

رفتار تثبیت ماسه با سیمان و ژئولیت تحت بارهای ضربه ای

علیرضا نصیری^۱، مرتضی جیریایی شراهی^{۲*}، علی عطارزاده^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

* نویسنده مسئول: ایمیل: jiryaei@qut.ac.ir

چکیده

یکی از راه های مقاوم سازی ماسه تثبیت آن با سیمان و آهک بوده است که با توجه به ایجاد آلودگی های زیست محیطی، عدم مقرون به صرفه بودن، ایجاد مشکلات ساختاری و عدم وجود مقاومت پایدار این مصالح، محققین بر آن هستند که مصالح جایگزین را بیابند. برای این منظور، راه های گوناگونی موضوع تحقیقات بوده است. از جمله این تحقیقات، پژوهش هایی هستند که اثر افزودن گردهای آتشفشانی- معدنی به مصالح خاکی را بررسی می کنند. از زیر مجموعه های این گردها، گرد ژئولیت است. گرد ژئولیت نسبتا ارزان و در دسترس است. تحقیقات پیشین نشان می دهد که این گرد، مقاومت دراز مدت ماسه را در برابر بار معمولی افزایش می دهد. اما تحقیقی برای بار ضربه ای انجام نشده است. در این تحقیق اثر افزودنی ژئولیت بر مقاومت ماسه در برابر بار ضربه ای بررسی می شود. آزمایشی برای بررسی اثر ژئولیت روی مقاومت ضربه ای ماسه طراحی شده است. تعداد ۲۵ نمونه در آزمایشگاه آماده شده و آزمایش روی این نمونه ها انجام شده است. نمونه ها دارای درصد های سیمان به مقدار ۴، ۶، ۸، ۱۰ درصد وزنی ماسه خشک هستند. سیمان در هر نمونه با درصدی از ژئولیت جایگزین شده است. درصد های جایگزینی برابر ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ درصد وزنی سیمان است. نتایج آزمایش نشان می دهد که مقدار جایگزینی بهینه برای همه ی نمونه ها بین ۳۰ تا ۵۰٪ است. برای همه ی نمونه ها، جایگزینی بیش از ۶۵٪ تاثیر معکوس روی مقاومت دارد. برای بیشتر نمونه ها، جایگزینی تا ۱۰٪ تاثیر چشمگیری روی مقاومت ندارد.

کلمات کلیدی

ژئولیت، سیمان، ماسه، مقاومت، بار ضربه ای.

آلودگی زیست محیطی ناشی از تولید و مصرف سیمان نشان دهنده یکی از مهم ترین ضرورت های این پژوهش است. در صنعت راه و ساختمان، سیمان یکی از مواد اجتناب ناپذیر است. هرگونه کاهش استفاده از سیمان در صنعت ساخت و ساز، به کاهش آلودگی محیط زیست کمک خواهد کرد. صنعت سیمان، سومین صنعت بزرگ باعث آلودگی های زیست محیطی است. این صنعت سالانه بیش از پانصد هزار تن دی اکسید سولفور SO_2 ، اکسید نیتروژن NO_x ، و مونواکسید کربن CO در محیط زیست رها می کند [۱].

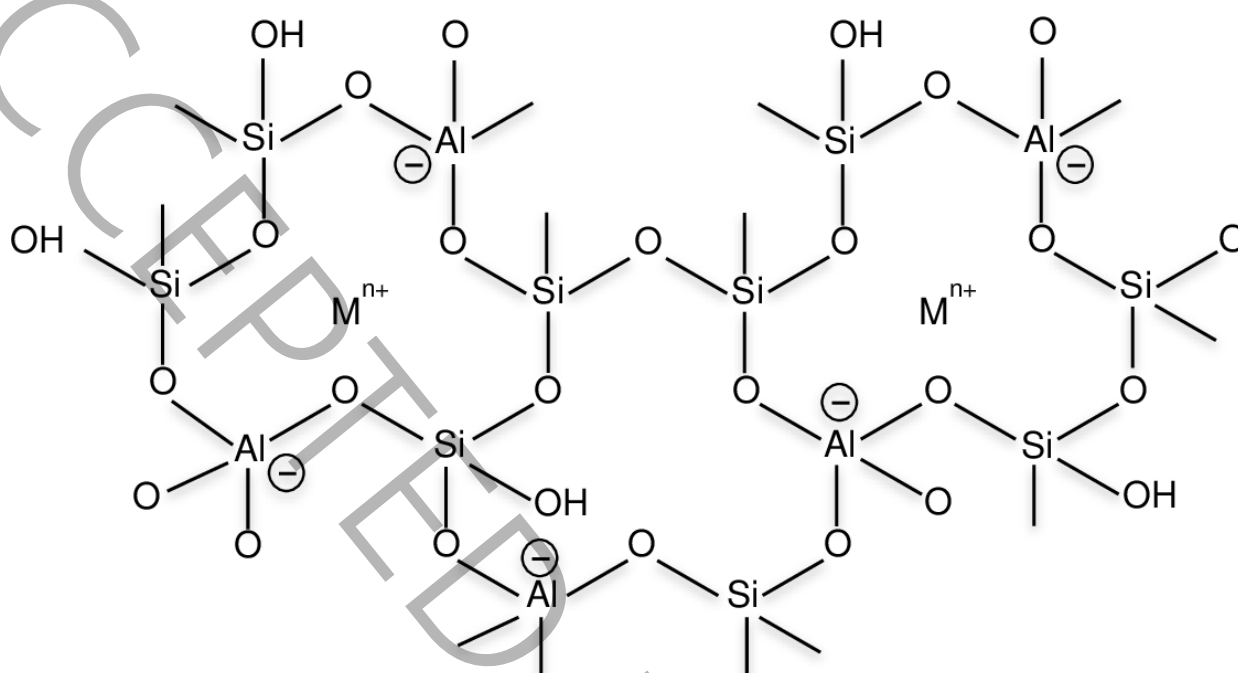
چالش اصلی که در حل آن تلاش می شود عبارت است از افزایش مقاومت ماسه در برابر بار ضربه ای وارده. بار لرزه ای در هنگام زلزله، بارهای وارده در حمل و نقل جاده ای، بارهای وارده از فعالیت جرثقیل ها، آسانسورها و بارهای وارده بر باند فرودگاه ناشی از نشست و برخاست هواپیما همگی از نوع بارهای ضربه ای و دینامیکی هستند که در طراحی و ساخت مورد توجه قرار می گیرند. از طرف دیگر بهای سیمان پرتلند بالا است و تولید آن خراب کننده محیط زیست است و منابع آن در حال محدود شدن است. برای حل این مساله، به جای سیمان پرتلند، گرد آتشفشانی- معدنی از خانواده پوزولان ها به ماسه افزوده می شود. افزودن پوزولان به جای سیمان پرتلند به بتن به سه دلیل انجام می شود. اول، بهای ارزان پوزولان ها نسبت به سیمان است. حتی پوزولان های مصنوعی از سیمان پرتلند ارزان تر هستند. دومین دلیل، جلوگیری از تخریب محیط زیست در جریان تولید سیمان پرتلند است. تولید سیمان مقدار زیادی گاز گلخانه ای به جو زمین تزریق می کند. سومین دلیل، افزایش دوام بتن است. با پوزولان ها، بتن دوام دراز مدت بالاتری خواهد داشت. مواد پوزولانی به خاطر دو ویژگی مورد توجه قرار گرفته است. اول توزیع جغرافیایی زیاد این مواد در ایران، مخصوصاً ماده ی زئولیت. دوم خواص مشخصه ویژه و یکتای این مواد. گرد خاصی که مورد تمرکز این پژوهش است، ماده ای به نام زئولیت است. زئولیت خانواده ای از گردهای آتشفشانی- معدنی است و به عنوان زیر مجموعه ای از پوزولان ها به شمار می رود. می توان زئولیت را به جای سیمان پرتلند در مقاوم سازی ماسه به کار برد. زئولیت به دو صورت طبیعی و مصنوعی قابل خریداری است. کشور ایران دارای معادن زئولیت است که انواعی از خانواده زئولیت طبیعی را تولید می کنند. بهای آن نسبت به سیمان پرتلند بسیار ارزان تر است. زئولیت طبیعی یکی از فراورده های جانبی معادن است. تولید آن، برعکس سیمان پرتلند، خرابی محیط زیست را به دنبال ندارد. زئولیت در صنایع گوناگون کاربرد دارد مانند صنعت تصفیه آب، دارو و درمان و صنعت ساخت و ساز.

یکی از نظریه هایی که در مورد شرایط و علت تشکیل زئولیت ها در طبیعت، ارائه شده است عبارت است از این که زئولیت ها اغلب در لایه های رسوبی، بعد از تشکیل و دفن رسوبات در اثر واکنش آلومینیم سیلیکات با آب حفره ای در درزها و شکستگی ها تشکیل شده اند. تمامی کانی های زئولیت که تا به حال شناسایی شده اند، کانی های ثانویه بوده و از تخریب یا دگرسانی کانی های اولیه ای نظیر فلدسپات، رس ها و در نهایت از ژل های سیلیکاته طبیعی به وجود می آیند. ساختار مولکولی زئولیت از سیلیس و آلومینیم ساخته شده است. ساختار خاص آن باعث می شود که به راحتی مولکول های کلسیم را جذب خود کند. همچنین شکل ساختار آن به گونه ای است که اجازه عبور مولکول های کوچک از درون شبکه خود را می دهد. اما مولکول های بزرگ در شبکه آن گیر می کنند و به دام انداخته می شوند. ساختار مولکولی زئولیت و خصوصیات شیمیایی عناصر تشکیل دهنده آن باعث این پدیده هستند. ساختار مولکولی چهار پهلوی مثلثی یا تتراهدرال برای زئولیت در شکل ۱ نمایش داده شده است.

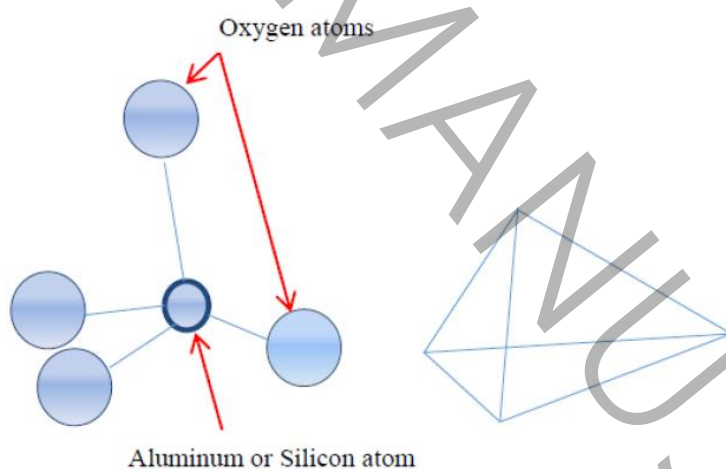
مولکول انواع زئولیت ساختار کریستالی از آلومینیوم و سیلیسیم دارد که شامل فلزات قلیایی یا قلیایی خاکی است مانند سدیم، پتاسیم، منیزیم، استرانسیم، باریم و کلسیم. زئولیت اولین بار در سال ۱۷۵۹ توسط معدن شناس سوئدی به نام کرونستد کشف شد. واژه زئولیت به معنای سنگ جوشان است و علت این نام گذاری، خروج مقدار زیادی آب به صورت بخار در زمان حرارت دادن به زئولیت است. در شکل ۲ واحد ساختار مولکولی زئولیت نشان داده شده است.

