

سرعت جریان در حین تحکیم شعاعی باطله دوغابی معدن مس سونگون تحت پیش بارگذاری خلأ

علی احمدی^۱، جعفر بلوری بزاز*^۲

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۱۱

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۰۳

چکیده

ارزیابی سرعت جریان در یک محیط متخلخل همواره یکی از مسائل حائز اهمیت در مهندسی ژئوتکنیک است. باطله‌های معدنی با رطوبت بالاتر از حد روانی به شکل دوغاب قابلیت فشردگی زیادی دارند و برای ذخیره‌سازی مناسب آن‌ها در مخزن سد باطله به یک روش بهسازی مانند پیش‌بارگذاری خلأ نیاز است. مطالعه حاضر، به بررسی آزمایشگاهی تأثیر رطوبت نمونه و شدت فشار مکش اعمالی بر تغییرات زمانی سرعت جریان در محیط پرداخته است. آزمون‌ها بر روی نمونه‌های اشباع مصالح باطله ریزدانه مربوط به معدن مس سونگون انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که نمودارهای حجم آب تخلیه شده و کرنش قائم نمونه‌ها با تقریب بسیار خوبی از یک تابع نمایی بر حسب زمان پیروی می‌کند. با فرض برقراری جریان داری در مصالح آزمون، روابطی برای تعیین سرعت جریان بر اساس دو رویکرد نرخ تخلیه آب منفذی و نرخ کرنش قائم نمونه‌ها ارائه می‌شود. سپس، به مقایسه نتایج حاصل از دو رویکرد در محاسبه سرعت جریان و تفسیر مشاهدات آزمایشگاهی پرداخته می‌شود. نتایج همچنین نشان می‌دهند که با افزایش رطوبت نمونه و فشار مکش، سرعت جریان افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر آن، پیش‌بارگذاری خلأ تا دستیابی نمونه‌ها به یک نسبت تخلخل معین ادامه پیدا می‌کند. در ادامه، یک رابطه نوین برای محاسبه متوسط درجه تحکیم لایه بر اساس نسبت سرعت جریان پیشنهاد می‌شود و سرانجام، رابطه پیشنهادی با تخمین مقدار ضریب قابلیت فشردگی حجمی برای داده‌های مطالعه حاضر به کمک آزمون ادنومتر و یک پروژه بهسازی پیش‌بارگذاری خلأ در ساحل دالیان چین با دقت بسیار خوبی صحت سنجی می‌شود.

کلید واژه‌ها: سرعت جریان، نرخ کرنش، فشار مکش، رطوبت، پیش بارگذاری خلأ.

۱. دانشجوی دکترای مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۲. دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران bolouri@um.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

زمین‌های نرم با ظرفیت باربری اندک ناشی از درجه رطوبت بسیار بالا، تحت بارهای حاصل از اعمال سازه و نیز وزن خود ذرات، نشست‌های بزرگی را در بلندمدت تجربه خواهند کرد. معمولاً برای حل این مشکل از تکنیک‌های بهسازی یا تسلیح استفاده می‌شود. پیش‌بارگذاری یک رویکرد رایج برای بهسازی خاک است که معمولاً به فشردن سازی زمین قبل از ساخت سازه اصلی اشاره دارد. پیش‌بارگذاری به کمک اعمال سربار قائم یا سربارگذاری (Surcharging) و پیش‌بارگذاری خلاء (Vacuum preloading) یا در اصطلاح تحکیم خلاء جزو روش‌های متداول برای پیش‌بارگذاری خاک هستند که به طور گسترده در پروژه‌های ژئوتکنیکی به کار گرفته می‌شوند. از آنجا که با اتمام پیش‌بارگذاری خلاء بخش عمده نشست تحکیمی اولیه اتفاق می‌افتد، می‌توان از اثرات نامطلوب مرتبط با نشست‌های بلندمدت جلوگیری کرد.

نخستین بار، تحکیم خلاء بر مبنای اثر فشار جو بر تغییرات اضافه فشار منفذی برای بهسازی خاک‌های رسی نرم با رطوبت بالا پیشنهاد شد (Kjellman, 1952). این روش کمک می‌کند تا از طریق استهلاک سریع فشار آب منفذی به کمک فرایند آبگیری (Dewatering) خاک نرم در مدت زمان کوتاهی به نشست نهایی دست یابد (Zhang et al., 2022). از پیش‌بارگذاری خلاء می‌توان به طور مؤثر در بهسازی خاک‌های بسیار نرم و مناطق متشکل از دوغاب (Slurry) که معمولاً استفاده از تکنیک سربارگذاری در آن‌ها دشوار است، بهره گرفت (Lei et al., 2021). منظور از دوغاب، مخلوطی از ذرات جامد معلق در یک سیال است که رطوبت آن بزرگتر از حد روانی می‌باشد. حداقل اندازه ذرات جامد دوغاب، یک میکرون است و با گذشت زمان، ذرات با یک سرعت معین در سیال ته نشین می‌شوند (Singh, 2017).

تحت اعمال مکش درون یک نمونه خاک با درجه رطوبت بالا، آب منفذی ابتدا به صورت شعاعی به طرف سیستم زهکش جریان می‌یابد و سپس از طریق یک لوله مخصوص مانند زهکش قائم پیش‌ساخته (Prefabricated vertical

drain: PVD) به سمت بالا حرکت می‌کند که در اثر خروج آب مقداری تغییر حجم در محیط ایجاد می‌شود. علت تسریع فرایند تحکیم شعاعی ناشی از اعمال مکش، افزایش تنش مؤثر حاصل از استهلاک سریع اضافه فشار منفذی است. از آنجا فشار خلاء از نوع همسانگرد است، خاک در تمام جهات افقی و قائم دچار کرنش می‌شود (Lee et al., 2006; Rondonuwu, 2015; Indraratna et al., 2016b)؛ با این وجود، مقدار کرنش‌های جانبی در مقایسه با کرنش‌های قائم بسیار ناچیز هستند (Chai et al., 2005; Indraratna et al., 2013; Mesri and Khan, 2012; Chai et al., 2007) و می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر کرد.

بر خلاف روش سربارگذاری که در آن افزایش تنش مؤثر ناشی از افزایش تنش کل انجام می‌شود، در حین بارگذاری خلاء، تنش کل ثابت باقی می‌ماند و نشست صرفاً به دلیل افزایش تنش مؤثر در نتیجه‌ی کاهش فشار منفذی در خاک صورت می‌پذیرد (Leong et al., 2000; Loan et al., 2006; Rondonuwu, 2015).

روش صفحه هوابندی شده (Airtight sheet) و روش خلاء-زهکش دو رویکرد میدانی رایج برای انجام پیش‌بارگذاری خلاء هستند (Chai and Carter, 2011). به منظور ارزیابی پیش‌بارگذاری خلاء در آزمایشگاه، معمولاً از آزمون ادئومتری با افزودن قابلیت اعمال مکش به نمونه (Chai et al., 2005; Chai et al., 2009) یا سایر دستگاه‌های توسعه یافته برای تحکیم شعاعی بهره گرفته می‌شود. به عنوان مثال، وو و همکاران (Vu et al., 2016) تحکیم خلاء خاک رس نرم را با استفاده از یک دستگاه آزمایش نقطه چاه خلاء (Vacuum well point) بررسی کردند. ژو و همکاران (Xu et al., 2016) نشان دادند که در انجام پیش‌بارگذاری خلاء برای مدیریت دوغاب لایروبی شده، می‌توان به جای لوله زهکش از شالی گندم نیز استفاده نمود.

با توجه به نوع پروژه و ویژگی‌های زمین ساختگاه مورد نظر، مطالعات متعددی نیز در مورد پاسخ خاک‌های نرم به پیش‌بارگذاری خلاء در ترکیب با سایر روش‌های بهسازی، از

باطله‌های نرم اورانیوم با روش سربارگذاری برای کنترل نشست مناطقی با درجه تحکیم اندک توسط مرکل و همکاران (Merkel et al., 2011) مورد مطالعه قرار گرفته است. ضمناً، تحلیل پایداری سدهای باطله توسط نجفی و یاراحمدی (۱۳۸۷) انجام شده است و در پژوهش دیگری، روستا و همکاران (۱۳۹۶) به ارزیابی پارامترهای مقاومت برشی مصالح دامپ باطله معدن شماره یک گل گهر سیرجان پرداخته‌اند.

با این وجود، استفاده از تکنیک پیش‌بارگذاری خلأ برای بهسازی ساختگاه‌های متشکل از باطله تنها در مطالعات محدودی در دسترس است. به طور نمونه، شانگ و ژانگ (Shang and Zhang, 1999) به ارزیابی میدانی کارایی پیش-بارگذاری خلأ در وقوع نشست منطقه‌ای حاوی باطله محلول-های خاکستر سدیم کربنات پرداختند و دریافتند که استفاده از پیش بارگذاری خلأ به خوبی سبب تحکیم لایه شده است. ارزیابی تثبیت باطله ماسه‌های نفتی تحت تحکیم خلأ نیز با در نظر گرفتن رفتار غیراشباع مواد، با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی اجزای محدود انجام شده است (Abazari, 2013). به علاوه، بهسازی الکتروکینتیک همراه با بارگذاری خلأ برای حذف آب موجود در باطله ماسه‌های نفتی توسط ژانگ (Zhang, 2016) مورد مطالعه قرار گرفته است.

بررسی‌های انجام شده حاکی از آن است که تمرکز مطالعات پیشین بر روی نشست نمونه‌ها و استهلاک اضافه فشار آب منفذی در حین اعمال خلأ بوده است. از طرفی، اولاً برقراری خلأ یا فشار مکشی سبب ایجاد گرادیان هیدرولیکی و وقوع جریان در محیط متخلخل می‌شود (Li et al., 2018) و ثانیاً، نرخ استهلاک اضافه فشار منفذی و تغییر حجم نمونه تحت بارگذاری، با نرخ جریان در ارتباط هستند.

یکی از کاربردهای مطالعه جریان در محیط متخلخل، بررسی تحکیم ناشی از زهکشی آب منفذی در حین پیش‌بارگذاری است. با توجه به اینکه در پیش‌بارگذاری خلأ به کمک زهکش قائم، تحکیم از نوع شعاعی است، اندازه‌گیری سرعت جریان در حالت زهکشی شعاعی می‌تواند به کنترل درجه

جمله الکترواسموزی (Jin, 2009; Wu and Hu, 2011; Wang et al., 2018)، تراکم دینامیکی (Deng and Xu, 2010)، سربارگذاری و حرارت‌دهی (Fu-lai et al., 2017)، استفاده از ستون‌های سنگی محصور شده با ژئوستتیک (Kumar et al., 2013)، روش شکست پنوماتیک (Songyu et al., 2016) و بهسازی با افزودن آهک (Wang et al., 2017) و لخته‌سازی چندگانه (Wang et al., 2019a) انجام شده است.

از نظر تحلیلی، خروجی‌های مسأله پیش‌بارگذاری خلأ شامل راه‌حلی برای محاسبه متوسط اضافه فشار آب منفذی و کرنش قائم لایه خاک بر حسب زمان اعمال خلأ به ازای فرضیات و شرایط مرزی مختلف (Geng et al., 2012; Kianfar et al., 2013; Indraratna et al., 2016a; Perera et al., 2017; Sun et al., 2020) است.

در بیشتر تحقیقات انجام شده برای ارزیابی جنبه‌های مختلف تحکیم خلأ، خاک نرم مورد مطالعه از نوع رس، لای و تورب (Peat) بوده است. پیش‌بارگذاری خلأ برای مناطق حاوی تورب اشباع با رطوبت بسیار بالا (۱۱۰٪ تا ۴۷۰٪ (Ariyaratna, 2011)، ۴۳۰٪ تا ۸۶۰٪ (Cognon, 1994)، ۵۰۰٪ تا ۲۰۰۰٪ (Pichan and O'Kelly, 2013)، ۳۰۰٪ تا ۹۵۰٪ (O'Kelly, 2015) با موفقیت انجام و سبب کاهش رطوبت زمین‌ها شده است. مناطق دارای دوغاب رس و لجن فاضلاب نیز مقادیر رطوبت بسیار بالایی (به عنوان مثال، ۵۱۴٪ (Chu et al., 2012)) دارند و نیازمند بهسازی هستند. علاوه بر رس، لای و تورب، مناطق حاوی باطله‌های معدنی نیز بسیار تراکم پذیر هستند و در نتیجه کرنش‌های بزرگی (در محدوده ۱۵٪ تا ۵۰٪) را تحت وزن خود ذرات و بارهای اعمال شده تجربه می‌کنند (Wels et al., 2000; Sheridan et al., 2012; Bonin et al., 2014; Lai et al., 2016; Qin et al., 2021).

باطله‌های ریزدانه معمولاً مانند خاک‌های نرم رفتار می‌کنند (Iftekhhar et al., 2018). از این رو، بهره‌گیری از روش‌های بهسازی زمین برای مدیریت صحیح نشست لایه‌های تشکیل شده از مواد باطله نیز ضروری است. به طور مثال، تثبیت

کانی‌های فلزی به طور گسترده در سازندهای زمین شناسی حوضه آبریز ارس در ایران وجود دارند. معدن مس سونگون از نظر صنعتی و ویژگی‌های زمین شناسی اهمیت بالایی در منطقه مذکور دارد. این معدن از سال ۱۳۶۹ فعال است و دارای ذخایری تقریباً معادل ۸۰۰ میلیون تن سنگ مس با عیار متوسط ۰/۶۷٪ می باشد، به طوری که تولید حداقل ۳۸۰ میلیون تن باطله مس طی ۲۵ سال آینده برآورد می‌شود. از نظر زمین شناسی، منطقه مورد مطالعه در پهنه آتشفشانی اُلِگوسن قرار دارد. این منطقه شامل سنگ‌های آتشفشانی کالک آلکالین، عمدتاً تراکی‌اندزیت، داسیت و آندزیت با گدازه بازالتی است. نهشته‌های مس پورفیری سونگون در سنگ‌های تراکی‌اندزیت که حاوی لایت پورفیری خاکستری کم رنگ با هوازدگی متوسط تا شدید و دارای مقاومت متوسط تا بالا است، یافت می‌شود. رنگ مناطق تحت تأثیر نفوذ آب زیرزمینی به قهوه‌ای تغییر می‌کند و با افزایش عمق، آثاری از کانی‌های سولفیدی (از جمله پیریت و کالکوپیریت) در مصالح یافت می‌شود. آندزیت در زمره سنگ‌های آتشفشانی ریزدانه قرار می‌گیرد. داسیت بافتی ریزدانه (آفانیتیک) تا پورفیری دارد و از نظر ترکیب بین آندزیت و ریولیت حد واسط است. اندازه متوسط دانه‌های آندزیت و داسیت در محدوده ۲۷ تا ۸۳ میکرون می‌باشد. به منظور بررسی دقیق‌تر رابطه دانه‌بندی مصالح باطله معدن مس سونگون با زمین شناسی منطقه، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مصالح تعیین و در جدول ۱ گردآوری شده است.

تحکیم تحت پیش‌بارگذاری خلأ دوغاب‌ها کمک نماید. با این وجود، تاکنون در هیچ یک از پژوهش‌های گذشته به طور ویژه به تعیین سرعت جریان آب منفذی در خاک تحت پیش-بارگذاری خلأ پرداخته نشده است.

با توجه به این امر، پژوهش حاضر با انجام آزمون‌های کوچک مقیاس به اندازه‌گیری سرعت جریان آب منفذی در مصالح ریزدانه با رطوبت بسیار بالا به شکل دوغاب در حین اجرای فرایند پیش‌بارگذاری خلأ می‌پردازد. بدین ترتیب، روابطی برای محاسبه سرعت جریان بر اساس دو رویکرد استفاده از «نرخ تخلیه» و «نرخ کرنش» ارائه و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه خواهد شد. دوغاب‌های مورد مطالعه در این پژوهش، مربوط به مصالح باطله معدن مس سونگون هستند که در مخزن سد باطله ذخیره می‌شوند و هدف اصلی امکان‌سنجی استفاده از تکنیک بهسازی پیش‌بارگذاری خلأ برای تسریع نشست تحکیمی باطله‌های دوغابی مس است. تحمیل وقوع نشست‌های بلندمدت در یک دوره کوتاه مدت سبب می‌شود تا بتوان در یک بازه زمانی معین، مقدار بیشتری از باطله‌ها را در مخزن سد ذخیره نمود که این امر باعث بهینه‌سازی استفاده از ظرفیت مخزن سد باطله خواهد شد.

