مهندسی عمران شریف (بهار ۱۳۹۶)
دوره‌ی ۲-۳۳، شماره‌ی ۱/۱، ص. ۱۱۷-۱۲۵، (یادداشت فنی)

Research Note

بررسی اثر زئولیت در مقاومت کششی خاک ماسه‌یی بابلسر تثبیت‌شده با سیمان

مجتبی عباسی * **(دانشجوی کارشناسی ارشد)**
موسسه آموزش عالی صنعتی مازندران
عیسی شوش‌پاشا (دانشیار)
حسین ملاعباسی (دانشجوی دکتری)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

در این بررسی، زئولیت به‌عنوان یکی از مواد افزودنی به سیمان و آثار آن در مقاومت کششی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا، از زئولیت نوع معدنی کلینوپیلولیت، سیمان تیپ II نکاء و ماسه‌ی بابلسر استفاده شده است. طرح اختلاط ۲۴ حالت سیمان و زئولیت شامل درصدهای سیمان مختلف: ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزن خشک کل نمونه و درصدهای جایگزینی ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ زئولیت با سیمان است. در این بررسی، ابتدا اختلاط براساس وزن خشک بیشینه و رطوبت بهینه‌ی به‌دست‌آمده از آزمایش تراکم استاندارد بر روی اختلاط‌های مختلف، نمونه‌ها ساخته و در شرایط مطلوب رطوبتی و دمایی به مدت ۲۸ روز نگه‌داری و آزمایش مقاومت کششی برزیلی به انجام رسیده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان داده که با جایگزینی ۳۰٪ زئولیت به‌جای سیمان، میزان مقاومت کششی آن نسبت به نمونه‌های بدون زئولیت به میزان ۴۰٪ افزایش یافته است.

mojtaba.abasi13@yahoo.com
shooshpasha@nit.ac.ir
hma@stu.nit.ac.ir

واژگان کلیدی: تثبیت، سیمان، زئولیت، تراکم، کشش برزیلی.

۱. مقدمه

سمنتاسیون سبب ایجاد و یا افزایش مقاومت کششی خاک‌ها می‌شود. دانستن مقاومت کششی خاک‌های سیمانته، به خصوص وقتی اهمیت می‌یابد که بدانیم شواهد تجربی و تئوری زیادی وجود دارد، مبنی بر اینکه گسیختگی در شیب‌های ماسه‌یی سیمانته با شکاف کششی در بخش فوقانی شیب‌ها آغاز می‌شود.[۱] همچنین وقتی برای بهسازی خاک ضعیف زیر پی و افزایش ظرفیت باربری از یک لایه‌ی خاک سیمانته استفاده می‌شود. شکست مجموعه (سیستم) در اثر افزایش بار، معمولاً تحت تنش‌های کششی در کف لایه‌ی بهسازی‌شده اتفاق می‌افتد. بنابراین خیلی منطقی‌تر است که مقاومت کششی به‌عنوان اندازه‌گیری مستقیم مقاومت خاک سیمانته به‌کار رود.[۲] در پژوهشی در سال ۲۰۰۴ این نتیجه به‌دست آمده است که هیدراتاسیون و گیرش سیمان ناشی از تزریق دوغاب سیمان به خاک، سبب ایجاد مقاومت کششی در مخلوط خاک و سیمان می‌شود، که به نسبت آب به سیمان و چگالی خشک خاک بستگی دارد. لذا بر حسب نوع گروت تزریق‌شده، مقاومت کششی برزیلی تقریباً ۱۸٪ و ۷٪ مقاومت تک‌محوری نمونه‌ها به ترتیب برای گروت سیمانی و گروت معدنی به‌دست آمده است.[۳] همچنین در سال ۲۰۰۷، با هدف تعیین میزان تأثیر سیمان، پوکی، و درصد رطوبت در مقاومت یک خاک ماسه‌یی سیمانته‌ی مصنوعی به انجام آزمایش‌های تک‌محوری و سه‌محوری بر روی خاک ماسه‌یی SC پرداخته شده و نمونه‌هایی به ابعاد ۵۰ میلی‌متر (قطر) × ۱۰۰ میلی‌متر (ارتفاع) و سیمان پرتلند تیپ III، که مدت ۷ روز عمل‌آوری شده است، مورد استفاده قرارگرفته و با بیان اینکه «مطالعات نشان داده است که مقاومت کششی در محدوده‌ی ۹ تا ۱۴ درصد مقاومت تک‌محوری تغییر می‌کند»، به‌دلیل وجود رابطه‌ی ذکرشده و سایر مزایای ارزانی، تکرارپذیری، سادگی، و... از آزمایش تک‌محوری جهت بررسی اثر متغیرهای مختلف در مقاومت خاک ـ سیمان استفاده شده و نتایج پژوهش مذکور نشان داده است که مقاومت تک‌محوری (و در نتیجه کششی) به‌صورت خطی با افزایش مقدار سیمان و به‌صورت نمایی با کاهش پوکی مخلوط متراکم افزایش می‌یابد.[۴] و نیز در سال ۲۰۱۱ نیز به بررسی پارامترهای کنترلی بر مقاومت کششی ماسه‌ی سیمانی پرداخته شده است.[۵]

