Archive of SID

مهندسی عمران شریف، (اپلیز ۱۳۹۵)
دوره ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۳۵-۴۶

Original Article

بررسی آزمایشگاهی پارامترهای مؤثر در مقاومت فشاری و خمشی مصالح خاک سیمان و بررسی عددی استفاده از این مصالح برای فرازبند سد بختیاری

میلاد تاج‌دینی* (دانشجوی دکتری)
مسعود حاجی‌علیلوی بناب (دانشیار)
مهران حسن‌زاده (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

خاک سیمان مخلوطی از سیمان پرتلند، خاک، و آب است، که به‌واسطه‌ی عمل هیدراتاسیون سیمان و تراکم اجزاء آن به هم چسبیده و ترکیبی متراکم، با دوام، با نفوذپذیری کم، و مقاوم در برابر سایش ایجاد می‌کند. پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت فشاری مصالح خاک سیمان مورد پژوهش پژوهشگران مختلفی قرار گرفته‌و عواملی همچون نسبت آب به سیمان، میزان سیمان و نوع آن از پارامترهای مؤثر در مقاومت این مصالح عنوان شده‌اند. هدف از این مطالعه، بررسی پارامترهای دیگری نظیر: ارزش ماسه‌یی، شاخص خمیری و نوع دانه‌بندی بر روی مقاومت فشاری و خمشی با استفاده از آزمایش تک‌محوری و خمشی روی این مصالح است، که بر روی ۷ نوع دانه‌بندی مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از آن بوده است که مقاومت فشاری و خمشی مصالح خاک سیمان با افزایش ارزش ماسه‌یی و کاهش اندیس خمیری متناسب بوده است. همچنین مدل‌سازی عددی بر روی سازه‌ی فرازبند سد بختیاری حاکی از پایداری آن با استفاده از مصالح مذکور بوده است.

واژگان کلیدی: مصالح خاک سیمان، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، ارزش ماسه‌یی، اندیس خمیری، نوع دانه‌بندی، مدل‌سازی عددی.

milad_tajdini@ alum.sharif.edu
hajialilue@tabrizu.ac.ir
mehran_hassanzadeh@gmail.com

۱. مقدمه

بتن بنا به تعریف مخلوطی از اجزاء متشکل از یک سامانه است، که شامل زیرسامانه‌های خمیر سیمان (سیمان و آب)، سامانه‌ی سنگ‌دانه‌ها (شن و ماسه) و سامانه‌ی حد اشتراک (محل اتصال) اجزاء ذکرشده است، که آن را می‌توان به شکل‌های بسیار زیادی در آورد. بتن‌های ویژه نیز به بتن‌هایی با خصوصیات غیرمعمول یا بتن‌های تولیدشده با روش‌های غیرمعمول گفته می‌شود. خاک سیمان نیز از جمله همین بتن‌های ویژه است.

نام دیگر خاک سیمان، زمین کوبیده‌شده است و کاربرد اصلی خاک سیمان به‌عنوان لایه‌ی اساس زیرین لایه‌های قیری و روسازی‌های بتنی است و کاربردهای دیگری نظیر حفاظت از شیب‌ها در سدهای خاکی و خاکریزها، مصالح آب‌بند فاضلاب‌ها و بتن پی سازه‌هاست. اجرای خاک سیمان در پروژه‌های عمرانی سطح کشور و در پروژه‌های سدسازی رشد چشم‌گیری داشته است.

طبق تعریف ACI ۱۱۶R، خاک سیمان مخلوطی از خاک و مقدار سیمان مشخص و آب است، که با چگالی بالایی متراکم شده باشند. درتعریف نشریه‌ی ۵۴ کمیته‌ی بین‌المللی سدهای بزرگ، خاک سیمان مخلوطی از سیمان پرتلند، خاک، و آب است، که به‌واسطه‌ی هیدراسیون سیمان و تراکم ماشین‌آلات اجزاء آن به هم چسبیده‌اند و ترکیبی متراکم، با دوام، با نفوذپذیری کم، و مقاوم در برابر سایش ایجاد می‌شود. در ACI ۲۳۰.IR، خاک سیمان به‌طور جامع‌تری تعریف شده است: مصالحی است که به واسطه‌ی مخلوط‌شدن متراکم و عمل‌آوری خاک و سنگ‌دانه و سیمان پرتلند، افزودنی‌های شیمیایی، و مواد مکمل سیمانی محتمل شامل: پوزولان‌ها و آب به شکل مصالح سخت‌شده با خصوصیات مهندسی ویژه ساخته می‌شود.[۱و۲]

مصالح خاک سیمان عموماً در مقابل گزینه‌ی بتن غلتکی در پروژه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. خاک سیمان و بتن غلتکی هر دو به‌طور کامل مخلوط‌های متراکم‌شده‌یی از سیمان، سنگ‌دانه، و آب هستند، ولی تفاوت اصلی آنها در نوع و اندازه‌ی سنگ‌دانه‌هاست. خاک سیمان اصولاً ریزدانه‌ی طبیعی گردگوشه است، در حالی که بتن غلتکی شامل دانه‌های با بیش از ۱۹ میلی‌متر است. امروزه خاک سیمان به‌عنوان محافظ شیب سدهای خاکی استفاده می‌شود، در حالی که بتن غلتکی بیشتر در مقاطع بتن حجیم مانند سدهای وزنی استفاده می‌شود. تقریباً همه نوع خاک در ساخت خاک سیمان مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما خاک‌های آلی و رس‌های خمیری و ماسه‌های واکنش‌زا از این قاعده مستثنی هستند. معمولاً

---

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۵/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۰/۷، پذیرش ۱۳۹۳/۱۰/۲۷.

www.SID.ir

Archive of SID

خاک‌های حاوی ۵-۳۵ درصد ریزدانه‌ی عبوری از الک ۲۰۰، بهترین صرفه‌ی اقتصادی را دارند؛ اما خاک‌های با بیش از ۲٪ مواد آلی برای تثبیت به شدت غیر قابل‌قبول‌اند.[۱و۲]

در پژوهشی در سال ۱۹۹۲ با استفاده از خواص شیمیایی سیمان به بررسی مقاومت مخلوط خاک سیمان در خاک‌هایی با شاخص‌های خمیری بالا پرداخته شده و این نتیجه به‌دست آمده است که سیمان با بالابردن PH خاک، محیط را مساعد واکنش‌های پوزولانیک می‌کند و مقاومت مصالح را تاحد بالایی بهبود می‌بخشد. همچنین در پژوهش مذکور با آزمایش بر سه نوع خاک موجود، این نتیجه به‌دست آمده است که با افزایش درصد سیمان، مقدار مقاومت فشاری محصورنشده برای خاک‌های با PI بالاتر تأثیر بیشتری دارد.[۳]

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۴، به بررسی مقاومت خاک‌ها پرداخته و در این راه از دو روش فیزیکی (تراکم) و شیمیایی (تثبیت) استفاده شده و این نتیجه به‌دست آمده است که استفاده‌ی توأم از روش تراکم دینامیکی و تثبیت با سیمان، مقاومت فشاری مصالح را تا ۲٫۵ برابر افزایش می‌دهد.[۴]

در پژوهشی در سال ۲۰۰۵، نیز به بررسی ویژگی‌های مصالح خاک سیمان به‌عنوان مصالح دوغاب پرداخته شده است. این ویژگی‌ها عبارت بودند از: کارایی، مقاومت فشاری، ویژگی‌های تنش ـ کرنش و... همچنین در پژوهش مذکور از ۳٪ سیمان ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد در طرح اختلاط استفاده شده و این نتایج به‌دست آمده است که برای درصدهای ۵ و ۱۰ سیمان یک رابطه‌ی خطی بین مقاومت فشاری و درصد رس وجود دارد و با افزایش رس مقاومت بین ۲ تا ۳ برابر کاهش می‌یابد.[۵]

همچنین در پژوهش دیگری در همان سال، با استفاده از ۳ طرح اختلاط مختلف به بررسی پارامترهای مقاومتی مصالح خاک سیمانی پرداخته و از سه درصد مختلف سیمان (۶، ۸ و ۱۲) در طرح اختلاط استفاده شده است. در این ارتباط حجم حفره‌های موجود در مصالح از موضوعات مهم قابل بررسی بوده است، زیرا اثر مستقیم در پارامترهای مقاومتی داشته و این نتیجه به‌دست آمده است که منحنی تمامی طرح‌های خاک سیمان در ابتدا خطی بوده و سپس رفتار کرنش نرم‌شوندگی در آنها مشاهده شده است.[۶]

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۸ نیز به بررسی مقاومت تیرهای مرکب ساخته‌شده با خاک سیمان و اندرکنش مصالح آن با تیرهای فولادی پرداخته و برای این کار از تیرهای مختلف خاک سیمانی، فولادی، مرکب، دوبل مرکب و... استفاده شده و نتایج نشان داده است که مقاومت تیرهای ماسه‌ی سیمانی از تیرهای رس سیمانی مقاومت بیشتری (حدوداً سه برابر) دارند، که دلیل آن را علاوه بر بزرگ‌تر بودن دانه‌ها، اندرکنش بهتر ماسه و فولاد بیان کرده‌اند.[۷]

برخی پژوهشگران (۲۰۰۵) نیز بر روی سه دانه‌بندی مختلف از خاک واشنگتن، آزمایش‌های خاکی انجام داده و نقش مثبت سیمان در بهبود خواص خاک را با آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری محدودنشده، و سه محوری تحکیم‌یافته‌ی زهکشی‌نشده پیدا کرده و نتیجه گرفته‌اند که با افزایش درصد سیمان، به میزان ۵ الی ۱۰ درصد، رفتار مصالح از شکل‌پذیر به تُرد و شکننده تغییر می‌کند.[۸]

