

ارزیابی خواص مکانیکی ملات سیمان حاوی سنگدانه‌های طبیعی ورمیکولیت منبسط‌شده

محمدحسین مختارزاده^۱؛ احسان طاهری^{۱*}

۱- گروه مکانیک سنگ، دانشکده معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۴؛ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

*نویسنده مسئول: (e_taheri@modares.ac.ir)

چکیده

یکی از بروزترین و مهم‌ترین مسائل مطرح در علوم عمران، مواد و مکانیک سنگ استفاده از سنگدانه‌های طبیعی و معدنی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان یا سنگدانه در ملات سیمان یا بتن می باشد. هدف از این مهم افزودن خواص این مواد به بتن یا ملات است. یکی از این مواد که امروزه مورد توجه واقع شده است ورمیکولیت منبسط شده می باشد. باتوجه به خاصیت عایق سازی محیط در برابر امواج و حرارت، امروزه برای بهره‌وری بیشتر استفاده از ملات با افزودنی ورمیکولیت منبسط‌شده رایج شده است. لذا تحقیق جامعی برای بدست آوردن خواص مکانیکی این ملات صورت نگرفته است. تحقیق حاضر به بررسی خواص مکانیک سنگی چون مقاومت فشاری تک محوری و چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت کششی و جذب آب و سرعت حرکت موج اولتراسونیک P در ملات حاوی ورمیکولیت منبسط‌شده می‌پردازد. نتایج حاصله حاکی از این مهم دارد که افزایش ورمیکولیت منبسط‌شده با اکثر پارامترهای مکانیکی (جز جذب آب) رابطه عکس دارد.

ملات های سبک، خواص مکانیکی، ورمیکولیت منبسط شده، ملات با سنگدانه ورمیکولیت منبسط شده

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

یکی از سنگدانه‌های سبک مهم در فرمولاسیون ملات برای ایجاد ملات ورمیکولیت منبسط‌شده (EVM^2) می باشد. این ماده معدنی، یک سیلیکات هیدراته منیزیم-آلومینیوم-آهن می باشد. که با قرار گرفتن در معرض دمای بالا، دچار تغییر شکل قابل توجهی می‌شود. ورمیکولیت به صورت تشکیلات ورقه‌ای ناشی از تغییر میکا، بیوتیت یا فلوگوپیت است. که پس از قرارگیری درمقابل حرارت، به میزان قابل توجهی منبسط می‌شود. فرآیند پوسته‌پوسته‌شدن، که دردهماهای حدود ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد یا بالاتر رخ می‌دهد، باعث می‌شود که این ماده معدنی مولکول‌های آب داخلی خود را از دست بدهد و ۸ تا ۳۰ برابر حجم اولیه خود منبسط شود. این انبساط باعث افزایش تخلخل و سبکی بیشتر وزن

استفاده از سنگدانه‌های سبک وزن، روشی مؤثر برای افزایش عملکرد ملات است و مزایایی مانند کاهش چگالی و عایق حرارتی را به همراه داشته است [۱-۳]. این سنگدانه‌ها که از منابع طبیعی و باطله‌های معادن بدست می‌آیند، به گسترش ملات‌هایی با خواص فیزیکی بهبود یافته و دوستدار محیط‌زیست کمک می‌کنند [۴-۶]. استفاده از سنگدانه‌های سبک در طرح اختلاط ملات، نه تنها نگرانی‌های زیست‌محیطی رو به رشد مرتبط با باطله‌های معادن و مصالح ساختمانی سنتی را برطرف می‌کند، بلکه بسیاری از نیازهای فنی ساختمان‌های مدرن را نیز برآورده می‌کند [۷-۱۰]. سنگدانه ورمیکولیت منبسط‌شده (EVA^1) به عنوان

² Expanded Vermiculite Mortar

¹ Expanded Vermiculite Aggregate

بالا از خود نشان می‌دهند که نشان دهنده کاربرد در مواقعی است که به مقاومت در برابر آتش یا پایداری حرارتی نیاز است. کوکسال و همکاران [۱۵، ۱۷، ۲۵] این مشاهدات را تأیید کرده‌اند و نشان داده‌اند که بتن‌های سبک حاوی ورمیکولیت منبسط‌شده نه تنها به عنوان عایق‌های حرارتی مؤثر عمل می‌کنند، بلکه از یکپارچگی مکانیکی لازم برای کاربردهای سازه‌ای نیز برخوردارند.