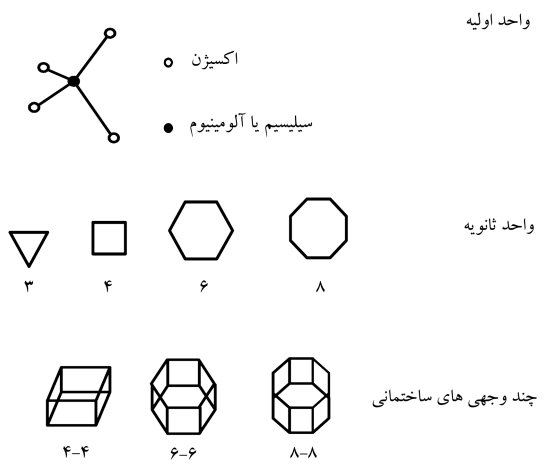
فیبر، خرده‌لاستیک، و شیشه را می‌توان از جمله مواد افزودنی به سیمان در راستای افزایش مقاومت ماسه نام برد. در پژوهش حاضر به بررسی اثر زئولیت به‌عنوان یک ماده‌ی افزودنی در مقاومت کششی خاک ماسه‌یی بابلسر تثبیت‌شده با سیمان پرداخته شده است.

زئولیت یک واژه‌ی یونانی است که از دو جزء به معنی سنگ و جوشان تشکیل شده و اولین بار در سال ۱۹۷۶، یک معدن‌شناس سوئدی به نام کرونستت، نام زئولیت را به کانی استیلبیت[1] داده است، که به هنگام حرارت‌دادن مقدار زیادی آب از آن خارج می‌شود. از دست‌دادن آب در زئولیت‌ها، آسان و برگشت‌پذیر است. زئولیت‌ها شامل فلزات قلیایی و قلیایی خاکی هستند و قادرند در واکنش‌های جایگزینی

---

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۱۰/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۴/۴/۱۶، پذیرش ۱۳۹۴/۵/۵.



شکل ۱. نمایش واحدهای ساختمانی در ساختار مولکولی زئولیت.[۶]

برگشت‌پذیر شرکت کنند. تجزیه‌های شیمیایی و ساختاری نشان می‌دهند که زئولیت‌ها عمدتاً حاوی سیلیسیم، آلومینیوم، و اکسیژن هستند (شکل ۱). زئولیت‌ها جامداتی بلورین و آب‌دار با روزنه‌هایی متحدالشکل و به ابعاد ۳ تا ۱۰ انگستروم هستند، که ابعاد مذکور در حد اندازه‌های مولکولی است، لذا به زئولیت‌ها غربال‌های مولکولی نیز می‌گویند.[۶]