در سال ۲۰۰۹ نیز محققان به بررسی مقاومت خاک سیمان‌هایی که با خاک‌های نمکی درست می‌شوند، پرداخته و در بررسی‌های خود به این نتیجه دست یافته‌اند که به‌دلیل ساختارکانی‌های خاک‌های مذکور بهتر است که مقاومت آن‌ها با افزایش سیمان و کاهش مقدار آب (کاهش نسبت آب به سیمان) بالا برده شود. زیرا درکانی خاک‌های ذکرشده، یون‌های So_4^{2-}، Cl^- و Mg^{2+} وجود دارد که با کاتیون‌های موجود در سیمان، ترکیب خوبی را تشکیل می‌دهند.[۹]

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۹ نیز با استفاده از یک تعریف جدید به نام نسبت حفره‌ها به سیمان (منافذ به حجم سیمان)، به بررسی خواص مقاومتی مصالح خاک سیمان پرداخته و برای این منظور از دو نوع خاک با دانه‌بندی مختلف استفاده شده است. نتایج بر روی خاک با ۲٪ سیمان بررسی شده و این نتیجه به‌دست آمده است که پارامتر نسبت حفره‌ها به سیمان، از پارامتر نسبت آب به سیمان تأثیر بیشتری در مقاومت فشاری مصالح خاک سیمان دارد.[۱۰]

همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۹، به بررسی پارامترهای تأثیرگذار در مقاومت مصالح خاک سیمان به‌عنوان مصالح اساس در روسازی پرداخته‌شده است، که در آن مقدار سیمان مصرفی نیز از ۰، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد تشکیل شده بود. نتایج پژوهش مذکور بر پایه‌ی پارامترهایی چون نسبت آب به سیمان، چگالی خشک، و رطوبت موجود در خاک بوده است، که نسبت آب به سیمان نقش کنترلی بیشتری داشته و نتایج نشان داده است که با افزایش چگالی خشک، مقاومت تک‌محوری محصورنشده افزایش یافته است، اما لزوماً بالاترین چگالی، بالاترین مقاومت را نمی‌دهد.[۱۱]

محققان در سال ۲۰۱۱، با استفاده از پارامترهای خاک و نسبت آب به سیمان، مقدار مقاومت فشاری خاک را پیش‌بینی و ثابت کرده‌اند که رابطه‌یی توانی بین آنها وجود دارد. برای این منظور خاک‌های مناطق مختلف ژاپن را مورد آزمایش قرار داده و نسبت‌های آب به سیمان مختلف را روی آنها امتحان کرده و نتیجه گرفته‌اند وقتی نمودار مقاومت فشاری در برابر نسبت سیمان به آب در مقیاس لگاریتمی رسم می‌شود، یک رابطه‌ی خطی بین آنها برقرار است.[۱۲]

همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۱۲ ، برای تأمین ضعف مصالح خاک سیمان (مقاومت کششی و خمشی) به‌دلیل تُردبودن مصالح، مصالح مذکور را تسلیح و برای این منظور از الیاف‌های فولاد و پروپیلن به‌عنوان مواد مسلح‌کننده استفاده شد. این الیاف‌ها به ترتیب ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱ درصد وزنی مخلوط را تشکیل داده‌اند. نتایج حاکی از افزایش مقاومت بیشتر الیاف پروپیلنی نسبت به سایر موارد بوده است، که دلیل آن اندرکنش و قفل و بست بهتر مصالح مذکور با مصالح خاک سیمان بوده است.[۱۳]

همچنین در سال ۲۰۱۲ مقاومت فشاری محصورنشده‌ی ۷ روزه‌ی مصالح خاک سیمان با استفاده از ارتباط آن با پارامترهای مقاومت CBR و نسبت آب به سیمان و چگالی خشک پیش‌بینی شد و این نتیجه به‌دست آمده است که مقاومت فشاری با نسبت چگالی خشک به نسبت آب به سیمان رابطه‌یی نمایی دارد.[۱۴]

برخی پژوهشگران (۲۰۱۲) هم در پژوهش خود به بررسی پارامترهای مقاومت برشی آزمایشگاهی خاک سیمان با استفاده از دستگاه سه‌محوری پرداخته و خاک مورد استفاده‌ی ایشان، در طبقه‌بندی نمونه‌های استوانه‌یی به قطر ۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر آماده و آزمایش‌های کرنش کنترل سه‌محوری با تنش محصورکنندگی ثابت با سرعت ثابت ۰٫۰۰۱ میلی‌متر بر ثانیه آزمایش شده است. تنش‌های محصورشده از ۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ کیلوپاسکال تشکیل و به نمونه‌ها که شامل صفر تا ۸ درصد سیمان بوده ، وارد شده است. نتایج پژوهش مذکور نشان می‌دهد که رفتار مصالح خاک سیمان به‌شدت شبیه رفتار ماسه‌ی متراکم بوده است.[۱۵]

بنابراین، رفتار مصالح خاک سیمان بسیار پیچیده بوده و این پیچیدگی بیشتر ناشی از عوامل ناشناخته‌ی مؤثر در مقاومت این نوع از مصالح است. بدین ترتیب مسئله‌ی عنوان‌شده با آزمایش‌های متفاوت باید بررسی شود تا پارامترهای مؤثر در رفتار مصالح به نحو مطلوبی به‌دست آیند. لذا در این نوشتار سعی بر آن است که پارامترهای مختلف تأثیرگذار درمقاومت فشاری این ماده از جمله: نوع دانه‌بندی، ارزش ماسه‌یی مصالح، و مقدار شاخص خمیری خاک بررسی شوند.

www.SID.ir

Archive of SID

۲. دستگاه، مصالح و روش انجام آزمایش

۱.۲. دستگاه

برای بررسی مقاومت فشاری و خمشی در آزمایشگاه، از آزمایش تک‌محوری محصورنشده به منظور تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D۱۶۳۴ و آزمایش خمشی به منظور مقاومت کششی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM D۱۶۳۵ استفاده شده است. در آزمایش مقاومت فشاری، بار با نرخ ثابت به نمونه وارد می‌شود تا نمونه گسیخته شود (آزمایش تنش کنترل)، و آزمایش مقاومت خمشی بار با تغییرمکان ثابت به نمونه وارد می‌شود (آزمایش کرنش کنترل).

دستگاه فشاری شامل دو فک است، که فک بالا متحرک و فک پایین ثابت است و نرخ نیروها توسط سیستم دیجیتالی که به‌منظور تنظیم نرخ دلخواه اثر نیروها طراحی شده است، با حرکت قائم خود باعث گسیختگی مصالح می‌شود. دستگاه خمشی نیز دو نیروی متمرکز نقطه‌یی توسط دو اهرم فشاری به بالای نمونه وارد می‌کند و نمونه را تحت فشار از بالا و کشش از پایین قرار می‌دهد (خمش خالص) تا نمونه گسیخته شود.

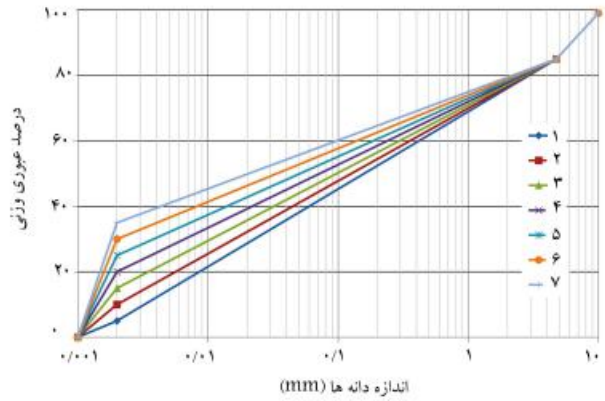
۲.۲. مصالح

در این پروژه از ۷ نوع دانه‌بندی خاک مطابق استاندارد مورد قبول برای تهیه‌ی خاک سیمان،[۲] استفاده شده است؛ تا اثر نوع دانه‌بندی، ارزش ماسه‌یی، و شاخص خمیری در آن سنجیده شود. روند دانه‌بندی‌ها به این صورت بوده است که ۱۵٪ از مصالح روی الک ۴ برای همه‌ی نمونه‌ها ثابت (مقدار شن)، و ۵-۳۵ درصد مصالح عبوری از الک ۲۰۰ بوده‌اند (مقدار رس)، که در بازه‌ی مذکور با افزایش ۵٪ از کران پایین تا کران بالای بازه، ۷ نوع دانه‌بندی را شامل شده و بالطبع درصد ماسه نیز برای تمام دانه‌بندی‌های تغییر کرده است. به‌منظور مقایسه‌ی یکسان در طرح اختلاط تمامی دانه‌بندی‌ها از ۷٪ وزن خشک خاک مطابق با استاندارد نشریه‌ی ۵۴ کمیته‌ی بین‌المللی سدهای بزرگ استفاده شده،[۲] و برای سیمان مصرفی در آزمایش‌ها، از سیمان پوزولانی پرتلند ویژه (پ.پ.و) تولید کارخانه‌ی سیمان آبیک استفاده شده است، زیرا از این نوع سیمان در ساخت فرازبند سد بختیاری استفاده شده است، تا اثر مقدار و نوع سیمان برای تمام نمونه‌ها یکسان باشد و نسبت آب به سیمان نیز برابر ۰/۵ برای تمام نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. به‌منظور اینکه اثر شاخص خمیری نیز مورد آزمایش قرار گیرد، مصالح عبوری از الک ۲۰۰ برای ۳ دانه‌بندی یک بار از رس و بار دیگر از پودر سنگ، که اندیس حالت خمیری آن صفر است، مورد آزمایش قرار گرفته است. آب موجود در نمونه‌ها نیز آب آشامیدنی نسبتاً تمیز بوده است، که خواص اسیدی و قلیایی نداشته است، تا باعث ایجاد فعل و انفعالات شیمیایی مضر با سیمان نشود. در شکل ۱، همه‌ی دانه‌بندی‌های مورد آزمایش و در جدول ۱ مشخصات آنها نشان داده شده است.