۲. روش پژوهش

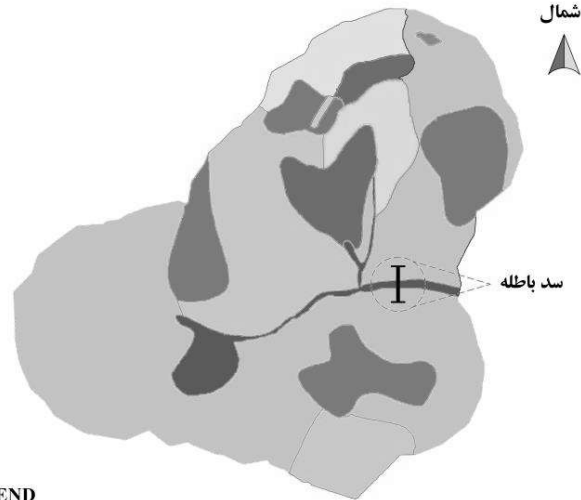
۲-۱. ویژگی‌های زمین شناسی ساختگاه

معدن مس سونگون یک معدن روباز در ناحیه شمال غربی ایران (43° 46' E and 38° 42' N) و در نزدیکی رودخانه ارس به فاصله ۱۲۰ کیلومتری تبریز واقع است (شکل ۱).



(ب) موقعیت معدن مس سونگون در نقشه آذربایجان شرقی

(الف) نقشه ایران



LEGEND

- Basaltic tuff
- Volcanosedimentary rocks
- Tuff breccia
- Quaternary alluvium
- Calcareous volcanic rocks
- Rhyodacite
- Dacite
- Trachyandesite
- Shale

(پ) محدوده معدن مس سونگون

شکل ۱. نقشه ساده شده سنگ شناسی معدن مس سونگون

جدول ۱. ویژگی‌های باطله‌های برداشت شده از معدن مس سونگون

(a) Physical properties			(b) Chemical analysis		
Property	Value	Standard	Components		% by dry weight
e_0 , Initial void ratio	1.026-3.467	-	Silica	SiO ₂	63.98
pH of water	6.8-7.9	ASTM-D1293	Aluminum oxide	Al ₂ O ₃	15.45
G _s , Specific gravity	2.71	ASTM-D854	Iron oxide	Fe ₂ O ₃	3.57
LL [%], Liquid limit	25	ASTM-D4318	Calcium oxide	CaO	5.32
PL [%], Plastic limit	22		Magnesium oxide	MgO	3.71
PI [%], Plasticity index	3		Sulfur trioxide	SO ₃	1.96
D ₅₀ [mm], Mean size of particles	0.055	ASTM-D422	Sodium oxide	Na ₂ O	1.09
C _c , Coefficient of gradation	1.036	ASTM-D2487	Potassium oxide	K ₂ O	2.78
C _u , Uniformity coefficient	1.144		Cupric oxide	CuO	2.14

با توجه به داده‌های جدول ۱، اولاً، به دلیل آن که رطوبت طبیعی مواد باطله بیشتر از مقدار حد روانی می‌باشد و مقاومت برشی پره (در محدوده مقادیر رطوبت طبیعی آن‌ها) بسیار کوچک (کمتر از ۵ کیلوپاسکال) است، بر اساس تعریف ارائه شده توسط بو و همکاران (Bo et al., 2005) می‌توان باطله‌های معدن مس سونگون را در گروه خاک‌های بسیار نرم دسته‌بندی کرد. ثانیاً، بر اساس داده‌های حاصل از تحلیل شیمیایی مصالح در جدول ۱، بخش عمده باطله‌های معدن مس سونگون شامل سیلیس (SiO_2) است که اندازه ذرات آن-ها بسیار کوچک و در دامنه ۲۶۲ تا ۷۲۴ نانومتر (۰/۲۶۲ تا ۰/۷۲۴ میکرون) متغیر می‌باشد. پس از آن، آلومینیوم اکسید (Al_2O_3) دارای بیشترین سهم در مصالح است که محدوده قطر دانه‌ها بین ۱/۵ میکرون تا ۴/۲ میکرون می‌باشد. قطر متوسط سایر اجزای تشکیل دهنده مصالح در محدوده ۴ تا ۷۲ میکرون است. این امر نشان می‌دهد که باطله‌های معدن مس سونگون رفتاری شبیه خاک‌های ریزدانه (لای و رس) دارند و در نتیجه توجه به مسأله تحکیم برای آن‌ها حائز اهمیت است. به منظور ارزیابی بیشتر، منحنی دانه‌بندی باطله‌های مس در شکل ۳ ارائه و با منحنی دانه‌بندی تعدادی از مصالح باطله مربوط به مناطق دیگر مقایسه گردیده است. با توجه به سیستم متحد طبقه‌بندی خاک برای خاک‌های ریزدانه (بر اساس استاندارد ASTM-D7928) باطله‌های معدن مس سونگون مصالحی با دانه‌بندی یکنواخت به اندازه لای با پلاستیسیته کم (ML) هستند.

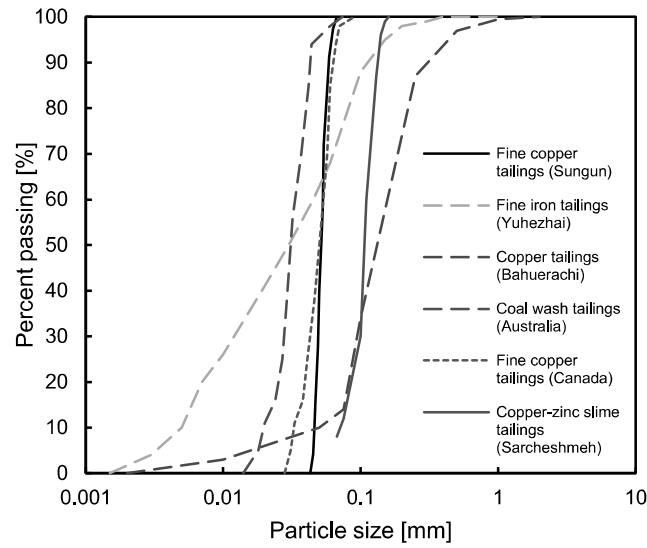
۲-۲. مصالح مصرفی

سد باطله سونگون دارای چهار قسمت اصلی شامل پی، سد آغازین (Starter dam)، آب بند ماسه‌ای (Sand dyke) و مواد لجنی (Slimes) باطله مس است (Naeini and Akhtarpour, 2018). مصالح مورد استفاده در این پژوهش شامل بخش ریزدانه مواد باطله مس هستند. باطله‌ها از نزدیکی سد باطله معدن مس سونگون (شکل ۲-الف) انتخاب شده‌اند. باطله‌ها مخلوطی از ذرات معدنی ریز و آب به شکل دوغاب هستند

(شکل ۲-ب) که رطوبت طبیعی آن‌ها در محل با توجه به نقاط مختلف بین ۳۸٪ تا ۱۲۷٪ می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های زمین شناسی باطله‌های معدن مس سونگون، انتظار می‌رود که لایه‌های تشکیل شده در مخزن سد نشست‌های بزرگی را در بلندمدت تجربه کنند که این امر استفاده از یک تکنیک بهسازی مناسب را به منظور تسریع نشست‌ها ضروری می‌کند. در مطالعه حاضر، به دلیل رطوبت بالای مصالح مذکور و با توجه به مطالب بیان شده در بخش مقدمه، روش پیش‌بارگذاری خلأ برای انجام پژوهش انتخاب شده است.

۲-۳. دستگاه آزمون

با توجه به هدف پژوهش، قرار است رفتار مصالح مورد نظر تحت پیش‌بارگذاری به کمک تحکیم خلأ در قالب مدل-سازی آزمایشگاهی ارزیابی گردد. بدین منظور، نمونه‌های باطله مس به ازای مقادیر مختلف رطوبت، قطر زهکش و شدت فشار مکشی تحت آزمایش قرار می‌گیرند تا سرعت زهکشی شعاعی آب منفذی و کرنش قائم ناشی از پیش‌بارگذاری خلأ به دست آید. با توجه به نحوه عملکرد زهکش‌ها و ناحیه مؤثر پیرامون لوله‌های نصب شده در خاک، معمولاً برای تحلیل رفتار تحکیمی، شکل نمونه‌ها به صورت استوانه‌ای در نظر گرفته می‌شود تا تداعی کننده یک سلول واحد (Unit cell) باشند. در این راستا، یک دستگاه آزمایشگاهی تحکیم خلأ طراحی و ساخته شده است. دستگاه آزمایش از شش بخش اصلی شامل مخزن مصالح، پمپ خلأ، محفظه خلأ، فشارسنج خلأ، زهکش قائم، شیرهای تنظیم کننده (مکش، تخلیه و زهکشی)، درپوش مخزن و شلنگ‌های اتصال دهنده در کنار قطعات جانبی دیگر مطابق شکل ۴ تشکیل شده است. مخزن مصالح یک استوانه صلب با جداره-های کاملاً صاف از جنس شیشه شفاف دارای قطر داخلی (D) و ارتفاع کل (h) به ترتیب، معادل ۱۵۰ میلی‌متر و ۴۵۰ میلی‌متر است. استفاده از شیشه صاف سبب کاهش اصطکاک میان مصالح و جداره مخزن می‌شود، به گونه‌ای که می‌توان فرض کرد اثر اصطکاک دیواره بر روی نتایج قابل اغماض است.



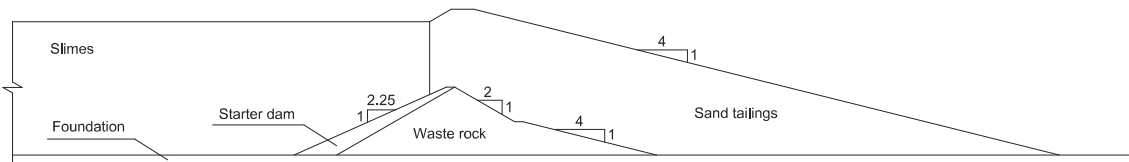
شکل ۳. منحنی دانه‌بندی باطله‌های معدن مس سونگون و معادن دیگر



(ب) مواد باطله مس استخراج شده

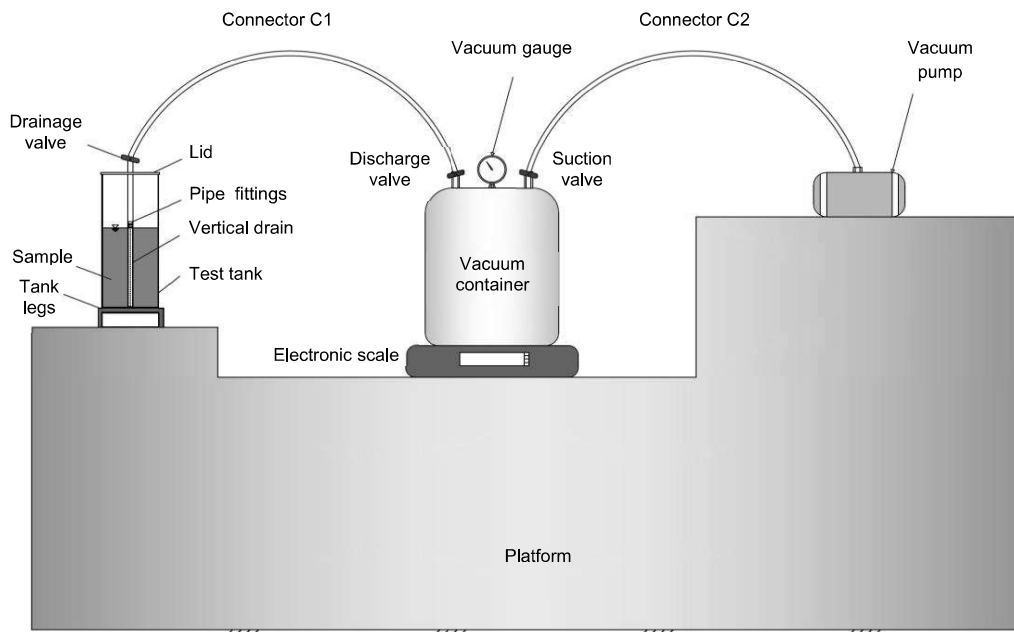


(الف) نمای سد باطله



(ب) مقطع عرضی سد باطله (Naeni and Akhtarpour, 2018)

شکل ۲. تصاویر سد باطله سونگون و باطله‌های مس



شکل ۴. نمای شماتیک پیکربندی بخش‌های دستگاه آزمون پیش‌بارگذاری خلأ

به جای بهره‌گیری از زهکش قائم پیش ساخته (PVD) برای زهکشی آب منفذی، در این پژوهش از یک لوله مشبک فیلتردار به عنوان زهکش مکشی 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 پروپیلن تعبیه شده است. قطر درونی و بیرونی لوله زهکش مکشی به ترتیب ۱۲ میلی‌متر و ۱۶ میلی‌متر و طول مسیر زهکشی قائم آن ۳۰۰ میلی‌متر می‌باشد. انتهای لوله زهکش بسته است. در عمل، حرکت برخی از ذرات بسیار ریز همراه با آب به سمت فیلتر، می‌تواند منجر به گرفتگی شدید منافذ جداره PVD شود (Deng et al., 2009). برای غلبه بر محدودیت ذکر شده، با توجه به حداقل اندازه ذرات باطله مس (بزرگتر از ۴۰ میکرون مطابق شکل ۳)، هر دو دیواره داخلی و خارجی لوله زهکش کاملاً با دو قطعه پارچه الک فلزی ضد زنگ با بعد چشمه ۳۸ میکرون (معادل مش الک #400) به عنوان لایه‌های فیلتر پوشانده شده است. چشمه‌های فیلتر فقط به آب منفذی اجازه زهکشی می‌دهد و از ورود ذرات جامد به داخل محفظه خلأ جلوگیری می‌کند. بر روی

شفاف بودن شیشه امکان مشاهده تغییر ضخامت نمونه را نیز فراهم می‌سازد. پمپ خلأ آزمون از نوع SpeediVac یک مرحله‌ای، رانش مستقیم، پره لغزشی و پایه روغنی است که قادر به تولید مکش تا حداکثر فشار خلأ نسبی معادل ۹۹/۹۹- کیلوپاسکال می‌باشد و برای عملکرد قابل اعتماد و طولانی مدت تا ۲۴ ساعت متوالی طراحی شده است. محفظه خلأ یک سیلندر گاز فریون از نوع R134a کاملاً خالی 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 به دلیل پایه روغنی بودن پمپ، سبب اختلال در عملکرد مکشی آن خواهد شد. از این رو، با نصب محفظه خلأ میان پمپ و مخزن مصالح، علاوه بر جلوگیری از ورود آب به داخل پمپ، می‌توان به جمع‌آوری آب تخلیه شده از میان حفرات مصالح پرداخت و همچنین، فشار مکشی تولید شده را در یک تراز دلخواه درون محفظه حبس کرد. جرم آب تخلیه شده با استفاده از یک ترازوی الکترونیکی واقع در زیر محفظه خلأ اندازه‌گیری می‌شود.

برای انتخاب ابعاد نمونه‌ها تحت پیش‌بارگذاری خلأ در آزمایشگاه معیاری وجود ندارد و از مقادیر نسبت ابعادی گوناگونی در مطالعات مختلف استفاده شده است. در پژوهش حاضر، ابعاد نمونه‌ها (ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر و قطر ۱۵۰ میلی‌متر و نسبت قطر به ارتفاع ۰/۵) با توجه به مطالعه (Vu et al., 2016) انتخاب شده‌اند که در آن ارتفاع و قطر نمونه به ترتیب معادل ۸۰۰ میلی‌متر و ۴۴۰ میلی‌متر و مقدار نسبت قطر به ارتفاع معادل ۰/۵۵ بوده است.

با توجه به مطالعات (Kianfar et al., 2013; Xu et al., 2016) برای پیش‌بارگذاری خلأ نمونه‌های دوغابی، مقادیر اولیه رطوبت نمونه‌های بازسازی شده باید حداقل بزرگ‌تر از ۱/۵ برابر حد روانی مصالح باشد که بر این اساس برای نمونه‌های باطله‌های مس ($LL=25\%$)، مقادیر رطوبت اولیه معادل ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ در نظر گرفته شد. با توجه به اشباع بودن نمونه-ها ($S_f = 1$)، نسبت تخلخل اولیه آن‌ها به صورت ارائه شده در جدول ۲ قابل تعیین است.

جدول ۲. مقادیر نسبت تخلخل اولیه نمونه‌ها

$\omega_i, \%$	$e_i = \omega_i \times G_s$
50	1.355
75	2.0325
100	2.71

توجه به این نکته حائز اهمیت است که نسبت تخلخل می‌تواند از یک بزرگتر باشد و با توجه به اشباع بودن کامل و رطوبت بسیار بالا ($\omega_i > LL$)، مقادیر نسبت تخلخل اولیه نمونه‌های آزمون قابل مقایسه با سایر پژوهش‌ها است. به عنوان مثال، در مطالعات (Been and Sills, 1981; Chu et al., 2012; Wang et al., 2019a) برای نسبت تخلخل اولیه خاک-ها مقادیر بزرگتر از یک و در بعضی حتی بالاتر از ۱۰ نیز گزارش شده است.

