

## بررسی اثر ژئولیت و سیمان بر تراکم خاک ماسه‌ای بابلسر\*

عیسی شوش پاشا<sup>(۱)</sup> مجتبی عباسی<sup>(۲)</sup> حسین ملاعباسی<sup>(۳)</sup>

**چکیده** ماسه‌های سیمانی به‌عنوان یکی از موضوعات اقتصادی و زیست‌محیطی در تثبیت خاک شناخته شده است. در برخی موارد ترکیبی از سیمان و ماسه با سایر مواد از جمله فیبر، شیشه، نانوذرات و یا ژئولیت می‌تواند به‌طور مؤثر در تثبیت خاک در جاده‌سازی استفاده شود. در این بررسی ژئولیت به‌عنوان یکی از مواد پوزلان افزودنی به سیمان و اثرات آن بر تراکم مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا از ژئولیت نوع معدنی کلینوپیلولیت و سیمان تیپ II نکا و ماسه بابلسر به‌عنوان خاک پایه استفاده شد. آزمایش تراکم استاندارد بر روی طرح اختلاط ۲۴ حالت سیمان و ژئولیت شامل درصد سیمان‌های مختلف ۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزن خشک کل نمونه و درصد‌های جایگزینی ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ ژئولیت با سیمان انجام شد. نتایج حاصل نشان می‌دهد با جایگزینی ژئولیت به‌جای سیمان، وزن مخصوص خشک حداکثر آن نسبت به نمونه‌های بدون ژئولیت به میزان ۲ تا ۲/۵ درصد کاهش می‌یابد و درصد رطوبت بهینه تقریباً ۱۴ درصد به‌دست آمده است. درانتها یک تابع براساس سری ولترا برای ارتباط دادن وزن مخصوص خشک حداکثر به پارامترهای ماسه ژئولیت سیمانی ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی** تثبیت، سیمان، ژئولیت، تراکم، رطوبت بهینه.

## Investigation of Zeolite and Cement on Compaction of Babolsar Sand

I. Shooshpasha M. Abbasi H. MolaAbasi

**Abstract** It is widely known and well emphasized that the cemented sand is one of economic and environmental topics in soil stabilization. In some instances, a blend of sand, cement and other materials such as fiber, glass, nano particle and zeolite can commercially available and effectively used in soil stabilization in road construction. In this investigation, zeolite and its effect on compaction studied as one of pozelan additive material to cement. Therefore, cilinopiolite kind of zeolite, Neka cement type II and Babolsar sand are used. Compaction poroctor tests were carried out on 24 combination type of cement and zeolite with include different cement percentages 2, 4, 6 and 8 percent of total dry weight of samples and replacement percent's of 0, 10, 30, 50, 70 and 90 cement with zeolite. Results show that by replacement cement material by zeolite, the maximum dry density increased 2 to 2.5% in comparison with cemented samples and 14% optimum water content approximately concluded. At the end, a function fits Based on Voltra series presented to relate maximum dry density and zeolite-cement-soil parameters.

**Key Words** Stabilization, Cement, Zeolite, Compaction, Optimum Water Content.

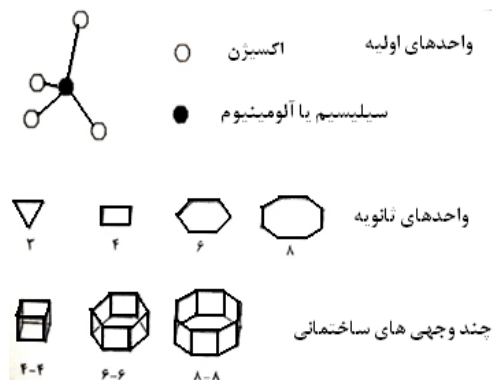
\* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۱۰/۲۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۲/۱ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و خاک و پی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل. Email: shooshpasha@nit.ac.ir

(۲) کارشناس ارشد خاک و پی، مؤسسه آموزش عالی غیرانتفاعی صنعتی، مازندران.

(۳) دانشجوی دکتری، مهندسی خاک و پی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل.

متحدالشکل و به ابعاد ۳ تا ۱۰ انگستروم می‌باشند که ابعاد مزبور در حد اندازه‌های مولکولی است، لذا به ژئولیت‌ها غریبال‌های مولکولی نیز می‌گویند [۳].