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی مصالح ماسه‌یی، آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص کمینه به روش استاندارد ASTM D۴۲۵۴-۹۱، وزن مخصوص بیشینه به روش میزلرزه‌ی ASTM D۴۲۵۳-۹۳، نیز انجام شده‌اند، که نتایج آن نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

۳.۲. روش انجام آزمایش

با توجه به نوع دانه‌بندی و نسبت آب به سیمان ثابت، طرح اختلاط نمونه‌ها با



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی‌های مورد استفاده در آزمایش.

شکل ۲. نمونه‌ی آزمایش فشاری و دستگاه مربوط.

توجه به استاندارد ASTM D۲۹۰۱ مطابق با توصیه‌ی انجمن سیمان پرتلند و معیارهای مربوط به آن انجام شده است. مصالح با استفاده از ماشین مخلوط‌کن جهت جلوگیری از ته‌نشینی و جدایی مخلوط با هم آمیخته شده‌اند.

نمونه‌های آزمایش فشاری به‌صورت استوانه‌هایی با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر (H/D = ۲) تهیه شده و به‌منظور عمل‌آوری، ابتدا در داخل اتاق بخار به مدت ۱۲ ساعت قرار گرفته و پس از خارج‌شدن از اتاق بخار، مستقیماً آزمایش شده‌اند.

نمونه‌های خمشی نیز برای تیرهای مستطیل‌شکل با سطح مقطع ۱۰۰ × ۱۰۰ میلی‌مترمربع و طول ۳۵۰ میلی‌متر تهیه شده‌اند. برای این منظور قالب‌های فلزی، روغن‌کاری شده و مصالح در ۳ لایه ریخته و هر لایه با ۹۰ ضربه‌ی یکسان و پراکنده در سطح کوبیده شده است تا ارتفاع به ۱۰۰ میلی‌متر برسد. سپس نمونه‌ها در اتاق بخار قرار داده شده و بلافاصله پس از بیرون‌آمدن از اتاق بخار، آزمایش شده‌اند. شایان ذکر است که نمونه‌ها از طرف ضلع جانبی‌شان در هنگام قالب‌ریزی، آزمایش شده و معمولاً توسط لایه‌یی نازک گچ‌اندود شده‌اند.

در شکل‌های ۲ و ۳، نمونه‌ی تحت آزمایش فشاری و خمشی به ترتیب نشان داده شده‌است.

با توجه به دانه‌بندی‌های و طرح اختلاط آزمایش‌ها در چهار حالت: ۱. آزمایش فشاری بر روی مصالح خاک سیمان با ریزدانه‌ی رسی (خمیری)؛ ۲. آزمایش فشاری

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱. طبقه‌بندی خاک‌ها و مشخصات فیزیکی مصالح ماسه‌یی.

نوع مصالح	$(\gamma d)_{max}$ (gr/cm^3)	$(\gamma d)_{min}$ (gr/cm^3)	C_u	C_c	توصیف خاک
ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۱	۲/۰۲	۱/۸۷	۱۲۰	۱۷	SP
ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۲	۱/۹۷	۱/۷۵	۱۷۵	۲۴	SP-SC
ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۳	۱/۸۸	۱/۷۰	۱۶۴	۲۵	SC
ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۴	۱/۸۲	۱/۶۶	۱۶۷	۱۸	SC
ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۵	۱/۷۸	۱/۶۳	۱۲۸	۱۶	SC
ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۶	۱/۶۹	۱/۵۸	۱۰۷	۱۱	SC
ماسه‌ی گردگوشه‌ی شماره‌ی ۷	۱/۶۴	۱/۵۷	۸۴	۱۵	SC

شکل ۳. نمونه‌ی آزمایش خمشی و دستگاه مربوط.

بر روی مصالح خاک سیمان با ریزدانه‌ی پودرسنگ (غیرخمیری)؛ ۳. آزمایش خمشی بر روی مصالح خاک سیمان با ریزدانه‌ی رسی (خمیری)؛ ۴. آزمایش فشاری بر روی مصالح خاک سیمان با ریزدانه‌ی پودر سنگ (غیرخمیری) بر روی نمونه‌های با دانه‌بندی موجود در شکل ۱ انجام شده است.

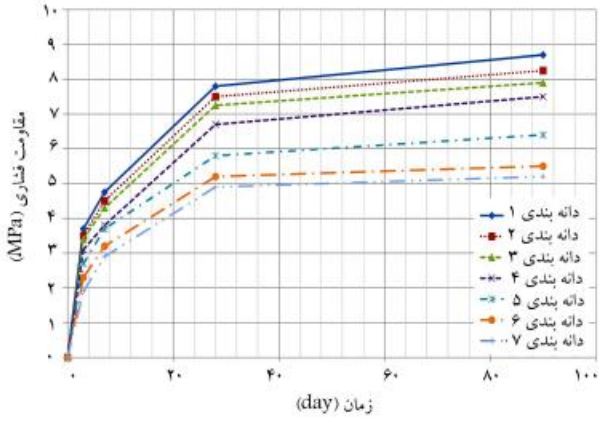
در حالت فشاری بار به‌صورت ثابت و مقدار ۱۵۰ کیلوپاسکال بر ثانیه به نمونه‌های استوانه‌یی وارد و در حالت خمشی بارگذاری عرضی روی دو نقطه از تیر با نرخ ۰/۰۱ میلی‌متر بر ثانیه انجام شده است، تا تیر به گسیختگی برسد. برای این کار تیر به ۳ قسمت مساوی تقسیم شده است، تا قسمت میانی تحت خمش خالص قرار گیرد و گشتاور آن ناحیه ثابت بماند.

در ادامه، عوامل تأثیرگذار در مقاومت‌های فشاری و خمشی مصالح خاک سیمان نظیر: دانه‌بندی، ارزش ماسه‌یی، و شاخص خمیری با کمک آزمایش‌های ذکرشده بررسی شده‌اند.

۳. بررسی آزمایش‌های مقاومت فشاری مصالح خاک سیمان

۱.۳. آزمایش‌های فشاری محصورنشده بر روی مصالح با دانه‌بندی‌های مختلف

شکل ۴، منحنی مقاومت فشاری مصالح خاک سیمان (q_u) بر حسب زمان‌های مرسوم این نوع آزمایش نمونه‌های بتنی (۳، ۷، ۲۸ و ۹۰ روز) را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه شکل ظاهری دانه‌ها همگی گردگوشه است، تنها پارامتر فیزیکی



شکل ۴. نتایج آزمایش فشاری بر روی مصالح با دانه‌بندی‌های مختلف.

تأثیرگذار در رفتار مقاومتی مصالح، مقدار چگالی کمینه و بیشینه‌ی آن است، که در جدول ۱ مقادیر آن ارائه شده است.

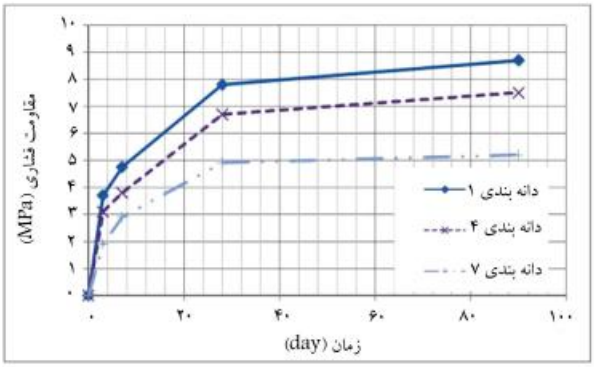
از منحنی‌های تنش فشاری بر حسب زمان مصالح خاک سیمان می‌توان دریافت که در مصالح پس از گذشت زمان و مطابق مطالعات سایر پژوهشگران،[۲-۵] مصالح مقاومت بیشتری کسب می‌کنند، و مصالح با چگالی خشک بیشتر، افزایش مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند، که این مسئله به دو امر مرتبط می‌شود: ۱. مصالح با چگالی بیشتر، مقاومت قفل و بست بین دانه‌یی بیشتری دارند که این عامل به مقاومت اصطکاکی مصالح کمک زیادی می‌کند؛ ۲. مصالح با درصد ریزدانه‌ی بیشتر اصولاً شاخص خمیری بیشتری دارند؛ که این عامل به‌دلیل جذب آب بیشتر توسط بخش ریزدانه‌ی (رس) خاک، سبب کاهش مقاومت خاک سیمان می‌شود، که در بخش ۲.۳.، مورد دوم به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

۲.۳. آزمایش‌های فشاری محصورنشده بر روی مصالح با شاخص خمیری‌های مختلف

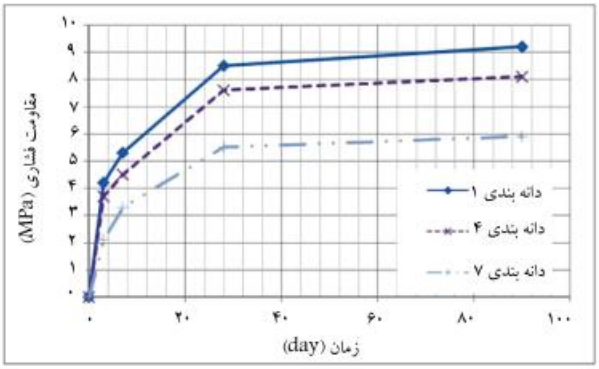
شاخص خمیری با استفاده از تعیین حد روانی خاک (LL) و حد خمیری خاک (PL) به‌دست می‌آید. مطابق تعریف، حد روانی آن مقدار از درصد رطوبت درون خاک است که خاک از وضعیت خمیری به وضعیت سیال تبدیل می‌شود و حد خمیری درصدی از رطوبت خاک است که چنانچه رطوبت خاک از آن مقدار کمتر باشد، حالت خمیری خاک از بین می‌رود و خاک حالت نیمه جامد می‌گیرد. با تعیین دو مقدار ذکرشده‌ی LL و PL، شاخص خمیری مطابق با رابطه‌ی ۱ تعریف

www.SID.ir

Archive of SID



الف) منحنی مقاومت فشاری - زمان در حالت خمیری؛



ب) منحنی مقاومت فشاری- زمان در حالت غیر خمیری .