در مورد عملکرد به‌عنوان عایق صدا نیز ملات با سنگدانه ورمیکولیت منبسط‌شده طبیعی سبک وزن، پالومار و همکاران [۲۲] دریافتند که گنجاندن سنگدانه‌های سبک‌وزن مانند ورمیکولیت منبسط‌شده به طور قابل توجهی عملکرد صوتی ملات‌های آهک-سیمان را بهبود بخشیده است.

ژو و همکاران [۲۳] در مطالعه‌ای در مورد ملات حاوی ورمیکولیت منبسط‌شده به عنوان جایگزین ماسه پرداختند، طیف وسیعی از خواص فیزیکی و مکانیکی را بررسی کرده‌اند. و تا حدودی شکاف‌های موجود در تحقیقات قبلی را برطرف نموده‌اند. آنان پارامترهای کلیدی مانند چگالی، نرخ جذب آب و رسانایی حرارتی را به همراه خواص صوتی مانند ضرایب جذب صدا را بررسی نمودند. این مطالعه همچنین نشان داده‌است که استفاده از ورمیکولیت منبسط شده در ملات سیمان، خواص جذب صدای آن را، به ویژه در محدوده فرکانس ۲۰۰ تا ۵۰۰۰ هرتز، افزایش می‌دهد و پتانسیل ارائه عایق صوتی کارآمد را در کاربردهای ساختمانی را مورد توجه قرار داده است.

پیشینه تحقیقاتی موجود در مورد ملات حاوی ورمیکولیت منبسط‌شده عمدتاً بر خواص مکانیکی بنیادی و ویژگی‌های مقاومتی در برابر حرارت و صوت متمرکز است. مطالعات به طور مداوم نشان داده‌اند که گنجاندن ورمیکولیت منبسط‌شده به دلیل ماهیت سبکی وزن، چگالی ملات‌ها را کاهش می‌دهد که با کاهش مقاومت‌های فشاری و خمشی مرتبط است. علاوه بر این، نشان داده شده است که افزودن ورمیکولیت منبسط‌شده به دلیل افزایش تخلخل، رسانایی حرارتی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد و کاربرد آن را برای کاربردهای عایق حرارتی مورد توجه قرار می‌دهد. با این حال، یک مطالعه تجربی کامل که این جنبه‌ها را در بر بگیرد، وجود ندارد که توانایی ارزیابی جامع عملکرد مواد در طیف وسیعی از کاربردهای عملی محدود می‌کند.

ورمیکولیت می‌گردد. و همچنین عملکرد مقاومتی در برابر حرارت و امواج را در این ماده به طور قابل توجهی تقویت می‌نماید. تولید جهانی ورمیکولیت، که تقریباً ۲.۳۵ میلیون تن تخمین زده شده است، که بر نقش مهم آن در کاربردهای مختلف تأکید می‌نماید [۱۱، ۱۲، ۱۳]. ورمیکولیت منبسط‌شده به دلیل چگالی کم، مقاومت حرارتی بالا و ویژگی‌های عایق عالی، به یک عنصر کاربردی در صنعت ساختمان تبدیل شده و کاربرد گسترده‌ای در ساخت مصالح ساختمانی پایدار و کارآمد پیدا کرده است [۱۴، ۱۲-۱۸]. استفاده از ورمیکولیت منبسط‌شده در ملات‌های سبک نه تنها وزن کلی عناصر ساختمانی را کاهش می‌دهد، بلکه ظرفیت جذب مایع آنها را همراه با عایق حرارتی افزایش می‌دهد و در نتیجه به بهبود راندمان انرژی در ساختمان‌ها کمک می‌کند [۲۰-۱۸].