خصوصیات اصلی فیزیکی و شیمیایی زئولیت ها مربوط به ترکیب شیمیایی و ساختار بلورین آن هاست. به عبارت دیگر خواص آن ها به طبیعت شیمیایی و فیزیکی آب موجود در ساختار زئولیت ها و همچنین نحوه قرار گرفتن آب درون شبکه های مولکولی بستگی دارد. وجود فلزات قلیایی، قلیایی خاکی، فضاهای خالی و مواد معدنی متعدد به هم مرتبط در آن ها از دیگر دلایل تنوع خواص زئولیت

ها است. کاربرد ژئولیت ها در صنایع مختلف بستگی به خواص فیزیکی و شیمیایی آن ها دارد. برخی از این خصوصیات شامل چگالی، اندازه، شکل، تخلخل، سختی، جذب سطحی و تبادل یونی است [۲].



شکل ۱ - ساختار مولکولی ژئولیت [۳]



شکل ۲ - واحد ساختار مولکولی ژئولیت [۴]

به طور کلی ژئولیت ها دارای خواصی از جمله جذب آب بالا بدون تغییر فیزیکی و شیمیایی، چگالی کم و حجم زیاد در جذب آب، ثبات ساختار بلوری، توانایی تبادل یونی، وجود کانال های مولکولی یکنواخت، توانایی جذب گاز و بخار، خواص کاتالیزوری و هدایت الکتریکی هستند [۵]. ظرفیت تبادل کاتیون مهمترین خاصیت ژئولیت هاست. این خاصیت به عوامل متعددی از جمله ویژگی های کاتیون ها، اندازه آن ها در فرم های هیدراته و غیر هیدراته، بار آن ها، دما، غلظت کاتیون ها در محلول، نوع آنیون وابسته به کاتیون در محلول و حلال بستگی دارد. ویژگی های ساختار ژئولیت می تواند نقش مهمی در توانایی تبادل کاتیون ایفا نماید. ظرفیت تبادل کاتیون ژئولیت همچنین به ترکیب شیمیایی آن و نسبت سیلیکا به آلومینا بستگی دارد و هر چه این نسبت کوچکتر باشد ظرفیت تبادل یون بیشتر خواهد بود [۶].

این پژوهش اهدافی را پیگیری می‌کند که حداقل شامل سه مورد هستند. هدف اول، بررسی امکان سنجی افزایش مقاومت ضربه ای خاک به وسیله جایگزینی سیمان با ژئولیت است. هدف دوم، بدست آوردن درصد بهینه جایگزینی سیمان با ژئولیت است. هدف سوم، بدست آوردن بیشینه افزایش مقاومت ضربه ای خاک ناشی از جایگزینی سیمان با ژئولیت است.

۲-۱- پژوهش های پیشین

شی و همکاران (۲۰۱۲) به منظور کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از سیمان پرتلند در تثبیت خاک، ژئولیت به عنوان جایگزین درصدی از سیمان پرتلند انتخاب کردند. آنها مقاومت فشاری تک محوری مخلوط ژئولیت-سیمان در سه دوز (۲/۵٪، ۵٪ و ۱۰٪) ژئولیت و در سه دوره عمل آوری (۷ روز، ۲۸ روز و ۹۰ روز) برای خاک ماسه‌ای شنی آزمایش کردند. نتایج آنها نشان داد که بالاترین مقدار مقاومت تک محوری برای مخلوط‌های ژئولیت-سیمان در ۹۰ روز، در دوز ۱۰٪ ژئولیت بدست می‌آید [۷]. شانگ در سال ۲۰۱۵ ویژگیهای ژئوتکنیکی مخلوط ماسه و ژئولیت شامل تراکم پذیری، نفوذپذیری و تحکیم یک بعدی مخلوط را با در نظر گرفتن درصد‌های وزنی مختلف ژئولیت، ۲۵٪، ۵۰٪ و ۷۵٪ مورد بررسی قرار داد [۸]. همچنین اثرات ژئولیت بر مقاومت برشی ماسه‌های سیمانی، پارامترهای مقدار سیمان و درصد جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، تنش سربار و زمان عمل آوری توسط شوش پاشا و همکاران (۱۳۹۸) بررسی شده است [۹]. ایده‌ی به کارگیری یک قطعه‌ی ژئولیتی در زیر پی‌های سطحی توسط سلامت پور و همکاران (۱۳۹۹) پیشنهاد شده است. آنها با در نظر گرفتن پی‌های سطحی بر روی ماسه‌های ساحل بابل‌سر نشان دادند که نرخ ظرفیت باربری بیشتر از حالت بدون قطعه‌ی ژئولیتی است [۱۰]. کاربرد ژئولیت در ترکیب با خرده لاستیک برای تثبیت ماسه توسط سلطانی و همکاران (۱۴۰۱) مطالعه و بررسی شده است. بهترین ترکیب، ۷/۵٪ خرده لاستیک به صورت گرانول و ۳۰٪ ژئولیت جایگزین سیمان پیشنهاد شده است [۱۱]. سعادت‌ی و همکاران (۱۴۰۰) نشان دادند که با جایگزینی ژئولیت بجای سیمان به میزان ۳۰٪ در نمونه‌های سیمانته، مقادیر مدول برشی افزایش یافته است. همچنین افزایش ترکیبات سیلیس و اکسید آلومینیم تا مقادیر مشخص، تاثیر قابل توجهی در افزایش سختی نمونه سیمانته شده دارد [۱۲]. ژئولیت به کاهش مصرف سیمان کمک می‌کند. از این رو، در توسعه پایدار از طریق کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مشارکت دارد. یوسفی و همکاران (۱۳۹۸) با جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، نشان دادند که رفتار خاک در موقع گسیختگی از حالت ترد به حالت خمیری میل می‌کند [۴]. عباسی و همکاران (۱۳۹۶) با آزمایش تراکم بر روی نمونه‌ها مشاهده کردند که با افزایش درصد جایگزینی ژئولیت به جای سیمان، بیشینه تراکم خشک نمونه‌ها کاهش و مقاومت کششی تا ۳۰٪ افزایش یافته است [۱۳].

رجبی و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تاثیر ژئولیت بر روی خاک رسی و مخلوط ماسه ای-رسی نشان دادند که درصد افزودنی ژئولیت بر روی مشخصات خاک مقاوم سازی شده اثر گذار است [۱۴]. در پژوهش دیگری چناربنی و همکاران (۲۰۲۱) به پایدار سازی رس‌های تغییر حجم دهنده پرداختند. آنها برای کنترل تغییر حجم در شرایط تناوب خشک و تر، درصدی از سیمان با ژئولیت جایگزین شده و اثر آن اندازه گیری گردید. نتایج آنها نشان داد که جایگزینی ۳۰٪ سیمان با ژئولیت، بیشترین اثر مثبت را بر روی رفتار رس دارد [۱۵]. شهریار کیان و همکاران (۲۰۲۱) به انجام آزمایش‌های اندازه گیری مقاومت فشاری بر روی خاک رسی-ماسه ای پرداختند. اثر درصد سیمان، درصد ژئولیت، درصد رطوبت اولیه، تعداد چرخه‌های یخ زدن و آب شدن، و زمان عمل آوری بر روی مقاومت فشاری را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که ژئولیت می‌تواند به همراه سیمان به عنوان پایدار کننده به کار برده شود تا رفتار مکانیکی خاک ارتقا یابد. افزودن ژئولیت نه تنها به افزایش مقاومت فشاری کمک کرده است، بلکه بر مقدار کرنش نهایی قابل تحمل نیز افزوده است [۱۶]. جمشیدوند و همکاران (۲۰۲۲) به مطالعه اثر چرخه‌های متعدد یخ و ذوب شدن بر روی انواع رفتار مکانیکی و دیگر رفتار خاک پایدار شده با سیمان پرداختند. این بررسی نشان داده است که در نمونه‌های ۲۸ روزه، جایگزینی سیمان با ژئولیت، مقاومت فشاری را بهبود داده است. با افزایش درصد ژئولیت به بیشتر از درصد بهینه، مقاومت فشاری کاهش پیدا کرده است. پیشنهاد شده که این امر به خاطر به هم خوردن تعادل بین مولفه‌های موثر واکنش‌های هیدراسیون و پوزولان است [۱۷]. شارو و همکاران (۲۰۲۱) به مطالعه خاک پایدار شده با Cement Kiln Dust یا به اختصار CKD که یک ماده‌ی پوزولان در دسترس است پرداختند. همچنین ژئولیت طبیعی به خاک افزوده گردیده است. این پژوهش متفاوت از دیگر مطالعات است، از این نظر که CKD با ژئولیت جایگزین نشده است، بلکه درصدی از خاک با ژئولیت جایگزین گردیده است. به این معنی که مقدار بهینه‌ی CKD ثابت نگاه داشته شده و ژئولیت به جای درصدی از خاک افزوده شده است. نتایج آنها نشان داده است که افزودن ۱۵٪ ژئولیت به خاک پایدار شده با مقدار بهینه‌ی CKD،