شکل ۵. رفتار مقاومت فشاری مصالح خاک سیمان در دو حالت خمیری و غیرخمیری.

می‌شود:

$$PI = LL - PL \qquad (1)$$

برای سه کران دانه‌بندی بر حسب مقدار ریزدانه‌ی کمتر، به کران‌های بالایی (نمونه‌ی ۱)، میانی (نمونه‌ی ۴) و پایینی (نمونه‌ی ۷) مقدار شاخص خمیری به ترتیب ۷، ۱۲ و ۱۹ درصد محاسبه شده است. همچنین برای این سه نوع دانه‌بندی، آزمایش‌ها بر روی مصالح غیرخمیری با شاخص خمیری صفر درصد نیز انجام شده است، که برای این منظور از پودرسنگ عبوری از الک ۲۰۰ به‌عنوان مصالح ریزدانه استفاده شده است.

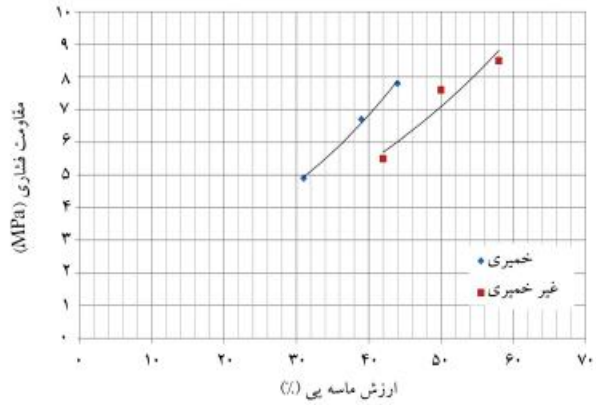
مطابق شکل ۵، مصالح با شاخص خمیری، کاهش نسبتاً محسوسی در مقاومت مصالح خاک سیمان ایجاد می‌کنند. دلیل این امر هیدراتاسیون آب توسط کانی‌های خمیری رسی است، که چون در این آزمایش‌ها نسبت سیمان و آب به‌دلیل مقایسه‌ی بهتر پارامترها ثابت فرض شده است، این کاهش مقاومت حادث شده است. شایان ذکر است که در مصالح با شاخص خمیری بالا باید مقدار آب بیشتری در طرح اختلاط در نظر گرفته شود.

۳.۳. آزمایش‌های فشاری محصورنشده بر روی مصالح با ارزش‌های ماسه‌یی مختلف

آزمایش هم‌ارز ماسه یا ارزش ماسه‌یی به‌منظور تعیین خلوص مصالح ریزدانه به‌کار می‌رود و نشان‌دهنده‌ی درصد ماسه‌ی خالص در برابر مواد کلوئیدی و رسی است. این آزمایش برای سه دانه‌بندی حد بالایی، میانی، و پایینی در هر دو حالت خمیری

جدول ۲. آزمایش ارزش ماسه‌یی برای دانه‌بندی‌های مختلف.

دانه‌بندی	هم‌ارز ماسه‌ی خمیری (٪)	هم‌ارز ماسه‌ی غیرخمیری (٪)
حد بالایی	۴۴	۵۸
حد میانی	۳۹	۵۰
حد پایینی	۳۱	۴۲



شکل ۶. نمودار مقاومت فشاری بر حسب ارزش ماسه‌یی برای دو حالت خمیری و غیرخمیری.

و غیر خمیری مطابق استاندارد ASTM D۲۴۱۹ انجام شده است، که نتایج آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

در شکل ۶، منحنی مقاومت فشاری بر حسب ارزش ماسه‌یی برای هر دو مصالح خمیری و غیرخمیری برای نمونه‌های ۲۸ روزه با سه کران بالایی، میانی، و پایینی دانه‌بندی نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، روند تغییرات مقاومت فشاری بر حسب ارزش ماسه‌یی با رگرسیون نسبتاً خوبی نمایی است (برای حالت خمیری $R^2 = ۰/۹۹$ و برای حالت غیرخمیری $R^2 = ۰/۹۶$).

مشاهده می‌شود که در حالت خمیری ارزش ماسه‌یی کاهش می‌یابد، که این امر موجب کاهش مقاومت فشاری مصالح خاک سیمان می‌شود. زیرا با کاهش ارزش ماسه‌یی، مقدار ناخالصی‌های بخش ریزدانه‌ی مصالح افزایش یافته است، که در کاهش باربری نقش مؤثری دارد. شایان ذکر است که این پارامتر در کارهای اجرایی اهمیت دارد، به‌طوری که مطابق آیین‌نامه، معمولاً برای رویه‌های بتنی، عدد هم‌ارز ماسه‌یی بین ۷۵ تا ۸۵ درصد و برای روسازی راه، عدد هم‌ارز ماسه‌یی بزرگ‌تر از ۲۵٪ برای مصالح خاکی زیراساس توصیه شده است.[۱۱]

۴. بررسی آزمایش‌های مقاومت خمشی مصالح خاک سیمان

۱.۴. آزمایش‌های تیر خمشی بر روی مصالح با دانه‌بندی‌های مختلف

مزیت آزمایش‌های خمشی نسبت به آزمایش‌های فشاری در این است که منحنی تنش ـ کرنش در این نوع آزمایش قابل ترسیم بوده است و این مطلب بیانگر آن است که با استفاده از این منحنی‌ها رفتار مصالح قابل بررسی است و می‌توان برای آن مدل رفتاری تعریف کرد، که البته این امر نیاز به آزمایش‌های متعددی دارد. البته در این پژوهش فقط نتایج مقاومت‌های خمشی بر حسب زمان ارائه شده‌اند، تا قابل مقایسه با مقاومت‌های فشاری باشند.

www.SID.ir

Archive of SID

مصالح با دانه‌بندی‌های مختلف (شکل ۱)، تحت خمش خالص قرار گرفته‌اند، که معیار گسیختگی در اینجا گسترش ترک‌های ناشی از تنش کششی در زیر تیر است، تا جایی که ظرفیت باربری خمشی آن دیگر افزایش پیدا نکند.

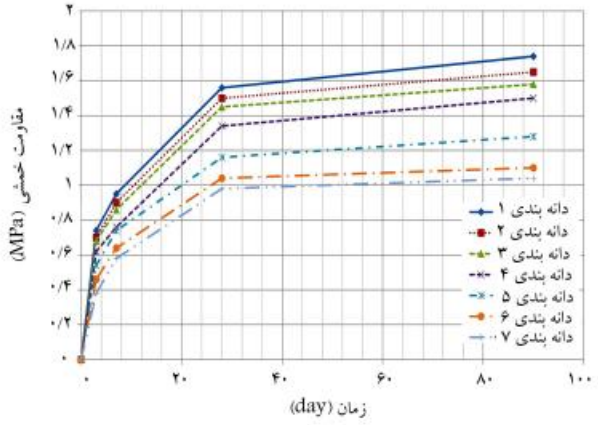
مطابق نتایج سایر پژوهشگران،[۵و۷] همانطور که از شکل ۷ پیداست مقاومت خمشی (کششی) مصالح خاک سیمان در اینجا کاهش محسوسی نسبت به مقاومت فشاری این نوع از مصالح پیدا می‌کند، که دلیل آن ضعف مصالح تُرد در کشش نسبت به فشار است.

در اینجا نیز دانه‌بندی با چگالی خشک بیشتر، از خود مقاومت بیشتری نسبت به مصالح با چگالی خشک کمتر نشان می‌دهند، چرا که دانه‌های درشت‌تر عمدتاً چگالی خشک مصالح خاکی را افزایش می‌دهند، لذا انرژی بیشتری جهت گسیخته‌شدن نیاز دارند، زیرا فرایند گسترش ترک از عامل چسبنده (سیمان) می‌گذرد و هر چه دانه‌ها درشت‌تر باشند، گسترش ترک، مسیر بیشتری را در خمیر سیمانی محاط بر دانه‌ها طی می‌کند تا این ترک‌ها به هم برسند و گسترش پیدا کنند. در شکل ۸، این مکانیزم در خمیر و دانه برای دو حالت ریزدانه و درشت‌دانه نشان داده شده است. شایان توجه است که در بتن‌های معمول اصولاً ترک از داخل خمیر سیمانی عبور می‌کند، زیرا این ماده مقاومت کمتری نسبت به سنگ‌دانه‌ها دارد.

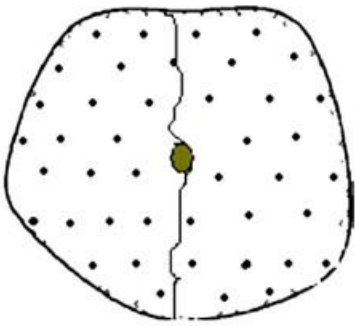
۲.۴. آزمایش‌های تیر خمشی بر روی مصالح با شاخص خمیری‌های مختلف

برای نمونه‌های با دانه‌بندی کران پایینی، میانی، و بالایی آزمایش‌های مقاومت خمشی یک باربرای مصالح خمیری (بخش ریزدانه‌ی رسی) و یک باربرای مصالح غیرخمیری (بخش ریزدانه‌ی پودر سنگ) انجام شده است. در اینجا نیز مقاومت خمشی هر دو مصالح خمیری و غیرخمیری کاهش قابل توجهی نسبت به مقاومت فشاری از خود نشان داده‌اند.