پژوهشگران زیادی در زمینه‌ی استفاده از زئولیت در ملات‌ها و افزایش مشخصات مکانیکی بتن‌ها کار کرده‌اند.[۷و۸] در سال ۲۰۰۷ نشان داده شده است که زئولیت طبیعی، چگالی دانه‌های جامد سیمان را به دلیل فضاهای خالی درون زئولیت کاهش و مدت زمان خمیری ملات‌های سیمان را افزایش می‌دهد.[۹]

سال‌های زیادی از فراگیرشدن استفاده از زئولیت در جهان بالاخص کشورهای صنعتی و پیشرفته می‌گذرد. لیکن از نظر هزینه و امکان دسترسی، تهیه‌ی این کانی‌ها در ایران بسیار ارزان و به راحتی میسر است. به همین دلیل استفاده از آنها علاوه بر کاهش معضلات زیست‌محیطی از نظر اقتصادی نیز بسیار مؤثر است. استفاده از زئولیت به‌عنوان یک ماده‌ی معدنی طبیعی و ارزان (در ایران) و جایگزینی آن با درصدی از سیمان می‌تواند برای بهسازی ماسه با سیمان مناسب باشد. ارزان‌بودن زئولیت نسبت به سیمان با توجه به آنالیز بهای جهانی، وجود معادن بسیار در کشور به ویژه در استان سمنان را می‌توان به‌عنوان بخشی از دلایل کاربرد زئولیت به‌جای سیمان نام برد.[۶]

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

برای مطالعه‌ی اثرات زئولیت در تراکم ماسه‌ی تثبیت‌شده با سیمان و بررسی مقاومت کششی آن، یک سری برنامه‌ی آزمایشگاهی طرح ریزی شده است. برنامه‌ی آزمایشگاهی شامل: معرفی مصالح مصرفی، طرح اختلاط، آزمایش تراکم جهت تعیین پارامترهای وزن مخصوص بیشینه و رطوبت بهینه، نمونه‌سازی، و روند آزمایش کشش است.

۱.۲. مصالح مورد استفاده

مصالح به‌کارگیری‌شده در این پژوهش شامل خاک ماسه‌یی بابلسر، سیمان پرتلند تیپ II، و زئولیت است.

۱.۱.۲. ماسه

با توجه به نهشته‌های ماسه‌یی فراوان در سواحل دریای خزر، در این پژوهش از ماسه‌ی ساحلی بابلسر استفاده شده است. ماسه‌ی بابلسر از نوع ماسه‌ی بد دانه‌بندی‌شده است، که اندازه‌ی متوسط دانه‌های آن حدوداً ۰٫۲۴ میلی‌متر است (شکل ۲).

وزن مخصوص خشک بیشینه و کمینه‌ی آن به ترتیب مقادیر ۱٫۷۷ و ۱٫۴۹ تن بر مترمکعب و چگالی دانه‌های جامد آن ۲٫۷۲ به‌دست آمده است.

۲.۱.۲. زئولیت

زئولیت مورد استفاده از نوع کلینوپتیلولیت است، که از معدنی واقع در ۳۰ کیلومتری شمال سمنان استخراج شده است، که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است.[۱۰]

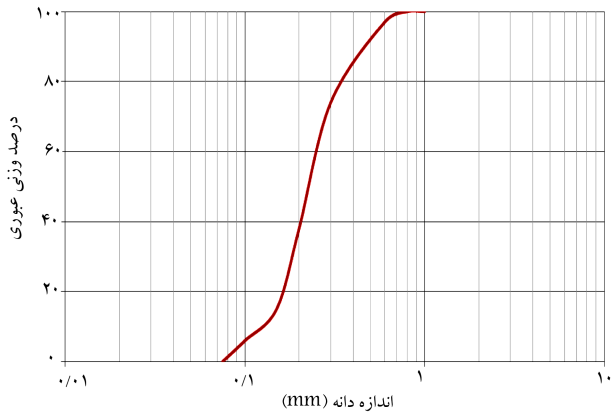
۳.۱.۲. سیمان

در این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ II کارخانه‌ی نکاء (واقع در استان مازندران) استفاده شده و مصرف ویژه‌ی آن در محل‌هایی که حرارت هیدراسیون متوسط برای آنها ضرورت داشته است و حمله‌ی سولفات‌ها به آنها در حد متوسط باشد، کاربرد دارد.