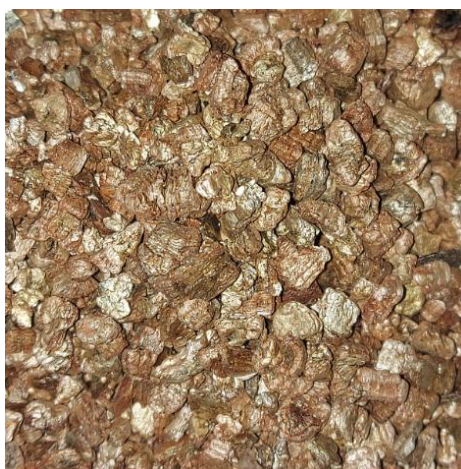
گنجاندن ورمیکولیت منبسط‌شده در فرمولاسیون ملات، هدف تحقیقات تجربی گسترده‌ای بوده است که نتایج قابل توجهی را در مورد تأثیر آن بر خواص فیزیکی و مکانیکی به دست داده است. مطالعات متعدد [۱۵، ۱۲-۱۹، ۲۱-۱۷-۲۵] نشان داده‌اند که ورمیکولیت به دلیل ماهیت سبک بودن، جرم‌مخصوص و چگالی ظاهری ملات‌ها را کاهش می‌دهد. از نظر خواص مکانیکی، می‌توان دریافت که وجود ورمیکولیت منبسط‌شده به عنوان جایگزین جزئی سنگدانه، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی ملات را کاهش می‌دهد [۲۶، ۲۳-۲۱، ۱۹، ۱۵، ۱۳، ۱۲]. طبق تحقیقات بیشتر انجام شده توسط پالومار و همکاران [۲۲]، کوکسال و همکاران [۱۲]، کوکسال و همکاران [۲۵، ۱۷]، کوکسال و همکاران [۲۶] رابطه معکوسی بین میزان ورمیکولیت منبسط شده در ملات و رسانایی حرارتی ملات را نشان می‌دهد. افزایش میزان ورمیکولیت منبسط‌شده منجر به کاهش محسوس در رسانایی حرارتی می‌شود که به تخلخل ناشی از افزودن این سنگدانه سبک، نسبت داده می‌شود. این کاهش در رسانایی، پتانسیل ملات حاوی ورمیکولیت منبسط‌شده را برای کاربردهای عایق حرارتی نشان می‌کند. ال-گمال و همکاران [۱۴] اثرات جایگزینی سیمان با ورمیکولیت منبسط‌شده بر مقاومت باقی‌مانده ملات‌ها پس از عملیات حرارتی را بررسی کردند. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که ملات‌های حاوی ۵ درصد ورمیکولیت منبسط‌شده مقاومت بیشتری در برابر دمای

به تفصیل شرح داده شده اند. تمامی این آزمایشات مطابق استاندارد های ذکر شده در هر بخش انجام شده است. در این پژوهش از مواد زیر برای ساخت نمونه ها استفاده شده است: مواد مورد استفاده در این مطالعه برای ساخت ملات‌ها عبارتند از: سیمان پرتلند تیپ دو، نوع $42.5 N$ تهیه شده توسط شرکت سیمان فراز فیروزکوه (فیروزکوه، استان تهران، جمهوری اسلامی ایران)؛ ماسه طبیعی استاندارد مطابق با $ISO 679$ [۲۸] تهیه شده از رودخانه جاجرود و شست‌وشو و سرند در دانشگاه تربیت مدرس تهران، با چگالی 1700 کیلوگرم بر متر مکعب؛ آب شیر و ورمیکولیت معادن شرکت معدنی آسیا با کد شناسایی $VeAsia25 A1$ (یزد، استان یزد، جمهوری اسلامی ایران) استفاده شده است. در شکل ۱ و ویژگی‌های فیزیکی ورمیکولیت منبسط شده مشاهده می‌گردد، به ویژه رنگ قهوه‌ای مایل به زرد و مورفولوژی کرمی شکل براق آن، همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است. شکل ۲، که جزئیات بیشتری از ورمیکولیت منبسط شده را نمایان می‌سازد، ساختار ظریف و لایه‌ای مشخصه اصلی ورمیکولیت می‌باشد که یک ماده معدنی فیلول سیلیکات آبدار است. این دانه‌های ورقه‌ای یا صفحه‌ای با رنگ‌های قهوه‌ای طلایی تا تیره و سطوح براق خود که به دلیل ماهیت میکایی خود نور را منعکس می‌کنند، شناخته می‌شوند. نشانگر مقیاس، مرجعی را ارائه می‌دهد که اندازه ظریف ورقه‌های ورمیکولیت منبسط‌شده را نشان می‌دهد. به طوری که ضخامت هر کدام فقط کسری از میلی‌متر است. چین‌خوردگی پیچیده و آکاردئونی لایه‌ها، نمایانگر فرآیند انبساط است، جایی که ورمیکولیت در معرض دمای بالا قرار می‌گیرد و باعث پوسته‌شدن آن با تبخیر آب درون ماده معدنی می‌شود. این حالت منبسط‌شده، خواص عایق ورمیکولیت و توانایی آن در سبک کردن مخلوط‌های سیمانی را افزایش می‌دهد.