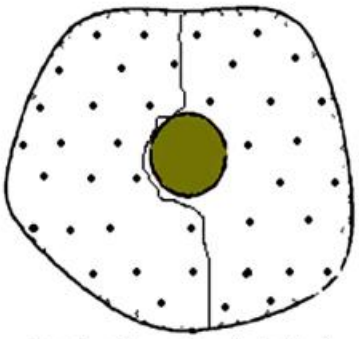
نکته‌ی جالب توجه در اینجا، کاهش بیشتر مقاومت مصالح خمیری نسبت به مصالح غیرخمیری بوده است. به طوری که مصالح غیرخمیری تقریباً به $\frac{۱}{۳}$ مقاومت حالت فشاری و مصالح خمیری به $\frac{۱}{۵}$ این مقاومت رسیده‌اند، که این نقش مهم شاخص خمیری را در مقاومت مصالح خاک سیمان نشان می‌دهد. در شکل ۹، مقاومت خمشی برای مصالح خمیری و غیرخمیری نشان داده شده است.



شکل ۷. نتایج آزمایش خمشی بر روی مصالح با دانه‌بندی‌های مختلف.

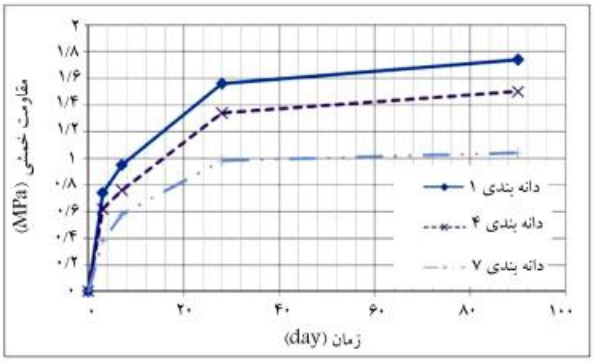


الف) مسافت طی شده ترک در حالت ریزدانه؛

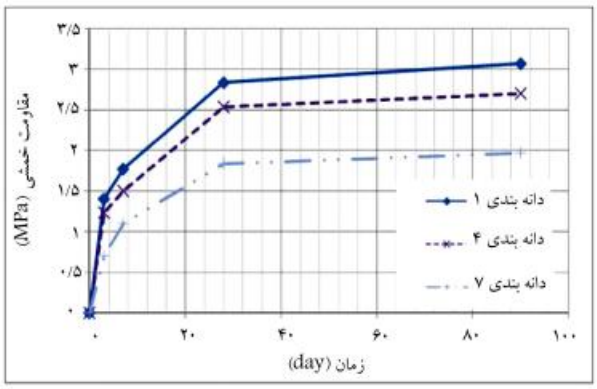


ب) مسافت طی شده ترک در حالت درشت دانه.

شکل ۸. مکانیزم گسترش ترک در مخلوط خاک سیمان در دو حالت ریزدانه و درشت‌دانه.



الف) منحنی مقاومت خمشی - زمان در حالت خمیری؛

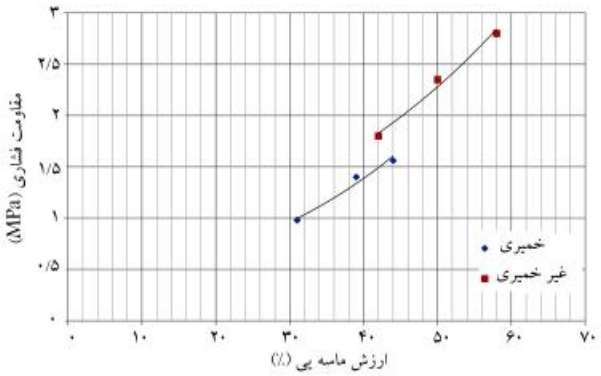


ب) منحنی مقاومت خمشی- زمان در حالت غیر خمیری.

شکل ۹. رفتار مقاومت خمشی مصالح خاک سیمان در دو حالت خمیری و غیرخمیری.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰. نمودار مقاومت خمشی بر حسب ارزش ماسه‌یی برای دو حالت خمیری و غیرخمیری.

۳.۴. آزمایش‌های تیر خمشی بر روی مصالح با ارزش‌های ماسه‌یی مختلف

از نتایج مقاومت خمشی ۲۸ روزه‌ی آزمایش‌های بخش ۲.۴. و همچنین مقادیر ارزش ماسه‌یی ذکرشده از جدول ۲، منحنی مقاومت خمشی برحسب ارزش ماسه‌یی برای دو حالت خمیری و غیرخمیری مطابق شکل ۱۰ ترسیم شده است. مطابق شکل مذکور، نمودارهای دو حالت خمیری و غیرخمیری با تقریب خوبی از نوع توانی هستند (برای حالت خمیری $R^2 = ۰/۹۶$ و برای حالت غیرخمیری $R^2 = ۰/۹۷$) که نقش مؤثر ارزش ماسه‌یی را در تأمین مقاومت خمشی مصالح خاک سیمان بیان می‌کند. نکته‌ی قابل ذکر این است که نتایج آزمایش مقاومت خمشی، برای زمان‌های ۳، ۷ و ۹۰ روز نیز به همین منوال است و با افزایش ارزش ماسه‌یی، مقدار این مقاومت به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد.

۵. مطالعه‌ی موردی فرازبند سد بختیاری و مدل‌سازی عددی آن

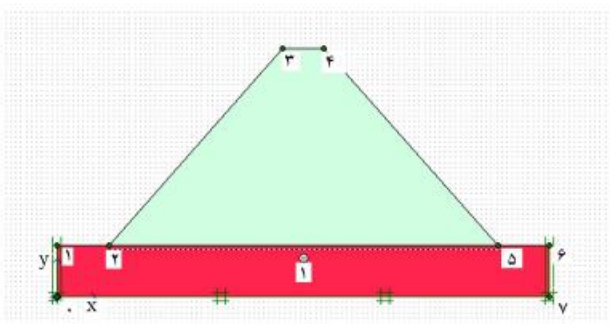
۱.۵. آشنایی با سد بختیاری و فرازبند آن

سد بختیاری با ارتفاع ۳۱۵ متر روی رودخانه‌ی بختیاری، که از سرشاخه‌های رود دز است، احداث خواهد شد. این سد که از لحاظ موقعیت جغرافیایی در مرز بین استان‌های لرستان و خوزستان قرار دارد، پس از تکمیل، بلندترین سد بتنی دو قوسی جهان محسوب خواهد شد.

در زمان ساخت سد، تونل‌هایی در کارگاه احداث می‌شود که این تونل در طول مدت ساخت سد، جریان آب رودخانه را از اطراف کارگاه عبور می‌دهد. در بالادست جهت انحراف آب به تونل، سازه‌یی به نام فرازبند احداث می‌شود که یک سد انحرافی موقت است. معمولاً مصالح سازنده‌ی آن: خاک، سنگریزه، بتن، خاک سیمان، و یا در برخی موارد سپر فولادی است و شکل آنها بستگی به هندسه‌ی دره خواهد داشت. در مورد سد بختیاری، گزینه‌ی مصالح خاک سیمان برای ساخت فرازبند از طرف پیمانکار اصلی مد نظر قرار گرفته است.

۲.۵. مشخصات سازه‌ی فرازبند سد بختیاری و اصول بررسی معیارهای پایداری سدهای وزنی

شکل دره در محل محور، V شکل است و در ترازهای بالا، شیب صخره‌ها تقریباً



شکل ۱۱. نحوه‌ی مدل‌سازی سازه‌ی فرازبند و پی آن.

به‌صورت قائم در می‌آید. پهنای کف بستر ۲۵ متر، عمق آبرفت منطقه ۵ متر، و سنگ بستر سد نیز از جنس آهک و مارن با میان‌لایه‌های سیلیسی است.

یک سد وزنی باید تحت کلیه‌ی حالات بارگذاری پایدار باشد و لغزش و واژگونی در بدنه‌ی سد و پی آن و سطح تماس‌شان باید بررسی، و تنش در بدنه و پی نیز باید کنترل شود.

به منظور کنترل پایداری، ۷ ترکیب مختلف بارگذاری مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شده است. ترکیبات بارگذاری نیز به ۳ دسته تقسیم شده‌اند، که با توجه به احتمال رخداد، سرعت و دوام بارگذاری، ضرایب اطمینان مجاز و تنش‌های فشاری و کششی مجاز متفاوت بوده است. لازم به توضیح است که سطوح لرزه‌یی در طراحی و ارزیابی رفتار سازه‌های هیدرولیکی بتنی و خاک سیمانی، براساس راهنمای انجمن مهندسان ارتش آمریکا (USACE) شامل زلزله‌ی مبنای بهره‌برداری (OBE) و زلزله‌ی بیشینه‌ی طراحی (MDE) است، لیکن از آنجا که سد جزء سازه‌های مهم و حیاتی محسوب می‌شود و نتایج خرابی آن می‌تواند خسارات فراوانی برجا گذارد، لذا در تحلیل‌ها از بارهای دینامیکی در سطوح لرزه‌یی طراحی (DBE) و بیشینه (MCE) استفاده شده است.[۱۶] این تذکر لازم است که جزئیات درنظرگرفتن هر یک از بارهای موجود در جدول به تفصیل در آیین‌نامه‌ی USACE ارائه و در این پژوهش فقط از حالت بهره‌برداری در مدل‌سازی عددی استفاده شده است.