ب- ویژگی نمونه‌ها

نمونه‌های ساخته شده به کمک روش اتخاذ شده، همگن هستند (Suazo et al., 2016). از سوی دیگر، هنگامی که رطوبت خاک بالاتر از حد روانی باشد، رفتار دوغاب به یک

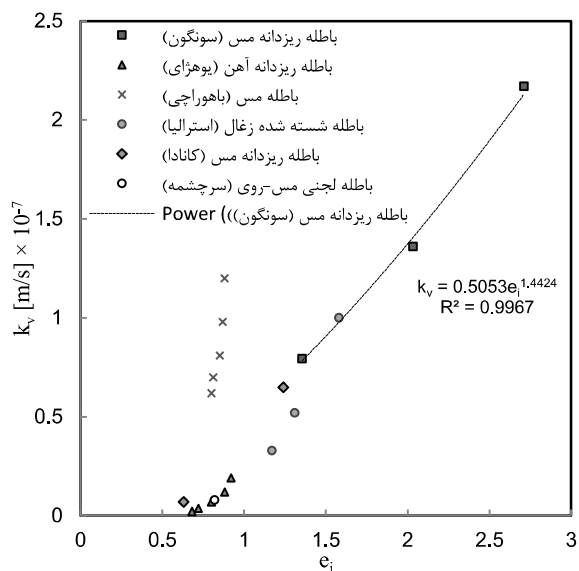
بخش فوقانی محفظه خلأ، دو شیر تنظیم کننده شامل شیرهای تخلیه و مکش به ترتیب، برای ورود آب تخلیه شده به داخل محفظه و تنظیم فشار خلأ نصب گردیده است. قطر داخلی و طول شلنگ‌های اتصال دهنده به ترتیب معادل ۱۰ میلی‌متر و ۱ متر است. برای مشاهده ساده حرکت آب در حین تخلیه، شلنگ‌های استفاده شده برای اتصال پمپ و سیستم زهکش، به صورت کاملاً شفاف انتخاب شده‌اند.

۴-۲. آماده سازی نمونه‌های آزمون

الف- روش ساخت نمونه‌ها

برای تهیه نمونه‌های آزمون، اساس روش ارائه شده توسط سوازو و همکاران (Suazo et al., 2016) به نام ته‌نشینی دوغاب (Slurry deposition) انتخاب شده است که با اندکی اصلاح استفاده می‌شود. بدین ترتیب که ابتدا باطله‌ها با همان مقدار رطوبت طبیعی موجود به آرامی درون مخزن آزمایش ریخته می‌شوند. سپس، با توجه به مقدار مورد نظر برای رطوبت اولیه (ω_i) نمونه‌ها، جرم 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 تقریبی ۱۰ دقیقه تا ۱۵ دقیقه با هم مخلوط می‌گردند تا یک توده تک لایه همگن (Homogeneous) 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 اشباع ایجاد شود.

لازم به ذکر است که در روش استفاده شده در این پژوهش، مخزن به طور کامل با مخلوط پر نمی‌شود ($h_i < h_t$)، تا در حین مخلوط شدن مصالح از پرتاب شدن آب و ذرات جامد به بیرون از مخزن اجتناب گردد. پس از استراحت نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت، برای اطمینان از درجه اشباع نمونه‌های ساخته شده به کمک این روش، پارامتر B اسکمپتون کنترل گردید و حداقل مقدار آن در بین تمام انواع نمونه‌ها معادل ۰/۹۹۲ اندازه‌گیری شد که بیانگر اشباع بودن نمونه‌ها است.



شکل ۵. تغییرات ضریب نفوذپذیری قائم نمونه‌های آزمون برحسب نسبت تخلخل اولیه

از طرفی، مقادیر k اندازه‌گیری شده در حالت اشباع و روند تغییرات آن‌ها بر حسب نسبت تخلخل در همان محدوده گزارش شده برای سایر باطله‌های معدنی مانند باطله مس معدن باهوراچی (Hu et al., 2017)، باطله شسته شده زغال در استرالیا (Qiu and Sego, 2001)، باطله ریزدانه مس در کانادا (Klohn, 1997)، باطله ریزدانه آهن معدن یوهزای (Hu et al., 2017) و باطله ریزدانه لجنی معدن مس-روی سرچشمه (Shamsai et al., 2007) با مشخصات فیزیکی مشابه است. ضمناً، بهترین تابع بیان‌کننده ارتباط میان ضریب نفوذپذیری و نسبت تخلخل اولیه نمونه‌های باطله ریزدانه مس سونگون از نوع توانی است که می‌تواند برای سایر باطله-های مذکور نیز به کار گرفته شود. تنها تفاوت، مربوط به باطله معدن مس باهوراچی است که علت را می‌توان به بالاتر بودن مقدار دامنه خمیری (PI=15%) آن در مقایسه با باطله معدن مس سونگون (PI=3%) نسبت داد.

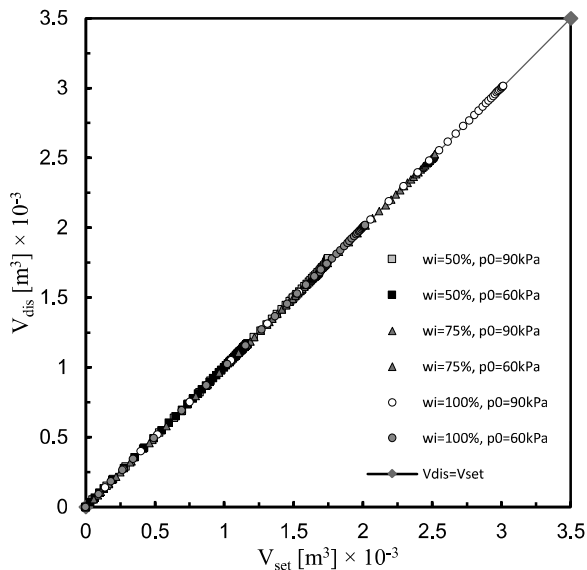
۲-۵. نحوه انجام آزمون

پس از آماده سازی نمونه، قسمت زیرین لوله زهکش مکشی دقیقاً در نقطه مرکزی واقع بر سطح مصالح قرار می‌گیرد و به طور کاملاً قائم به داخل توده هدایت شده و در سرتاسر آن

سیال همگن و همسانگرد ($K=1$) شباهت بیشتری پیدا می‌کند. با این وجود، به منظور حصول اطمینان در مورد همگن بودن نمونه‌های ساخته شده با روش مذکور، مطابق پیشنهاد سوازو و همکاران (Suazo et al., 2016) از سه محدوده یک سوم بالایی، میانی و پایینی لایه در دو طرف مخزن، برای مصالح دارای رطوبت اولیه ۵۰٪، نمونه‌هایی (Specimens) برداشته و مقدار رطوبت و ضریب نفوذپذیری قائم آن‌ها به طور جداگانه در آزمایشگاه اندازه‌گیری شد. اختلاف مقادیر رطوبت در نمونه‌های برداشت شده در مقایسه با رطوبت مورد نظر حداکثر ۲/۳۷٪ اندازه‌گیری گردید. همچنین، تفاوت میان مقادیر ضریب نفوذپذیری قائم اندازه‌گیری شده در تمام نمونه‌های برداشت شده نسبت به مقدار میانگین حداکثر ۱۴/۵٪ بود. این نتایج، تأیید کننده دستیابی به یک درجه تکرارپذیری مناسب برای اطمینان از همگن بودن همه نمونه‌ها بودند. بر همین اساس، اولاً برای نمونه‌های دارای رطوبت اولیه ۷۵٪ و ۱۰۰٪ نیز می‌توان (بدون انجام آزمون‌های کنترلی به دلیل سخت بودن نمونه‌گیری از بخش‌های مختلف) فرض کرد شرایط لایه همگن است. ثانیاً، با توجه به رطوبت بالا می‌توان ضرایب نفوذپذیری افقی و قائم را با هم تقریباً برابر در نظر گرفت. بنابراین، فرض می‌شود نمونه‌های ساخته شده با این روش، مانند نمونه‌های ساخته شده در پژوهش‌های دیگر (Kianfar et al., 2013; Suazo et al., 2016)، از نظر رسانایی هیدرولیکی، همسانگرد (Isotropic) هستند. شکل ۵، تغییرات ضریب نفوذپذیری قائم بر حسب نسبت تخلخل نمونه‌ها را نشان می‌دهد که بر اساس آزمون هدافتان اندازه‌گیری شده‌اند.

مطابق شکل ۵، مقدار k باطله مس معدن سونگون در حالت اشباع در محدوده $7/94 \times 10^{-8}$ متر بر ثانیه تا $2/17 \times 10^{-7}$ متر بر ثانیه قرار دارد که هماهنگی مناسبی با مقادیر پیشنهاد شده برای لای (۱×۱۰^{-۹} متر بر ثانیه تا ۱×۱۰^{-۵} متر بر ثانیه) مطابق (Budhu, 2010) دارد. بنابراین، می‌توان آن‌ها را در زمره مصالح با نفوذپذیری بسیار کم در نظر گرفت.

(Equal-strain) در حین پیش‌بارگذاری خلأ در آزمون‌ها برقرار است. برای بررسی تغییر مکان‌ها، داده‌های حجم آب تخلیه شده (V_{dis}) با کاهش حجم نمونه حاصل از نشست سطحی (V_{set}) در هر لحظه از پیش‌بارگذاری خلأ در شکل ۶ مقایسه شده است.



شکل ۶. مقایسه حجم آب تخلیه شده با کاهش حجم نمونه حاصل از نشست سطحی در هر لحظه از مکش

با توجه به شکل ۶، مشاهده می‌شود که تغییر حجم فقط ناشی از تغییر ضخامت نمونه‌ها رخ داده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که برای تمام نمونه‌های آزمون، اولاً نمونه‌ها در حین فرایند پیش‌بارگذاری خلأ کاملاً اشباع باقی مانده‌اند و ثانیاً، تحکیم خلأ با تقریب بسیار بالایی ($R^2 > 0.993$) از نوع یک بعدی است. از این رو، با توجه به نظرات مطرح شده در مطالعات پیشین (Robinson et al., 2012; Indraratna et al., 2016a)، می‌توان فرض ناچیز بودن جابجایی‌های جانبی نمونه‌ها را نیز پذیرفت. در واقع، تحکیم تحت خلأ که از نوع شعاعی است تا مدت زمان بسیار طولانی (از نظر تئوری تا بی نهایت) ادامه خواهد یافت (Conte and Troncone, 2009)، اما از نظر عملی، می‌توان مقدار کرنش قائم را از یک لحظه معین به بعد ثابت فرض کرد. به عنوان یک معیار، هر زمان که اختلاف دو قرائت متوالی برای کرنش کمتر از ۱٪ باشد یا نرخ کرنش قائم کوچکتر از ۰/۱۵٪ بر ساعت (مشابه معیار

نصب می‌شود. با توجه به شکل استوانه‌ای مخزن آزمایش و قرارگیری لوله زهکش در مرکز نمونه‌ها، شرایط کرنش متقارن محوری برقرار است. پس از قرار دادن درپوش و مهر و موم کردن مخزن، پمپ روشن می‌شود، در حالی که شیر مکش باز و شیرهای تخلیه و زهکشی بسته هستند. به محض اینکه گنج خلأ، فشار مورد نظر را نشان دهد، آزمایش با باز کردن همزمان شیرهای تخلیه و زهکشی آغاز می‌شود. نمونه‌ها تحت دو فشار مکشی جداگانه معادل ۶۰ و ۹۰ کیلوپاسکال قرار می‌گیرند، به طوری که شدت مکش تولید شده در طول هر آزمون ثابت باقی می‌ماند. دمای محیط آزمایشگاه در زمان انجام آزمون‌ها 20 ± 2 سلسیوس می‌باشد. در حین آزمایش، جرم آب تخلیه شده از نمونه توسط یک ترازوی الکتریکی با حساسیت قرائت یک گرم (دقت نسبی ۰/۰۳٪ ظرفیت کل) واقع در زیر محفظه خلأ، اندازه‌گیری و حجم معادل آن بر اساس وزن مخصوص آب، معادلسازی می‌شود. تغییر ضخامت نمونه در هر لحظه از آزمون (۱ دقیقه، ۲ دقیقه، ۳ دقیقه، ۴ دقیقه، ۶ دقیقه و پس از آن با فواصل زمانی ۳ دقیقه-ای) با استفاده از یک کولیس با حساسیت قرائت ۰/۰۵ میلی‌متر و دامنه ۳۰۰ میلی‌متر (دقت نسبی ۰/۰۱۷٪ طولی) ثبت می‌شود. حساسیت کولیس با توجه به دقت نسبی توصیه شده توسط استاندارد ASTM-D2435 در انجام آزمون تحکیم یک بعدی، مبنی بر بهره‌گیری از حساسیت قرائت ۰/۰۲۵ میلی‌متر برای حداقل ضخامت نمونه ۱۲ میلی‌متر جهت دستیابی به دقت نسبی ۰/۰۲۱٪ طولی اتخاذ شده است. ضمناً، علت استفاده از کولیس برای اندازه‌گیری تغییر ضخامت نمونه‌ها آن بود که امکان نصب سنسور LVDT به دلیل رطوبت بسیار بالا وجود نداشت. توجه شود که برای اطمینان، تغییر ضخامت نمونه در چهار طرف مخزن اندازه‌گیری و کنترل می‌شود و سپس، با تقسیم مقدار میانگین چهار قرائت بر ارتفاع اولیه نمونه، کرنش قائم در مدت زمان معین بدست می‌آید. ضمناً، مقدار نشست نمونه در جداره بیرونی زهکش، اختلاف بسیار اندکی (حداکثر ۳/۸٪) با نشست در لبه دیواره مخزن دارد، به گونه‌ای که می‌توان فرض کرد که شرایط کرنش‌برابر

می‌شود. شکل عمومی همه نمودارها به گونه‌ای است که تغییرات حجم بر حسب زمان را می‌توان به خوبی به کمک یک تابع نمایی ($R^2 > 0.988$) مطابق رابطه (۱) تخمین زد:

$$V_{(t)} = V_{fin} [1 - \exp(-\alpha_1 t)] \quad (1)$$

که در آن V_{fin} حجم نهایی قابل تخلیه شدن به کمک اعمال مکش، t زمان پیش‌بارگذاری خلاً و α_1 یک ضریب تابع رطوبت اولیه نمونه است که مقدار آن بر اساس تحلیل معکوس از روی داده‌های آزمایش به صورت ارائه شده در جدول ۳ محاسبه شده است.

از جدول ۳ ملاحظه می‌شود که مقادیر α_1 مربوط به فشار خلاً ۹۰ کیلوپاسکال اندکی بزرگتر از حالت اعمال مکش ۶۰ کیلوپاسکال هستند. علت این امر را می‌توان به تأثیر شدت فشار بر تولید گرادیان هیدرولیکی نسبت داد.

جدول ۳. مقادیر ضریب زمانی نرخ تخلیه آب

$\omega_i, \%$	$\alpha_1, 1/s \times 10^{-4}$	
	$p_0 = 60 \text{ kPa}$	$p_0 = 90 \text{ kPa}$
50	4.972	5.061
75	5.914	5.932
100	7.923	8.012

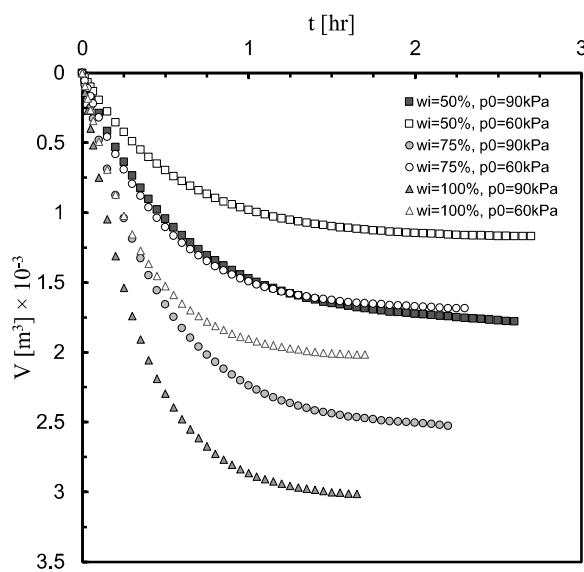
همچنین، روند تغییرات نمودارهای مربوط به همه مصالح در شکل ۷ نشان می‌دهد که تحت فشار مکشی ثابت، هر چه رطوبت اولیه نمونه بیشتر باشد، اولاً تغییرحجم نهایی آن بزرگتر است و ثانیاً، به مدت زمان کوتاهتری برای اعمال مکش به منظور زهکشی آب منفذی نیاز خواهد بود. ضمناً، به ازای یک رطوبت ثابت، افزایش فشار مکشی سبب می‌شود تا نمونه تغییرحجم بزرگتری را در یک مدت زمان معین 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 با افزایش فشار مکشی، گرادیان هیدرولیکی شدیدتر می‌گردد، به ازای یک ضریب نفوذپذیری معین، آب در نمونه‌ای تحت مکش بالاتر، در مقایسه با همان نمونه تحت مکش پایین‌تر، با سرعت بیشتری جریان می‌یابد و زهکشی می‌شود.