باعث ۲۱٪ افزایش مقاومت شده است [۱۸]. شیر محمدی و همکاران (۲۰۲۱) اثر پایدار کننده‌ی مخلوط آهک-زئولیت بر روی رفتار خاک طبیعی با پلاستیسیته کم را مورد مطالعه قرار دادند. آنها آزمایش‌های استاندارد تراکم و همچنین آزمایش‌های فشاری برای بررسی مقاومت نمونه‌ها انجام دادند. خاک طبیعی با درصد‌های گوناگون آهک و زئولیت را تحت اثر چرخه‌های پی در پی یخ زدن و ذوب شدن قرار دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که وقتی درصدی از آهک با زئولیت جایگزین می‌شود، مقاومت، دوام و بازدهی مکانیکی خاک به مراتب بیشتر می‌شود. همچنین، بر پایه تصاویر میکروسکوپی اسکن الکترونی، ساختار نمونه‌های تحت تغییرات شدید دما را بررسی کردند [۱۹]. اکبری و همکاران (۲۰۲۱) مطالعه‌ای آزمایشگاهی برای بررسی اثر آهک، نانو-زئولیت، و فیبرهای پلی پروپیلن بر روی انواع خواص خاک رسی کائولن انجام دادند. از جمله این خواص، مقاومت فشاری و مقاومت کششی غیرمستقیم هستند. نتایج آنها نشان می‌دهد که جایگزینی آهک با نانو-زئولیت اثر مفیدی بر روی مشخصه‌های مکانیکی خاک دارد. تا ۴۰٪ جایگزینی آهک با ذرات نانو-زئولیت، بیشترین بازدهی را برای افزایش مقاومت نمونه‌های پایدار شده در دمای ۴۰ درجه سانتیگراد داشته است. نتایج تحلیل‌های XRD و SEM نشان می‌دهد که افزودن افزودنی‌ها در خاک رس کائولن، ساختار خاک را تغییر می‌دهد و کمک می‌کند به ساخته شدن ژل‌های کلسیم سیلیکات هیدراته در حین واکنش‌های پوزولانی [۲۰]. مطالعه‌ی دیگری نیز توسط آنها ارائه شده است که نتایج بسیار نزدیک و شبیه به نتایج قبلی است [۲۱]. علی و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی نانوذرات زئولیت برای ارتقای خصوصیات خاک پرداختند. مطالعات آزمایشگاهی آنها بر روی رفتار مکانیکی و ریز ساختار خاک بهبود داده شده با نانوزئولیت انجام گردیده است. آنها آزمایش برش مستقیم و آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های خاک با درصد‌های گوناگون نانوزئولیت را انجام دادند. نتایج آنها نشان می‌دهد که با افزودن نانوزئولیت، مقاومت برشی نمونه‌های خاک به شدت افزایش پیدا کرده است. مقاومت فشاری نیز در برخی نمونه‌ها بیش از ۱۰ برابر بهتر شده است. در مورد شکل پذیری خاک، نانوزئولیت باعث کاهش شکل پذیری خاک شده است. به این صورت که کرنش نهایی گسیختگی خاک کاهش یافته است. بررسی ریز ساختار خاک توسط آنها نشان می‌دهد که تولید محصولات سیمانی توسط واکنش‌های نانوزئولیت، دلیل افزایش مقاومت خاک است [۲۲]. در مطالعه‌ی دیگری که توسط خواجه و همکاران (۲۰۲۲) انجام شد به کاهش مصرف آهک در ارتقای خاک رسی مساله دار با جایگزینی آهک با زئولیت پرداخته شده است. بر روی نمونه‌های تثبیت شده با آهک و زئولیت، آزمایش‌هایی از جمله آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش سه محوری تحکیم نشده و زهکشی نشده انجام شد. نتایج آنها نشان می‌دهد که افزودن زئولیت باعث افزایش بیشینه وزن مخصوص خشک و باعث کاهش رطوبت بهینه می‌شود. در ۲۵٪ جایگزینی آهک با زئولیت، مقاومت فشاری دارای بیشترین مقدار و شاخص پلاستیسیته دارای کمترین مقدار است. بنابراین، مقدار ۲۵٪ به عنوان جایگزینی بهینه پیشنهاد شده است [۲۳]. هدف پژوهش دیگری که توسط ربابه و همکاران (۲۰۲۱) انجام شد، ارزیابی آزمایشگاهی پایدار سازی خاک تغییر حجم دهنده با آهک، زئولیت، و ترکیب آنها بوده است. نتایج حاکی از اثر مطلوب زئولیت است. افزودن زئولیت کمک کرده است به کاهش پلاستیسیته، کاهش خزش خطی، کاهش پتانسیل تورم. همچنین زئولیت به افزایش وزن مخصوص بیشینه ی خشک، افزایش مقاومت فشاری، و افزایش سی بی آر کمک کرده است. نتایج عددی آزمایش‌ها با تحلیل‌های ریز ساختار انجام شده هماهنگ است. این تحلیل‌ها شامل روش‌های SEM و X-ray می‌باشد [۲۴]. اثر ترکیب زئولیت و سیمان بر روی لایه‌های زیرسازی راه‌ها، توسط شیخ و همکاران (۲۰۲۲) مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی این تاثیر آنها از مقاوم فشاری نمونه‌ها استفاده کردند. لایه‌های خاک راهسازی نمونه گیری شده و نمونه ی کنترل دارای ۵٪ سیمان بوده است. سیمان با زئولیت جایگزین شده و این درصد جایگزینی معادل ۲۰، ۳۰، ۴۰، و ۶۰ درصد وزن سیمان بوده است. برای بیشترین مقاومت فشاری، درصد بهینه جایگزینی برابر ۳۰٪ گزارش شده است. آزمایش‌های آنها نشان می‌دهد که به کار بردن زئولیت به جای سیمان، مقدار کرنش گسیختگی را به اندازه‌ی ۳۳٪ افزایش می‌دهد. به عبارت دیگر، زئولیت رفتار خاک را از خشک و ترد به سمت نرم و شکل پذیر تغییر می‌دهد [۲۵]. پژوهش دیگر توسط خواجه و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی کاهش وزن خاک‌های پایدار شده با سیمان و زئولیت توسط دانه‌های پلی استرن می‌پردازد. رفتار تنش-کرنش، مقاومت فشاری، انرژی کرنشی، و ظرفیت سی بی آر با انجام آزمایش‌های مکانیکی اندازه گیری شدند. در نتایج عددی آنها شان داده شده است که افزودن زئولیت به اندازه بهینه ی ۳۰٪، مقاومت فشاری و همین طور ظرفیت سی بی آر را به شدت ارتقا می‌دهد و کاهش این مقادیر به خاطر استفاده از دانه‌های پلی استرن به خوبی توسط زئولیت جبران می‌شود. ترکیب فعال شاخصی است از کمترین مقدار CaO و به عبارت دیگر شاخصی است از مجموع Al_2O_3 و SiO_2 در مخلوط. آنها نشان دادند که این شاخص می‌تواند در پیش بینی مقاومت فشاری و ظرفیت سی بی آر به کار رود و تخمین‌های خوبی ارائه کند [۲۶]. رفتار

ترکیب ماسه با ۱۵٪ رس کائولینیت توسط حسین زاده و همکاران (۲۰۲۳) بررسی شده است. آنها هم در شرایط وجود آلودگی نیترات سرب در خاک و هم در شرایط عدم وجود آلودگی درصد‌های گوناگون زئولیت به مخلوط افزودند. سپس به اندازه گیری مشخصه های خاک مانند ظرفیت جذب و پارامترهای مقاومتی خاک پرداختند. بر پایه نتایج آزمایش های گزارش شده توسط آنها، زئولیت تأثیری مطلوب روی مشخصه های خاک، حتی رفتار دینامیکی آن دارد [۲۷]. در پژوهشی توسط شاه منصوری و همکاران (۲۰۲۱) به اندازه گیری مقاومت فشاری پس از افزودن فوم سیلیکا و زئولیت طبیعی به بتن پرداخته شده است. نتایج آزمایش های آنها نشان می دهد که افزایش NaOH باعث کاهش مقاومت فشاری و افزودن فوم سیلیکا و زئولیت طبیعی باعث افزایش مقاومت فشاری خواهد شد. به علاوه، این پژوهش یک روش شبکه عصبی مصنوعی پیشنهاد می دهد که با آن می توان مقاومت فشاری پس از افزودن پوزولان ها را تخمین زد. برخی از متغیرهایی که به عنوان ورودی در شبکه عصبی مصنوعی در نظر گرفتند عبارت است از سن نمونه، مقدار NaOH در نمونه، مقادیر افزودنی های فوم سیلیکا و زئولیت طبیعی در نمونه [۲۸]. رضانی و همکاران در سال ۲۰۲۵ نقش الیاف زئولیت و پلی وینیل الکل بر دوام خاک ماسه رسی تثبیت شده با سیمان تحت چرخه های انجماد-ذوب و تر-خشک را مورد بررسی قرار دادند. آنها آزمایش های آزمایشگاهی، شامل مقاومت فشاری تک محوری، میکروسکوپ الکترونی و سرعت پالس اولتراسونیک را برای ارزیابی تأثیر نسبت جایگزینی زئولیت و میزان الیاف بر دوام و ویژگی های مکانیکی خاک تثبیت شده بکار بردند. نتایج آنها نشان داد که خواص مکانیکی نمونه های سیمانی شده در چرخه های تر-خشک در مقایسه با چرخه های انجماد-ذوب به طور قابل توجهی کاهش یافته است. نسبت جایگزینی بهینه سیمان برای دستیابی به مناسب ترین رفتار دوام ماسه رسی تثبیت شده با زئولیت ۲۰٪ بود. نتایج آنها حاکی از تأثیر مثبت الیاف در بهبود دوام خاک است. نمونه های حاوی زئولیت و الیاف، در شرایط تر-خشک و انجماد-ذوب، کاهش جرم کمتری نسبت به نمونه های بدون زئولیت و الیاف داشتند [۲۹]. نصرا. پور و همکاران (۲۰۲۴) برای دستیابی به بهترین مقاومت مکانیکی، کمترین هزینه و کمترین تأثیر زیست محیطی از رویکرد بهینه سازی چند هدفه با استفاده از شبکه عصبی پس انتشار برای پیش بینی مقاومت مکانیکی، همراه با یک الگوریتم تکاملی چند هدفه مبتنی بر تخمین هندسه تطبیقی برای شناسایی بهترین پارامترها برای ماسه بهبود یافته با سیمان-زئولیت استفاده کردند [۳۰]. کاو و همکاران (۲۰۲۵) به طور نوآورانه یک ماده جدید ماسه آهکی تثبیت شده با سیمان اصلاح شده با زئولیت را معرفی کردند. خواص فیزیکی و شیمیایی آنها برای بررسی این ماده از طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی، مقاومت فشاری تک محوری و توموگرافی کامپیوتری استفاده کردند. علاوه بر این، آنها تأثیر زیست محیطی این ماده را از نظر عملکرد جذب Pb^{2+} و ارزیابی چرخه عمر آینده نگر (LCA) ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد که زئولیت می تواند فعالیت خود را در این ماده تحت نسبت های اختلاط طراحی شده مواد اولیه حفظ کند و به طور کلی، نتایج آنها پتانسیل استفاده از این ماده را در ساخت و ساز سازگار با محیط زیست نشان داد [۳۱]. نتایج تحقیق آزمایشگاهی و یکینگ کو و همکاران (۲۰۲۵) نشان می دهد که کامپوزیت خاک سیمانی زئولیت و الیاف نخل، هنگامی که در نسبت های بهینه ترکیب شوند، صرف نظر از اینکه در معرض آب تمیز یا فرسایش نمکی قرار گیرند، و همچنین در طول چرخه های خشک-مرطوب یا انجماد-ذوب، بهترین دوام و حداقل کاهش مقاومت و جرم را نشان می دهند [۳۲].

هدف اصلی تحقیق بررسی تأثیر جایگزینی زئولیت با سیمان بر مقاومت ضربه ای تثبیت ماسه با سیمان است. در ادبیات فنی تا کنون این مساله مورد بررسی قرار نگرفته است. از طرف دیگر با توجه به ماهیت ضربه ای بارهای دینامیکی و لرزه ای موضوع مقاومت در برابر ضربات وارده بصورت تعداد ضربات قابل تحمل، اهمیت دارد. در تحقیق حاضر، آزمایشی برای بررسی اثر زئولیت روی مقاومت ضربه ای ماسه مخلوط با سیمان طراحی شده است. نمونه ها دارای درصد های سیمان متفاوت که همین مقدار سیمان در هر نمونه با درصد های متفاوت از زئولیت جایگزین شده است.