۳.۵. نحوه‌ی مدل‌سازی سازه‌ی فرازبند سد بختیاری

۱.۳.۵. پارامترهای هندسی سازه و پی مسئله

مدل‌سازی عددی فرازبند سد بختیاری با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود PLAXIS 3D Tunnel انجام شده است. اصول طراحی فرازبند از جنس خاک سیمان مطابق با سدهای ذوزنقه‌یی متقارن است، که مقطع عرضی آنها عموماً به شکل ذوزنقه (شکل ۱۱)، و وزن آنها عامل پایداری سد است. جهت مدل‌سازی سازه‌ی فرازبند و خاک زیر آن، ارتفاع متوسط فرازبند با استفاده از نقشه‌های موجود در گزارش‌ها، برابر ۴۸ متر و شیب سد نیز ۱:۰/۷ (افقی: قائم) در نظر گرفته شده است تا نیاز به قالب‌بندی نباشد و سرعت اجرا بالا رود. عرض تحتانی فرازبند نیز برابر ۷۵ متر و عرض تاج آن برابر ۸ متر لحاظ شده است. به‌منظور جلوگیری از تأثیر نامناسب تکیه‌گاه‌های فرضی در این مدل، پی فرازبند با ابعاد بزرگ مدل‌سازی شده است، که فاصله‌ی این پی فرضی از طرفین شیب برابر ۱۰ متر و عمق آن نیز برابر ۱۰ متر در نظر گرفته شده است. انتخاب این ابعاد پی بدین دلیل است که با افزایش عرض پی بیش از حد عرض منتخب، ضریب اطمینان پایداری تغییر چندانی نسبت به عرض منتخب فوق نداشته است، که این مطلب نشان می‌دهد که اگر سطح گسیختگی حتی بزرگ‌تر از

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۳. ترکیبات بارگذاری سازه‌ی فرازبند.

حالت	بارگذاری	ترکیبات
بهره‌برداری	عادی	بار مرده + رسوب + فشاربرکنش + فشار هیدرواستاتیک آب (تراز ۵۵۰ متر)
زلزله‌ی MCE	غیرعادی	بار مرده + رسوب + فشاربرکنش + نیروی اینرسی بدنه تحت اثر زلزله + فشار هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک آب (تراز ۵۵۰ متر)
سیل ۲۵ ساله	غیرعادی	بار مرده + رسوب + فشاربرکنش + فشار هیدرواستاتیک آب (تراز ۵۷۸٫۷۵ متر)
بلافاصله بعد از ساخت + زلزله‌ی MCE	فوق‌العاده	بار مرده + نیروی اینرسی بدنه تحت اثر زلزله
سیل ۱۰۰ ساله	فوق‌العاده	بار مرده + رسوب + فشاربرکنش + فشار هیدرواستاتیک آب + وزن آب ناشی از روگذری (تراز ۵۸۴٫۵ متر)
سیل ۲۰۰ ساله	فوق‌العاده	بار مرده + رسوب + فشاربرکنش + فشار هیدرواستاتیک آب در بالادست (تراز ۵۵۰ متر) +فشار هیدرواستاتیک آب در پایین‌دست محصور بین فرازبند و بدنه اصلی سد (تراز ۵۸۰ متر)
زلزله‌ی OBE	فوق‌العاده	بار مرده + رسوب + فشاربرکنش + نیروی اینرسی بدنه تحت اثر زلزله + فشار هیدرواستاتیک و هیدرودینامیک آب (تراز ۵۵۰ متر)

عرض فعلی شود، حالت بحرانی جهت پایداری سد محسوب نمی‌شود.[۱۷] حجم فرازبند سد بختیاری از مصالح خاک سیمان، حدود ۷۰۰۰۰ مترمکعب برآورد می‌شود.

۲.۳.۵. پارامترهای مصالح سازه و پی مسئله

مشخصات مصالح پی فرازبند برابر مقادیر ذکرشده درگزارش‌های میدانی در نظر گرفته شده است. چسبندگی مصالح پی برابر ۳۵۰ کیلوپاسکال و زاویه‌ی اصطکاک داخلی برابر ۳۲ درجه است. با توجه به اعداد ارائه‌شده درگزارش می‌توان نتیجه گرفت که خاک پی رس خیلی سخت است و بنابراین می‌توان مدول کشسانی پی را برابر ۱۰۰۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفت. وزن مخصوص اشباع مصالح پی مطابق گزارش برابر ۲۲ کیلونیوتن بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. با توجه با اینکه مصالح پی همانند رس سخت است، با تقریبی مناسب می‌توان تخلخل پی را برابر ۰٫۳ در نظر گرفت و مقدار وزن مخصوص غیراشباع را برابر ۱۷ کیلونیوتن بر مترمکعب به‌دست آورد. ضریب پواسون نیز ۰٫۳ و مدل رفتاری مصالح سازه و پی، مدل رفتاری موهر ـ کولمب فرض شده است.

برای مدل‌سازی فرازبند با توجه به اینکه این خاکریز از جنس خاک سیمان است و با علم به این موضوع که مصالح خاک سیمان طبیعتی شکننده و نزدیک به خاک سیمانته دارند، چسبندگی مصالح برابر ۷۰۰ کیلوپاسکال و زاویه‌ی اصطکاک داخلی آن برابر ۲۵ درجه (برابر با بیشینه‌ی زاویه‌ی اصطکاک داخلی برای رس‌های سخت) فرض شده است. همچنین با توجه به این مطلب می‌توان مدول کشسانی فرازبند را برابر با مدول کشسانی پی در نظرگرفت. به دلیل سختی متفاوت مصالح فرازبند و پی، به منظور درنظرگرفتن اندرکنش مناسب بین این دو مصالح، از یک لایه‌ی اندرکنشی با مشخصات مصالح $\frac{2}{3}$ برابر مشخصات خاک پی ($\delta = ۰٫۶۶$) در نظرگرفته شده است. زیرا هنگامی که دو مصالح خاک و خاک سیمان کنار هم قرار می‌گیرند، رفتار در سطح تماس آنها، متفاوت از هر دوی مصالح مبناست و این مسئله باید در مدل‌سازی نظرگرفته شود. وزن مخصوص اشباع مصالح فرازبند برابر ۲۴ کیلونیوتن بر مترمکعب و با توجه به اجرای این مصالح به‌صورت متراکم، میزان تخلخل با تقریبی مناسب برابر ۰٫۳ فرض شده است. درنهایت، مقدار وزن مخصوص غیراشباع برابر ۱۸٫۵ کیلونیوتن بر مترمکعب به‌دست آمده و با توجه به شکننده‌بودن مصالح، ضریب پواسون برابر ۰٫۲ در نظرگرفته شده است. مشخصات مکانیکی مصالح مطابق جدول ۴ است، که در آن، γ_{un-sat} وزن مخصوص غیراشباع (ظاهری)، γ_{sat} وزن مخصوص اشباع، ν نسبت پواسون، E_{ref} مدول کشسانی مرجع مدل موهر ـ کولمب، c_{ref} چسبندگی مرجع و φ زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک است.

۳.۳.۵. نحوه‌ی مش‌بندی و محاسبات سازه و پی مسئله

مش‌بندی دو و سه بُعدی این مدل با استفاده از المان مثلثی انجام شده است، که این مش‌بندی در ناحیه‌ی سازه‌ی فرازبند ریزتر و در ناحیه‌ی پی درشت‌تر است. مش‌بندی سه‌بُعدی در PLAXIS به این صورت انجام می‌پذیرد که دو المان مثلثی در صفحات مجاور به هم وصل می‌شوند و تشکیل یک هرم می‌دهند. برای افزایش دقت مش‌بندی سه‌بُعدی، برنامه به‌صورت فرضی بین صفحات تعیین‌شده توسط کاربر، صفحات مجازی ایجاد می‌کند و محاسبات را انجام می‌دهد. همچنین ابعاد مش‌ها را چندین بار، مرحله به مرحله ریزتر ساخته و با ناچیزشدن اختلاف نتایج در ۳ مرتبه‌ی پایانی، مش‌بندی به‌صورت ابعاد فعلی در مدل‌سازی لحاظ شده است.

به منظور انجام محاسبات مسئله از دو روش کاهش $\varphi - c$ و ساخت مرحله به مرحله استفاده شده است، به این صورت که ابتدا جهت کنترل واژگونی از تحلیل کاهش $\varphi - c$ استفاده شده و ضریب اطمینان به دست آمده و سپس با استفاده از روش ساخت مرحله به مرحله، نشست کلی فرازبند تعیین شده است. این دو تحلیل برای هر دو حالت خشک و اشباع در تحلیل استاتیکی فرازبند انجام شده است.

۶. تحلیل نتایج عددی

۱.۶. تحلیل نتایج در حالت خشک استاتیکی

تغییرشکل کلی فرازبند در حالت خشک استاتیکی در شکل ۱۲ ارائه شده است، که مطابق آن بیشترین جابه‌جایی مربوط به تورم ۳۸ سانتی‌متری در طرفین بوده و همچنین پی به مقدار حدودی ۱۰ سانتی‌متر نشست کرده است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴. مشخصات مکانیکی مصالح سازه، پی، و المان سطح تماس فرازبند.

اجزاء فرازبند	γ_{un-sat} (kN/m^3)	γ_{sat} (kN/m^3)	ν	E_{ref} (kPa)	c_{ref} (kPa)	φ (درجه)
پی	۱۷٫۰	۲۲	۰٫۳	۱۰۰۰۰	۳۵۰	۳۲
سازه	۱۸٫۵	۲۴	۰٫۲	۱۰۰۰۰	۷۰۰	۲۵
المان سطح تماس	-	-	۰٫۳	۶۶۰۰	۲۱۰	۲۱

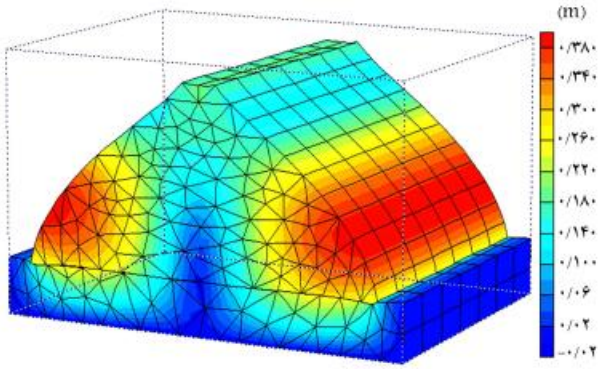
مطابق شکل ۱۳، بیشترین جابه‌جایی قائم (نشست) در قسمت فوقانی فرازبند صورت گرفته و مقدار آن برابر ۲۰ سانتی‌متر بوده و همان‌طور که انتظار می‌رود با فاصله از سطح، میزان نشست کاهش یافته است.