این پژوهش یک مطالعه تجربی دقیق و کامل برای ارائه درک گسترده نسبت به میزان کمی تغییرات پارامترهای مکانیکی ملات سیمان حاوی ورمیکولیت منبسط‌شده بوده و تلاش دارد تحقیقات آتی را که می‌خواهند از خواص منحصر ویژه ورمیکولیت منبسط‌شده در مصالح ساختمانی مدرن بهره ببرند، هموار سازد. این پژوهش در ابتدا با استفاده از ورمیکولیت منبسط شده تولید شده در معادن ایران (شهر یزد) و ارائه‌ی خواص فیزیکی و مکانیکی ملات حاوی این ماده با درصدهای متفاوت فرصت مقایسه با تحقیقات پیشین را که از ورمیکولیت منبسط شده تولید شده در کشور اوکراین بهره برده اند فراهم ساخته و ثابا از نظر طرح اختلاط و نحوه ساخت ملات حاوی ورمیکولیت منبسط شده دیدگاهی کاملاً نوآورانه را ارائه کرده است. همانطور که در بخش نخست این پژوهش مشاهده می‌شود پیشینه تحقیق مرور شده است در بخش دوم ابتدا مواد و طرح و نحوه اختلاط مواد معرفی و نحوه ساخت نمونه ها مفصلاً بررسی گردیده است و سپس آزمایشات انجام شده بر روی نمونه ها به تفصیل آورده شده است. در بخش سوم نتایج این آزمایشات قابل مشاهده می‌باشد و در بخش چهارم نتیجه گیری، تحلیل داده ها و جمع بندی کلی بر روی این نتایج گزارش شده در بخش سوم انجام گردیده است.

۲- مواد و روش ها

این پژوهش با هدف بررسی پارامترهای مکانیکی بر روی ملات سیمان حاوی ورمیکولیت منبسط شده با استفاده از روش آزمایشگاهی صورت پذیرفته است. در این بخش ابتدا مواد مورد استفاده و طرح و نحوه اختلاط آن ها معرفی و چگونگی ساخت نمونه ها، درصدهای مختلف ورمیکولیت منبسط‌شده مورد استفاده در ملات سیمان و نحوه جایگزینی در ملات سیمان بررسی و ارائه گردیده است. سپس آزمایشات صورت گرفته بر روی نمونه‌ها با هدف یافتن پارامترها مکانیکی



شکل ۱- ورمیکولیت منبسط شده مورد استفاده در ساخت ملات



شکل ۲- ساختار ورمیکولیت منبسط شده [۲۳]

که در آن که در آن V_c حجم سیمان، V_w حجم آب، V_s حجم ماسه در طرح اختلاط با سطح جایگزینی صفر، R نسبت جایگزینی به حجم دانه های ورمیکولیت منبسط شده تعریف شده $R = V_{ev}/V_{ns}$ ، که در آن V_{ev} حجم دانه های ورمیکولیت منبسط شده جایگزین شده است، $(V_{ns} \cdot R = V_{ev})$ حجم EVA های جایگزین شده، V_e فضای خالی (منافذ یا حفره های حاوی هوا) است [۲۹]. بنابراین، $R = 0\%$ در معادله (۱) نشان دهنده ملاتی بدون جایگزینی EVA بوده (ملات شاهد) و $R = 100\%$ نشان دهنده ملاتی با جایگزینی کامل EVA از نظر حجم است. در این تحقیق، اثرات سطوح مختلف EVA به عنوان جایگزینی جزئی حجم برای ماسه استاندارد در ملات را بررسی می کنیم. این مطالعه حول یک ملات سنگدانه طبیعی پایه (NAM^3) با نسبت جایگزینی حجم 0% (R)، به عنوان ملات شاهد، ساختار یافته است. سه نسبت جایگزینی مختلف دانه های ورمیکولیت منبسط شده، با افزایش 10% ، 15% و 20% بررسی شده است. پس چهار

