ماسه، تیلینگ و رس به ترتیب، معادل ۰/۷، ۱/۳۵ و ۲/۴ ساعت می‌باشد. ضمناً، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که جریان آب از نمونه‌های ماسه‌ای به مراتب سریعتر از نمونه‌های تیلینگ و خاک رس تخلیه می‌شود. با توجه به نتایج گزارش شده در برخی از مطالعات پیشین [۱۴-۱۲]، اولاً محدوده تغییرات سرعت جریان برای هر یک از مصالح مورد قبول و قابل صحت‌سنجی است. ثانیاً، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از روش پیش بارگذاری خلأ به طور مناسبی سبب افزایش سرعت جریان شعاعی و تسریع فرایند تغییر حجم نمونه‌ها شده است.

## ۵. نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر، اثر تراز فشار مکشی اعمالی و درصد رطوبت اولیه خاک بر حجم تخلیه و سرعت زهکشی آب منفذی ناشی از اعمال مکش به نمونه‌های اشباع ماسه، رس و مصالح باطله ریزدانه مربوط به معدن مس سونگون مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور با طراحی یک سیستم آزمایشگاهی با قابلیت تنظیم فشار مکشی، فرایند پیش بارگذاری خلأ بر روی نمونه‌های واقع در یک مخزن استوانه‌ای انجام شد و با استخراج یک رابطه ریاضی جدید، سرعت جریان شعاعی از روی نمودارهای حجم آب تخلیه شده تعیین گردید. نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می‌دهند که شدت جریان با تقریب بسیار خوبی از یک تابع نمایی پیروی می‌کند. از طرفی، با افزایش فشار مکش اعمالی و درصد رطوبت اولیه نمونه، در یک زمان معین سرعت زهکشی افزایش می‌یابد. به طور کلی با افزایش زمان مکش، حجم آب تخلیه شده از نمونه افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در لحظات اولیه آزمون، زهکشی با نرخ بیشتری صورت می‌پذیرد، اما به تدریج شیب نمودار کاهش می‌یابد و پس از مدتی، اعمال مکش تأثیر قابل توجهی بر روی تخلیه آب منفذی ندارد و نمودار به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند. این مقدار بیانگر حداکثر تغییر حجم قابل تحمیل بر نمونه تحت فرایند پیش بارگذاری خلأ است که به صورت نشست سطحی نهایی نمونه نمایان می‌شود.

## ۶. مراجع

1. Terzaghi, K. (1943), "Theoretical Soil Mechanics", Wiley and Sons, Inc., New York, 526 pages.
2. Kacimov, A. R. and Obnosov, Y. V., "Infiltration-Induced Phreatic Surface Flow to Periodic Drains", Applied Mathematical Modelling, 91(1), pp 989-1003.
3. Das, B. M. and Sobhan, K. (2013), "Principles of Geotechnical Engineering", Cengage Learning, Technology and Engineering, 8<sup>th</sup> Edition, USA, 770 pages.
4. Kjellman, W. (1952), "Consolidation of Clay by means of Atmospheric Pressure", Proc. of a Conference on Soil Stabilization. Boston: MIT Press.
5. O'Kelly, B.C. (2015), "Case studies of Vacuum Consolidation Ground Improvement in Peat Deposits", Environmental Science, Book Chapter, pp 315-345.
6. Wang, J., Cai, Y., Jianjun, M. and Chu, J. (2016), "Improved Vacuum Preloading Method for Consolidation of Dredged Clay-Slurry Fill", Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 142(11), pp 601-605.
7. Indraratna, B., Zhong, R. and Rujikiatkamjorn, C. (2016), "An Analytical Model of PVD-assisted Soft Ground Consolidation", Procedia Engineering, 143, pp 1376-1383.
8. Hong, F. and Jin, C. (2020), "Performance of a Winged PVD (WPVD) for Vacuum Consolidation of Soft Clayey Deposits", Transportation Geotechnics, 24, pp 370-378.
9. Chai, J., Lu, Y. Hong, F. (2021), "Groundwater Level under Vacuum Consolidation", Ground Improvement, doi: 10.1680/jgrim.19.00008.

۱۰. احمدی، ع. و بلوری بزاز، ج. (۱۳۹۸)، "پاسخ تحلیلی نشست سطحی خاک ریزدانه اشباع حاصل از تکنیک تحکیم خلأ"، یازدهمین کنگره ملی

مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، ایران، ۱۱-۱۲ اردیبهشت، <https://civilica.com/doc/917889>



دوازدهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ تیرماه ۱۴۰۰  
دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران



11. Suazo, G., Fourie, A., Doherty, J. and Hassan, A. (2016), “*Effects of Confining Stress, Density and Initial Static Shear Stress on the Cyclic Shear Response of Fine-Grained Unclassified Tailings*”, Géotechnique, 66, pp 401-412.
12. Zhou, Y., Wang, P., Shi, L., Cai, Y. and Wang, J. (2021), “*Analytical Solution on Vacuum Consolidation of Dredged Slurry Considering Clogging Effects*”, Geotextiles and Geomembranes, 49(3), pp 842-851.
13. Kianfar, K., Indraratna, B. and Rujikiatkamjorn, C. (2013), “*Radial Consolidation Model Incorporating the Effects of Vacuum Preloading and Non-Darcian Flow*”, Géotechnique, 63(12), pp 1060-1073.
14. Alabi, O., Ojurongbe, T. A. and, Sedara, S. (2019), “*Gradients of Seepage Velocity Model for Contaminant Transport Prediction*”, Scientific African, 4, pp 1-6.