با توجه به خشک‌بودن محیط، تنش مؤثر برابر تنش کل و برابر ۶۴۰ کیلونیوتن بر مترمربع است. در شکل ۱۴، کانتور تنش مؤثر در سازه و پی نشان داده شده است. شایان ذکر است مطابق تعریف نرم‌افزار، تنش مؤثر از تفاضل تنش کل و مقدار فشار منفذی به‌دست می‌آید.

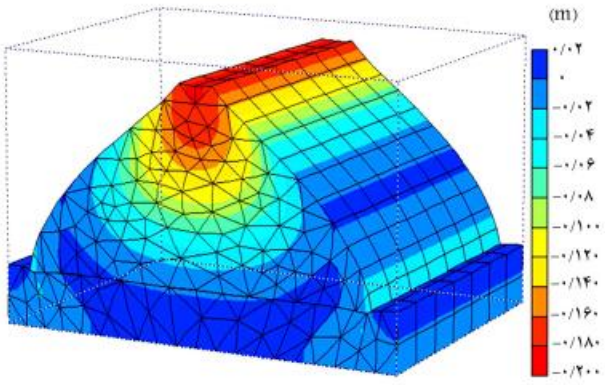
منحنی تنش ـ کرنش در قسمت تحتانی و میانی فرازبند در شکل ۱۵ نشان داده شده است، که مطابق آن، در قسمت مذکور کاهش حجم اتفاق افتاده است.

منحنی تنش ـ کرنش طرفین فرازبند نیز مطابق شکل ۱۶ است، که مطابق آن، در نواحی مذکور تورم رخ داده است.

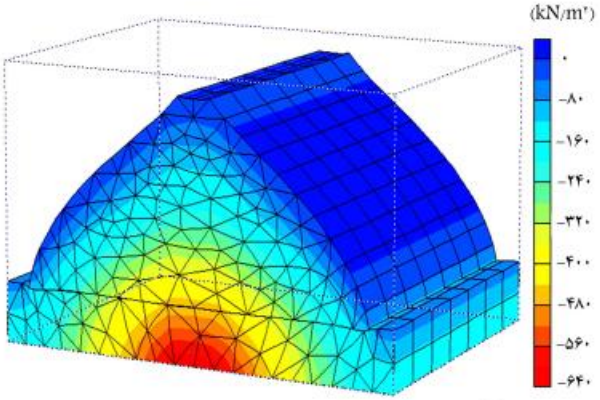
مطابق شکل ۱۷، مقدار ضریب اطمینان در مقابل واژگونی در حالت خشک استاتیکی در مقدار تقریبی ۵ ثابت مانده است. براساس توصیه‌ی USACE، کمینه‌ی ضریب اطمینان مجاز واژگونی برابر ۴ است.[۲]



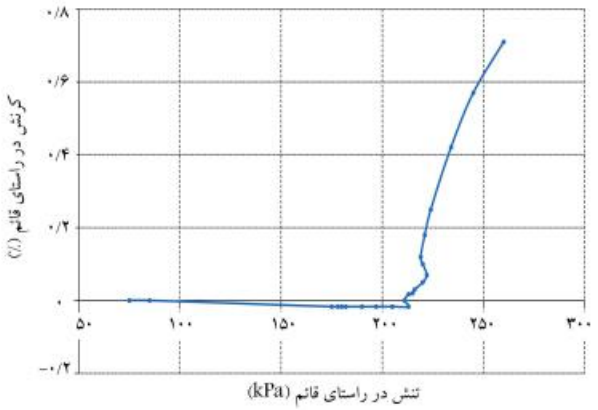
شکل ۱۲. تغییرشکل کلی فرازبند در حالت خشک استاتیکی.



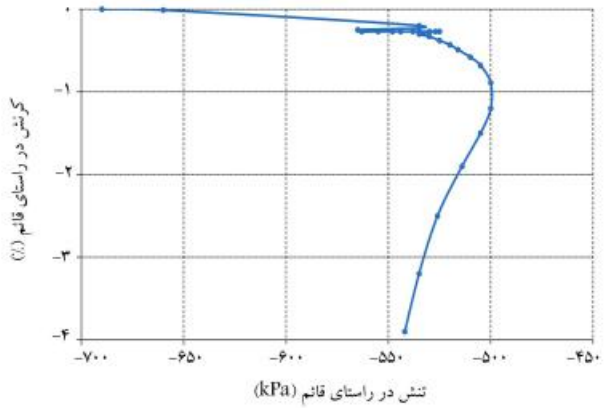
شکل ۱۳. تغییرات نشست در راستای قائم.



شکل ۱۴. میزان تنش مؤثر در بخش‌های مختلف مدل.



شکل ۱۵. منحنی تنش ـ کرنش در قسمت تحتانی و میانی فرازبند.



شکل ۱۶. منحنی تنش ـ کرنش طرفین فرازبند.

www.SID.ir

Archive of SID

۲.۶. تحلیل نتایج در حالت اشباع استاتیکی

تغییرشکل کلی فرازبند در حالت اشباع استاتیکی در شکل ۱۸ نشان داده شده است، که مطابق آن بیشترین جابه‌جایی مربوط به تورم ۳۰ سانتی‌متری در طرفین است. همچنین پی به مقدار حدودی ۱۰ سانتی‌متر نشست کرده است.

مطابق شکل ۱۹، بیشترین نشست در قسمت فوقانی فرازبند صورت گرفته و مقدار آن برابر ۱۴ سانتی‌متر است.

همان‌طورکه در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، به دلیل اشباع‌بودن محیط، تنش مؤثر برابر ۵۰۰ کیلونیوتن بر مترمربع و تنش کل نیز همانند حالت قبل، ۶۴۰ کیلونیوتن بر مترمربع بوده است.

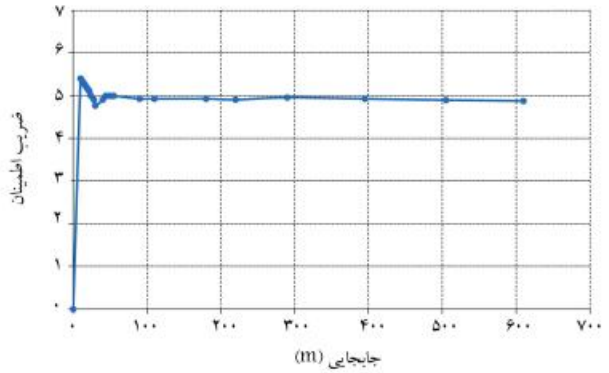
منحنی تنش ـ کرنش در قسمت فوقانی و میانی فرازبند در شکل ۲۱ نشان داده شده است، که مطابق آن در قسمت مذکور، کاهش حجم اتفاق افتاده است.

منحنی تنش ـ کرنش جناحین فرازبند نیز مطابق شکل ۲۲ است، که مطابق آن در نواحی مذکور تورم رخ داده است.

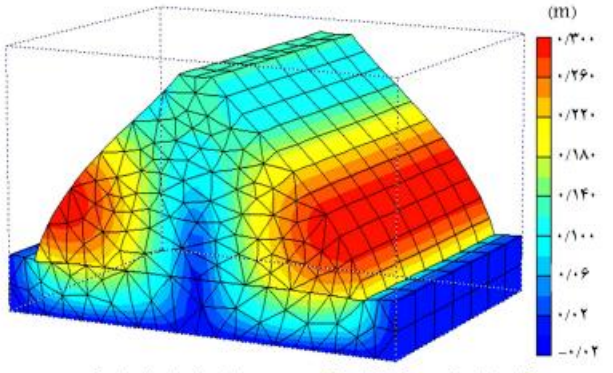
مطابق شکل ۲۳، مقدار ضریب اطمینان در مقابل واژگونی در حالت اشباع استاتیکی حدود ۶٫۳ است، که از عدد ۴ بزرگ‌تر است.

۳.۶. تحلیل نتایج مدل‌سازی و پایداری سازه‌ی فرازبند

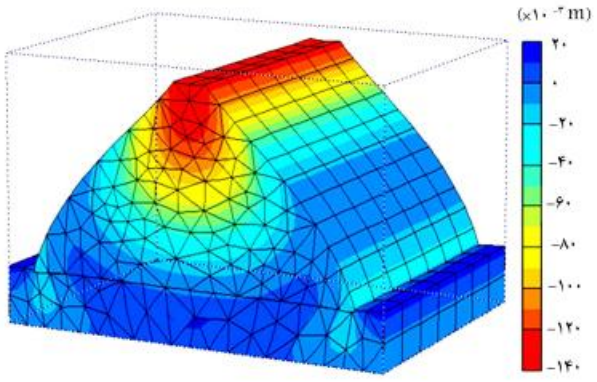
همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در حالت کلی فرازبند پایدار است و نشست چشم‌گیری در آن اتفاق نمی‌افتد. ولی برخلاف معمول، مقدار ضریب اطمینان در حالت اشباع بیشتر و همچنین مقدار نشست نیز در حالت اشباع کمتر است. دلیل این مسئله را می‌توان این‌گونه شرح داد که با توجه به سختی مصالح پی و فرازبند (مصالح پی



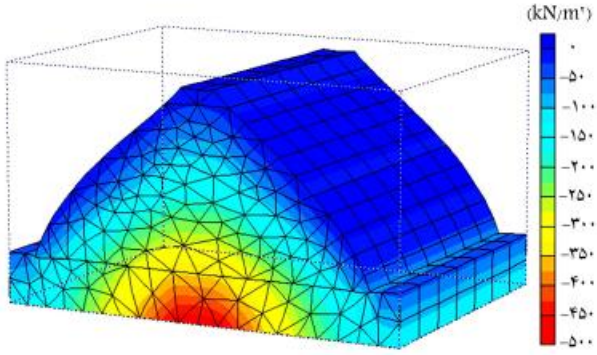
شکل ۱۷. ضریب اطمینان در مقابل جابه‌جایی.