۲- مواد و مصالح

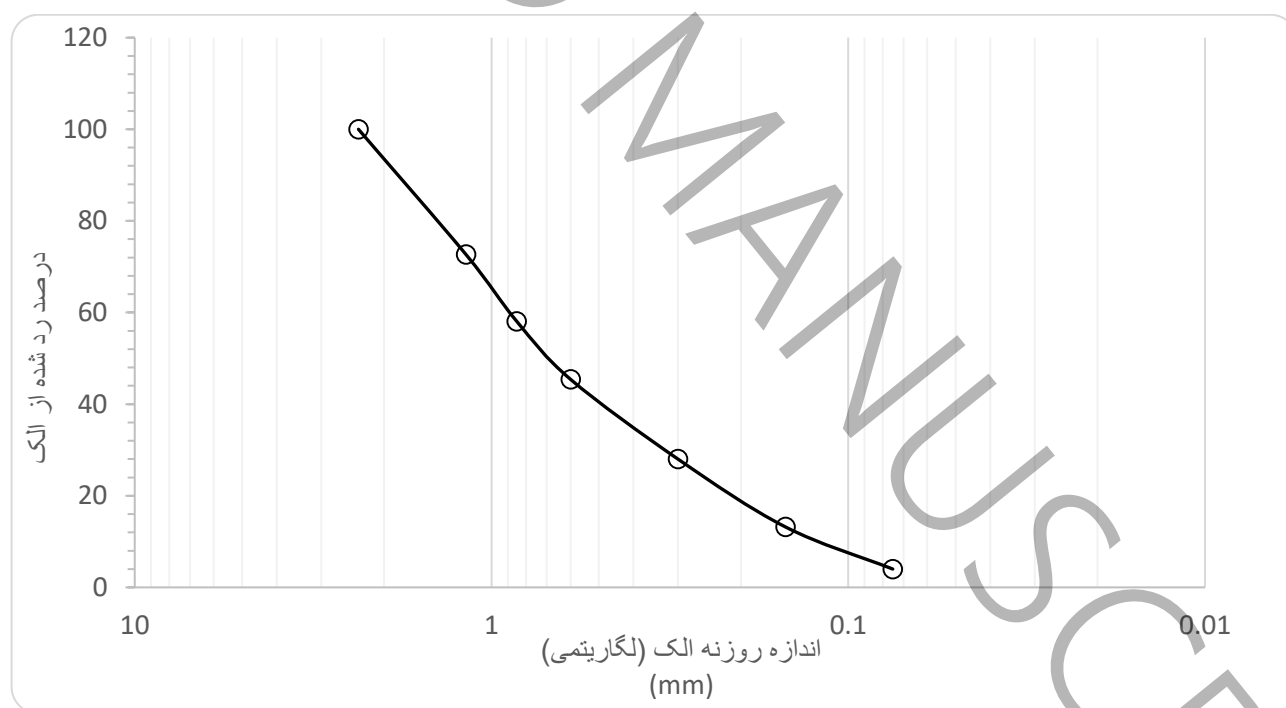
۲-۱- ماسه

خاک مورد استفاده در پژوهش حاضر از منطقه جنوب شرقی تهران تهیه شده است. پس از خشک کردن خاک طبیعی در دمای اتاق، از خاک مانده روی الک ۲۰۰ و عبوری از الک ۲ (ماسه ریز تا متوسط) برای ساخت نمونه ها استفاده شد. شمایی از ماسه ی به کار برده شده در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ - ماسه ی مورد استفاده در آزمایشگاه

نمودار دانه بندی ماسه استفاده شده در شکل ۴ ارائه شده است. قابل ذکر است که نمونه ای یک کیلوگرمی از ماسه مورد نظر برای آزمایش دانه بندی مطابق با استاندارد ASTM C136، مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۴ - نمودار دانه بندی ماسه استفاده شده در آزمایش

۲-۲- سیمان

برای آزمایش ها از سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان شاهرود استفاده شد. این سیمان در پاکت های پلی پروپیلنی ۵۰ کیلوگرمی خریداری شده است. کاربرد این نوع سیمان در مکان های با حرارت هیدراسیون متوسط است که حمله سولفات ها به آنها در حد متوسط باشد. نکته قابل توجه این است که در مشخصه ی شیمیایی سیمان مورد استفاده، مقدار درصد اکسید سیلیسیم و درصد اکسید آلومینیم

به ترتیب برابر ۲۱/۱۱ و ۴/۴۸٪ ذکر شده است. قابل ذکر است که اکسید سیلیسیم و اکسید آلومینیم دو مورد از عناصر اصلی در ژئولیت استفاده شده از آزمایش ها نیز هستند.

۳-۲- ژئولیت

ژئولیت استفاده شده در آزمایش ها در شکل ۵ نشان داده شده است. ژئولیت مورد استفاده در آزمایش ها از شرکت معدنی افرازند



شکل ۵ - گرد ژئولیت استفاده شده در آزمایشگاه

در استان سمنان تهیه شده است. مشخصات فنی ژئولیت مورد استفاده در جدول ۱ که توسط این شرکت گزارش شده است، نشان داده شده است. توجه شود که در آنالیز شیمیایی جدول درصد اکسید سیلیسیم برابر ۶۶ تا ۶۸٪ و درصد اکسید آلومینیم برابر ۱۰ تا ۱۱/۸٪ ذکر شده است. از بخش های قبل توضیح داده شد که اکسید سیلیسیم و اکسید آلومینیم در عناصر تشکیل دهنده ی سیمان نیز حضور داشتند. مقدار اکسید سیلیسیم و اکسید آلومینیم در ژئولیت به مراتب بیشتر از سیمان است.

جدول ۱ - آنالیزهای شیمیایی - عناصر اصلی ژئولیت استفاده شده در آزمایش (توسط شرکت افرازند).

المان های اصلی	درصد
SiO ₂ (silicon Dioxide)	۶۶-۶۸
Al ₂ O ₃ (Aluminum Oxide)	۱۰/۵ - ۱۱/۷۵
Fe ₂ O ₃ (Iron Oxide)	۰/۵
Na ₂ O (Sodium Oxide)	۳ - ۳/۵
K ₂ O (Potassium Oxide)	۴ - ۴/۵
CaO (Calcium Oxide)	۰/۲ - ۰/۶
MgO (Magnesium Oxide)	۰/۵۸
TiO ₂ (Titanium Oxide)	۰/۸
MnO (Manganese Oxide)	۰/۰۳
P ₂ O ₅ (Phosphorus Pentoxide)	۰/۰۲۶
SrO (Strontium Oxide)	۰/۲۴
Loss on Ignition	۱۱-۱۲

۳- روش تحقیق و آزمایش ضربه

۳-۱- طرح اختلاط نمونه ها

برای مطالعه اثرات زئولیت بر مقاومت ماسه تثبیت شده با سیمان و بخصوص بررسی مقاومت آن در برابر ضربه، نمونه هایی با طرح اختلاط مشخص ساخته شد بگونه ای که درصدهای مختلف سیمان و درصدهای گوناگون جایگزینی زئولیت با سیمان استفاده شد. درصد سیمان برابر با ۴، ۶، ۸ و ۱۰٪ از وزن خشک کل نمونه در نظر گرفته شد. همچنین درصد جایگزینی زئولیت با سیمان برابر با ۰، ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰٪ از سیمان تعیین شد. در مجموع ۲۴ نمونه ساخته شد و این نمونه ها به گونه ای عمل آوری شده اند که به مقاومت ۲۸ روزه خود برسند. برای تعیین درصد رطوبت بهینه مخلوط از آزمایش تراکم پراکتور استاندارد ASTM D698 استفاده شده است. هر نمونه با مقدار وزنی یکسان ماسه برابر ۳۳۰۰ گرم ساخته شده است. درصد رطوبت استفاده شده برای نمونه‌ی ۴٪ سیمان برابر ۱۱٪، نمونه‌ی ۶٪ سیمان برابر ۱۱،۴٪ و نمونه‌ی ۸٪ سیمان برابر ۱۱،۷٪ و نمونه‌ی ۱۰٪ سیمان برابر ۱۲،۱٪ بر اساس تعریف رطوبت بهینه آزمایش تراکم پراکتور استاندارد تعیین شده است. با اضافه شدن سیمان درصد رطوبت اندکی افزایش می یابد زیرا واکنش هیدراسیون سیمان نیاز به درصدی از آب موجود در مخلوط دارد. آب لازم برای واکنش هیدراته شدن ذرات سیمان با نسبت آب به سیمان واحد در نظر گرفته شد. یعنی هر چه درصد سیمان بالاتر باشد، مقدار رطوبت کمی بیشتر می شود تا آب کافی برای واکنش سیمان وجود داشته باشد.

نمونه های آماده شده در شکل ۶ نشان داده شده اند. توجه شود که در تصویر ۲۵ نمونه وجود دارد. یعنی یکی بیشتر از ۲۴ تای مورد نیاز. دلیل این است که یک نمونه تنها با خاک بدون سیمان و پوزولان تهیه شده است.



شکل ۶ - نمونه های آماده شده برای آزمایش مقاومت ضربه ای.

۳-۲- دستگاه ساخت نمونه ها

شکل ۷ دستگاه به کار برده شده برای ساخت نمونه ها در آزمایشگاه را نشان می دهد. نمونه ها در قالب ریخته و سپس کوبیده شده اند تا به تراکم لازم برسند. در قسمت پایین این دستگاه قالبی مکعب شکل به ابعاد ۳۰ در ۳۰ در ۵ سانتی متر طراحی شده است. این قالب از جنس یک نوع چوب مصنوعی ساخته شده است. قالب بر روی بستر بزرگ تری پایدار و ثابت شده است. این بستر بزرگ از جنس همان چوب مصنوعی قبلی است. در قسمت بالای این دستگاه، ابزار متراکم کننده قرار دارد که می توان با استفاده از آنها نمونه ها را به صورت لایه به لایه کوبید. نیروی کوبش توسط سقوط آزاد یک وزنه به جرم حدود ۲/۸ کیلوگرم تامین شد. عملیات کوبش به تعداد ۱۰

ضربه برای هر لایه انجام شد. اندازه‌ی نیروی کوبش توسط ارتفاع سقوط آزاد کنترل می‌شود. دامنه‌ی تغییر این ارتفاع از ۵۰ تا ۶۰ سانتی متر است. وزنه‌ی سقوط آزاد و همچنین سازه‌ی نگهدارنده‌ی ابزار تراکم از جنس فلز است. خاک بگونه‌ای در قالب ریخته شده و کوبیده شده است که انرژی وارد شده در واحد حجم با انرژی تراکم پراکتور استاندارد متناظر با رطوبت بهینه یکسان باشد به این ترتیب تراکم نمونه‌ها متناظر با حالت دانسیته خشک حداکثر انجام شده است. وزنه بصورت توخالی انتخاب شده است تا میله نشان داده شده در شکل‌های ۷ و ۸ از آن عبور کند و میله، نقش هدایت کننده داشته باشد. برای پخش شدن انرژی بصورت یکنواخت روی سطح مخلوط از صفحه فلزی استفاده شد بگونه‌ای که وزنه ابتدا روی صفحه فلزی برخورد کند سپس انرژی ضربه از صفحه به مخلوط وارد شود. صفحه فلزی در تصویر برداشته شده است تا نمونه خاک تثبیت شده در تصویر دیده شود.



شکل ۷ - دستگاه ساخت نمونه‌ها در آزمایشگاه.