(Kianfar et al., 2013)) گردد، می‌توان مقدار کرنش را ثابت در نظر گرفت. در این لحظه، آزمایش طی فرایندی به ترتیب با بستن شیر مکش، خاموش کردن پمپ مکش و بستن شیر زهکشی به پایان خواهد رسید. بنابراین، در این پژوهش، زمان نهایی (t_{ult}) فرایند پیش‌بارگذاری خلاً متناظر با همان لحظه آستانه ثابت شدن مقدار کرنش (بر اساس معیار نرخ کرنش بیان شده) در نظر گرفته می‌شود.

۳. نتایج آزمایشگاهی و تفسیر

۳-۱. نرخ تخلیه آب

تغییرات مقدار حجم آب تخلیه شده از هر نمونه بر حسب مدت زمان اعمال مکش در شکل ۷ رسم شده است.



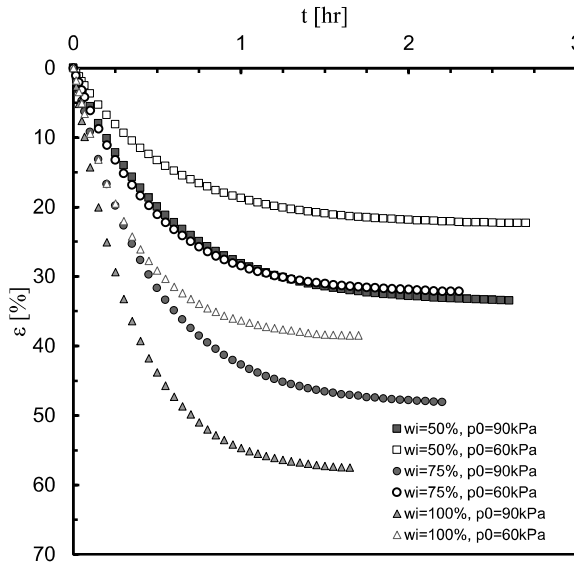
شکل ۷. تغییرات حجم آب تخلیه شده بر حسب مدت زمان اعمال مکش

اعمال مکش

از بررسی نمودارهای موجود در شکل ۷ 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 خط مماس بر نمودار کاهش می‌یابد و پس از مدتی، نمودار به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند. این مقدار بیانگر حداکثر تغییرحجم قابل تحمیل بر نمونه تحت فرایند پیش‌بارگذاری خلاً است که به صورت نشست سطحی نهایی نمونه نمایان

۳-۲. نرخ کرنش

زمان نهایی مورد نیاز برای اتمام پیش بارگذاری خلأ که نشان دهنده تکمیل فرایند تحکیم اولیه نمونه‌ها است، در شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۸. تغییرات کرنش قائم نمونه‌ها بر حسب مدت زمان

اعمال مکش

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود حداکثر زمان نهایی مورد نیاز برای پیش بارگذاری خلأ نمونه‌ها، معادل ۲/۷ ساعت در نمونه‌ای با رطوبت اولیه ۵۰٪ تحت فشار ۶۰ کیلوپاسکال می‌باشد. بنابراین، با مقایسه زمان نهایی پیش بارگذاری خلأ با زمان نهایی نشست تحت وزن ذرات می‌توان نتیجه گرفت که در شرایط اعمال مکش به نمونه‌های باطله مس سونگون، پیش از وقوع نشست تحت وزن خود ذرات، نشست حاصل از زهکشی در اثر مکش انجام شده است. همین امر دلیل دیگری است که سبب شده است تا α_1 و α_2 مربوط به هر فشار، به ازای یک رطوبت معین (مطابق جدول‌های ۳ و ۴) تقریباً با هم برابر گردند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اعمال خلأ سبب تسریع نشست تحت وزن نمونه‌های باطله مس با ابعاد مورد بررسی در مطالعه حاضر هم گردیده است. به عبارت دیگر، چنانچه ابعاد پروژه بسیار بزرگ و کار به صورت میدانی باشد، علاوه بر نشست ناشی از پیش بارگذاری خلأ، باید نشست تحت وزن خود ذرات به طور جداگانه کنترل گردد.

تغییرات کرنش قائم هر نمونه بر حسب مدت زمان اعمال پیش بارگذاری خلأ در شکل ۸ رسم شده است. با توجه به شکل ۸، برای کرنش‌های قائم نمونه‌ها نیز می‌توان به نتایج مشابه موارد بیان شده در ارتباط با نمودارهای تغییرات حجم آب تخلیه شده بر حسب زمان پیش بارگذاری خلأ دست یافت. ضمناً، بهترین تابع بیان کننده تغییرات کرنش قائم نمونه بر حسب زمان ($R^2 > 0.982$) نیز به صورت رابطه (۲) قابل برازش است:

$$\varepsilon_{(t)} = \varepsilon_{fin} [1 - \exp(-\alpha_2 t)] \quad (2)$$

که در آن ε_{fin} کرنش قائم نهایی نمونه و α_2 یک ضریب تابع رطوبت اولیه نمونه است که مقدار آن به صورت تحلیل معکوس با توجه به تغییرات داده‌های مشاهده شده محاسبه گردیده و در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مقادیر ضریب زمانی نرخ نشست

$\omega_i, \%$	$\alpha_2, 1/s \times 10^{-4}$	
	$p_0 = 60 \text{ kPa}$	$p_0 = 90 \text{ kPa}$
50	5.014	5.110
75	5.933	5.961
100	7.981	8.052

مطابق جدول ۴، ملاحظه می‌گردد که فشار مکشی ۹۰ کیلوپاسکال سبب شده است که مقادیر α_2 اندکی بزرگتر از حالتی باشد که از فشار خلأ ۶۰ کیلوپاسکال استفاده شده است. این مسأله را نیز می‌توان از طریق مفهوم اثر شدت فشار بر گرادیان هیدرولیکی ایجاد شده توجیه کرد. ضمناً، مقدار α_2 کمی بزرگتر از α_1 است که می‌تواند به دلیل آن باشد که در زمان قرائت داده‌های کرنش قائم نمونه، علاوه بر نشست حاصل از تخلیه آب، بخشی از تغییر حجم مربوط به نشست تحت وزن خود مصالح (Self-weight settlement) است که سبب بزرگتر شدن بسیار جزئی ضریب زمانی نرخ نشست در مقایسه با ضریب زمانی نرخ تخلیه آب شده است. از طرفی، با توجه به شکل‌های ۶ و ۷، می‌توان زمان پایان آزمون برای هر نمونه تحت هر فشار مکشی را تعیین کرد. بدین ترتیب، مدت

ثابت نیست، بلکه بسته به تغییرات نسبت تخلخل و ضریب نفوذپذیری ناشی از افزایش تنش، می‌تواند کاهش یا افزایش - یابد (چشمی و همکاران، ۱۳۹۴؛ Hu et al., 2017) و در آن شرایط، زمان نهایی تابع فشار اعمالی نیز خواهد بود.

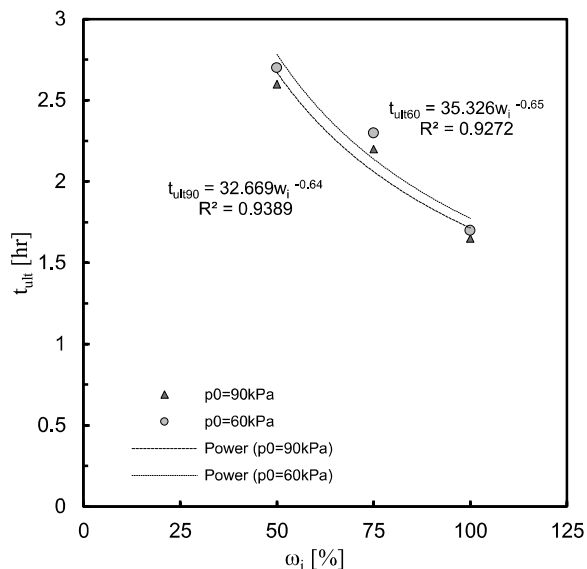
۳-۳. محاسبه سرعت جریان

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 جریان قابل ارزیابی است. به دلیل وجود عواملی نظیر تغییر آرایش ذرات و شکل هندسی حفرات و تغییرات احتمالی در دمای مصالح و گرادیان هیدرولیکی در حین پیش‌بارگذاری، تعیین مقدار دقیق سرعت جریان بسیار پیچیده است. بنابراین، نمی‌توان همواره یک ارتباط دقیق میان سرعت جریان با کلیه عوامل برقرار کرد و معمولاً رابطه سرعت جریان به کمک پارامتر گرادیان هیدرولیکی بیان می‌شود. برای ماسه و لای، ارتباط میان پارامترهای جریان را می‌توان مطابق قانون داری به صورت رابطه (۳) بیان نمود:

$$v = ki \quad (3)$$

که در آن v سرعت جریان، k ضریب نفوذپذیری خاک و i گرادیان هیدرولیکی ناشی از وجود اختلاف فشار بین دو نقطه از محیط است.

از طرفی، هانسبو (Hansbo, 1960) نشان داده است که رابطه بین سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی برای رس‌های عادی تحکیم یافته تحت گرادیان‌های هیدرولیکی پایین از قانون داری تبعیت نمی‌کند؛ به طوری که در محدوده گرادیان هیدرولیکی پایین یک رابطه غیرخطی میان سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی برقرار است و به دنبال آن در محدوده گرادیان‌های هیدرولیکی بالا یک رابطه خطی بین پارامترهای جریان وجود دارد (شکل ۱۰).



شکل ۹. تغییرات زمان نهایی بر حسب رطوبت اولیه نمونه‌ها

نتایج ارائه شده در شکل ۹، همچنین بیانگر آن هستند که اولاً با افزایش رطوبت اولیه نمونه‌ها به مدت زمان کوتاه‌تری برای تکمیل پیش‌بارگذاری نیاز است، به طوری که می‌توان بهترین توابع نشان دهنده ارتباط میان زمان نهایی و رطوبت نمونه را از نوع توانی در نظر گرفت و علت آن بالاتر بودن ضریب نفوذپذیری نمونه‌هایی با رطوبت اولیه بزرگتر و در نتیجه، سهولت بیشتر زهکشی در مقایسه با سایر نمونه‌های آزمون است. ثانیاً، به ازای یک مقدار رطوبت اولیه معین، زمان نهایی تحکیم خلأ برای فشار ۹۰ کیلوپاسکال اندکی (معادل ۲/۹۴٪، ۴/۳۵٪ و ۳/۷۰٪ اختلاف نسبی به ازای رطوبت اولیه به ترتیب ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪) کمتر از زمان مورد نیاز تحت فشار ۶۰ کیلوپاسکال است. با این وجود، می‌توان t_{ult} را به ازای هر دو فشار تقریباً یکسان در نظر گرفت. دلیل این امر، آن است که تغییرات ضریب تحکیم شعاعی در محدوده تنش-های موجود در این مطالعه را می‌توان تقریباً ثابت و مستقل از فشار مکش اعمالی فرض کرد. این توجیه با نظریه تحکیم خلأ ارائه شده در مطالعه (Rujikiatkamjorn and Indraratna, 2006) در تطابق است. البته باید توجه شود که اگر دامنه تغییرات تنش‌های اعمالی بسیار زیاد (در محدوده ۱۰۰ کیلوپاسکال تا ۱ مگاپاسکال) باشد، مقدار ضریب تحکیم

اکنون با توجه به دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری شده برای نرخ تخلیه آب و نرخ نشست نمونه‌ها می‌توان سرعت جریان در باطله‌های ریزدانه مس را بر اساس دو رویکرد تخمین زد:

رویکرد اول- سرعت جریان بر اساس نرخ تخلیه

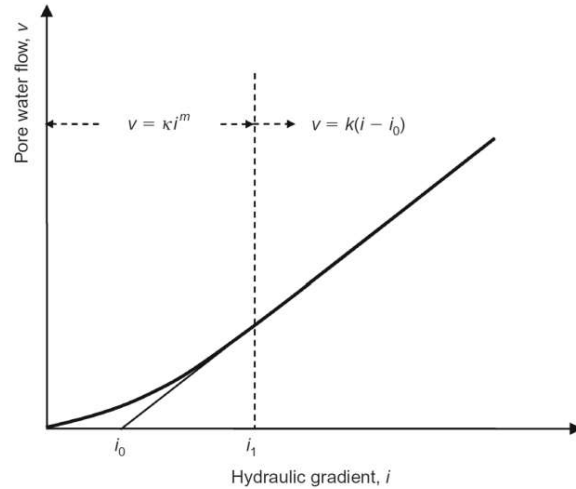
مقدار آبی که درون یک نمونه در واحد زمان جریان دارد، به کمک رابطه (۷) قابل محاسبه است (Das and Sobhan, 2013):

$$q = vA \quad (۷)$$

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

علاوه بر نظرات هانسبو (Hansbo, 1960)، بررسی‌های آزمایشگاهی دیگر نیز نشان می‌دهند که قانون داری برای خاک‌هایی با نسبت تخلخل کم (Kianfar et al., 2013) یا برای جریان تحت گرادیان‌های هیدرولیکی کوچک (Sathanathan and Indraratna, 2006; Indraratna et al., 2016c) معتبر نیست. اخیراً، مطابق پیشنهاد مرجع (Wang et al., 2019b)، در خاک‌هایی با ابعاد لای و ماسه متوسط همواره جریان داری برقرار است. بنابراین، با توجه به بالا بودن مقادیر نسبت تخلخل نمونه‌ها از یک سو و ابعاد ذرات مس سونگون در محدوده لای (مطابق شکل ۳) از سوی دیگر، می‌توان فرض برقراری قانون داری در باطله‌های ریزدانه مس سونگون را پذیرفت. بدیهی است در شرایط برقراری جریان خطی، $m=1$ (رابطه ۴) است و در نتیجه، $i_0=0$ و $K=k$ می‌باشد و نیازی به در نظر گرفتن پارامتر i_1 برای مصالح آزمون نیست. بنابراین، از بخش خطی رابطه (۴) که نشان دهنده برقراری جریان خطی یا همان جریان داری است، برای باطله‌ها استفاده می‌شود. بدین منظور، با توجه به داده‌های مربوط به تغییرات حجم تخلیه آب منفذی بر حسب زمان مکش، می‌توان بر اساس رابطه (۷)، سرعت جریان در یک محیط را به صورت رابطه (۸) محاسبه نمود:

$$v_{(t)} = \frac{1}{A_{(t)}} \frac{dV_{(t)}}{dt} \quad (۸)$$



شکل ۱۰. ارتباط کلی سرعت جریان منفذی با گرادیان هیدرولیکی در یک محیط متخلخل (Hansbo, 1960)

با توجه به شکل ۱۰، ارتباط میان سرعت جریان و گرادیان هیدرولیکی به صورت رابطه (۴) قابل بیان است:

$$v = \begin{cases} ki^m; & i \leq i_1 \\ k(i - i_0); & i > i_1 \end{cases} \quad (۴)$$

که در آن m یک ثابت است که به نوع خاک، نسبت تخلخل و دما بستگی دارد و در آزمایشگاه به صورت تجربی برای هر خاک به دست می‌آید، K ضریب نفوذپذیری بر اساس جریان غیرخطی، k ضریب نفوذپذیری بر اساس جریان خطی، i_1 گرادیان هیدرولیکی مورد نیاز برای غلبه بر حداکثر انرژی پیوند آب منفذی سیار و i_0 گرادیان هیدرولیکی معادل جریان خطی است به طوری که:

$$k = mki_1^{m-1} \quad (۵)$$

$$i_0 = \frac{i_1(m-1)}{m} \quad (۶)$$

پارامترهای i_0 ، i_1 و K بسته به نوع خاک و شرایط حاکم بر مسأله در آزمایشگاه تعیین می‌شوند. به طور کلی، برای جریان غیرداری، i_1 در محدوده ۸ تا ۳۵ (Dubin and Moulin, 1986)، مقدار m در حدود ۱/۵ (Das and Hansbo, 2001) و مقدار i_0 بین ۴ تا ۱۰ گزارش شده است (Sobhan, 2013). (Hansbo, 1960).