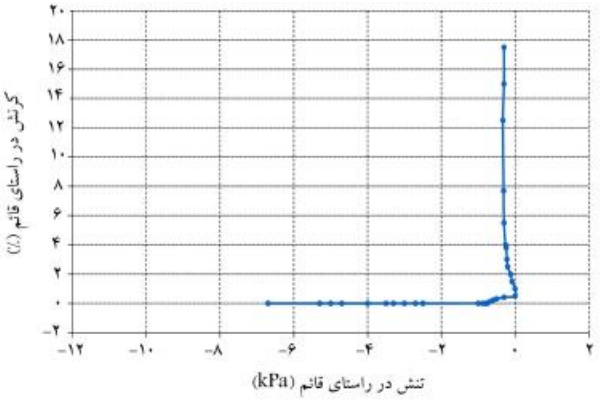
شکل ۱۸. تغییرشکل کلی فرازبند در حالت اشباع استاتیکی.



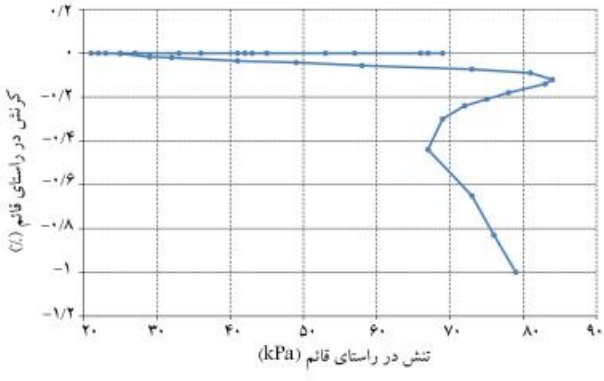
شکل ۱۹. تغییرات نشست در راستای قائم.



شکل ۲۰. میزان تنش مؤثر در بخش‌های مختلف مدل.



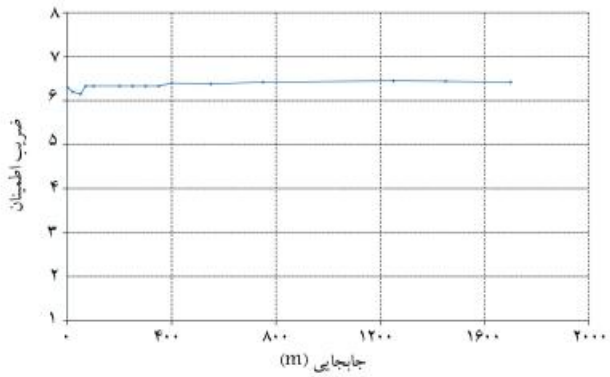
شکل ۲۱. منحنی تنش ـ کرنش در قسمت فوقانی و میانی فرازبند.



شکل ۲۲. منحنی تنش ـ کرنش در جناحین فرازبند.

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲۳. ضریب اطمینان در مقابل جابه‌جایی.

از جنس رس بسیار سخت و مصالح فرازبند از جنس خاک سیمان بوده است)، عامل تعیین‌کننده‌ی شرایط بحرانی، سُستی مصالح و ناپایداری شیروانی نخواهد بود. زیرا همان‌طور که مشاهده شده است، مقدار ضریب اطمینان در هر دو مورد، بالای ۵ است. در نتیجه حالت تعیین‌کننده‌ی شرایط بحرانی، نشست کلی مدل است. در حالت اشباع، تنش مؤثر که عامل تعیین‌کننده‌ی مقدار نشست در خاک است، کاهش می‌یابد و در این حالت مقدار نشست و یا تورم کمتر از حالت خشک است. همچنین با توجه به وزن پایین در حالت اشباع، مقدار تنش برشی موجود در محل (هم‌زمان با مقاومت برشی) کاهش می‌یابد، اما با این حال این مسئله تعیین‌کننده نیست. درنهایت می‌توان گفت که اختلاف نشست و یا تورم و ضریب اطمینان در حالت خشک و اشباع بسیار به هم نزدیک و قابل صرف‌نظر است و با توجه به نتایج حاصل می‌توان پایداری فرازبند را اذعان کرد.

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش آزمایش مقاومت فشاری و خمشی بر روی مصالح خاک سیمان انجام شده و اثر پارامترهای مقاومتی در آنها مورد ارزیابی قرارگرفته است. همچنین از این مصالح جهت ساخت سازه‌ی فرازبند سد بختیاری استفاده شده است، که نتایج تحلیل مدل‌سازی بر روی آن نیز مورد بررسی قرارگرفته است. برخی از نتایج حاصل از آزمایش‌ها و تحلیل عددی به این شرح هستند:

- مصالح با دانه‌بندی‌هایی که مقدار درشت‌دانه‌و نیز وزن مخصوص خشک بیشتری داشته‌اند، مقاومت فشاری و خمشی بیشتری نسبت به مصالح با چگالی خشک کمتر داشته‌اند.
- مصالح با دانه‌بندی‌هایی که مقدار شاخص خمیری کمتری داشته‌اند، مقاومت فشاری و خمشی بیشتری نسبت به مصالح با مقدار شاخص خمیری بیشتر داشته‌اند، که دلیل آن هیدراتاسیون کانی‌های رسی و جذب آب بیشتر توسط بخش خاکی مخلوط بوده است. به طوری که در مصالح با شاخص خمیری بیشتر، مقاومت خمشی و مقاومت فشاری، از لحاظ کمّی به ترتیب حدود ۳۰٪ و ۱۰٪ نسبت به حالت غیرخمیری کاهش یافته است.
- مصالح با دانه‌بندی‌هایی که مقدار ارزش ماسه‌یی بیشتری داشته‌اند، مقاومت فشاری و خمشی بیشتری نسبت به مصالح با مقدار ارزش ماسه‌یی کمتر داشته‌اند، زیرا مقدار ارزش ماسه‌یی در حقیقت بیان‌گر وجود ذرات ریزدانه‌ی ناخالص با باربری کم است.
- نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی حاکی از آن است که با افزایش ارزش ماسه‌یی مقاومت مصالح خاک سیمان به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. به‌طوری که در مصالح با مقدار هم‌ارز ماسه‌ی کمتر، از لحاظ کمّی مقاومت خمشی و مقاومت فشاری به‌ترتیب حدود ۴۰٪ و ۱۰٪ نسبت به حالت مصالح با مقدار هم‌ارز ماسه‌ی بیشتر کاهش می‌یابد.
- سازه‌ی فرازبند سد بختیاری که از مصالح خاک سیمان تشکیل شده است، با اطلاعات موجود در گزارش‌ها، به خوبی در دو حالت خشک و اشباع پایدار است.
- اختلاف نشست و تورم در دو حالت خشک و اشباع ناچیز است و با توجه به سختی مصالح پی و فرازبند، عامل تعیین‌کننده‌ی شرایط بحرانی، سُستی مصالح و ناپایداری شیروانی نخواهد بود.

منابع (References)

1. ACI, *State of the Art Report on Soil Cement*, 230, IR (2006).
2. ICOLD, *Soil Cement for Embankment Dams*, Bulletin 54 (1996).
3. Penev, D. and Kawamura, M. "Experimental methods and devices methods", *Materials and Structures*, **25**, pp. 115-120 (1992).
4. Bahar, R., Benazzoug, M. and. Kena, S. "Performance of compacted cement-stabilised soil", *Cement and Concrete Composites*, **26**(7), pp. 811-820 (2004).
5. Reddy, B.V. and Gupta, A. "Characteristics of soil-cement blocks using highly sandy soils", *Materials and Structures,* **38**(280), pp. 651-658 (2005).
6. Venkatarama Reddy, B.V. and Uday Vyas, Ch.V. "Influence of shear bond strength on compressive strength and stress–strain characteristics of masonry", *Materials and Structures,* **41**, pp. 1697-1712 (2008).
7. Wangs, S.-R. and Cao, B.-F. "Experimental study on interaction mechanism of small H-beams and a soil-cement retaining wall", *China Univ Mining & Technol,* **18**(1), pp. 149-152 (2008).
8. Sariosseiri, F. and Muhunthan, B. "Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils", *Engineering Geology*, **104**(1-2), pp. 119-125 (2009).
9. Xing, H., Yang, X., Xu, C. and Ye, G. "Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil–cement Engi-

www.SID.ir

Archive of SID

neering", *Engneering Geoogy*, **103**(1), pp. 33-38 (2009).

10. Da Fonseca, A.V., Cruz, R.C. and Consoli, N.C. "Strength properties of sandy soil-cement admixtures", *Geotech. Geol. Eng.*, **27**(6), pp. 681-686 (2009).
11. Yoon, S. and Abu-Farsakh, M. "Laboratory investigation on the strength characteristics of cement-sand as base material", *KSCE Journal of Civil Engineering*, **13**, pp. 15-22 (2009).
12. Kawamura, M. and Kasai, Y. "Mix design and strength of soil–cement concrete based on the effective water concept", *Materials and Structures*, **44**(2), pp. 529-540 (2011).
13. Sukontasukkul, P. and Jamsawang, P. "Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil–cement column", *Construction and Building Materials*, **29**, pp. 201-205 (2012).
14. Sukontasukkul, P., Sawatparnich, A. and Sawangsuriya, A. "Prediction of unconfined compressive strength of soil–cement at 7 days", *Geotech. Geol. Eng.*, **30**(1), pp. 263-266 (2012).
15. Ajorloo, A., Mroueh, H. and Lancelot, L. "Experimental investigation of cement treated sand behavior under triaxial test", *Geotech. Geol. Eng.*, **30**(1), pp. 129-143 (2012).
16. US Army Corps of Engineers, *Earthquake Design and Evaluation of Concrete Hydraulic Structures*, Engineer. Manual (EM), No. 1110-2-6053 (2007).
17. US Army Corps of Engineers, *Gravity Dam Design*, Engineer. Manual (EM), No. 1110-2-2200 (1995).

www.SID.ir