شکل ۱ نمایش واحد‌های ساختمانی در ساختار مولکولی ژئولیت

سال‌های زیادی از فراگیر شدن استفاده از ژئولیت در جهان بالاخص کشورهای صنعتی و پیشرفته می‌گذرد. لیکن از نظر هزینه و امکان دسترسی، تهیه این کانی‌ها در ایران بسیار ارزان و به‌راحتی میسر است. به‌همین دلیل استفاده از آنها علاوه بر کاهش معضلات زیست‌محیطی از نظر اقتصادی نیز بسیار اثرگذار است [4].

استفاده از ژئولیت به‌عنوان یک ماده معدنی طبیعی و ارزان (در ایران) و جایگزینی آن با درصدی از سیمان می‌تواند برای به‌سازی ماسه با سیمان مناسب باشد. ارزان بودن ژئولیت نسبت به سیمان را با توجه به آنالیز بهای جهانی و وجود معادن بسیار در کشور به‌ویژه در استان سمنان [4] می‌توان به‌عنوان بخشی از دلایل کاربرد ژئولیت به‌جای سیمان نام برد.

این مقاله شامل مطالعات قبلی اثرات سیمان و ژئولیت بر تراکم، مواد و روش‌های آزمایش (مشخصات مصالح شامل دانه‌بندی، وزن مخصوص، بیشینه و کمینه و تراکم پروکتور) و درانتها بحث و نتایج این بررسی می‌باشد.

## مقدمه

از ویژگی‌های عمده خاک‌های ماسه‌ای سست، مقاومت ضعیف و ناپایداری حجمی آنها می‌باشد. برای تثبیت این نوع خاک‌ها استفاده از تکنیک افزودن سیمان به‌عنوان یکی از گزینه‌های پرکاربرد مورد استفاده مهندسان می‌باشد [1].

سیمان که از یک سو انرژی فراوانی برای تولید آن مصرف می‌شود و از سوی دیگر موجب تولید حدود ۸ درصد گازکربنیک تولیدشده در جهان می‌شود، توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است. بنابراین بهینه‌سازی ترکیب آن به‌گونه‌ای که کمترین میزان انرژی برای تولید آن مصرف شود و کمترین لطمه به منابع طبیعی وارد شود و درنهایت بهترین کارایی ممکن از آن گرفته شود، به‌عنوان یک هدف اصلی مطرح می‌گردد [2].

برخی از مطالعات به استفاده از فیبر، خرده‌لاستیک، نانو ذرات و شیشه در ماسه سیمانی در راستای افزایش مقاومت و کاهش رفتار ترد ماسه سیمانی اشاره کرده‌اند. در بررسی ادبیات فنی، کمتر به افزودن ماده پوزلانی از جمله ژئولیت به ماسه سیمانی پرداخته شده است. استفاده از ژئولیت به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی می‌تواند گزینه‌ای درخور توجه برای کاهش مصرف سیمان باشد.

ژئولیت یک واژه یونانی می‌باشد که از دو جزء به معنی سنگ و جوشان تشکیل شده است و اولین بار در سال ۱۹۷۶ توسط یک معدن‌شناس سوئدی به نام کرونتست، نام ژئولیت به کانی استیلیت داده شد که به‌هنگام حرارت دادن مقدار زیادی آب از آن خارج می‌گردد. از دست دادن آب در ژئولیت‌ها، آسان و برگشت‌پذیر است. ژئولیت‌ها شامل فلزات قلیایی و قلیایی خاکی هستند و قادرند در واکنش‌های جایگزینی برگشت‌پذیر شرکت نمایند. تجزیه‌های شیمیایی و ساختاری نشان می‌دهند که ژئولیت‌ها عمدتاً حاوی سیلیسیم، آلومینیوم و اکسیژن هستند (شکل ۱). ژئولیت‌ها جامداتی بلورین و آبدار با روزنه‌هایی

### اثرات سیمان و زئولیت بر تراکم

افزودن سیمان به خاک موجب تغییر در وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه می‌شود، ولی محققان در مورد چگونگی و میزان این تغییرات نظرات متفاوتی را ارائه نموده‌اند. کمیته تخصصی ACI بیان می‌دارد که تثبیت با سیمان باعث تغییر در وزن مخصوص خشک بیشینه و درصد رطوبت بهینه می‌شود، اما این تغییرات قابل پیش‌بینی نیستند [5]. برای تثبیت موفقیت‌آمیز، تراکم کافی ضروری است ولی نکته مهمی که در تراکم می‌بایست به آن توجه داشت این است که تأخیر بین اختلاط و متراکم کردن می‌تواند حداکثر دانسیته را کاهش دهد.