و ارتباط آن کاملاً با نمونه قطع می‌شود (Budi et al., 2018). یکی از علل وقوع این امر، تجمع ذرات خاک در اطراف لوله زهکش است (Jinfeng et al., 2020; Zhou et al., 2021)، به نحوی که گویا شعاع زهکش بزرگ‌تر از شعاع خارجی لوله باشد. بنابراین، تعیین مقدار دقیق n_r به تحلیل بهتر جریان در نمونه تحت پیش‌بارگذاری خلأ کمک می‌کند. با توجه به مطالب بیان شده و ترکیب روابط (۹) تا (۱۲) با یکدیگر، برای محاسبه سرعت متوسط جریان بر مبنای رویکرد اول، می‌توان از رابطه (۱۳) استفاده نمود:

$$\bar{v}_{(t)} = \frac{V_{(t)} - V_{(t-\Delta t)}}{2\pi n_r r_w \left[h_i - \frac{V_{(t)}}{\pi(R^2 - r_w^2)} \right] \Delta t} \quad (13)$$

با توجه به معلوم نبودن مقدار n_r ، با فرض اولیه $n_r=1$ می‌توان رابطه (۱۴) را برای محاسبه سرعت متوسط جریان بر اساس رویکرد اول تولید نمود:

$$\bar{v}_{(t)} = \frac{V_{(t)} - V_{(t-\Delta t)}}{2\pi r_w \left[h_i - \frac{V_{(t)}}{\pi(R^2 - r_w^2)} \right] \Delta t} \quad (14)$$

رویکرد دوم- سرعت جریان بر اساس نرخ کرنش

برای نمونه‌های استوانه‌ای موجود در مخزن آزمون، می‌توان با استفاده از رابطه (۱۵) به محاسبه گرادیان هیدرولیکی در راستای شعاعی پرداخت:

$$i_r = \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial r} \quad (15)$$

که در آن i_r گرادیان هیدرولیکی شعاعی، h هد فشار، r فاصله شعاعی هر نقطه از نمونه نسبت به مرکز لوله زهکش، γ_w وزن مخصوص آب و u اضافه فشار آب منفذی است.

برای سهولت بررسی مسأله، از تغییرات ضریب نفوذپذیری در حین پیش‌بارگذاری خلأ به دلیل محدوده اندک تغییرات تنش مؤثر صرف نظر می‌شود. به عبارت دیگر، نسبت ضریب نفوذپذیری به ضریب قابلیت فشردگی حجمی (k/m_v) نمونه در حین اعمال فشار، ثابت فرض می‌شود. این فرض، مطابق با

که در آن $v_{(t)}$ و $A_{(t)}$ به ترتیب، سرعت جریان 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 یک تابع دقیق ریاضی نظیر $V=f(t)$ برای بیان تغییرات حجم تخلیه بر حسب زمان در هر نمونه در حین آزمون، امکان محاسبه دقیق مشتق حجم تخلیه نسبت به زمان مکش وجود ندارد. از این رو، می‌توان برای محاسبه متوسط سرعت جریان، رابطه (۸) را به صورت رابطه (۹) ساده‌سازی نمود:

$$\bar{v}_{(t)} = \frac{1}{\bar{A}_{(t)}} \frac{\Delta V_{(t)}}{\Delta t} \quad (9)$$

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

بر اساس مشخصات آزمایش، می‌توان پارامترهای سطح مقطع متوسط و تغییرات حجم تخلیه را به ترتیب، به صورت روابط (۱۰) و (۱۱) تعریف کرد:

$$\bar{A}_{(t)} = 2\pi r_{eq} \left[h_i - \frac{V_{(t)}}{\pi(R^2 - r_w^2)} \right] \quad (10)$$

$$\Delta V_{(t)} = V_{(t)} - V_{(t-\Delta t)} \quad (11)$$

که در آن h_i ارتفاع اولیه نمونه، R شعاع داخلی مخزن آزمایش یا همان شعاع نمونه و r_w شعاع خارجی لوله زهکش مکشی است. r_{eq} شعاع معادل فصل مشترک زهکش و نمونه برای عبور جریان شعاعی است که به صورت رابطه (۱۲) در نظر گرفته می‌شود.

$$r_{eq} = n_r r_w \quad (12)$$

که در آن n_r عدد نسبت شعاع فصل مشترک است و مقدار آن به مشخصات نمونه‌ها و شرایط آزمون بستگی دارد. تعریف پارامتر r_{eq} در واقع با الهام از این مفهوم صورت می‌گیرد که آب منفذی جریان یافته از طرف دیواره مخزن به طرف لوله در حین زهکشی شعاعی، به محض رسیدن در فاصله r_{eq} از مرکز زهکش، عملاً جذب رژیم آب موجود در زهکش شده

$$\bar{v}_{(t)} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \right) \left(\frac{R^2 - r_w^2}{r_w} \right) \quad (19)$$

اکنون، با بهره‌گیری از رابطه‌های (۱۴) و (۱۹) می‌توان نمودار تغییرات سرعت متوسط جریان آب منفذی برای هر یک از نمونه‌های آزمایش را به صورت نمایش داده شده در شکل ۱۱ رسم نمود و نتایج دو رویکرد را با یکدیگر مقایسه کرد.

بررسی نمودارهای ارائه شده در شکل ۱۱، حاکی از آن است که به طور کلی با افزایش زمان اعمال مکش، سرعت جریان کاهش پیدا می‌کند؛ به گونه‌ای که هر چه رطوبت اولیه نمونه‌ها بیشتر باشد، نرخ کاهش سرعت جریان بزرگتر است. دلیل کاهش سرعت جریان با گذشت زمان، استهلاک تدریجی اضافه فشار آب منفذی حاصل از اعمال مکش می‌باشد که سبب کاهش گرادیان هیدرولیکی موجود در نمونه می‌گردد.

نتایج همچنین نشان می‌دهد که به ازای یک فشار مکشی ثابت، در نمونه‌ای با رطوبت اولیه کمتر، جریان آهسته‌تر از سایر نمونه‌ها صورت می‌پذیرد. دلیل این امر آن است که در حجم کل اولیه یکسان و شرایط اشباع کامل، نمونه‌ای با رطوبت کمتر، نسبت تخلخل کوچکتر و در نتیجه، ضریب نفوذپذیری پایین‌تری از بقیه نمونه‌ها دارد و بنابراین، تحت یک گرادیان هیدرولیکی ثابت حاصل از مکش معین اعمالی، مطابق قانون دارسی سرعت جریان در آن کمتر از سایر نمونه‌ها خواهد بود. 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 معادل همان زمان نهایی تحکیم خلأ است که مطابق مطالب بیان شده تابع رطوبت اولیه نمونه‌ها می‌باشد.

۴-۳- تفاوت دو رویکرد در محاسبه سرعت جریان

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، در لحظات اولیه اعمال پیش‌بارگذاری خلأ، مقادیر سرعت جریان حاصل از دو رویکرد تقریباً با یکدیگر برابر هستند، اما به تدریج بر اساس رابطه رویکرد اول، سرعت جریان بزرگتر از حالتی می‌شود که در آن از رویکرد دوم استفاده شده است.

فرض اتخاذ شده در استاندارد ASTM-D2435 برای آزمون تحکیم یک بعدی نمونه در نظر گرفته می‌شود. همچنین، آب منفذی و ذرات جامد موجود در نمونه، تراکم ناپذیر فرض می‌شوند. مشابه فرض اتخاذ شده در مطالعات (Shang and Zhang, 1999; Tang and Shang, 2000)، به دلیل رطوبت بسیار بالای مصالح در پژوهش حاضر، می‌توان از ایجاد ناحیه دست خورده (Smear zone) در اطراف زهکش صرف نظر نیز کرد. تحت پیش بارگذاری خلأ، تغییرات اضافه فشار آب منفذی بر حسب فاصله شعاعی هر نقطه از محیط نسبت به مرکز لوله زهکش مطابق رابطه (۱۶) قابل محاسبه است (Cao et al., 2020):

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\gamma_w}{2k_h} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \left(\frac{R^2 - r^2}{r} \right) \quad (16)$$

که در آن k_h ضریب نفوذپذیری افقی نمونه و ε کرنش قائم است.

با فرض ثابت بودن فشار مکش در راستای شعاعی نمونه، رابطه (۱۶) برای محاسبه متوسط تغییرات اضافه فشار آب منفذی بر حسب فاصله شعاعی به صورت رابطه (۱۷) بازنویسی می‌شود (Cao et al., 2020):

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} = \frac{\gamma_w}{2k_h} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \left(\frac{R^2 - r_w^2}{r_w} \right) \quad (17)$$

از طرف دیگر، با توجه به قانون دارسی، ترکیب رابطه (۱۵) روابط (۳) و (۱۷) با فرض برقراری فشار مکشی ثابت در کل فاصله شعاعی می‌توان به رابطه (۱۸) دست یافت:

$$v_{(t)} = i_r k_h = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \right) \left(\frac{R^2 - r_w^2}{r_w} \right) \quad (18)$$

مشابه رویکرد اتخاذ شده در بررسی نرخ تخلیه آب، به دلیل عدم دسترسی به یک تابع دقیق ریاضی مانند $\varepsilon = g(t)$ برای بیان نرخ کرنش در هر نمونه در حین انجام آزمون و عدم توانایی در تعیین دقیق مشتق کرنش نسبت به زمان، می‌توان رابطه (۱۸) را برای محاسبه سرعت متوسط جریان بر اساس رویکرد دوم به صورت رابطه (۱۹) ساده‌سازی کرد:

۳-۵. کاربرد نوین اندازه‌گیری سرعت جریان

ارتباط مدت زمان پیش‌بارگذاری با درجه تحکیم و پارامترهای دیگر مسأله، به کمک رابطه (۲۰) قابل بیان است (Rujikiatkamjorn and Indraratna, 2006):

$$m_v = -\frac{k_h t}{\mu \gamma_w d_c^2} \frac{8}{\ln\left(1 - \frac{U\%}{100}\right)} \quad (20)$$

که در آن U متوسط درجه تحکیم است که معمولاً بر اساس دو رویکرد نسبت نشست (رابطه ۲۱) و نحوه استهلاك اضافه فشار آب منفذی (رابطه ۲۲) محاسبه می‌شود (Das and Sobhan, 2013):

$$U = U_{set} = \frac{S_t}{S_{100}} = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{100}} \quad (21)$$

$$U = U_{epwp} = 1 - \frac{u_t}{u_0} \quad (22)$$

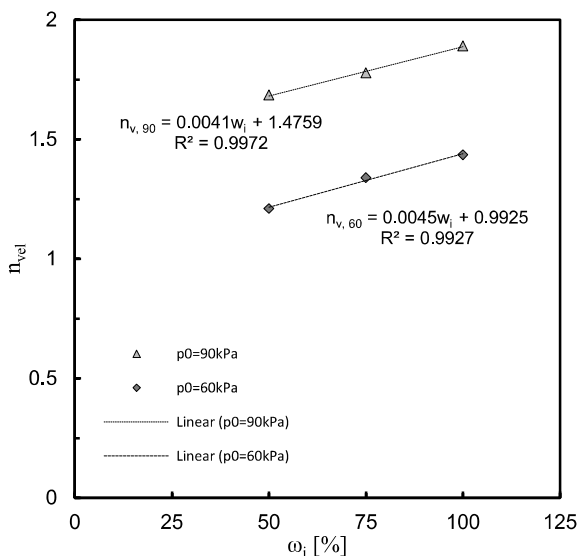
که در آن U_{set} متوسط درجه تحکیم کل لایه بر حسب نسبت تغییرات نشست یا نسبت کرنش، U_{epwp} متوسط درجه تحکیم کل لایه بر حسب نسبت استهلاك اضافه فشار آب منفذی، S_t نشست و ε_t کرنش قائم لایه در لحظه t ، S_{100} نشست نهایی و ε_{100} کرنش قائم لایه به ازای درجه تحکیم ۱۰۰٪، u_t اضافه فشار آب منفذی در لحظه t و u_0 اضافه فشار آب منفذی اولیه است.

برای محاسبه مقدار نشست لایه به ازای درجه تحکیم ۱۰۰٪، روش‌های گوناگونی توسط پژوهشگران مختلف مانند آسائوکا (Asaoka, 1978) و نیز گو و چو (Guo and Chu, 2016) ارائه شده است که معمولاً روش آسائوکا رایج‌تر و قابل اعتمادتر می‌باشد.

یکی از دلایل بزرگ‌تر بودن \bar{v}_{app1} نسبت به \bar{v}_{app2} آن است که رویکرد اول فقط بر اساس روند تغییر حجم نمونه ناشی از حجم تخلیه شده آب به محاسبه سرعت جریان می‌پردازد و اثرات ناشی از پارامترهای تحکیم شعاعی و نرخ استهلاك اضافه فشار آب منفذی در نمونه را لحاظ نمی‌کند. بنابراین، رویکرد دوم نتایج واقع بینانه‌تری از سرعت جریان در مقایسه با رویکرد اول تولید می‌کند. علت دیگر برای بزرگ‌تر بودن \bar{v}_{app1} نسبت به \bar{v}_{app2} را می‌توان به فرض اولیه ($n_r=1$) در نظر گرفته شده برای شعاع معادل فصل مشترک زهکش و محیط خاک برای عبور جریان شعاعی به صورت $\Gamma_{eq}=1 \times r_w$ (در معادله ۱۲) نسبت داد. به منظور بررسی بیشتر این پدیده، نسبت سرعت جریان رویکرد اول به رویکرد دوم ($\bar{v}_{app1}/\bar{v}_{app2}$) در هر لحظه محاسبه شده و برای سادگی، مقدار میانگین نسبت سرعت‌ها با نماد n_{vel} نشان داده می‌شود. تغییرات مقادیر n_{vel} بر حسب رطوبت اولیه هر نمونه به ازای فشارهای مکشی در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

با توجه به شکل ۱۲، می‌توان نتیجه گرفت که در فشار مکشی ثابت، با افزایش رطوبت هر نمونه، پارامتر نسبت سرعت افزایش می‌یابد. به علاوه، به ازای یک رطوبت ثابت، هر چه فشار مکشی اعمال شده بزرگتر باشد، n_{vel} هم بزرگتر است.

بررسی داده‌های ارائه شده در شکل ۱۱ (الف و ب) و مقایسه آن‌ها با شکل ۱۲ حاکی از آن است که سرعت‌های جریان حاصل از دو رویکرد زمانی با یکدیگر برابر می‌شود که مقدار شعاع معادل استفاده شده در رابطه (۱۲)، تقریباً برابر $\Gamma_{eq}=n_{vel}r_w$ در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر، مقدار n_r که در ابتدا مقدار دقیق آن برای محاسبه شعاع فصل مشترک زهکش و محیط خاک معلوم نبود، تقریباً برابر با همان پارامتر n_{vel} است که با توجه به شکل ۱۲، مقدار آن مساوی یا بزرگتر از یک است و دارای رابطه مستقیم با شدت فشار مکش و رطوبت نمونه می‌باشد.



شکل ۱۲. تغييرات n_{vel} بر حسب رطوبت اوليه نمونه

با توجه به دشواری استفاده از روش‌های مبتنی بر نشست (Asaoka, 1978; Guo and Chu, 2016) و تفاوت در خروجی آن‌ها نسبت به یکدیگر، به عنوان یک نوآوری، در این مطالعه برای محاسبه متوسط درجه تحکیم لایه، رابطه (۲۳) بر اساس مفهوم نسبت سرعت جریان پیشنهاد می‌شود:

$$U = U_{vel} = 1 - \frac{\bar{V}_t}{\bar{V}_i} \quad (23)$$

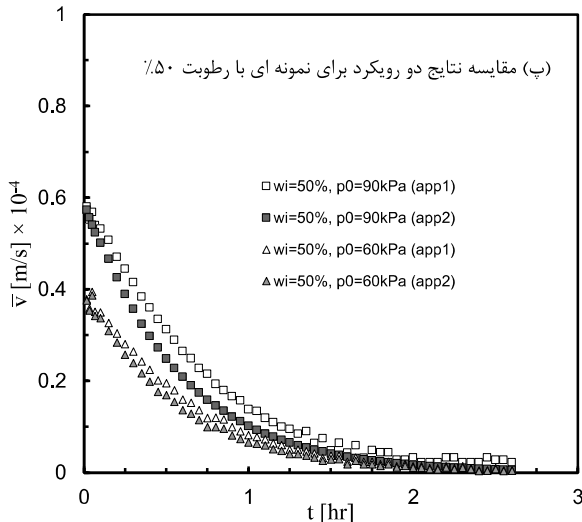
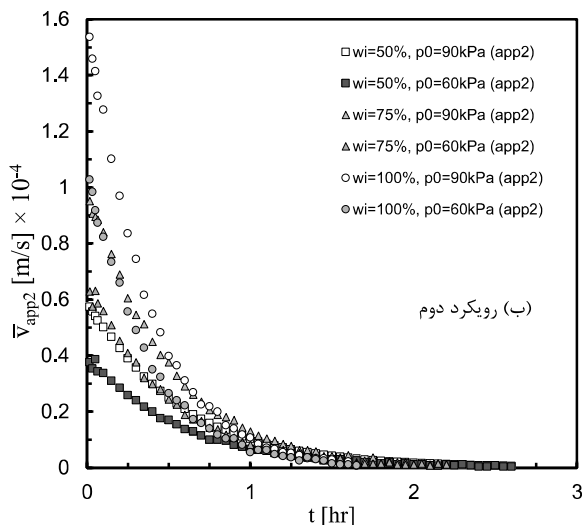
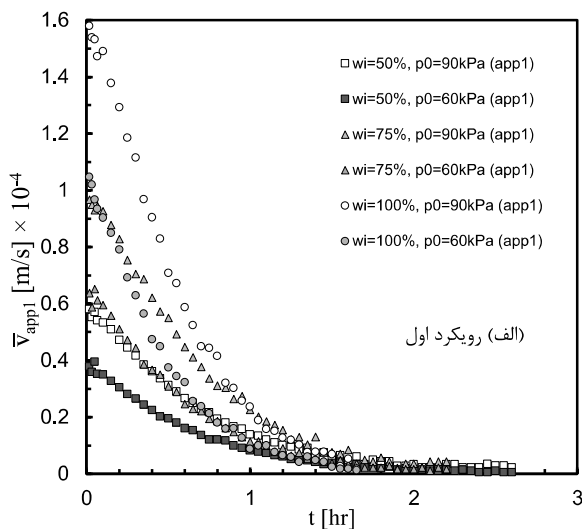
که در آن U_{vel} متوسط درجه تحکیم کل لایه بر حسب نسبت تغییرات سرعت جریان، \bar{V}_t متوسط سرعت جریان در لایه در لحظه t و \bar{V}_i متوسط سرعت جریان اولیه در لایه است.