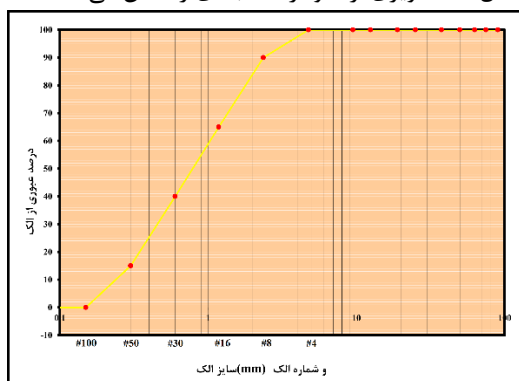
آنالیز EVA نشان می دهد. طبق داده های فنی ارائه شده توسط شرکت معادن آسیا، اجزای اصلی شامل سیلیسیم دی اکسید (SiO_2)، اکسید آهن (Fe_2O_3)، اکسید آلومینیوم (Al_2O_3)، اکسید پتاسیم (K_2O)، اکسید منیزیم (MgO)، اکسید سدیم (Na_2O)، اکسید منگنز (MnO) و دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) است. ترکیبات شیمیایی EVA مقادیر بیشتری از اکسیدهای آهن و پتاسیم را نسبت به آنچه معمولاً انتظار می رود نشان می دهد که می تواند به دلیل شرایط خاص تشکیل ماده معدنی یا فرآیندهای فرآوری این ماده معدنی باشد که ممکن است عناصر خاصی را پرعیار تر نماید.

۱-۲- طرح اختلاط و نحوه ساخت نمونه ها

معادله پیوستگی حجم مخلوط ملات را می توان به صورت زیر در رابطه (۱) بیان شده است:

$$V_c + V_w + V_s(1 - R) + \underbrace{V_s \times R + V_e}_{V_{ev}} = 1 \text{ m}^3 \quad (1)$$

پس از ۲۸ روز تمامی نمونه‌ها در آزمایشگاه آماده سازی نمونه دانشگاه تربیت مدرس با ابعاد مناسب آزمون‌های مختلف مکانیک سنگی و فیزیکی برش داده شده‌اند. آزمون‌های صورت گرفته بر روی این نمونه‌ها به ترتیب آزمون اندازه‌گیری سرعت موج اولتراسونیک p ، آزمون مقاومت فشاری تک محوری (UCS^4)، آزمون مقاومت سه محوری (TCS^5)، آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم برزیلی (BT^6)، آزمون مقاومت بار نقطه ای (PLT^7)، آزمون جذب آب بوده‌اند. شکل ۳، تصویری از نمودار دانه بندی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- منحنی دانه بندی سنگدانه طرح اختلاط مورد استفاده

۲-۲- آزمون مقاومت فشاری تک محوری

همانطور که در بالا بیان گردیده است. پس از برش نمونه‌ها به صورت دستی ابتدا و انتهای نمونه‌ها تسطیح گردیده است تا در هنگام آزمایش از تمرکز تنش جلوگیری به عمل آید [۳۲]. سپس در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس و با دستگاه شرکت سننام آزمون مقاومت فشاری تک محوری انجام گردیده است. برای هر طرح اختلاط ۴ نمونه آماده شده است. برای این آزمون از استاندارد $ASTM D2938$ [۳۳] استفاده گردیده است. در شکل ۴، تصویری از انجام این آزمایش مکانیک سنگ را در دانشگاه تربیت مدرس را میتوان مشاهده نمود.

دسته ملات یا درصد جایگزینی ۰ و ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ تولید شده است. این انتخاب به این دلیل صورت پذیرفت که میزان اولیه ۱۰ درصدی یعنی بین ۰ و ۱۰ و ۱۰ تا ۲۰ مقایسه گردند و دلیل افزایش ۵ درصدی بین ۱۰ تا ۱۵ و ۱۵ تا ۲۰ نیست امکان مقایسه ای بهتر را فراهم می‌آورد. نسبت آب به سیمان در ۰/۸۳ می‌باشد به گونه ای که ابتدا ورمیکولیت منبسط شده را در آب به وزن اشباع رسانده و در ملات دیگر آب جدیدی وارد نشده است. جرم سیمان مورد استفاده ۴۴۰ گرم می‌باشد و نسبت وزنی سیمان به ماسه استاندارد نیز ۰/۴۴ می‌باشد. طرح اختلاط از ماسه طبیعی استاندارد مطابق با $ASTM 1260$ [۳۰] تهیه شده است. نمونه‌های هر دسته توسط یک برچسب ID شناسایی می‌شوند: $EVM\#$ ، که در آن '#' نشان دهنده درصد خاص دانه ورمیکولیت منبسط شده گنجانده شده است که با مقدار R نشان داده می‌شود. به عنوان مثال، یک نمونه با ۲۰٪ دانه های ورمیکولیت منبسط شده به عنوان $EVM20$ برچسب گذاری می‌شود.