۳-۳- جزییات نمونه سازی

روش نمونه سازی این گونه است که ابتدا مقدار محاسبه شده‌ی ماسه، سیمان و ژئولیت به نسبت طرح اختلاط به صورت خشک با هم مخلوط می‌شوند. به عبارت دیگر، برای نمونه‌های دارای سیمان با درصد وزنی مشخص، اختلاط ماسه، سیمان و ژئولیت ابتدا به صورت خشک و دستی انجام می‌شود. در مرحله بعد، افزودن رطوبت مورد نیاز و اختلاط مجدد در لایه‌های یکسان انجام می‌شود. توجه شود که آب به دلیل واکنش‌های شیمیایی سیمان و ژئولیت، آخرین ماده‌ای است که افزوده و مخلوط می‌شود. به جهت رسیدن به رطوبت بهینه، نمونه‌ها با مقدار آب لازم مخلوط می‌شوند. مقدار رطوبت اولیه‌ی افزوده شده به همه نمونه‌های خاک، معادل ۵٪ وزنی است. پس از اضافه شدن ماسه به مخلوط، آب در هر لایه به صورت دستی افزوده می‌شود. برای رفع اثر تبخیر آب حین اختلاط ۱ میلی گرم آب اضافی به مخلوط اضافه شد. پس از افزوده شدن آب، مخلوط مورد نظر در قالب چوبی تهیه شده ریخته و به روشی که در قسمت قبل توضیح داده شد متراکم شدند.



شکل ۸ - کوبش لایه های مخلوط در هنگام آماده سازی نمونه های آزمایش.

ضمناً برای اتصال بهتر لایه های افزوده شده ی خاک، سطح لایه کوبیده شده ی قبلی پس از رسیدن به ارتفاع مورد نظر شیار زده می شود تا درگیری مناسب تری با خاک لایه بعدی در محل فصل مشترک آنها ایجاد شود. به عبارت دیگر، پس از کوبیدن هر لایه، سطح آن به اندازه ۳ میلی متر خراشیده شد تا لایه ها از هم جدا نباشند و نمونه ای همگن بدست بیاید.

جهت آسانی خارج کردن نمونه ها پس از عمل آوری، قالب به صورت چند تکه با چند قسمت جدا شونده طراحی شده است. این قسمت های جداشونده ی قالب با ابزار و یراق به هم متصل شده اند. برای استحکام بیشتر قالب در هنگام کوبش لایه های مخلوط، دور قالب با حایل های اضافی محصور و پایدار می شود. برای خارج کردن نمونه از قالب، قالب ها به صورت یک جا به همراه قاب نگهدارنده آن ها، داخل نایلون قرار داده شده است تا از خروج مصالح مخلوط جلوگیری شود.

فرایند عمل آوری نمونه های آزمایش در شکل ۹ نشان داده شده است. برای عمل آوری مناسب نمونه ها قالب را با پارچه مرطوب پوشانده و جهت جلوگیری از تبخیر آب، روی قالب ها و پارچه های مرطوب با سلفون پوشیده شد. مدت زمان عمل آوری برای هر نمونه ۲۸ روز در اتاقی با دمای کنترل شده برابر ۲۳ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. پس از عمل آوری، نمونه ها از قالب خارج شده و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفتند تا حالتی خشک پیدا کنند.



شکل ۹ - نمونه های آزمایش در حال عمل آوری در مدت زمان ۲۸ روز.

۴-۳- دستگاه آزمایش

استانداردمشخصی برای آزمایش مقاومت ضربه ای تثبیت سیمانی ماسه یافت نشد. ایده اولیه آزمایش مقاومت ضربه ای از ACI-544.2R و همچنین از کار تحقیقاتی دهقانی و همکاران [۳۳] گرفته شده است و سپس تغییراتی که مناسب تثبیت باشد داده شده است. آزمایش با سقوط یک توپ با وزن مشخص بر روی نمونه ها انجام می شود. توپ دارای وزن یکنواخت ۲۵۰ گرم است. یک دستگاه آزمایش ساخته شده است که در آن یک مسیر عمودی برای افتادن توپ ساخته شد. دستگاه دارای یک بستر است که نمونه ها بر روی آن به حالت خوابیده قرار داده می شوند. توپ از بالای دستگاه رها می شود تا با سقوط آزاد بر روی نمونه ی خوابیده برخورد کند. برخورد توپ با نمونه باعث ایجاد پدیده ی ضربه می شود. وقتی توپ پی در پی روی نمونه سقوط آزاد دارد، در نهایت نمونه دچار شکست می شود. اولین ترک ایجاد شده در نمونه، نقطه ی شکست نمونه در نظر گرفته میشود. شمار سقوط های آزاد که برای شکست نمونه لازم است به عنوان معیار سنجش مقاومت نمونه ثبت می شود.

دستگاه ساخته شده برای آزمایش در شکل ۱۰ نشان داده شده است. ابتدا این دستگاه طراحی شده و سپس بر اساس طرح، مصالح مورد نیاز تهیه گردیده است. این دستگاه با چوب مصنوعی موجود در بازار تهیه شده است. مصالح قطعات بیشتر از جنس چوب مصنوعی است به جز مصالح ابزار و یراق اتصالات که از جنس فلز است. بر اساس نقشه های طرح، قطعه ها با شکل های مستطیل و مربع برش زده شده اند. قطعات دستگاه به هم به صورت مستحکم توسط ابزار و یراق مخصوص متصل شده است. ارتفاع کلی دستگاه برابر ۱۱۰ سانتی متر و ارتفاع سقوط آزاد توپ برابر ۹۵ سانتی متر طراحی و ساخته شده است. ضخامت قطعات دستگاه به گونه ای طراحی شده است که توانایی تحمل بار های بسیار بیشتر از اندازه ی بار ضربه ی آزمایش را داشته باشد.



شکل ۱۰ - دستگاه انجام آزمایش.

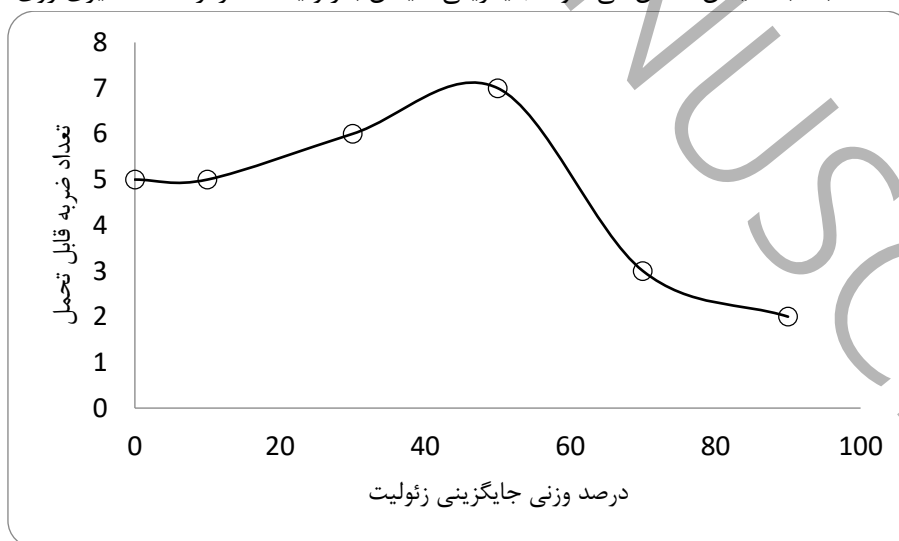
برای خنثی کردن اثر واکنش ضربه ی برخورد توپ به کف دستگاه، از یک فوم نرم پلاستیکی به ضخامت ۵ میلی متر استفاده شده است. به این صورت که در قطعه ی افقی کف دستگاه، یک فرورفتگی به ابعاد خود نمونه و ارتفاع ۵ میلی متر ایجاد شده است. فوم نرم پلاستیکی در این فرورفتگی قرار داده می شود. نحوه ی قرار گیری فوم در زیر نمونه ها، در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱ - فوم زیر نمونه آزمایش.

۴- نتایج و بحث

برای نمونه های خاک دارای ۴ درصد وزنی سیمان، نتایج آزمایش مقاومت ضربه ای در شکل ۱۲ ترسیم شده است. بیشترین مقاومت یعنی تعداد ضربات قابل تحمل هنگامی بدست می آید که ۵۰٪ سیمان با ژئولیت جایگزین گردد. جایگزینی سیمان با ژئولیت بیش از ۶۰٪ باعث کاهش مقاومت نسبت به سیمان خالص می شود. جایگزینی سیمان با ژئولیت کمتر از ۱۰٪ تاثیری روی مقاومت ندارد.



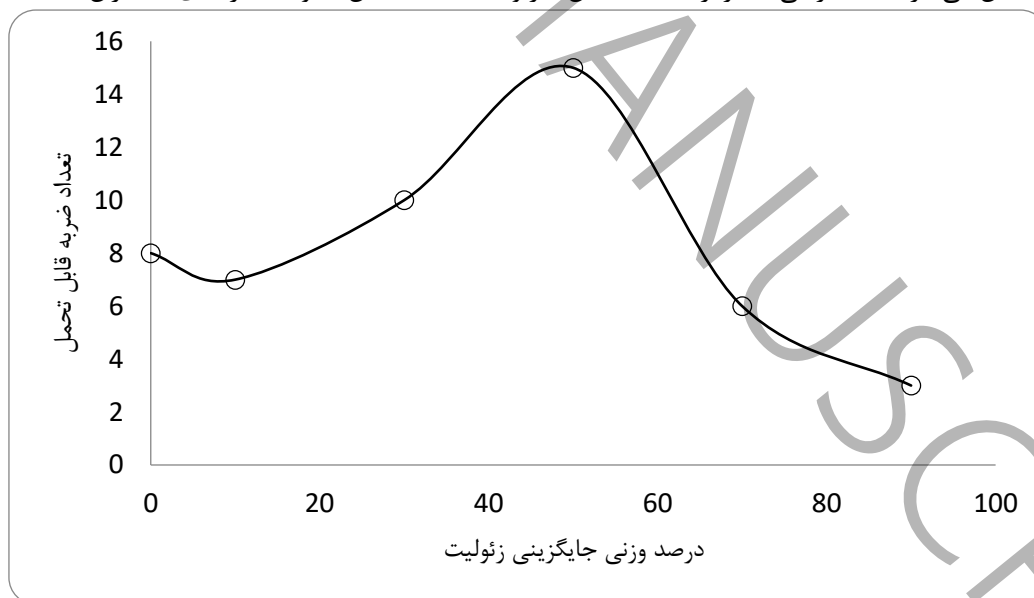
شکل ۱۲ - نتیجه آزمایش مقاومت ضربه ای برای ماسه با ۴٪ سیمان.

برای نمونه های خاک که دارای ۶ درصد وزنی سیمان بوده اند نتایج آزمایش ضربه در شکل ۱۳ ترسیم شده است. بیشترین مقاومت در ۳۰٪ جایگزینی سیمان با ژئولیت به دست می آید. جایگزینی بیش از ۴۴٪ سیمان با ژئولیت باعث کاهش مقاومت نسبت به سیمان خالص می شود. جایگزینی کمتر از ۱۰٪ تاثیری روی مقاومت ندارد.