۲.۲. طرح اختلاط

برای بررسی اثر زئولیت در تراکم ماسه‌ی تثبیت‌شده با سیمان طرح اختلاط‌های ذیل شامل درصد سیمان‌های مختلف، درصدهای جایگزینی زئولیت با سیمان استفاده شده است:

- درصد سیمان: ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزن مخصوص خشک کل نمونه.
- درصدهای جایگزینی زئولیت با سیمان: ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد سیمان.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی ماسه‌ی بابلسر.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شیمیایی زئولیت معدنی مورد استفاده در پژوهش حاضر.[۱۰]

مشخصات	زئولیت
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۱٫۱۹
سطح ویژه (cm^2/gr)	۱۰۰۰
جذب آب	٪۶۰ حجمی
ظرفیت تبادل یونی (meq/gr)	۲٫۶
چگالی دانه‌های جامد	۲٫۲

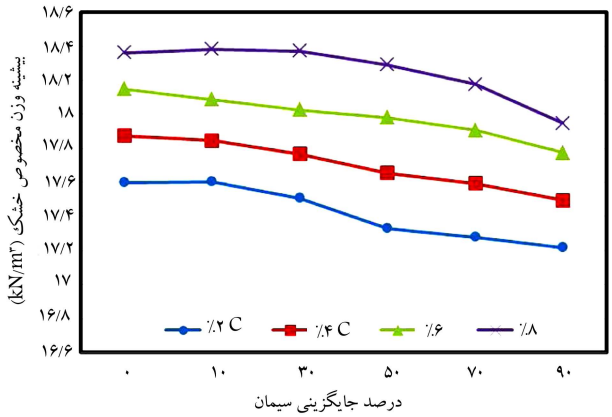
۳.۲. آزمایش تراکم

آماده‌سازی نمونه در اسرع وقت پس از اتمام مخلوط و آزمایش براساس استاندارد ASTM D ۶۹۸ انجام شده است. با توجه به انجام آزمایش‌های تراکم استاندارد برای هر ۲۴ حالت طرح اختلاط، بیشینه‌ی چگالی خشک به‌دست آمده است (شکل ۳).

با توجه به شکل ۳، با افزایش میزان جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان، چگالی بیشینه‌ی خشک نمونه‌ها کاهش یافته است، که میزان این کاهش در طرح ۲٪ سیمان، ۱٫۲٪ و در طرح ۸٪ سیمان، ۲٪ است. این در حالی است که درصد رطوبت بهینه‌ی نمونه درکلیه‌ی اختلاط‌ها تقریباً ۱۴٪ بوده است. همان‌طوری که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، بیشینه‌ی کاهش تقریباً ۲ درصدی برای جایگزینی سیمان با زئولیت نتیجه شده است، که با توجه به قیمت و مزایای زیست‌محیطی زئولیت نسبت به سیمان لزوم استفاده از زئولیت را بیشتر نمایان می‌سازد.

۴.۲. نمونه‌سازی

نمونه‌هایی به ابعاد ۳۸ میلی‌متر (قطر) × ۷۶ میلی‌متر (ارتفاع) و سیمان پرتلند تیپ II نکاء و زئولیت معدن سمنان مطابق با طرح اختلاط به روش کوبش مرطوب در ۳ لایه تا حصول بیشینه‌ی وزن مخصوص و رطوبت بهینه‌ی موردنظر عمل‌آوری شده است. نمونه‌های ساخته‌شده در بسته‌های پلاستیکی به مدت ۷ و ۲۸ روز در دستگاه حمام بخار با درجه دمایی تقریباً ۲۲ درجه و ۹۰٪ رطوبت نگه‌داری شده است (شکل ۴).



شکل ۳. نتایج کلی تراکم با استفاده از درصدهای مختلف جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان.