برای ارزیابی رابطه نوین ارائه شده (۲۳)، مقادیر درجه تحکیم نهایی بر اساس دو رویکرد نسبت نشست و نسبت تغییرات سرعت جریان تعیین و در جدول ۵ ارائه شده‌اند.

جدول ۵. مقایسه مقادیر متوسط درجه تحکیم نهایی بر

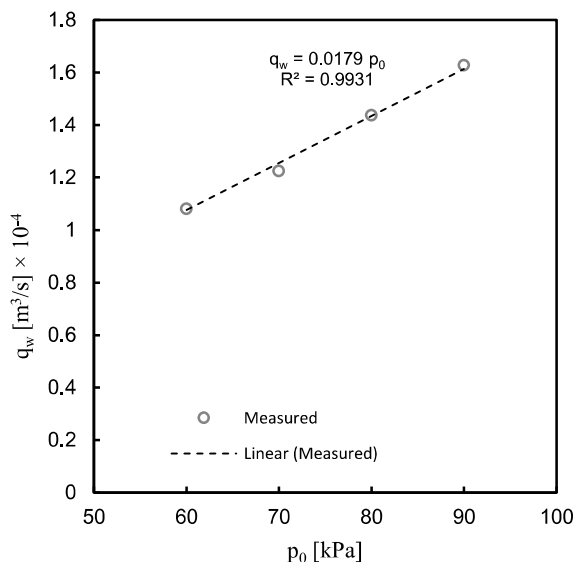
اساس رویکرد نسبت نشست و روش پیشنهادی

ω_i [%]	U_{set} [%]		U_{vel} [%]	
	(Based on Asaoka's method)		(Proposed in this study)	
	$p_0 = 90 \text{ kPa}$	$p_0 = 60 \text{ kPa}$	$p_0 = 90 \text{ kPa}$	$p_0 = 60 \text{ kPa}$
50	99.09	99.26	99.06	99.22
75	99.18	99.34	99.14	99.31
100	99.21	99.30	99.17	99.28



شکل ۱۱. تغییرات متوسط سرعت جریان بر حسب زمان

اعمال مکش بر اساس رویکرد اول و دوم



شکل ۱۳. تغییرات ظرفیت دبی تخلیه لوله زهکش بر حسب فشار مکشی اعمالی توسط پمپ پژوهش حاضر

همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، با افزایش فشار مکش تولید شده توسط پمپ خلأ، ظرفیت دبی تخلیه لوله افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش سرعت جریان ناشی از افزایش هد اعمالی می‌باشد. در مطالعات پیش‌بارگذاری خلأ، به دلیل مقدار بسیار اندک حاصل از عبارت حاوی ظرفیت دبی در رابطه (۲۴)، معمولاً از اثر آن بر روی μ صرف نظر می‌شود و μ فقط تابع n محاسبه می‌شود. با این وجود، برای افزایش دقت تحلیل‌ها، در مطالعه حاضر اثر آن در محاسبات نظر گرفته شده است. با ترکیب رابطه (۲۰) و رابطه (۲۳) در لحظه نهایی، می‌توان به رابطه (۳۰) دست یافت:

$$m_v = -\frac{t_{ult} k_h}{\mu \gamma_w d_c^2} \ln\left(\frac{\bar{v}_f}{\bar{v}_i}\right) \quad (30)$$

با توجه به رابطه پیشنهادی (۳۰)، می‌توان مقدار ضریب قابلیت فشرده‌گی حجمی نمونه‌ها را در حین تحکیم خلأ تخمین زد.

داده‌های ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهند که هماهنگی بسیار خوبی میان مقادیر متوسط درجه تحکیم به دست آمده از دو رویکرد وجود دارد. بنابراین، می‌توان از رابطه پیشنهادی (۲۳) برای محاسبه متوسط درجه تحکیم لایه تحت پیش-بارگذاری خلأ بهره گرفت. در رابطه (۲۰)، μ ضریبی است که از رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود (Indraratna *et al.*, 2016a):

$$\mu = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left[\ln n - \frac{3}{4} \right] + \pi \frac{2k_h l^2}{3q_w} \quad (24)$$

که در آن l طول زهکش قائم و n نشان دهنده نسبت شعاع یا نسبت قطر است که با توجه به نوع زهکش و آرایش نصب آن در لایه به کمک رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود:

$$n = \frac{r_e}{r_w} = \frac{d_e}{d_w} \quad (25)$$

که در آن d_w قطر مجرای زهکشی است به طوری که برای زهکش‌های قائم پیش ساخته با مقطع مستطیلی به ابعاد $a \times b$ به صورت رابطه (۲۶) معادلسازی می‌شود:

$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (26)$$

ضمناً، r_e و d_e به ترتیب شعاع و قطر مؤثر زهکشی است به طوری که (Das, 2019):

$$d_e = 2r_e = 2R \quad (27) \text{ (زهکش منفرد در سلول واحد)}$$

$$d_e = 1.128d \quad (28) \text{ (زهکش چندگانه با آرایش مربعی)}$$

$$d_e = 1.05d \quad (29) \text{ (زهکش چندگانه با آرایش مثلثی)}$$

که در آن d فاصله مرکز به مرکز زهکش‌های نصب شده از یکدیگر است.

ضمناً، در رابطه (۲۴)، q_w ظرفیت دبی تخلیه لوله زهکش در شرایطی است که درون مخزن آزمایش به جز آب هیچ مصالح دیگری وجود نداشته باشد. مطابق شکل ۱۳، تغییرات ظرفیت دبی تخلیه لوله زهکش با توجه به فشار مکشی پمپ مورد استفاده در پژوهش حاضر به صورت خطی اندازه‌گیری شده است.

۳-۶. صحت سنجی

اکنون با استفاده از رابطه (۱۹)، می توان مقادیر سرعت جریان متناظر اولیه و نهایی را به صورت زیر محاسبه نمود:

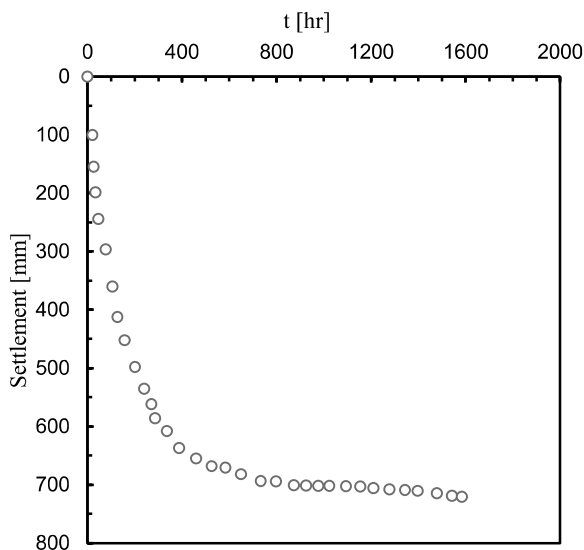
$$\bar{v}_i = 1.188 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$\bar{v}_f = 1.181 \times 10^{-8} \text{ m/s}$$

با توجه به اطلاعات به دست آمده، بر اساس رابطه پیشنهادی (۳۰) مقدار ضریب قابلیت فشرده‌گی حجمی لایه برای پروژه بهسازی دالیان چین معادل $1/911 \times 10^{-6}$ مترمربع بر نیوتن تخمین زده می‌شود که تنها ۶۴٪ خطای نسبی در مقایسه با مقدار m_v لایه در محل پروژه دارد که قابل قبول است و نشان دهنده صحت رابطه پیشنهادی می‌باشد.

ب- داده‌های آزمایشگاهی مطالعه حاضر

به منظور صحت سنجی بیشتر رابطه پیشنهادی برای داده‌های مطالعه حاضر، ابتدا مقادیر m_v با انجام آزمون تحکیم یک-بعدي اذئومتري بر روی نمونه‌ها تحت سربارهای قائم (۵'۷۰) معادل ۶۰ کیلوپاسکال و ۹۰ کیلوپاسکال محاسبه می‌شوند و سپس مطابق جدول ۶، با مقادیر m_v حاصل از رابطه (۳۰) مقایسه می‌گردند.



شکل ۱۴. تغییرات نشست لایه بر حسب زمان پیش‌بارگذاری خلأ در پروژه بهسازی دالیان چین (رسم مجدد بر اساس داده‌های برداشت شده از مطالعه (Shang and Zhang, 1999))

الف- اطلاعات یک پروژه میدانی

برای ارزیابی قابلیت اجرایی و دقت رابطه پیشنهادی (۳۰) در تخمین مقدار m_v ، اطلاعات مربوط به یک پروژه بهسازی به کمک پیش‌بارگذاری خلأ انجام شده در ساحل دالیان واقع در چین (Shang and Zhang, 1999) مورد بررسی قرار می‌گیرد. ناحیه مورد نظر حاوی باطله متشکل از ذرات خاکستر سدیم کربنات معلق در آلكالین به شکل دوغاب بوده است که با هدف استفاده به عنوان مصالح پی برای مناطق صنعتی استخراج شده‌اند. فشار مکشی در محدوده ۸۰ تا ۹۰ کیلوپاسکال از طریق نصب زهکش‌های قائم پیش‌ساخته تا عمق ۸ متری به زمینی در وسعت 45×45 مترمربع اعمال شده است. ابعاد زهکش‌ها 3×100 میلی‌متر و فاصله قرارگیری مرکز به مرکز آن‌ها از یکدیگر $1/2$ متر بوده که در آرایش مربعی نصب شده‌اند. بنابراین، با توجه به روابط (۲۵)، (۲۶) و (۲۸)، $d_w = 0.0656 \text{ m}$ ، $d_c = 1.354 \text{ m}$ و $n = 20.64$ به دست می‌آید. به دلیل آن که در مطالعه (Shang and Zhang, 1999) اشاره‌ای به ظرفیت دبی تخلیه زهکش نشده است، $\mu = 2.2826$ محاسبه می‌شود. از طرفی، مقدار ضریب نفوذپذیری و ضریب قابلیت فشرده‌گی حجمی متوسط لایه به ترتیب معادل $7/93 \times 10^{-9}$ متر بر ثانیه و $2/047 \times 10^{-6}$ مترمربع بر نیوتن بوده و عملیات پیش‌بارگذاری خلأ پس از ۶۶ روز (معادل ۱۵۸۴ ساعت) به اتمام رسیده است. شکل ۱۴، تاریخچه زمانی نشست لایه در پروژه مذکور را نشان می‌دهد.

با توجه به داده‌های نشست در شکل ۱۴ و ضخامت لایه تحت پیش‌بارگذاری خلأ (معادل ۸۰۰۰ میلی‌متر)، می‌توان به اطلاعات زیر برای بازه‌های زمانی اولیه و نهایی عملیات دست یافت:

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_i = \frac{100.413 - 0}{8000} = 1.255 \times 10^{-2} \\ \Delta t_i = 20.448 - 0 = 20.448 \text{ hr} = 73612.8 \text{ s} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_f = \frac{721 - 719}{8000} = 2.5 \times 10^{-4} \\ \Delta t_f = 1584 - 1543 = 41 \text{ hr} = 147600 \text{ s} \end{cases}$$

جدول ۶. توانایی رابطه پیشنهادی (۳۰) برای تخمین ضریب قابلیت فشرده‌گی حجمی نمونه‌های باطله مس سونگون

ω_i [%]	$m_v [m^2/N] \times 10^{-6}$					
	60 kPa			90 kPa		
	Oedometer test	Proposed Eq. (30)	Error [%]	Oedometer test	Proposed Eq. (30)	Error [%]
50	3.953	3.849	-2.63	3.948	3.781	-4.23
75	5.797	5.541	-4.42	5.786	5.519	-4.61
100	7.056	6.604	-6.41	7.035	6.525	-7.25

نکته حائز اهمیت دیگر آن است که با توجه به داده‌های جدول ۶، به طور کلی مقادیر m_v حاصل از رابطه پیشنهادی کوچکتر از m_v بدست آمده از آزمون ادئومتری هستند. برای ارزیابی دلیل احتمالی این امر، مقادیر نهایی کرنش قائم یک- بعدی کنترل می‌گردند.

۳-۷- کنترل مقادیر نهایی کرنش قائم

بر اساس مطالعه (Indraratna *et al.*, 2016b)، چنانچه کرنش-های قائم در نمونه‌ای تحت اعمال فشار خلأ در حالت تحکیم یک بعدی بزرگتر از ۱۵٪ شود، بهتر است به جای نظریه تحکیم کرنش کوچک (Small strain framework: SSF) ترزاقی (با دامنه کاربرد تا کرنش ۱۵٪) از چارچوب تحلیلی تحکیم کرنش بزرگ (Large strain framework: LSF) (برای کرنش‌های بزرگتر از ۱۵٪) استفاده گردد. زیرا هر چه مقدار کرنش قائم نمونه از ۱۵٪ (کرنش آستانه برای تحکیم خلأ) بیشتر شود، خطای نسبی خروجی حاصل از نظریه تحکیم برای تخمین مقدار دقیق کرنش افزایش می‌یابد و ممکن است اختلاف نسبی بین مقادیر تا حدود ۱۰٪ نیز حاصل شود. مطابق شکل ۸، کرنش‌های قائم نهایی مربوط به کلیه نمونه-های باطله مس سونگون بزرگتر از ۱۵٪ است. بنابراین، در محدوده رطوبت نمونه‌ها و فشارهای مکشی اعمالی، چارچوب کرنش بزرگ برقرار است. برای بررسی دقیق‌تر این مسأله، مقادیر نهایی کرنش قائم یک‌بعدی تحت فشار خلأ به شدت p_0 بر اساس چارچوب کرنش کوچک (رابطه ۳۱) محاسبه و مطابق جدول ۷ با مشاهدات آزمایشگاهی حاضر مقایسه شوند.

$$\varepsilon_{ult} = m_{v, oed} \cdot p_0 \quad (31)$$

که در آن $m_{v, oed}$ ضریب قابلیت فشرده‌گی حجمی بدست آمده از آزمون ادئومتری است.

از بررسی داده‌های ارائه شده در جدول ۷، می‌توان نتیجه گرفت که اگر برای پیش‌بینی مقدار نهایی کرنش قائم از چارچوب کرنش کوچک استفاده شود، مقادیر به دست آمده در مقایسه با مشاهدات آزمایشگاهی بزرگتر هستند، به گونه‌ای

همانطور که در جدول ۶ ملاحظه می‌شود، با افزایش رطوبت نمونه‌ها و افزایش فشار مکشی اعمال شده، اختلاف میان داده‌های m_v بدست آمده از رابطه (۳۰) با نتایج حاصل از آزمون ادئومتری افزایش می‌یابد؛ به طوری که حداکثر خطای نسبی ۷/۲۵٪- مربوط به نمونه‌ای با رطوبت اولیه ۱۰۰٪ و فشار مکشی ۹۰ کیلوپاسکال می‌باشد. بنابراین، با توجه به محدوده خطای نسبی موجود، می‌توان به صحت مشاهدات و سایر نتایج حاصل از پژوهش حاضر نیز اطمینان کرد. این امر همچنین نشان می‌دهد که فرض‌های اتخاذ شده در مطالعه حاضر از جمله برقراری قانون داریسی در باطله‌های ریزدانه مس سونگون، منطقی بوده‌اند. به علاوه، مقادیر بدست آمده برای m_v حاصل از هر دو رویکرد (رابطه ۳۰ و نتایج آزمون ادئومتری)، با مقادیر گزارش شده برای باطله‌های معدنی دیگر (Qiu and Sego, 2001; Hu *et al.*, 2017) در محدوده رطوبت اولیه موجود هماهنگی خوبی دارد. ضمناً، اگر چه مقدار m_v متناظر با فشار مکشی ۶۰ کیلوپاسکال به ازای کلیه مقادیر رطوبت، اندکی بزرگتر از m_v مربوط به فشار مکشی ۹۰ کیلوپاسکال است که این امر با نظر ارائه شده در مرجع (Budhu, 2010) در تطابق است، اما مطابق بحث مطرح شده برای مقدار ضریب تحکیم در بخش ۳-۲، به دلیل کوچک بودن دامنه تنش‌ها در این پژوهش، می‌توان به توصیه (Hu *et al.*, 2017)، مقدار m_v برای باطله‌های مس سونگون را نیز برای هر دو فشار تقریباً یکسان در نظر گرفت.