کاپا و دوروکان در سال ۲۰۰۴ مشخصات تراکمی زئولیت و مخلوط زئولیت - بتونیت (BEZ) (Bentonite-Embedded Zeolite) را مورد ارزیابی قرار دادند. با افزایش مقدار بتونیت در مخلوط، وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش می‌یابد و این در حالی است که درصد رطوبت بهینه افزایش یافته است. البته با افزودن مقادیر مختلف بتونیت، کاهش وزن مخصوص خشک حداکثر و افزایش درصد رطوبت بهینه چشمگیر نمی‌باشد [6].

صرف زمان زیاد برای اختلاط باعث وقوع هیدراسیون جزئی سیمان می‌شود که نتیجه آن کاهش مقاومت در دانسیته ثابت است. اگر عمل تراکم به تأخیر بیفتد سیمان شروع به عمل هیدراسیون می‌کند و موجب سفت شدن خاک تثبیت‌شده می‌گردد و در نهایت عمل تراکم را مشکل می‌نماید [5]. تأخیر بین اختلاط و تراکم به کاهش قابل ملاحظه در مقاومت فشاری محصورنشده مصالح تثبیت‌شده با سیمان می‌انجامد. وایت و گناندران در سال ۲۰۰۵ گزارش کردند که ۴ تا ۲۴ ساعت تأخیر بین اختلاط و عمل تراکم به ترتیب موجب ۱۰ تا ۲۰ و ۴۰ درصد کاهش در مقاومت فشاری محصورنشده می‌گردد [7].

زایلسکا در سال ۲۰۰۸ در مطالعه‌ای تأثیر میزان

سیمان و نوع روش انتخابی برای انجام آزمایش تراکم را بر دانسیته و درصد رطوبت بهینه مورد ارزیابی قرار داد. آنها نتیجه گرفتند که ارتباط مستقیمی که بین عمل هیدراسیون و میزان سیمان وجود دارد؛ به عبارت دیگر با افزایش میزان سیمان، عمل هیدراسیون که منجر به کاهش رطوبت می‌شود، نیز افزایش می‌یابد [8].

دانسیته خاک به جنس خاک، انرژی تراکم و میزان شاخص تثبیت بستگی دارد. در این ارتباط ال‌قباری و همکارانش در سال ۲۰۰۹ تأثیر دو شاخص تثبیت مختلف را در منحنی تراکم خاک ماسه‌ای مورد ارزیابی قرار دادند. شاخص‌های تثبیت مورد استفاده شامل سیمان پرتلند معمولی و گرد کوره سیمان می‌شدند [9]. آنها دریافتند که با افزایش میزان سیمان دانسیته خاک افزایش پیدا می‌کند. دلیل این مطلب را می‌توان به دو عامل زیر نسبت داد:

۱. از آنجایی که سیمان دارای مصالح ریزدانه تری نسبت به ماسه است، این مواد فضای خالی بین ذرات ماسه را پر می‌کند و باعث افزایش وزن مخصوص خشک خاک می‌شود.

۲. بالاتر بودن وزن مخصوص دانه‌های سیمان (Gs) نسبت به ماسه.

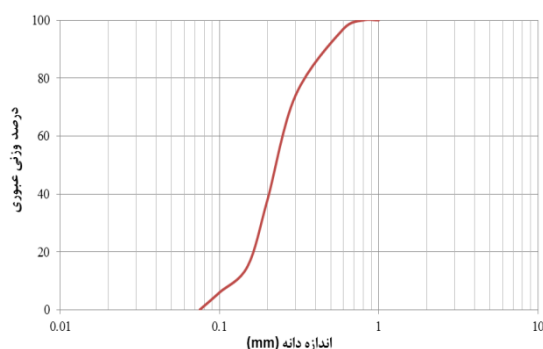
پس در حالت کلی می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که افزایش سیمان باعث افزایش وزن مخصوص خشک خاک می‌شود که مقدار این افزایش به نوع و میزان سیمان بستگی خواهد داشت. نکته مهم دیگر این است که افزایش سیمان منجر به کاهش رطوبت بهینه می‌شود و این کاهش رطوبت برای درصد سیمان‌های بالا محسوس‌تر است.