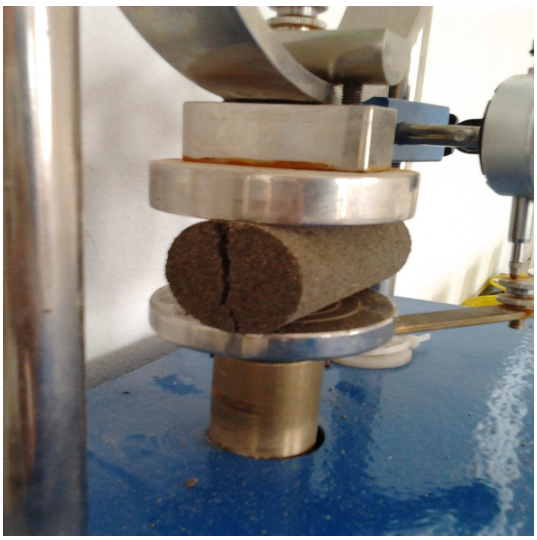
شکل ۴. روند ساخت نمونه‌های آزمایش کششی.

۵.۲. روند آزمایش کشش برزیل

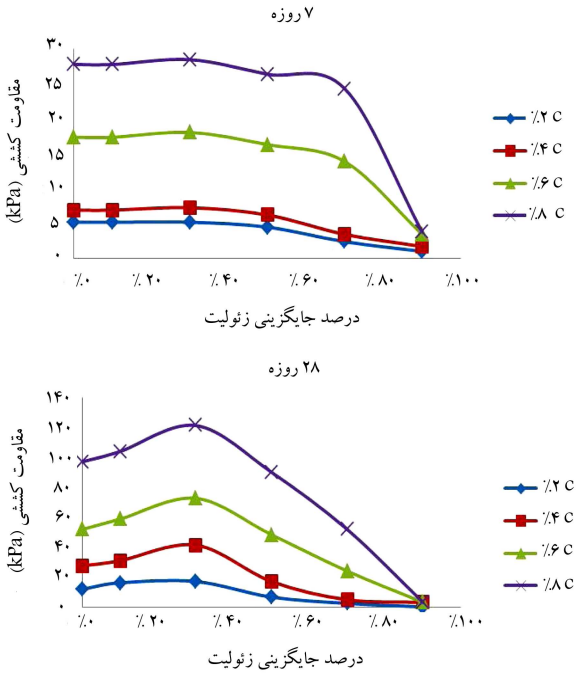
از آنجایی که اندازه‌گیری مقاومت کششی مستقیماً مشکل است؛ لذا، برای برآورد آن از دستگاه برزیلی استفاده شده است. در این آزمایش نمونه‌های تهیه‌شده بین دو فک به‌صورت قطری قرار داده شده و تحت بارگذاری قرار گرفته است، که تحت استاندارد آزمایش برزیلی ۷۲۲۳ انجام شده است (شکل ۵).

۳. نتایج

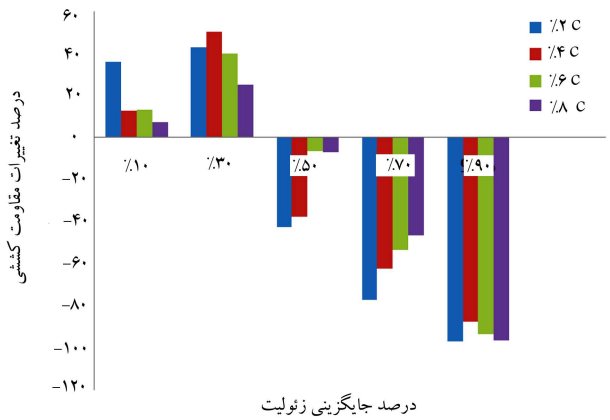
با توجه به انجام آزمایش‌های کشش برزیلی برای هر ۲۴ حالت طرح اختلاط، مقاومت کششی نمونه‌ها حاصل شده است (شکل ۶).