قبل از ساخت نمونه، ماسه استاندارد و ورمیکولیت منبسط شده به مدت ۴۸ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد درون آون آزمایشگاهی قرار گرفتند تا از تأثیر آب منفذی در مواد اولیه جلوگیری به عمل آید. فرآیند و زمان بندی ساخت ملات به دقت با رعایت استانداردهای $ASTM C305$ [۳۱] انجام شده است. در ابتدا، آب شیر با استفاده از یک میکسر مکانیکی با سرعت چرخش پایین به مدت ۳۰ ثانیه با سیمان ترکیب شده است. پس از آن، مخلوطی از ماسه استاندارد و EVA ، که سنگدانه ریز را تشکیل می‌دادند، به تدریج طی ۳۰ ثانیه در حالی که سرعت پایین حفظ شده بود، اضافه گردیدند. پس از توقف اختلاط، ملات به مدت ۹۰ ثانیه استراحت داده شد. پس از این مکث مجدداً یک دوره اختلاط ۶۰ ثانیه‌ای با سرعت مناسب صورت پذیرفت. که سبب گردید ملات به قوام مناسب برسد. پس از این امر در ۱۰ عدد قالب استوانه ای پلاستیکی به قطر ۵۴ میلی متر و طول ۱۴۰ میلی متر ملات ریخته شد. برای هر ۴ طرح اختلاط این فرآیند صورت گرفته است. تمامی نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج گردیده و به مدت ۲۸ روز درون حوضچه آب فرآیند عمل آوری شان صورت گرفته است.

Brazilian Test⁶
Point Load Test⁷

Uniaxial Compressive Strength⁴
Triaxial compressive strength⁵

همان طور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، چهار نمونه آماده شده برای تست مقاومت فشاری تک محوری با طرح اختلاط دارای ۲۰ درصد ورمیکولیت آورده شده است.



شکل ۶- نمونه های دارای ۲۰ درصد ورمیکولیت قبل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری

از رابطه (۲) مقاومت فشاری تک محوری بدست می آید.

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (2)$$

که در آن σ_c مقاومت فشاری تک محوری برحسب مگاپاسکال MPa بوده و F حداکثر بار وارده برحسب مگانیوتون MN و همچنین A سطح مقطع اولیه نمونه برحسب متر مربع m^2 بوده است.

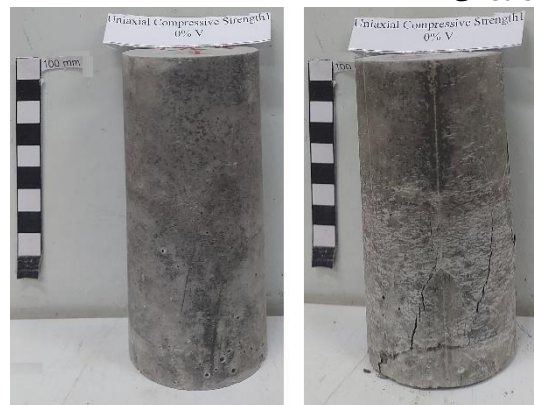
۳-۲- آزمون مقاومت فشاری سه محوری

همانند آزمون مقاومت فشاری تک محوری که در بالا بیان گردیده است. پس از برش نمونه ها بوسیله ساب با دست ابتدا و انتهای نمونه ها تسطیح گردیده و سپس در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس و با دستگاه شرکت سنتام و سلول هوک موجود در آزمایشگاه فوق الذکر تست مقاومت فشاری سه محوری انجام گردیده است. برای هر طرح اختلاط حداقل ۳ نمونه آزمون شده است. برای این آزمون از استاندارد $ASTM D2664$ [۳۴] استفاده گردیده است. برای نمونه شکل ۷، تصویر قبل و بعد نمونه شماره یک از طرح اختلاط ۱۰ ورمیکولیت قرار داده شده است. که در آن الف قبل از انجام آزمون و ب پس از انجام آزمون می باشد.