میتریوس و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی اثر جایگزینی زئولیت طبیعی نوع HEU به جای ماسه در ساخت ملات سبک پرداخته‌اند. نتایج بررسی‌های آنان نشان می‌دهد که اضافه کردن زئولیت طبیعی به مخلوط ملات ماسه و سیمان پرتلند سبب کاهش تا ۱۸/۵ درصدی وزن مخصوص آن می‌شود. افزایش نسبت

### مصالح مورد استفاده

مصالح به‌کارگیری شده در این تحقیق شامل خاک ماسه‌ای بابلسر، سیمان پرتلند تیپ II نکا و ژئولیت سمنان می‌باشد. در انتخاب مصالح مورد آزمایش سعی شده است که مصالح برای تثبیت خاک‌های نوار ساحلی شمال کشور مناسب باشد.

**ماسه.** باتوجه به نهشته‌های ماسه‌ای فراوان در سواحل دریای خزر در این پژوهش از ماسه‌ی ساحلی بابلسر استفاده شده است. ماسه‌ی بابلسر از نوع ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده است که اندازه‌ی متوسط دانه‌های آن حدوداً ۰/۲۴ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM-C136 [13] می‌باشد (شکل ۱). وزن مخصوص خشک بیشینه و کمینه‌ی ماسه‌ی بابلسر به‌ترتیب مقادیر ۱/۷۷ و ۱/۴۹ تن بر مترمکعب ASTM-D4253-4 [14,15] و چگالی دانه‌های جامد آن ۲/۷۲ مطابق با استاندارد ASTM-D854-92 [16] به‌دست آمده است. علت بالا بودن چگالی دانه‌های جامد، وجود درصدی از مصالح اکسید آهن و سایر مصالحی چون نیکل و کبالت است [۱۷].



شکل ۲ منحنی دانه بندی ماسه بابلسر

**ژئولیت.** ژئولیت مورد استفاده از نوع کلینوپتیلولیت است که از معدنی واقع در ۳۰ کیلومتری شمال سمنان استخراج شده است. خواص فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۱) آمده است [4]:

ژئولیت طبیعی افزایش تخلخل و افزایش جذب آب ملات و در برخی موارد کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری را سبب می‌شود [10].

هوانگ در سال ۲۰۱۵ به بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی اختلاط‌های ماسه و ژئولیت، با درصد جرم‌های مختلف ژئولیت ۲۵، ۵۰، ۷۵٪ پرداخته است. نتیجه‌ی بررسی ایشان در مورد تراکم نشان داد که با افزایش نسبت جرم ژئولیت در مخلوط، درصد رطوبت بهینه تمایل به افزایش و وزن مخصوص خشک ماکزیم تمایل به کاهش دارد [11].

یلماز و همکاران [12] نیز به بررسی خواص مکانیکی و شیمیایی مخلوط‌های ژئولیت و ماسه پرداخته‌اند.

در این تحقیق به بررسی ژئولیت به‌عنوان یک ماده‌ی پوزلان افزودنی و اثرات آن بر تراکم خاک‌های ماسه‌ای بابلسر تثبیت شده با سیمان پرداخته شده است. در این بررسی یک‌سری آزمایش انجام شده است که در ادامه به آنها اشاره شده است.