شکل ۵. شکست نمونه‌ی تحت آزمایش برزیلی.



شکل ۶. نتایج آزمایش کشش برزیلی.



شکل ۷. درصد تغییرات مقاومت کششی ماسه‌ی سیمانی با درصدهای مختلف جایگزینی زئولیت.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، زئولیت در مدت زمان ۷ روز در مقاومت کششی تأثیر نداشته و با افزایش زمان با توجه به ذات پوزلانی ماده در مدت ۲۸ روز، که مدت زمانی مناسب برای بهسازی پی است، عملکرد بهتری دارد. در مقایسه‌یی بهتر می‌توان درصد تغییرات را در شکل ۷ مشاهده کرد. مطابق شکل مذکور، به ازاء جایگزینی ۳۰٪ زئولیت به‌جای سیمان، افزایش مقاومت کششی تا حدود ۴۰٪ قابل تعیین است.

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، زئولیت به‌عنوان یک ماده‌ی معدنی پوزلانی جهت تراکم و افزایش مقاومت کششی ماسه‌ی تثبیت‌شده با سیمان که در محیط‌های خورنده، پایداری بیشتری نسبت به سیمان دارد و سبب هیدراسیون آرام سیمان با حرارت‌زایی کمتر می‌شود، معرفی شده است.

در بررسی نتایج آزمون تراکم بر روی نمونه‌هایی که در آنها فقط از سیمان استفاده شده است، مشاهده می‌شود که با افزایش درصد جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان، بیشینه‌ی تراکم خشک نمونه‌ها کاهش و مقاومت کششی با افزایش درصد جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان تا ۳۰٪ افزایش یافته است، که ناشی از فعالیت پوزلانی زئولیت و کندترکردن فرایند هیدراسیون است. سیمان در مقایسه با زئولیت، مسائل زیست‌محیطی و مسائل دیگری از جمله زمان اختلاط با توجه به گیرش سیمان و سخت‌شدن عمل تراکم، کارایی کمتری دارد. همچنین درصدهای افزایشی تا ۴۰٪، ناشی از استفاده از زئولیت به‌جای سیمان و با توجه به کاهش معضلات زیست‌محیطی، استفاده از زئولیت به‌جای سیمان ضروری به نظر می‌رسد.

پانوشت

1. Stilbite

منابع (References)

1. Consoli, N.C., Foppa, D., Festugato, L. and Heineck, K.S. "Key parameters for strength control of artificially cemented soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **120**(2), pp. 197-205 (2007).
2. Consoli, N.C., Dalla Rosa, F. and Fonini, A. "Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **135**(12), pp. 1846-1856 (2009).
3. Dano, C., Hicher, P.Y. and Tailliez, S. "Engineering properties of grouted sands", *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering*, **130**(3), pp. 328-338 (2004).
4. Consoli, N.C., Da Fonseca, A.V., Cruz, R.C. and Heineck, K.S. "Fundamental parameters for the stiffness and strength control of artificially cemented sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **135**(9), pp. 1347-1353 (Sep. 2009).
5. Consoli, N.C., Da Fonseca, A.V., Cruz, R.C. and Heineck, K.S. "Voids/cement ratio controlling tensile strength of cement-treated soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **137**(11), pp. 1347-1353 (2011).
6. Khaleghi, M.H. "Zeolites in Iran", Geological Organization of Iran.
7. Albayraka, M., Yorukoglu, A., Karahan, S., Atlıhan, S., Aruntas, H.Y. and Girgin, I. "Influence of zeolite additive on properties of autoclaved aerated concrete", *Building and Environment*, **42**(9), pp. 3161-3165 (2007).
8. Caputo, D., Liguori, B. and Colella, C. "Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: The effect of zeolite structure", *Cement and Concrete Composites*, **30**(5), pp. 455-462 (2008).
9. Yılmaz, B., Ucar, A., Oteyaka, B. and Uz, V. "Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement", *Building and Environment*, **42**(11), pp. 3808-3815 (2007).
10. http://www.afrazand.com/Zeolite.htm.