شکل ۱۳ - نتیجه آزمایش مقاومت ضربه ای برای ماسه به ۶٪ سیمان.

برای نمونه های خاک که دارای ۸ درصد سیمان وزنی بوده اند نتایج ترسیم شده در شکل ۱۴ به دست آمده است. بیشترین مقاومت در ۵۰٪ جایگزینی سیمان با ژئولیت حاصل می شود. جایگزینی بیش از ۶۵٪ سیمان با ژئولیت باعث کاهش مقاومت نسبت به حالت اولیه ی سیمان خالص می گردد. جایگزینی کمتر از ۱۰٪ سیمان با ژئولیت باعث کاهش مقاومت ضربه ای به میزان ۱۳٪ شده است.



شکل ۱۴ - نتیجه آزمایش مقاومت ضربه ای برای ماسه با ۸٪ سیمان.

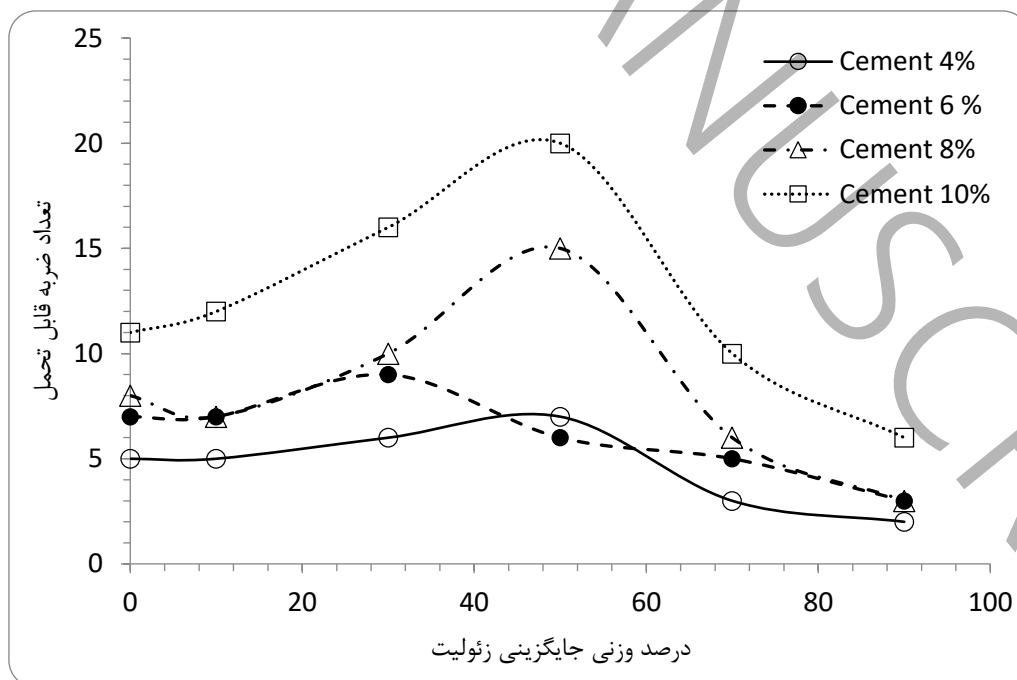
برای نمونه های خاک که دارای ۱۰ درصد وزنی سیمان بوده اند نتایج مطابق شکل ۱۵ به دست آمده است. بیشترین مقاومت در ۵۰٪ جایگزینی سیمان با ژئولیت حاصل شد. جایگزینی بیش از ۶۵٪ سیمان با ژئولیت مقاومت را نسبت به سیمان خالص کاهش می دهد. جایگزینی از صفر تا ۶۵٪ سیمان با ژئولیت تاثیر مطلوبی روی مقاومت دارد بنحوی که با افزایش مقدار ژئولیت جایگزین، مقاومت ضربه ای افزایش می یابد اما مقدار بهینه جایگزینی، ۵۰٪ است. با افزایش مقدار ژئولیت جایگزین از ۶۵٪ مقاومت نسبت به حالت بدون

ژئولیت کاهش یافت.



شکل ۱۵ - نتیجه آزمایش مقاومت ضربه ای برای ماسه با ۱۰٪ سیمان.

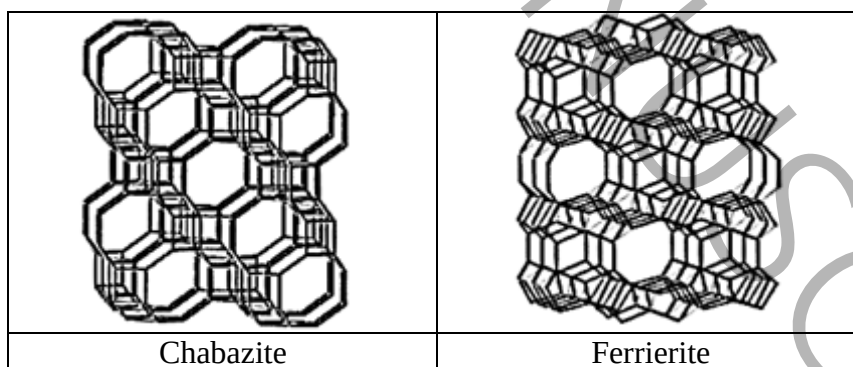
جهت مقایسه بهتر نتایج آزمایشات مقاومت ضربه ای با یکدیگر، نمودار ۱۶ ارائه شده است. مقدار عددی مقاومت در محور عمودی نشان داده است. مقدار ژئولیت جایگزینی بهینه برای همه نمونه‌ها بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ از سیمان است. برای همه نمونه‌ها، جایگزینی بیش از ۶۰٪ الی ۶۵٪ تاثیر معکوس روی مقاومت دارد. به این معنی که مقاومت نسبت به حالت اولیه سیمان خالص کاهش می‌یابد. برای بیشتر نمونه‌ها، جایگزینی از صفر تا ۱۰٪ ژئولیت تاثیر چشمگیری روی مقاومت ندارد. هر چه مقدار سیمان افزوده شده به ماسه بیشتر باشد، تاثیر جایگزینی ژئولیت بیشتر می‌شود. به این معنی که برای ماسه با ۱۰٪ سیمان نسبت به ماسه با ۸٪ سیمان، تاثیر جایگزینی ژئولیت بیشتر است. نرخ تغییر مقاومت هم برای ماسه با درصد بالاتر سیمان دارای شیب تندتر است.

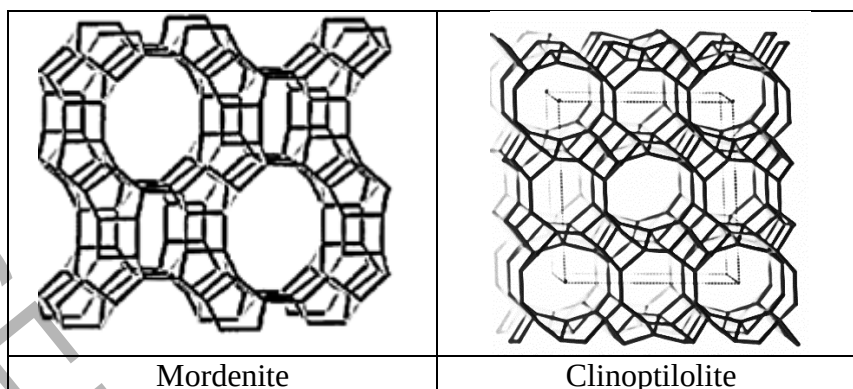


شکل ۱۶ - مقایسه ی نتیجه آزمایش مقاومت ضربه ای برای همه ماسه ها.

از نتایج بدست آمده می توان دریافت که مقدار ژئولیت در ترکیب با سیمان یک درصد بهینه در همه ی حالت های بررسی شده دارد. به عبارت دیگر، با افزوده شدن مقدار ژئولیت، مقاومت افزایش می یابد و با رسیدن به درصد بهینه، مقاومت به حداکثر می رسد و در صورت عبور از درصد بهینه، مقاومت کاهش می یابد. ژئولیت به دلیل دارا بودن ساختارهای سیلیکات آلومینیوم با سیمان بخوبی واکنش می دهد و باعث بهبود پیوستگی و بافت مخلوط می شود. با افزایش درصد ژئولیت، ظرفیت واکنش پذیری سیمان به پایان می رسد و ژئولیت اضافی به عنوان مواد سرگردان باعث کاهش مقاومت می شود. ارزش افزوده ی ژئولیت در واقع واکنش پذیری آن با سیمان برای افزایش مقاومت نهایی است. با توجه به نتایج این تحقیق مقدار بهینه درصد جایگزینی ژئولیت با سیمان بین ۳۰ تا ۵۰٪ وزنی سیمان است. نتایج تحقیق حاضر با نتایج شوش پاشا و همکاران [۹] سازگار است. آنها میزان بهینه ژئولیت را ۵۰٪ سیمان اعلام نمودند. همچنین گزارش دادند که این مقدار ژئولیت باعث افزایش میانگین ۶۰٪ مقاومت برشی می شود. سلامت پور و همکاران [۱۰] نیز نتایج سازگاری با نتایج تحقیق حاضر ارائه دادند. آنها میزان بهینه ژئولیت را برای افزایش مقاومت فشاری محصور نشده ۴۰٪ گزارش دادند و نشان دادند که این مقدار ژئولیت باعث افزایش ۱۱۰٪ مقاومت فشاری میشود. نتایج سلطانی و همکاران [۱۱] نیز با نتایج تحقیق حاضر مطابقت نسبتاً خوبی دارد. آنها گزارش کردند که اضافه شدن ۳۰٪ ژئولیت و ۷/۵٪ گرانول لاستیکی تا حداکثر ۱۰۰٪ مقاومت فشاری محصور نشده را افزایش می دهد. نتایج سعادت و همکاران [۱۲] نیز که حاکی از افزایش مدول برشی تناوبی در اثر ۳۰٪ جایگزینی سیمان با ژئولیت است تطابق خوبی با نتایج تحقیق حاضر دارد. نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر با نتایج عباسی و همکاران [۱۳] که نشان می دهد با جایگزینی ۳۰٪ ژئولیت به جای سیمان، میزان مقاومت کششی آن نسبت به نمونه های بدون ژئولیت به میزان ۴۰٪ افزایش می یابد، سازگاری دارد. لازم به ذکر است که تفاوت در میزان بهبود مقاومت ها قابل توجیه است زیرا خلوص و فرم ژئولیت بکار رفته و همچنین تفاوت در نوع فیزیکی مقاومت ها باعث تفاوت در میزان بهبود مقاومت میشود. نتایج شیخ و همکاران [۲۵] نیز که گزارش کردند که افزودن ۳۰٪ ژئولیت به مصالح روسازی باعث افزایش ۲۹٪ مقاومت و ۳۳٪ کرنش گسیختگی می شود، با نتایج تحقیق حاضر سازگار است زیرا افزایش کرنش گسیختگی احتمالاً باعث افزایش مقاومت در برابر بار ضربه ای خواهد شد.