### برنامه‌ی آزمایشگاهی

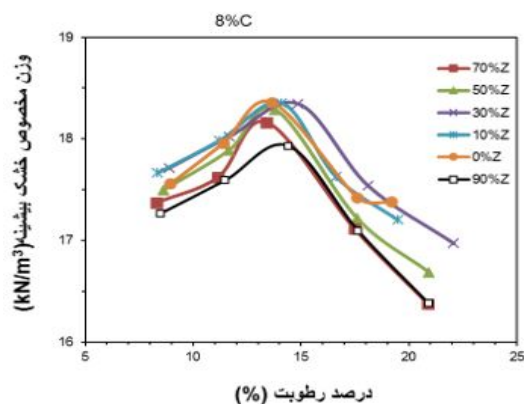
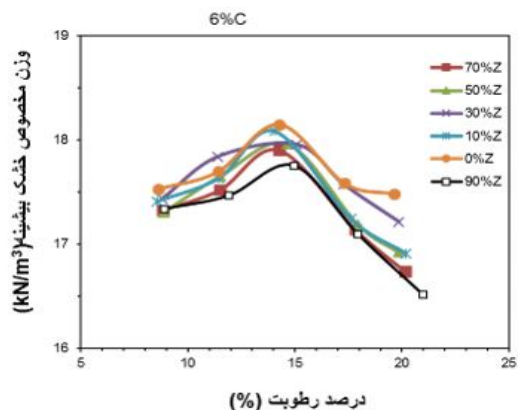
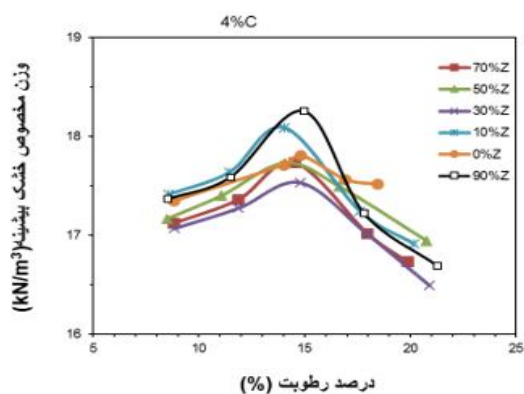
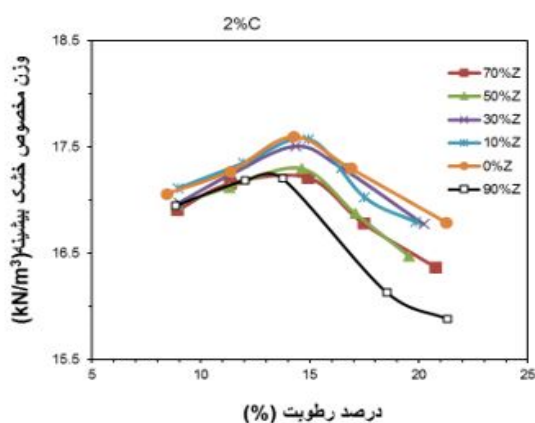
برای مطالعه‌ی اثرات ژئولیت و سیمان بر تراکم ماسه‌ی بابلسر پارامترهای مقدار سیمان و جایگزینی آن با ژئولیت مدنظر قرار گرفته است. در جدول (۱) متغیرهای مربوط به آزمایش تراکم استاندارد ارائه شده است.

جدول ۱ مشخصات متغیرهای ملاحظه شده

متغیرها	تعداد سطوح	توضیحات
نوع خاک پایه	۱	ماسه‌ی بددانه‌بندی‌شده‌ی بابلسر
نوع سیمان	۱	سیمان پرتلند تیپ II نکا
مقادیر سیمان	۴	۲، ۴، ۶ و ۸ درصد وزن خشک کل
نوع ژئولیت	۱	ژئولیت طبیعی کلینوپتیلولیت
مقادیر ژئولیت	۶	۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد سیمان

جدول ۲ مشخصات مکانیکی زئولیت معدنی [9]

مشخصات	زئولیت
وزن مخصوص ( $\text{gr/cm}^3$ )	۱/۱۹
سطح ویژه ( $\text{cm}^2/\text{gr}$ )	۱۰۰۰
جذب آب	۶۰ درصد حجمی
ظرفیت تبادل یونی ( $\text{gr/meq}$ )	۲/۶
چگالی دانه‌های جامد	۲/۲



شکل ۳ تراکم طرح‌های مختلف جایگزینی با سیمان

سیمان. در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان نکا واقع در استان مازندران استفاده شده است. مصرف ویژه این سیمان در محل‌هایی است که حرارت هیدراسیون متوسط برای آنها ضرورت دارد و حمله سولفات‌ها به آنها در حد متوسط می‌باشد.