که در آن h_i نشان دهنده ارتفاع اولیه نمونه‌ها است و برای نمونه‌های باطله مس سونگون در آزمون‌های حاضر معادل ۳۰۰ میلی‌متر است.

از رابطه (۳۲) می‌توان این گونه نتیجه گرفت که چنانچه کل آب حفره‌ای موجود در نمونه زهکشی شود، از نظر ریاضی حداکثر کرنش قائم (ϵ_{max}) نمونه برابر است با:

$$\epsilon_{max} = \frac{e_i}{1+e_i} \quad (34)$$

با توجه به رابطه (۳۴)، مقادیر حداکثر کرنش قائم نمونه‌ها از نظر تئوری مطابق جدول ۸ قابل محاسبه خواهد بود.

جدول ۸. تغییرات حداکثر کرنش قائم نمونه‌های باطله مس سونگون بر حسب رطوبت اولیه

ω_i [%]	e_i	ϵ_{max} [%]
50	1.355	57.54
75	2.0325	67.02
100	2.71	73.05

همانطور که در جدول ۸ ملاحظه می‌شود، با افزایش رطوبت نمونه‌ها مقدار حداکثر کرنش آن‌ها هم افزایش می‌یابد که این امر ناشی از آن است که به ازای یک حجم کل ثابت در حالت اشباع، نمونه‌ای با آب بیشتر، نسبت تخلخل بیشتر و در نتیجه، ظرفیت باربری کوچکتر و قابلیت فشردگی حجمی بزرگتری دارد. با این وجود، از نظر عملی، تخلیه کل آب منفذی از یک نمونه تحت اعمال خلأ غیرممکن است و همواره بخشی از آب در میان حفرات باقی می‌ماند. زیرا محدوده فشار خلأ ایجاد شده به قدری بالا (در محدوده مکش بافتی ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوپاسکال) نیست که اضافه فشار منفذی ایجاد شده اولاً بتواند تمام آب منفذی محصور میان ذرات جامد را تخلیه کند و ثانیاً سبب بسته شدن تمام حفرات شود.

با توجه به نتایج بدست آمده از شکل ۸، می‌توان کرنش قائم نهایی نمونه‌ها را به صورت ارائه شده در جدول ۹ گردآوری کرد.

که با افزایش رطوبت اولیه نمونه‌ها، خطای نسبی در تخمین مقدار ϵ_{ult} افزایش می‌یابد. ضمناً، حداکثر خطای نسبی ۱۰/۱۴٪ است که به خوبی با نظر ارائه شده در مرجع (Indraratna et al., 2016b) درباره اختلاف میان مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج حاصل از چارچوب کرنش کوچک هماهنگ است.

جدول ۷. مقایسه کرنش قائم نهایی نمونه‌ها بر اساس چارچوب کرنش کوچک با مشاهدات آزمون‌ها

ω_i [%]	$p_0 = 60$ kPa		Error [%]	$p_0 = 90$ kPa		Error [%]
	ϵ_{ult} [%] (Observed)	ϵ_{ult} [%] (SSF)		ϵ_{ult} [%] (Observed)	ϵ_{ult} [%] (SSF)	
50	22.31	23.72	+6.32	33.43	35.53	+6.28
75	32.13	34.78	+8.25	48.06	52.07	+8.34
100	38.48	42.34	+10.03	57.49	63.32	+10.14

از آنجایی که هدف این پژوهش ارزیابی سرعت جریان است و اصالتاً به دنبال مقایسه نتایج کرنش نمونه‌های آزمایشگاهی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط روابط تحلیلی در چارچوب کرنش بزرگ نیست، می‌توان محدوده خطاهای به دست آمده (در جدول ۷) را قابل قبول دانست. بنابراین، به دلیل گستردگی و پیچیدگی بحث تحکیم شعاعی در چارچوب کرنش بزرگ (Indraratna et al., 2016c; Wang et al., 2020) می‌توان اثر آن را برای تحلیل دقیق‌تر تاریخچه زمانی کرنش‌های ایجاد شده در نمونه‌های باطله مس سونگون تحت پیش‌بارگذاری خلأ در یک پژوهش دیگر مورد ارزیابی قرار داد.

اکنون، برای اطمینان بیشتر از صحت مشاهدات، مقدار کرنش-ها با یک رویکرد نظری نیز کنترل می‌شوند. بدین منظور، با توجه به رطوبت و ارتفاع اولیه نمونه‌ها، می‌توان به طور جداگانه ارتفاع ستون آب (h_w) و ستون ذرات جامد (h_s) باطله را به ترتیب به کمک روابط (۳۲) و (۳۳) محاسبه نمود.

$$h_w = \frac{e_i}{1+e_i} h_i \quad (32)$$

$$h_s = \frac{1}{1+e_i} h_i \quad (33)$$

جدول ۹. کرنش نهایی مشاهده شده در نمونه‌ها بر حسب رطوبت اولیه و فشار مکشی اعمال شده

ω_i [%]	ϵ_{ult} [%] (Observed)		$\epsilon_{ult} (90kPa) / \epsilon_{ult} (60kPa)$
	$p_0 = 60 \text{ kPa}$	$p_0 = 90 \text{ kPa}$	
50	22.31	33.43	1.4984
75	32.13	48.06	1.4958
100	38.48	57.49	1.4940

داده‌های ارائه شده در جدول ۹ نشان می‌دهند که با افزایش ۵۰٪ در شدت فشار خلاً از ۶۰ کیلوپاسکال به ۹۰ کیلوپاسکال، کرنش قائم متناظر در نمونه‌ها با رطوبت ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ نیز به ترتیب، معادل ۴۹/۸۴٪، ۴۹/۵۸٪ و ۴۹/۴۰٪ افزایش یافته‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که کرنش با مکش اعمالی در شرایط اشباع یک رابطه مستقیم دارد. به علاوه، مطابق مطالب بیان شده ملاحظه می‌شود که کرنش قائم نهایی حاصل از پیش‌بارگذاری خلاً کوچکتر از حداکثر کرنش قائم تئوری (جدول ۸) شده است.

۳-۱. کنترل رطوبت نهایی نمونه‌ها و کارایی پیش‌بارگذاری

برای بررسی بیشتر وضعیت نمونه‌ها، رطوبت نهایی (ω_{ult}) آن‌ها در پایان پیش‌بارگذاری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور، می‌توان با توجه به روابط وزنی-حجمی حاکم بر یک نمونه خاک از رابطه (۳۵) استفاده نمود:

$$\omega_{ult} = \omega_i - \left(\frac{1 + e_i}{G_s} \right) \epsilon_{ult} \quad (35)$$

با توجه به داده‌های جدول ۹، می‌توان رطوبت نهایی نمونه‌ها را مطابق اطلاعات ارائه شده در جدول ۱۰ تعیین کرد.

جدول ۱۰. رطوبت نهایی نمونه‌ها در انتهای پیش‌بارگذاری

خلأ

ω_i [%]	ω_{ult} [%]		$\Omega = (\omega_{ult} - \omega_i) / \omega_i$ [%]	
	$p_0 = 60 \text{ kPa}$	$p_0 = 90 \text{ kPa}$	$p_0 = 60 \text{ kPa}$	$p_0 = 90 \text{ kPa}$
50	30.61	20.95	-38.78	-58.10
75	39.05	21.22	-47.93	-71.71
100	47.32	21.30	-52.68	-78.70

بر اساس جدول ۱۰، اولاً ملاحظه می‌شود که استفاده از مکش ۹۰ کیلوپاسکال در آبیگری و کاهش رطوبت نمونه‌ها بسیار

مؤثرتر از فشار خلاً ۶۰ کیلوپاسکال بوده است. ثانیاً مقدار عامل کاهش نسبی رطوبت (Ω) متناظر با فشار ۹۰ کیلوپاسکال به ازای رطوبت اولیه ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ به ترتیب ۱/۴۹۸۲، ۱/۴۹۶۱ و ۱/۴۹۳۹ برابر Ω مربوط به مکش ۶۰ کیلوپاسکال است که این امر تأیید کننده برقراری ارتباط مستقیم میان کارایی پیش‌بارگذاری خلاً با فشار اعمالی در کاهش رطوبت نمونه‌ها در شرایط اشباع می‌باشد. محدوده تغییرات رطوبت با نتایج ارائه شده در پژوهش (Shang and Zhang, 1999) نیز هماهنگ است. نکته حائز اهمیت دیگر آن است که مقادیر نهایی رطوبت در نمونه‌ها تحت فشار مکشی ۶۰ کیلوپاسکال بزرگتر از حد روانی ($LL=25\%$) هستند که نشان می‌دهد با وجود کاهش رطوبت، نمونه‌ها همچنان در وضعیت مایع قرار دارند. با این حال، به ازای فشار مکشی ۹۰ کیلوپاسکال رطوبت نهایی همه نمونه‌ها در محدوده بین حد انقباض ($SL=18\%$) و حد خمیری ($PL=22\%$) واقع شده است که این امر اولاً بیانگر قرارگیری نمونه‌ها در حالت خمیری است؛ ثانیاً با توجه به بزرگتر بودن ω_{ult} نمونه‌ها در مقایسه با حد انقباض ($SL=18\%$) می‌توان به این نتیجه رسید که نمونه‌ها در پایان پیش‌بارگذاری خلاً همچنان در وضعیت اشباع کامل قرار دارند و وارد فاز غیراشباع نشده‌اند. از این بحث می‌توان دو نتیجه اساسی گرفت:

اولاً، می‌توان به عنوان یک نوآوری، یک نسبت تخلخل حداقل برای نمونه‌ها تحت پیش‌بارگذاری خلاً ($e_{min,VP}$) به صورت رابطه (۳۶) تعریف کرد:

$$e_{min,VP} = \frac{\omega_{ult} G_s}{S_r} \quad (36)$$

که در آن S_r درجه اشباع نهایی نمونه در پایان پیش‌بارگذاری خلاً است.

ثانیاً، چنانچه تحت شرایطی (به طور مثال، زمانی که رطوبت اولیه نمونه به حد روانی بسیار نزدیک یا حتی کمتر از آن باشد)، در پایان پیش‌بارگذاری خلاً رطوبت نهایی کمتر از حد انقباض شود، نمونه وارد فاز غیراشباع می‌گردد که می‌تواند در پژوهش‌های بعدی مورد بررسی قرار گیرد.

مخزن استوانه‌ای انجام شد و با استخراج دو رابطه مبتنی بر دو رویکرد استفاده از نرخ تخلیه آب و نرخ کرنش قائم، سرعت جریان از روی داده‌های آزمایشگاهی تعیین گردید. مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت موارد زیر بیان نمود:

(۱) تغییرات حجم تخلیه و کرنش قائم نمونه با تقریب بسیار خوبی ($R^2 > 0.98$) از یک تابع نمایی بر حسب زمان تبعیت می‌کند، به گونه‌ای که 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 خط مماس بر نمودار کاهش می‌یابد و پس از مدتی، به دلیل استهلاک اضافه فشار منفذی، گرادیان هیدرولیکی موجود تأثیر قابل توجهی بر روی تخلیه آب منفذی ندارد و نمودار به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند. این مقدار بیانگر بیشترین تغییر حجم قابل تحمیل بر نمونه تحت فرایند پیش بارگذاری خلأ است که به صورت کرنش نهایی نمونه نمایان می‌شود.

(۲) به ازای یک لحظه معین، با افزایش فشار مکش اعمالی و رطوبت اولیه نمونه، سرعت جریان افزایش می‌یابد.

(۳) زمان نهایی مورد نیاز برای تکمیل فرایند پیش‌بارگذاری خلأ تابع رطوبت نمونه است و می‌توان با تقریب خوبی آن را در محدوده مکش ۶۰ کیلوپاسکال تا ۹۰ کیلوپاسکال اعمالی، مستقل از شدت فشار دانست.

(۴) در لحظات اولیه اعمال مکش، مقادیر سرعت جریان حاصل از دو رویکرد تقریباً با یکدیگر برابر هستند، اما به تدریج بر اساس رابطه رویکرد اول، جریان سریعتر از حالت استفاده از رویکرد دوم است.

(۵) بزرگ‌تر بودن \bar{v}_{app1} در مقایسه با \bar{v}_{app2} به دلیل آن است که بر خلاف رویکرد دوم، رویکرد اول فقط بر اساس روند تغییر حجم نمونه ناشی از حجم تخلیه شده آب به تعیین سرعت جریان می‌پردازد و اثرات ناشی از پارامترهای تحکیم شعاعی و نرخ استهلاک اضافه فشار آب منفذی در نمونه را

با توجه به مطالب بیان شده می‌توان اینگونه استنباط کرد که استفاده از تکنیک پیش‌بارگذاری خلأ، تنها تا رسیدن نسبت تخلخل نمونه به $e_{min,VP}$ مؤثر است و پس از آن فرایند تغییر حجم و زهکشی تحت مکش آنقدر ناچیز (نزدیک به صفر) می‌شود که می‌توان آن را متوقف شده در نظر گرفت. بنابراین، در چنین شرایطی برای ادامه تحکیم باید از روش اعمال سربار کمک گرفت و چنانچه هدف آبیگری به طور مطلق باشد، باید از روش حرارت‌دهی برای حذف آب منفذی باقیمانده در نمونه استفاده گردد. برای نمونه‌های باطله مس سونگون مقادیر نسبت تخلخل حداقل تحت پیش‌بارگذاری خلأ به صورت ارائه شده در جدول ۱۱ قابل محاسبه هستند.

جدول ۱۱. نسبت تخلخل حداقل نمونه‌های مس سونگون تحت پیش‌بارگذاری خلأ

ω_i [%]	$e_{min, VP}$
50	0.5677
75	0.5751
100	0.5772

با توجه به داده‌های جدول ۱۱ می‌توان نسبت تخلخل حداقل نمونه‌های باطله مس سونگون تحت پیش‌بارگذاری خلأ را تقریباً معادل ۰/۵۷ در نظر گرفت. به علاوه، می‌توان نتیجه گرفت که $e_{min,VP}$ مستقل از رطوبت اولیه نمونه‌های باطله مس سونگون بوده است. ضمناً، باید توجه داشت که پارامتر $e_{min,VP}$ پیش‌بارگذاری خلأ با پارامتر e_{min} مربوط به بحث ارزیابی درجه تراکم یا دانسیته نسبی (D_r) برای خاک‌های درشت دانه تفاوت دارد.

۴. نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در پژوهش حاضر، اثر تراز فشار مکشی و رطوبت اولیه خاک بر نرخ تخلیه آب منفذی و کرنش قائم ناشی از روش پیش-بارگذاری خلأ برای نمونه‌های اشباع باطله ریزدانه مربوط به معدن مس سونگون مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور، با طراحی یک سیستم آزمایشگاهی با قابلیت تنظیم فشار مکشی، فرایند پیش‌بارگذاری خلأ بر روی نمونه‌های واقع در یک

(۸) رابطه پیشنهادی برای تعیین متوسط درجه تحکیم لایه تحت پیش‌بارگذاری خلأ بر اساس نسبت سرعت در زمان-های اولیه و نهایی فرایند، می‌تواند جایگزین مناسبی برای محاسبه مقدار متوسط درجه تحکیم به کمک رویکردهای متداول مانند استفاده از نسبت نشست و نسبت اضافه فشار منفذی باشد.

(۹) با انجام آزمون ادنومتري برای نمونه‌های باطله مس سونگون، صحت رابطه پیشنهادی برای تخمین مقدار ضریب قابلیت فشردگی حجمی نمونه‌ها مورد تأیید قرار گرفت. ضمناً، رابطه پیشنهادی با توجه به داده‌های گزارش شده در یک پروژه بهسازی پیش‌بارگذاری خلأ برای باطله‌هایی با رطوبت بالا مربوط به ساحل دالیان چین نیز با دقت بسیار مناسبی اعتبار سنجی گردید.

لحاظ نمی‌کند. بنابراین، رویکرد دوم، نتایج واقع بینانه‌تری برای سرعت جریان تحت پیش‌بارگذاری خلأ ارائه می‌دهد.

(۶) ارتباط میان سرعت جریان مبتنی بر دو رویکرد را می‌توان از طریق پارامتر نسبت سرعت n_{vel} بررسی نمود. به طوری که در فشار مکشی ثابت، با افزایش رطوبت هر نمونه، پارامتر نسبت سرعت افزایش می‌یابد و به ازای یک رطوبت ثابت، هر چه فشار مکشی اعمال شده بزرگتر باشد، پارامتر نسبت سرعت هم بزرگتر می‌شود.

(۷) استفاده از روش پیش‌بارگذاری خلأ، تنها تا رسیدن نسبت تخلخل نمونه به پارامتر نسبت تخلخل حداقل مؤثر است و پس از آن می‌توان فرایند تغییرحجم و زهکشی را متوقف شده در نظر گرفت.