برای تحلیل و بحث نتایج بدست آمده لازم است به ساختار شیمیایی توجه شود. پوزولان های طبیعی دارای ذرات اکسید سیلیسیم SiO_2 و اکسید آلومینیم Al_2O_3 هستند. به این ساختارهای مولکولی سیلیکات آلومینیوم یا آلومینوسیلیکات گفته می شود. ساختارهای آلومینوسیلیکات برای چهار نوع ژئولیت در شکل ۱۷ نشان داده شده است که در تحقیق حاضر از ژئولیت نوع کلینوپتولیت استفاده شده است. از طرف دیگر فرایند واکنش سیمان و آب منجر به تولید ذرات هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 می شود. واکنش سیلیکات آلومینیوم و هیدروکسید کلسیم باعث افزایش خاصیت چسبندگی شده و در نهایت به افزایش مقاومت می انجامد [۳۴].





شکل ۱۷ - ساختار آلومینوسیلیکات مربوط به چهار نوع زئولیت [۳۴، ۳۵].

به طور کلی، این طور در نظر گرفته می شود که مشارکت زئولیت در افزایش مقاومت فشاری، ناشی از واکنش پوزولانی با هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 است [۳۴]. مطالعات گذشته به یافته های متفاوتی در مورد اثر ترکیب زئولیت با سیمان بر روی مقاومت فشاری رسیده اند. این گوناگونی نتایج ممکن است به علت عواملی مانند ترکیب شیمیایی زئولیت استفاده شده، ریزی و درشتی بافت زئولیت، و همینطور واکنش پذیری زئولیت با Ca(OH)_2 باشد [۳۴]. هنگام واکنش زئولیت با سیمان، مقدار Ca(OH)_2 مصرف شده در واکنش بسیار بیشتر از مقدار مورد نیاز برای تبادل کاتی است. بنابراین، تبادل کاتی ممکن است که فرایند آغازین باشد و به دنبال آن فرایند اصلی دیگری رخ دهد. بلکه این فرایند اصلی محتمل است که شکسته شدن ساختارهای آلومینوسیلیکات و تشکیل شدن ساختارهای C-S-H و C-A-S-H باشد [۳۴].

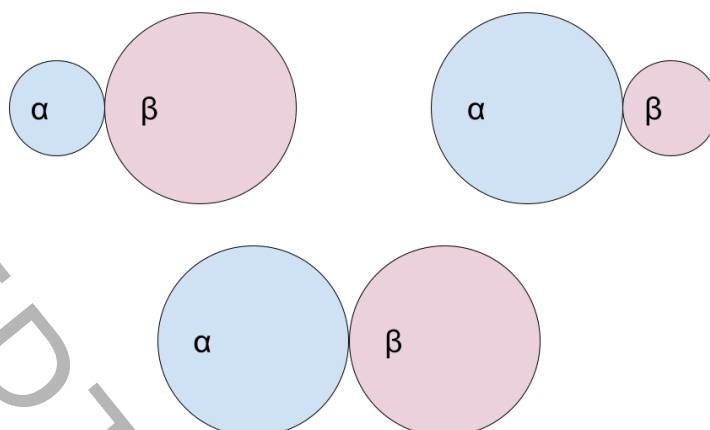
بر پایه دو فرض زیر و سه حالت متمایز که در پی آن خواهد آمد، مشاهده های آزمایش را می توان توجیه کرد:

۱. فرض می شود که ترکیب سیمان و آب منجر به تولید هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 به میزان α خواهد شد.
۲. از طرفی دیگر فرض می شود که مقدار β از ساختارهای آلومینوسیلیکات در مخلوط وجود دارد که ناشی از افزودن زئولیت است.

دو فرض بالا باعث به وجود آمدن سه حالت احتمالی در شکل ۱۸ می شوند. حالت اول این است که مقدار β که ارتباط مستقیم با میزان زئولیت جایگزینی دارد متناسب با مقدار α باشد، در این صورت واکنش α و β کامل بوده و باعث نهایت افزایش خاصیت چسبندگی می شود. به عبارت دیگر، تعادل کافی بین اندازه های موجود α و β در مخلوط وجود دارد تا واکنش های شیمیایی بدون کم آمدن یا زیاد آمدن α و β انجام شود. حالت دوم این است که مقدار β کمتر از مقدار متناسب با α باشد. یعنی، مقدار کافی β برای واکنش با α وجود نداشته باشد. در این صورت همه ی α نمی تواند در افزایش خاصیت چسبندگی مشارکت کند. بنابراین نهایت افزایش چسبندگی و مقاومت به دست نمی آید. حالت سوم حالتی است که در آن مقدار β بیشتر از مقدار متناسب با α باشد، یعنی پس از واکنش α و β ، مقداری از β زیاد آمده و به صورت اضافی در محیط واکنش وجود خواهد داشت. در این صورت، مقدار اضافی β اثر معکوس روی مقاومت بتن دارد. بلکه خاصیت شکنندگی بتن را افزایش می دهد و مقاومت را کاهش می دهد. با افزایش مقدار زئولیت ظرفیت واکنش پذیری سیمان به پایان می رسد و زئولیت مازاد بعنوان مواد اضافی باعث کاهش گیرش و مقاومت تثبیت می شود. به عبارت دیگر، اگر هریک از این مقادیر α و β متناسب باشد این حالت متناظر با درصد جایگزینی بهینه زئولیت بجای سیمان است. اگر مقدار β کمتر از مقدار α باشد در این صورت درصد زئولیت جایگزین سیمان کم است و مقداری از هیدروکسید کلسیم مازاد که در واکنش شرکت نکرده وجود خواهد داشت. بعنوان مثال حالت تا ۱۰٪ زئولیت که جا دارد زئولیت بیشتری اضافه شود تا مقاومت بیشتری حاصل شود. در نهایت اگر مقدار β بیشتر باشد در این صورت مقداری از سیلیکاتهای زئولیت وارد واکنش نمیشوند و این سیلیکاتها مقاومت را کاهش می دهند.

مقدار β بیشتر از مقدار متناسب با α باشد

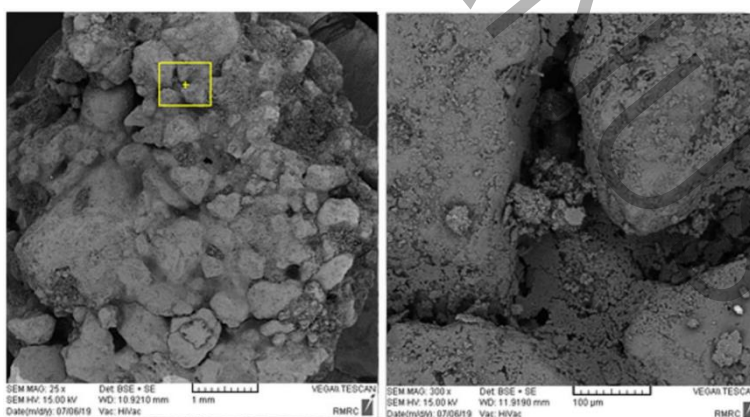
مقدار β کمتر از مقدار متناسب با α باشد



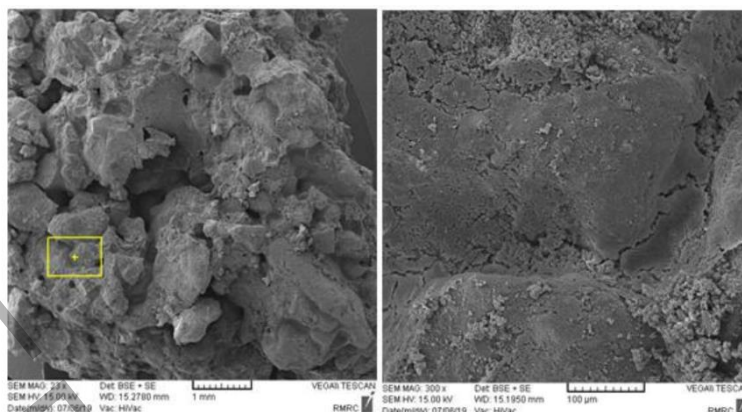
مقدار β متناسب با مقدار α باشد

شکل ۱۸ - سه حالت بوجود آمده از مقایسه اندازه α و β .

از لحاظ مورفولوژی نیز می توان به بحث و تحلیل نتایج بخصوص وجود درصد بهینه جایگزینی سیمان با زئولیت پرداخت. بر اساس تحلیل های میکروسکوپ الکترونی در شکل های ۱۹ و ۲۰، مورفولوژی با افزودن سیمان و زئولیت تغییر می کند [۱۱]. در خاک بدون سیمان و زئولیت، حفره ها و فضاهای خالی بسیاری وجود دارد. وقتی سیمان و آب به خاک افزوده می شود، فضاهای خالی خاک به صورت نسبی پر می شود و فواصل خالی بین دانه های خاک کمتر می شود. وقتی درصدی از سیمان با زئولیت جایگزین می شود، اگر این درصد بهینه باشد، فضاهای خالی بیش از پیش پر می شود و فاصله های خالی بین دانه های خاک نیز کمتر از قبل می شود. بافت خاک بیشتر به صورت توده و یکپارچه در می آید. به خاطر پیوستگی حاصل شده برای بافت خاک، مقاومت خاک بیشتر می شود. این پیوستگی ناشی از واکنش های اکسید سیلیسیم، اکسید آلومینیم، و اکسید کلسیم است. زئولیت در حین هیدراتاسیون، بدلیل دارا بودن سیلیکاتهای آلومینیوم با سیمان بخوبی واکنش می دهد و باعث بهبود بافت و پیوستگی می شود.



شکل ۱۹ میکروسکوپ الکترونی: خاک پایه و سیمان ۱۰٪ [۱۱].



شکل ۲۰ میکروسکوپ الکترونی: ترکیب خاک پایه و سیمان ۱۰٪ و ژئولیت ۳۰٪ [۱۱]

۵- جمع بندی

افزایش مقاومت ماسه زیر بار ضربه تاثیر زیادی بر رفتار و دوام سازه های ژئوتکنیکی بخصوص تحت بارهای دینامیکی دارد. برای افزایش طول عمر سازه های ژئوتکنیکی می توان مقاومت ماسه در برابر ضربه را افزایش داد. یکی از راههای مقاوم سازی ماسه تثبیت آن با سیمان و آهک بوده است که با توجه به ایجاد آلودگی های زیست محیطی، عدم مقرون به صرفه بودن، ایجاد مشکلات ساختاری و عدم وجود مقاومت پایدار این مصالح، محققین بر آن هستند که مصالح جایگزین مناسب مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور، راه های گوناگونی موضوع تحقیقات بوده است. از جمله این تحقیقات، پژوهش هایی هستند که در آن ها اثر افزودن گردهای آتشفشانی- معدنی به مصالح خاکی بررسی می شود. از زیر مجموعه های این گردها، گرد ژئولیت است. گرد ژئولیت نسبتا ارزان است. در کشور ایران، معادن تولید کننده این گرد وجود دارند. تحقیقات پیشین نشان می دهد که این گرد مقاومت فشاری و برشی ماسه را در برابر بار معمولی افزایش می دهد. اما تحقیقی برای بار ضربه ای انجام نشده بود. در این تحقیق، تلاش شد اثر افزودنی ژئولیت بر روی مقاومت ماسه در برابر بار ضربه ای بصورت آزمایشگاهی بررسی شود. براساس نتایج آزمایش ضربه ای که در تحقیق حاضر طراحی و ساخته شد، برای هر مقدار سیمان مخلوط شده، درصد بهینه جایگزینی سیمان با ژئولیت پیشنهاد شد. همچنین نتایج نشان داد که دامنه ی درصدهای جایگزینی که اثر ناچیز و یا معکوس روی مقاومت دارد نیز مشخص گردیده است. مقدار جایگزینی بهینه بین ۳۰٪ تا ۵۰٪ ژئولیت است. جایگزینی بیش از ۶۵٪ تاثیر معکوس روی مقاومت ضربه ای دارد. به این معنی که مقاومت نسبت به حالت اولیه سیمان خالص کاهش می یابد. مشاهده می شود که جایگزینی تا ۱۰٪ تاثیر چشمگیری روی مقاومت ضربه ای ندارد.