### روند آزمایش تراکم

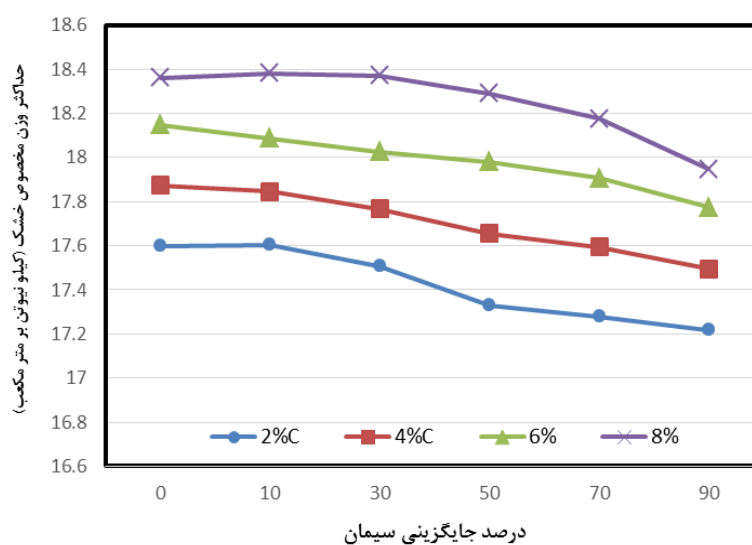
آماده‌سازی نمونه در اسرع وقت پس از اتمام مخلوط و آزمایش براساس استاندارد  $\text{D 698-07}^{\text{E1}}$  انجام شد [18]. در هر طرح، در مجموع پنج نمونه برای به‌دست آوردن رطوبت مطلوب برای تراکم استفاده گردید. مقادیر مختلف ماسه، سیمان و زئولیت خشک‌شده در گرم‌خانه براساس درصدهای بیان‌شده برای هر نمونه جمعاً به میزان ۳ کیلوگرم جدا شد و با رطوبت نسبتاً کم مخلوط شد و مخلوط در قالب پروکتور استاندارد با استفاده از چکش با سقوط آزاد متراکم شد. تراکم در ۳ لایه، هر لایه با ۲۵ ضربه متراکم و سطح خاک روی قالب بدون اعمال فشار صاف شد. پایه برداشته شد و خاک و قالب وزن شدند. نمونه رطوبت از بالا، وسط و پایین از خاک گرفته شد. این روش تا زمانی که وزن خاک در قالب از حداکثر مقدار عبور و شروع به کاهش می‌کند تکرار شد.

### نتایج

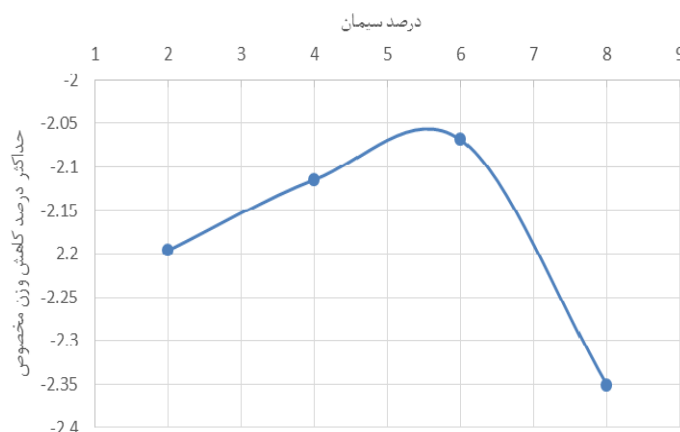
با انجام آزمایش‌های تراکم استاندارد برای هر ۲۴ حالت طرح اختلاط درصد رطوبت و حداکثر وزن مخصوص خشک حاصل شد. نتایج به‌صورت شکل‌های ذیل می‌باشد.

برای توجیه استفاده از ژئولیت به‌جای سیمان، تغییرات آن به‌صورت درصد در شکل (۵) نشان داده شده است. همان‌طوری که در شکل (۵) دیده می‌شود حداکثر کاهش ۲/۵ درصدی وزن مخصوص خشک حداکثر برای جایگزینی سیمان با ژئولیت دیده می‌شود که باتوجه به قیمت و مزایای زیست محیطی ژئولیت نسبت به سیمان لزوم استفاده از ژئولیت را نشان می‌دهد.

به‌طور خلاصه نتایج حداکثر تراکم برای طرح‌های اختلاط در شکل (۴) ارائه شده است. با توجه به شکل (۴) با افزایش میزان جایگزینی ژئولیت به‌جای سیمان، وزن مخصوص خشک حداکثر نمونه‌ها کاهش می‌یابد که میزان این کاهش در طرح ۲٪ سیمان ۱/۲ درصد و در طرح ۸٪ سیمان ۲ درصد می‌باشد. این در حالی است که درصد رطوبت بهینه نمونه در کلیه اختلاطها تقریباً ۱۴٪ بوده است.