شکل ۴- فرآیند انجام آزمون مقاومت فشاری تک محوری روی نمونه حاوی ۲۰ درصد ورمیکولیت

برای مثال شکل ۵، تصویر قبل و بعد نمونه شماره یک از طرح اختلاط فاقد ورمیکولیت (نمونه شاهد) قرار داده شده است. که در آن الف قبل از انجام آزمون و ب پس از انجام آزمون می باشد.



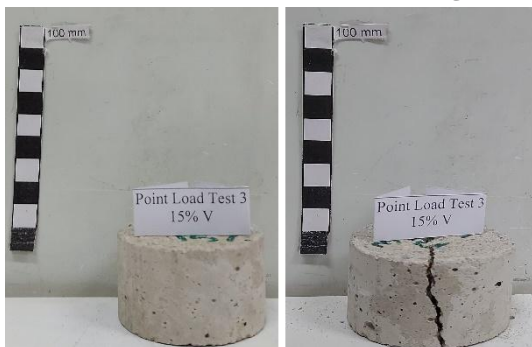
شکل ۵- نمونه آزمون مقاومت فشاری از طرح اختلاط فاقد ورمیکولیت

مقاومت بار نقطه ای صورت گرفته بر روی نمونه ای با ۲۰ درصد ورمیکولیت مشاهده می گردد.



شکل ۹- نحوه و فرآیند انجام آزمایش بار نقطه ای

شکل ۱۰، تصویر قبل و بعد از آزمایش نمونه ای با ۱۵ درصد ورمیکولیت را نشان می‌دهد. که در آن تصویر سمت چپ تصویر قبل از تست و تصویر سمت راست تصویر پس از این آزمون می باشد.

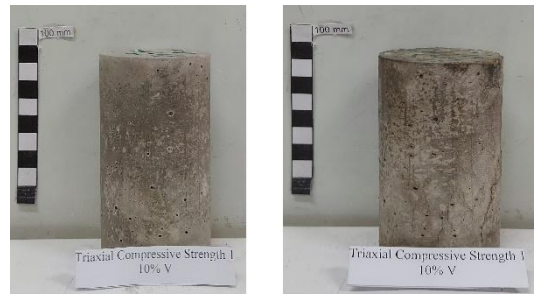


شکل ۱۰- تصویر قبل و بعد از آزمون مقاومت بار نقطه ای برای نمونه ای با ۱۵ درصد ورمیکولیت

برای تعیین مقاومت کششی و محاسبات مربوطه آن از رابطه (۳) استفاده گردیده است.

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (3)$$

که در آن I_s شاخص بارنقطه ای برحسب مگاپاسکال MPa بوده و P بار گسیختگی برحسب نیوتون N و همچنین



شکل ۷- نمونه آزمون مقاومت فشاری سه محوری از طرح اختلاط با ۱۰ درصد ورمیکولیت

شکل ۸، تصویری از نحوه انجام آزمایش مقاومت فشاری سه محوری بر روی نمونه‌ها را در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس نشان می‌دهد.



شکل ۸- تصویر انجام آزمایش مقاومت فشاری سه محوری در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس از این آزمایش میزان چسبندگی (c)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و مقاومت فشاری سه محوری حاصل می گردد.

۲-۴- آزمون بار نقطه‌ای

برای هر طرح اختلاط حداقل ۴ نمونه برای آزمون مقاومت بار نقطه ای آماده سازی گردید، این آزمون با دستگاه جک شرکت هایکو هند در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس انجام گردید و این آزمون طبق استاندارد *ASTM D5731* [۳۵] صورت پذیرفته است. این آزمایش به صورت محوری انجام گرفته است. در شکل ۹، فرآیند و نحوه انجام آزمایش

آزمون مقاومت بار نقطه ای پیش بینی شده است. رابطه (۷) بیانگر همین پیش بینی می باشد [۳۶].

$$\sigma_c = (14 + 0.175 D) I_s (50) \quad (7)$$

که در آن D برحسب میلی متر می باشد.

۲-۵- آزمون مقاومت کششی غیرمستقیم^۸

(روش برزیلی)

برای هر طرح اختلاط حداقل ۴ نمونه برای آزمون برزیلی انتخاب گردید و این آزمون طبق روش پیشنهادی *ASTM D3967* [۳۷] انجام گردیده است. در شکل ۱۱، تصویری از نحوه انجام روش برزیلی و نمونه را درون فک آزمایش برزیلی مشاهده می گردد.