فهرست علائم

- α میزان هیدروکسید کلسیم در مخلوط.
فرض است که ترکیب سیمان و آب منجر به تولید هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 به میزان α می شود.
- B مقدار ساختارهای سیلیکات آلومینیوم در مخلوط.
فرض است که افزودن پوزولان منجر به حضور مقدار β از ساختارهای آلومینوسیلیکات می شود.

Stabilized sand with zeolite under impact load

Alireza Nasiry^a, Morteza Jiryaei Sharahi^{b1}, Dr. Ali Attarzadeh^c

^a M.Sc. Student, Qom University of Technology

^b Assistant Professor, Qom University of Technology

^c Assistant Professor, Qom University of Technology

ABSTRACT

Cement production has numerous environmental side effects, and it is desirable to reduce the pollutants during cement production. One way of alleviating cement production pollution is by reducing its consumption. Demand for cement can be reduced by introducing alternative materials with the same benefits but are less detrimental to the environment. A natural substitute for cement in infrastructure civil projects is a pozzolan, which is naturally found and is a side product of some industrial processes. One type of pozzolan that has wide availability in Middle Eastern countries is zeolite. Zeolite has been investigated by previous researchers as a replacement for cement for specific types of civil infrastructure development. However, no previous study has investigated zeolite as a substitute for cement for stabilizing sandy soils under impact loading. The feasibility of replacing a percentage of cement with zeolite for stabilizing the sand soil under impact loads is being assessed. Different percentages of cement are replaced with zeolite, and samples are tested under impact loads. Tests indicate that there is an optimum percentage of replacement at which the soil strength under impact loads shows the greatest increase. The optimal replacement percentage is found to be between 30% to 50%. Any replacement below or above that optimal range would hurt the impact strength of the soil samples. The positive effect at optimum replacement percentages can be attributed to the reaction of Calcium Hydroxide and silicate-aluminum structures. Calcium Hydroxide is generated by cement hydration, and silicate-aluminum structures come from the introduction of zeolite into the mix.

KEYWORDS

Sand, Cement, Zeolite, Strength, Impact load.

¹ Corresponding Author: Email: jiryaei@qut.ac.ir

- [1] Cement Manufacturing Enforcement Initiative, in: EPA (Ed.), United States Environmental Protection Agency, 2022.
- [2] B. Bogdanov, D. Georgiev, K. Angelova, Y. Hristov, Synthetic Zeolites and Their Industrial and Environmental Applications Review, in: International Science Conference, Economics and Society Department on the Base of Knowledge, Stara Zagora Bulgaria., 2009.
- [3] P. Baile, E. Fernández, L. Vidal, A. Canals, Zeolites and zeolite-based materials in extraction and microextraction techniques, *Analyst*, 144(2) (2019) 366-387.
- [4] R. Yousefi, A.A. Amouei, M. Amelsakhi, Investigating the structure of zeolite and its effect on soil improvement, in: 6th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, 2019.
- [5] P. Misaelides, Application of natural zeolites in environmental remediation: A short review, *Microporous and Mesoporous Materials*, 144(1) (2011) 15-18.
- [6] A. Rahma, H. Jomaa, Modeling the cementitious effect of the Pozzolana on the compressive strength of concrete, *Cogent Engineering*, 5(1) (2018) 1548002.
- [7] J.X. Shi, The Applications of Zeolite in Sustainable Binders for Soil Stabilization, *Applied Mechanics and Materials*, (2012) 112-115.
- [8] H. Shang, Geotechnical laboratory characterization of sand-zeolite mixtures., *Electronic Theses and Dissertations*, 2015.
- [9] I. Shooshpasha, M. Abbasi, H. Molaabasi, The Effect of Zeolite on Shear Strength of Babolsar Sand Stabilized with Cement, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 49.1(94) (2019) 89-96.
- [10] S. Salamatpoor, Y. Jafarian, A. Hajiannia, Experimental investigation into the influence of zeolite addition on shallow foundations behavior placed on coastal sand of Mazandaran Sea, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(4) (2021) 114-128.
- [11] M.S. Soltani, M. Jiryaei Sharahi, M. Amelsakhi, Effect of Zeolite and tire granules on cement stabilization of the sand, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(2) (2022) 759-774.
- [12] M. Saadati, M. Derakhshandi, A. Bahmanpour, N. Ganjian, Experimental investigation of cyclic behavior of zeolite cemented sand, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(12) (2022) 5441-5456.
- [13] M. Abbasi, E. Shooshpasha, H. MolaAbasi, INVESTIGATION OF ZEOLITE EFFECT ON THE STRENGTH OF BABOLSAR SAND STABILIZED WITH CEMENT, *Sharif Journal of Civil Engineering*, 33.2(1.1) (2017) 117-120.
- [14] A.M. Rajabi, S.B. Ardakani, Effects of Natural-Zeolite Additive on Mechanical and Physicochemical Properties of Clayey Soils, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(10) (2020) 04020306.
- [15] H.A. Chenarboni, S.H. Lajevardi, H. Mola Abasi, E. Zeighami, The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils, *Construction and Building Materials*, Volume 272 (2021).
- [16] M. Shahriar Kian, S. Kabiri, M. Bayat, Utilization of Zeolite to Improve the Behavior of Cement-Stabilized Soil, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering* 7, Article number: 35, (2021).
- [17] S. Jamshidvand, A. Ardakani, A. Kordnaeij, Effect of cement and zeolite on silty sand samples under freeze-thaw cycles, *Road Materials and Pavement Design*, 23(8) (2022) 1836-1859.
- [18] A.A. Sharo, F.M. Shaqour, J.M. Ayyad, Maximizing Strength of CKD – Stabilized Expansive Clayey Soil Using Natural Zeolite, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(4) (2021) 1204-1213.
- [19] S. Shirmohammadi, S. Ghaffarpour Jahromi, M. Payan, K. Senetakis, Effect of Lime Stabilization and Partial Clinoptilolite Zeolite Replacement on the Behavior of a Silt-Sized Low-Plasticity Soil Subjected to Freezing-Thawing Cycles, *Coatings*, 11(8) (2021) 994.

- [20] H.R. Akbari, H. Sharafi, A.R. Goodarzi, Effect of polypropylene fiber inclusion in kaolin clay stabilized with lime and nano-zeolite considering temperatures of 20 and 40 ° C, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(2) (2021) 1841-1855.
- [21] H.R. Akbari, H. Sharafi, A.R. Goodarzi, Effect of polypropylene fiber and nano-zeolite on stabilized soft soil under wet-dry cycles, *Geotextiles and Geomembranes*, 49(6) (2021) 1470-1482.
- [22] A. Ali, B.A. Mir, N. Gul, F.Z. Malik, Strength and Microstructural Behavior of Soft Soil Treated with Zeolite Nanoparticles, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 10(6) (2023) 1239-1254.
- [23] A. Khajeh, R.J. Chenari, H. MolaAbasi, M. Payan, An experimental investigation on geotechnical properties of a clayey soil stabilised with lime and zeolite in base and subbase courses, *Road Materials and Pavement Design*, Volume 23 - Issue 12 (2022).
- [24] S.R. Rababah, M.M. Taamneh, H.M. Abdallah, O.K. Nusier, L. Ibdah, Effect of Adding Zeolitic Tuff on Geotechnical Properties of Lime-Stabilized Expansive Soil, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(12) (2021) 4596-4609.
- [25] A. Sheikh, M. Akbari, G. Shafabakhsh, Laboratory Study of the Effect of Zeolite and Cement Compound on the Unconfined Compressive Strength of a Stabilized Base Layer of Road Pavement, *Materials*, 15(22) (2022) 7981.
- [26] A. Khajeh, S.A. Ebrahimi, H. MolaAbasi, R.J. Chenari, M. Payan, Effect of EPS beads in lightening a typical zeolite and cement-treated sand, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80 (2021) 8615-8632.
- [27] M. Hosseinzade, M. Hassanlourad, S.A. Naeini, Investigating the zeolite and bentonite adsorbent effect on different parameters of soil, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement*, 176(4) (2023) 261-272.
- [28] A.A. Shahmansouri, M. Yazdani, S. Ghanbari, H. Akbarzadeh Bengar, A. Jafari, H. Farrokh Ghatte, Artificial neural network model to predict the compressive strength of eco-friendly geopolymer concrete incorporating silica fume and natural zeolite, *Journal of Cleaner Production*, 279 (2021) 123697.
- [29] M. Ramezani, S. Soleimani Kutanaei, A. Seyedkazemi, A. Esfandiari Fard, Enhancing the Durability of Cement-Stabilized Clayey Sand with Zeolite and PVA Fibers Under Wet-Dry and Freeze-Thaw Cycles, *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12(5) (2025) 162.
- [30] S. Nasrollahpour, A. Tanhadoust, S. Kaur Brar, H. MolaAbasi, M.L. Nehdi, O. Ataei, Multi-objective optimization of sustainable cement-zeolite improved sand based on life cycle assessment and artificial intelligence, *F1000Research*, 13 (2024) 257.
- [31] L. Cao, P. Cao, Z. Wang, Z. Tan, C. Zhou, G. Zhang, S. Zhang, J. Wang, Performance and environmental impact assessment of a novel zeolite modified cement stabilized calcareous sand material for island eco-construction, *Construction and Building Materials*, 458 (2025) 139628.
- [32] W. Qu, N. Maimt, J. Qu, Effects of zeolite and palm fiber on the weathering resistance and durability characteristic of cement soil, *Scientific Reports*, 15(1) (2025) 4408.
- [33] M. dehghani ashkezari, g. dehghani ashkezari, Investigation of Impact Behavior of High Strength Concrete and Ultra-High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete under Impact of Projectile, *Journal of Advanced Defense Science & Technology*, 9(3) (2018) 337-348.
- [34] K. Luke, The Effect of Natural Zeolites on the Composition of Cement Pore Fluids at Early Ages, in: *International Congress on the Chemistry of Cement*, ICCC, 2007.
- [35] A. Mastinu, A. Kumar, G. Maccarinelli, S.A. Bonini, M. Premoli, F. Aria, A. Gianoncelli, M. Memo, Zeolite Clinoptilolite: Therapeutic Virtues of an Ancient Mineral, *Molecules*, 24(8) (2019) 1517.