شکل ۴ نتایج کلی تراکم با استفاده از درصد‌های مختلف جایگزینی ژئولیت به‌جای سیمان



شکل ۵ حداکثر تغییرات تراکم بیشینه نمونه‌های مورد آزمایش

که در آنها فقط از سیمان استفاده شده است مشاهده می‌شود که با افزایش درصد سیمان تقریباً با ثابت بودن رطوبت بهینه در ۱۴٪، حداکثر تراکم خشک نمونه‌ها افزایش می‌یابد. دلیل این مطلب را می‌توان ریزتر بودن سیمان نسبت به ماسه و پرکردن فضای خالی بین ذرات ماسه دانست. از طرف دیگر بالاتر بودن وزن دانه‌های جامد سیمان ( $G_s$ ) نسبت به ماسه نیز مزید بر علت است. این درحالی است که با افزایش درصد سیمان مختلف جایگزینی زئولیت مقدار تراکم نمونه‌ها کاهش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند پایین بودن وزن مخصوص دانه‌های زئولیت نسبت به سیمان و ماسه باشد. چرا که براساس نتایج آزمایش تعیین چگالی ویزه ( $G_s$ ) انجام شده در این تحقیق، پارامتر ( $G_s$ ) در زئولیت ۲/۲۲، ماسه ۲/۷۱ و سیمان ۳/۱۱ بوده است. این در حالی است که درصد رطوبت بهینه در تمامی طرح اختلاط‌ها تقریباً ثابت و برابر ۱۴٪ می‌باشد.

سیمان در مقایسه با زئولیت دارای مسائل زیست‌محیطی و مسائل دیگری از جمله زمان اختلاط باتوجه به گیرش سیمان و مشکل شدن عمل تراکم از کارایی کمتری برخوردار است. هم‌چنین درصد‌های کاهش ناشی از استفاده از زئولیت به‌جای سیمان در مقابل اثرات زیست‌محیطی و ارزان بودن زئولیت نسبت به سیمان (حداقل نصف قیمت سیمان) قابل صرف نظر کردن است.

زئولیت علاوه بر کمک به کاهش مصرف سیمان و ذخیره کردن مقدار قابل توجهی انرژی در فرآیند تولید سیمان و مشارکت در توسعه پایدار، از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای خصوصاً  $CO_2$  تأثیرگذار است؛ لذا برای تثبیت بسترهای ماسه‌ای و خاکریزهای ماسه‌ای استفاده از زئولیت به‌جای سیمان پیشنهاد می‌شود.

### نتیجه‌گیری

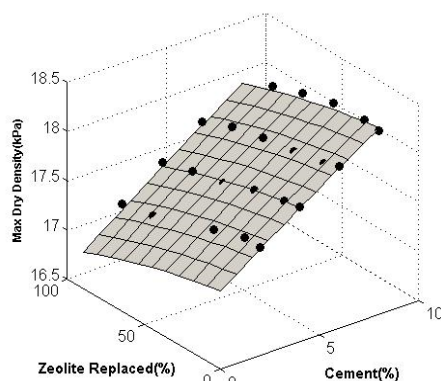
در این تحقیق زئولیت به‌عنوان یک ماده معدنی پوزلانی

باتوجه به مطالب بالا و استفاده از رگرسیون خطی و سری ولترا (رابطه ۱) فرمولی برای تعیین حداکثر وزن مخصوص خشک و مقادیر سیمان و درصد‌های جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان به‌صورت رابطه (۲) ارائه شده است که با استفاده از آن و داشتن وزن مخصوص خشک مورد نیاز مهندسان و شرایط خاص هر پروژه درصد‌های سیمان و زئولیت قابل تعیین است. سری ولترا:

$$Y = a_1 + a_2X_1 + a_3X_2 + a_4X_1^2 + a_5X_2^2 + a_6X_1X_2 \quad (1)$$

$$\gamma(kN/m^2) = 17.3 + 0.144C - 0.003Z - 0.0009C^2 - 0.00002Z^2 + 0.00008CZ \quad (2)$$

که در آن C و Z به‌ترتیب درصد سیمان و جایگزینی زئولیت به‌جای سیمان می‌باشد. در نمایی دیگر می‌توان شکل (۶) را ارائه داد که کفایت مدل را اثبات می‌کند. ضمناً فرمول به‌دست آمده از دقت خیلی خوبی ( $R^2=0.99$ ) برخوردار است.