مراجع

- چشمی، اکبر؛ عزالدین، زهرا؛ مرادی هرسینی، کاظم؛ ۱۳۹۴. مقایسه ضریب تحکیم حاصل از آزمایش CPTu و آزمایش تحکیم یک بعدی. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، دوره ۸، شماره ۳ و ۴، صفحه ۸۱-۹۴.
- روستا، مرتضی؛ غلام نژاد، جواد؛ یاراحمدی بافقی، علیرضا؛ محمدی، حمیدرضا؛ نجفی، مهدی؛ ۱۳۹۶. تعیین پارامترهای مقاومت برشی مواد دامپ باطله معدن با تکیه بر روش تحلیل برگشتی و تعیین ارتفاع پایدار و فاصله‌ی ایمن دامپ باطله تا دیواره‌ی معدن (مطالعه‌ی موردی: معدن شماره یک گل گهر سیرجان). نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، دوره ۱۰، شماره ۳ و ۴، صفحه ۸۳-۸۸.
- نجفی، مهدی؛ یاراحمدی بافقی، علیرضا؛ ۱۳۸۷. تحلیل قابلیت اعتماد پایداری سدهای باطله. نشریه انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، دوره ۱، شماره ۳ و ۴، صفحه ۵۹-۷۰.
- Abazari, E.T., 2013. Stabilization of oil sands tailings using vacuum consolidation. University of Alberta, Edmonton, Alberta, p. 157.
- Ariyaratna, P.R.C., Thilakasiri, H.S., Karunawardena, W.A., 2011. Vacuum consolidation of Sri Lankan peaty soil. Annual Transactions of the Institution of Engineers, Colombo, Sri Lanka, pp. 27-37.
- Artidteang, S., Bergado, D.T., Saowapakpiboon, J., Teerachakulpanich, N., Kumar, A., 2011. Enhancement of efficiency of prefabricated vertical drains using surcharge, vacuum and heat preloading. Geosynthetics International 18, 35-47.
- Asaoka, A., 1978. Observational Procedure of settlement prediction.
- Been, K., Sills, G.C., 1981. Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study. Géotechnique 31, 519-535.
- Bo, M.W., Choa, V., Wong, K.S., 2005. Reclamation and soil improvement on ultra-soft soil. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement 9, 23-31.
- Bonin, M.D., Nuth, M., Dagenais, A.-M., Cabral, A.R., 2014. Experimental Study and Numerical Reproduction of Self-Weight Consolidation Behavior of Thickened Tailings. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 140, 04014068.
- Budhu, M., 2010. Soil Mechanics and Foundations, 3rd Edition. John Wiley & Sons, Incorporated.
- Budi, Z., Qi, L., Carlos, S., 2018. Particle Migration and Clogging in Radial Flow: A Microfluidics Study. Micro to macro mathematical modelling in soil mechanics, Reggio Calabria, Italy.
- Cao, Y., Zhang, J., Xu, J., Xu, G., 2020. A Large-Strain Vacuum-Assisted Radial Consolidation Model for Dredged Sludge Considering Lateral Deformation. KSCE Journal of Civil Engineering 24, 3561-3572.

- Chai, J., Carter, J., Hayashi, S., 2005. Ground deformation induced by vacuum consolidation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering* 131, 1552-1561.
- Chai, J., Carter, J.P., 2011. Deformation analysis in soft ground improvement, Chapter 4, Vacuum consolidation. Springer Science & Business Media.
- Chai, J., Miura, N., Bergado, D., 2008. Preloading clayey deposit by vacuum pressure with cap-drain: analyses versus performance. *Geotext Geomembr* 26, 220-230.
- Chai, J., Ong, C.Y., Carter, J.P., Bergado, D.T., 2013. Lateral displacement under combined vacuum pressure and embankment loading. *Géotechnique* 63, 842-856.
- Chai, J., C., Matsunaga, K., Sakai, A., Hayashi, S., 2009. Comparison of vacuum consolidation with surcharge load induced consolidation of a two-layer system. *Géotechnique* 59, 637-641.
- Chen, Z.J., Feng, W., Li, A., Al-Zaoari, K.Y.M., Yin, J.H., 2022. Experimental and molecular dynamics studies on the consolidation of Hong Kong marine deposits under heating and vacuum preloading. *Acta Geotechnica*.
- Chu, J., Yan, S., Lam, K.P., 2012. Methods for improvement of clay slurry or sewage sludge. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement* 165, 187-199.
- Coggon, J.M., Juran, I., Thevanayagam, S., 1994. Vacuum consolidation technology: principles and field experience. *ASCE Proc. Conf. on Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments*, College Station, TX, New York, USA, pp. 1237-1248.
- Conte, E., Troncone, A., 2009. Radial consolidation with vertical drains and general time-dependent loading. *Canadian Geotechnical Journal* 46, 25-36.
- Das, B.M., 2019. *Advanced Soil Mechanics*. CRC Press.
- Das, B.M., Sobhan, K., 2013. *Principles of Geotechnical Engineering*
- Deng, A., Xu, S.L., 2010. Consolidating dredge soil by combining vacuum and dynamic compaction effort. *Ground Improvement and Geosynthetics*, pp. 113-118.
- Deng, D.S., Hong, Z.S., Liu, C.J., Ding, J.W., Hong, P.Y., 2009. Large-scale model tests on dewater of dredged clay by use of ventilating vacuum method. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* 31, 250-253.
- Dubin, B.I., Moulin, G., 1986. Influence of a Critical Gradient on the Consolidation of Clays. *ASTM special technical publications*, 354-377.
- Fu-lai, N., Xin, W., Xiao-bin, Z., Wei, L., 2017. Experimental Study on Vacuum Dynamic Consolidation Treatment of Soft Soil Foundation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 269, 012009.
- Geng, X., Indraratna, B.N., Rujikiatkamjorn, C., 2012. Analytical solutions for a single vertical drain with vacuum and time-dependent surcharge preloading in membrane and membrane-less systems. *International Journal of Geomechanics Journal* 12, 15.
- Guo, W., Chu, J., 2016. New observational method for prediction of one-dimensional consolidation settlement. *Géotechnique* 67, 516-522.
- Hansbo, S., 1960. Consolidation of clay: With special reference to influence of vertical sand drains. *Proceedings of the Swedish Geotechnical Institute*. Swedish Geotechnical Institute., Stockholm, Sweden, pp. 1-160.
- Hansbo, S., 2001. Consolidation equation valid for both Darcian and non-Darcian flow. *Géotechnique* 51, 51-54.
- Hu, L., Wu, H., Zhang, L., Zhang, P., Wen, Q., 2017. Geotechnical Properties of Mine Tailings. *Journal of Materials in Civil Engineering* 29, 04016220.
- Iftekhar, A.S., Sumi, S., Stephen, R., 2018. Development of a model to predict consolidation of tailings. *Environmental Geotechnics* 5, 271-284.
- Indraratna, B., Kan, M.E., Potts, D., Rujikiatkamjorn, C., Sloan, S.W., 2016a. Analytical solution and numerical simulation of vacuum consolidation by vertical drains beneath circular embankments. *Computers and Geotechnics* 80, 83-96.
- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Zhong, R., 2016b. Recent Developments of Vacuum-Assisted Consolidation of Soft Estuarine Clays. *Geotechnical and Structural Engineering Congress 2016*, pp. 950-959.
- Indraratna, B., Zhong, R., Fox, P.J., Rujikiatkamjorn, C., 2016c. Large-strain vacuum-assisted consolidation with non-Darcian radial flow incorporating varying permeability and compressibility. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 04016088.
- Indraratna, B.N., Rujikiatkamjorn, C., McIntosh, G., Balasubramaniam, A.S., 2007. Vacuum Consolidation Effects on Lateral Yield of Soft Clays as Applied to Road and Railway Embankment. *Proceedings of the International Symposium on Geotechnical Engineering, Ground Improvement and Geosynthetics for Human Security and Environmental Preservation*, Bangkok, Thailand, pp. 31-62.
- Jin, Y., 2009. Renovated Vacuum Consolidation with Electroosmosis. *Geosynthetics in Civil and Environmental Engineering*, 460-463.
- Jinfeng, L., Huie, C., Xiaoqing, Y., Wenchong, S., 2020. Analysis of the Effectiveness of the Step Vacuum Preloading Method: A Case Study on High Clay Content Dredger Fill in Tianjin, China. *Journal of Marine Science and Engineering* 8, 1-16.

- Kianfar, K., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., 2013. Radial consolidation model incorporating the effects of vacuum preloading and non-Darcian flow. *Géotechnique* 63, 1060-1073.
- Kjellman, W., 1952. Consolidation of Clayey Soils by Atmospheric Pressure. *Proceedings of a Conference on Soil Stabilization*, Massachusetts Institute of Technology, Boston, pp. 258-263.
- Klohn, E.J., 1997. Tailings dams in Canada. *Geotechnical News*. BiTech Richmond Publishers, BC, Canada, pp. 117-123.
- Kumar, S.G., Robinson, R., Rajagopal, K., 2013. Improvement of soft clays by combined vacuum consolidation and geosynthetic encased stone columns. *Indian Geotechnical Journal* 44, 59-67.
- Lai, J., Liu, H., Qiu, J., Chen, J., 2016. Settlement Analysis of Saturated Tailings Dam Treated by CFG Pile Composite Foundation. *Advances in Materials Science and Engineering* 2016, 7383762.
- Lee, K.H., Kang, M.C., Jung, D.S., 2006. Nonlinear consolidation analysis of reclaimed ground with lateral drain vacuum consolidation. *KSCE Journal of Civil Engineering* 10, 427.
- Lei, H., Fang, Q., Liu, J., Zheng, G., Wang, P., Gao, L., 2021. Ultra-soft Ground Improvement Using Air-Booster Vacuum Preloading Method: Laboratory Model Test Study. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 7, 87.
- Leong, E.C., Soemitro, R.A.A., Rahardjo, H., 2000. Soil improvement by surcharge and vacuum preloadings. *Géotechnique* 50, 601-605.
- Li, C.-x., Xiao, J., Yang, Y., Wu, W., 2018. One-Dimensional Large-Strain Nonlinear Consolidation of Overconsolidated Clays with a Threshold Hydraulic Gradient. *Advances in Civil Engineering* 2018, 1-15.
- Loan, T., Sandanbata, I., Kimura, M., 2006. Vacuum Consolidation Method-Worldwide Practice and the Latest Improvement in Japan.
- Long, P., Nguyen, L., Bergado, D., Balasubramaniam, A., 2015. Performance of PVD improved soft ground using vacuum consolidation methods with and without airtight membrane. *Geotextiles and Geomembranes* 43, 473-483.
- Merkel, G., Stefan Lindner, Barnekow, U., 2011. Stabilization of Soft Tailings by Surcharge Loading for Re-contouring of the Truenzig Tailings Pond of Wismut. *Tailings and Mine Waste Conference*. Vancouver: University of British Columbia Library.
- Mesri, G., Khan, A., 2012. Ground improvement using vacuum loading together with vertical drains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138, 680-689.
- Naeini, M., Akhtarpour, A., 2018. Numerical analysis of seismic stability of a high centerline tailings dam. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 107, 179-194.
- O'Kelly, B.C., 2015. Case studies of Vacuum Consolidation Ground Improvement in Peat Deposits; Chapter 11. In: Ltd., E. (Ed.), *Embankments with Special Reference to Consolidation and Other Physical Methods*, pp. 315-345.
- Perera, D., Indraratna, B., Leroueil, S., Rujikiatkamjorn, C., Kelly, R., 2017. Analytical model for vacuum consolidation incorporating soil disturbance caused by mandrel-driven drains. *Canadian Geotechnical Journal* 54, 547-560.
- Pichan, S.P., O'Kelly, B.C., 2013. Stimulated decomposition in peat for engineering applications. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement* 166, 168-176.
- Qin, J., Zheng, J., Li, L., 2021. An analytical solution to estimate the settlement of tailings or backfill slurry by considering the sedimentation and consolidation. *International Journal of Mining Science and Technology* 31, 463-471.
- Qiu, Y., Sego, D.C., 2001. Laboratory properties of mine tailings. *Canadian Geotechnical Journal* 38, 183-190.
- Robinson, R.G., Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., 2012. Final state of soils under vacuum preloading. *Canadian Geotechnical Journal* 49, 729-739.
- Rondonuwu, S.G., 2015. Behavior of vacuum consolidation with and without surcharge load. *Department of Science and Advance Technology, Graduate School of Science and Engineering*. Saga University, Saga, Japan, p. 127.
- Rujikiatkamjorn, C., Indraratna, B., 2006. Improvement of soft clays using vacuum-assisted consolidation method. *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*, pp. 1-6.
- Sathananthan, I., Indraratna, B., 2006. Plane-strain lateral consolidation with non-Darcian flow. *Canadian Geotechnical Journal* 43, 119-133.
- Shamsai, A., Pak, A., Bateni, S.M., Ayatollahi, S., 2007. Geotechnical Characteristics of Copper Mine Tailings: A Case Study. *Geotechnical and Geological Engineering* 25, 591-602.
- Shang, J.Q., Zhang, J., 1999. Vacuum consolidation of soda-ash tailings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement* 3, 169-177.
- Sheridan, T.M., Zornberg, J.G., Gilbert, R.B., 2012. Evaluation of Settlements at the Conquista Tailings Impoundment. *The University of Texas at Austin*, pp. 1-56.
- Singh, R.k., 2017. Filtration Characteristics of CMP Slurries. *Advanced Materials Handling*, 27-30.
- Songyu, L., Dingwen, Z., Guangyin, D., Wenjun, H., 2016. A New Combined Vacuum Preloading with Pneumatic Fracturing Method for Soft Ground Improvement. *Procedia Engineering* 143, 454-461.

- Suazo, G., Fourie, A., Doherty, J., Hasan, A., 2016. Effects of confining stress, density and initial static shear stress on the cyclic shear response of fine-grained unclassified tailings. *Géotechnique* 66, 401-412.
- Sun, H.L., Weng, Z.Q., Liu, S.J., Geng, X.Y., Pan, X.D., Cai, Y.Q., Shi, L., 2020. Compression and consolidation behaviors of lime-treated dredging slurry under vacuum pressure. *Engineering Geology* 270, 105573.
- Tang, M., Shang, J.Q., 2000. Vacuum preloading consolidation of Yaoqiang Airport runway. *Géotechnique* 50, 613-623.
- Vu, V.T., Yao, L.H., Wei, Y.J., 2016. Laboratory investigation of axisymmetric single vacuum well point. *Journal of Central South University* 23, 750-756.
- Wang, J., Ding, J., Wang, H., Mou, C., 2020. Large-strain consolidation model considering radial transfer attenuation of vacuum pressure. *Computers and Geotechnics* 122, 103498.
- Wang, J., Huang, G., Fu, H., Cai, Y., Hu, X., Lou, X., Jin, Y., Hai, J., Ni, J., Zou, J., 2019a. Vacuum preloading combined with multiple-flocculant treatment for dredged fill improvement. *Engineering Geology* 259, 105194.
- Wang, J., Ni, J., Cai, Y., Fu, H., Wang, P., 2017. Combination of vacuum preloading and lime treatment for improvement of dredged fill. *Engineering Geology* 227, 149-158.
- Wang, J., Zhao, R., Cai, Y., Fu, H., Li, X., Hu, X., 2018. Vacuum preloading and electro-osmosis consolidation of dredged slurry pre-treated with flocculants. *Engineering Geology* 246, 123-130.
- Wang, L., Li, Y., Zhao, G., Chen, N., Xu, Y., 2019b. Experimental Investigation of Flow Characteristics in Porous Media at Low Reynolds Numbers ($Re \rightarrow 0$) under Different Constant Hydraulic Heads. *Water* 11, 2317.
- Wels, C., Barnekow, U., Haase, M., Exner, M., Jakubick, T., U., 2000. Case study on self-weight consolidation of uranium tailings. *International symposium on the process metallurgy of uranium, Canada*, pp. 749-766.
- Wu, H., Hu, L., 2011. Theoretical analysis and numerical simulation of vacuum preloading in combination with electro-osmosis consolidation. *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, pp. 605-615.
- Xu, G., Yu, X., Wu, F., Yin, Y., 2016. Feasibility of vacuum consolidation in managing dredged slurries with wheat straw as drainage channels. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 1-7.
- Zhang, R.J., Zheng, Y.L., Dong, C.Q., Zheng, J.-J., 2022. Strength behavior of dredged mud slurry treated jointly by cement, flocculant and vacuum preloading. *Acta Geotechnica* 17, 2581-2596.
- Zhang, R., 2016. Electrokinetics and vacuum combined dewatering of oil sand tailings. *Civil and Environmental Engineering. The University of Western Ontario*, p. 105.
- Zhou, Y., Chen, L., Gong, Y., Wang, S., 2021. Pore-Scale Simulations of Particles Migration and Deposition in Porous Media Using LBM-DEM Coupling Method. *Processes* 9, 465.