شکل ۶ درون‌یابی حداکثر دانسیته با درصد سیمان و جایگزینی‌ها

### بحث و تجزیه تحلیل نتایج

زئولیت در مقایسه با سیمان در محیط‌های خورنده پایداری بیشتری نسبت به سیمان دارد و سبب هیدراسیون آرام سیمان با حرارت‌زایی کمتر می‌شود. در بررسی نتایج آزمون تراکم بر روی نمونه‌هایی

- برای کاهش معضلات زیست‌محیطی سیمان در ماسه سیمانی معرفی شده است. در بررسی نتایج آزمون تراکم استاندارد بر روی نمونه‌های ژئولیتی سیمانی مشاهده می‌شود:
۱. حداکثر وزن مخصوص خشک با افزایش درصد سیمان افزایش می‌یابد.
  ۲. حداکثر وزن مخصوص خشک با افزایش درصد جایگزینی ژئولیت به جای سیمان کاهش می‌یابد.
  ۳. درصد رطوبت بهینه برای تمامی حالات در نظر گرفته شده تقریباً ۱۴ درصد است.
  ۴. کاهش حداکثر وزن مخصوص خشک ناشی از استفاده از ژئولیت به جای سیمان بین ۲ تا ۲/۵ درصد است.
۵. مدل چندجمله‌ای ارائه شده در این مقاله تخمین مناسبی از حداکثر وزن مخصوص برای نمونه‌های ژئولیتی سیمانی و سیمانی را دارد.
۶. سیمان در مقایسه با ژئولیت دارای مسائل زیست‌محیطی و مسائل دیگری از جمله زمان اختلاط با توجه به گیرش سیمان و سخت شدن عمل تراکم از کارایی کمتری برخوردار است. همچنین درصدهای کاهش حداکثر ۲/۵ درصد ناشی از استفاده از ژئولیت به جای سیمان و با توجه به کاهش معضلات زیست‌محیطی استفاده از ژئولیت به جای سیمان ضروری به نظر می‌رسد.

### مراجع

1. Gunaratne, M., "The Foundation Engineering Handbook", Taylor & Francis Group, CRC PRESS, (2006).
2. Yılmaz, B., Ucar, A., Oteyaka, B., Uz, V., "Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement", *Building and Environment*, Vol 42, pp. 3808–3815, (2007).
۳. خلقی، م.ح، "ژئولیت‌ها در ایران"، سازمان زمین‌شناسی کشور، انتشارات دانشگاه تهران، ص ۱۱۲، (۱۳۶۹).
4. Mola-Abasi H, Shooshpasha I, "Influence of zeolite and cement additions on mechanical behavior of sandy soil" *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 8 pp. 746–752, (2016)
5. ACI Committee 230., "State-of-of-the-Art report on soil cement", ACI. 230.1R-90. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pp. 1-23, (1997).
6. Kaya, A., Durukan, S., "Utilization of Bentonite-Embedded Zeolite as Clay Liner", *Applied Clay Science*, Vol. (25), pp. 83–91, (2004).
7. White, W. G., and Gnanendran, C. T., "The Influence of Compaction Method and Density on the Strength and Modulus of Cementitiously Stabilized Pavement Material", *The International Journal of Pavement Engineering*, Vol. (6), No. (2), pp. 97-110, (2005).
8. Zabielska-Adamska, K., "Laboratory compaction of fly ash and fly ash with cement additions", *Journal of Hazardous Materials*, Vol. (151), pp. 481–489, (2008).
9. Al-Aghbari, M. Y., Mohamedzein, Y. E. A., Taha, R., "Stabilization of Desert Sands Using Cement and Cement Dust", *Proceeding of the Institution of Civil Engineers*, Ground Improvement Vol. (162), pp. 145-151, (2009).



10. Vogiatzis, D., Kantiranis, N., Filippidis, A., Tzamos, E., and Sikalidis, C., "Hellenic Natural Zeolite as a Replacement of Sand in Mortar: Mineralogy Monitoring and Evaluation of Its Influence on Mechanical Properties", *Geosciences*, Vol, 2, pp. 298-307, (2012).
11. Hong S., "Geotechnical laboratory characterization of sand zeolite mixtures", Master Thesis, Maysia University, (2015).
12. Yilmaz, E., Belem, T., & Benzaazoua, M., "Specimen size effect on strength behavior of cemented paste backfills subjected to different placement conditions", *Engineering Geology*, Vol. 185, pp. 52-62. (2015).
13. Annual Book of ASTM Standards, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2012) .
14. Annual Book of ASTM Standards., "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken,(2012).
15. Annual Book of ASTM Standards., "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken,(2012).
16. Annual Book of ASTM Standards., "Standard Test for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", American Society for Testing and Materials, West Conshohock,(2012).
۱۷. نورزاد، رضا، "مشخصات رفتاری ماسه مسلح با ژئوتکستایل"، پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی شریف، (۱۳۷۹).
18. Annual Book of ASTM Standards., "Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil", American Society for Testing and Materials, West Conshohocke, (2012).