D_e قطر معادل مغزه برحسب میلی متر mm بوده است. که برای آزمایش محوری از رابطه (۴) حاصل می گردد.

$$D_e^2 = \frac{4WD}{\pi} \quad (4)$$

که در آن W قطر نمونه برحسب میلی متر mm و D نیز ضخامت نمونه برحسب میلی متر mm می باشد.

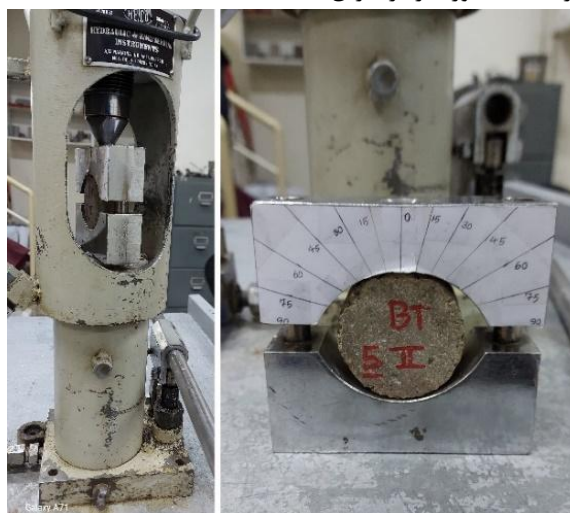
$I_s(50)$ شاخص مقاومت بار نقطه ای تصحیح شده بر حسب مگاپاسکال می باشد که رابطه (۵) مستخرج می گردد.

$$I_s(50) = F \times I_s \quad (5)$$

در این رابطه F ضریب تصحیح بوده و خود از رابطه (۶) محاسبه می گردد.

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad (6)$$

هوک و براون مقدار مقاومت فشاری تک محوری را از طریق



شکل ۱۱- تصویری از فرآیند انجام آزمایش برزیلی برای نمونه ای با ۲۰ درصد ورمیکولیت

در شکل ۱۲، تصویر قبل و بعد نمونه ای با ۱۰ درصد ورمیکولیت را نشان می دهد.



شکل ۱۲- تصویر قبل و بعد آزمون تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم

شده اند. در این آزمایش از استاندارد *ASTM C642-21* [۴۰] بهره گیری شده است. خروجی این آزمون در بخش نتایج در دسترس قرار دارد.

۳- نتایج

پس از انجام آزمون های فوق الذکر و پردازش داده ها نتایج آزمون ها به شرح زیر بیان گردیده است:

در جدول ۱ نتایج آزمون مقاومت بار نقطه ای آورده شده است. در این جدول σ_c مقاومت فشاری تک محوری بر حسب مگاپاسکال (MPa) می باشد. و همچنین $I_s(50)$ شاخص مقاومت بار نقطه ای بر حسب مگاپاسکال (MPa) می باشد. تمامی نتایج مستخرج از روابط ۳ تا ۷ است.

جدول ۱- نتایج آزمون مقاومت بار نقطه ای

انحراف از معیار	$I_s(50)$	انحراف از معیار	σ_c	Sample ID
0/031751	3/1	3/103996	65/51	V 0
0/005636	1/41	6/414099	29/4	V 10
0/000728	1/20	2/221701	23/84	V 15
0/016697	0/70	3/091368	13/85	V 20

برای بررسی آماری دقیق داده های جدول ۱ با استفاده از روش آماری $ANOVA^9$ یک طرفه^{۱۰} و با در نظر گرفتن مقدار آلفا برابر ۰/۰۵ برای فاکتور مقاومت بار نقطه ای عدد F برابر ۲۵۰/۲۵ بدست آمد و مقدار F بحرانی نیز ۴/۰۶۶ می باشد و برای مقاومت فشاری نیز این اعداد به ترتیب F برابر ۴۱۰/۰۶۹ بدست آمد و مقدار F بحرانی نیز ۴/۰۶۶ می باشد که این بیانگر رد شدن فرض صفر بودن میانگین ها می باشد. جدول ۱ نشان می دهد که با افزودن مقدار ورمیکولیت منبسط شده مقاومت کاهش می یابد. در شکل ۱۴ این کاهش به شکل ملموس تری قابل مشاهده می باشد.

برای تعیین مقاومت کششی و محاسبات مربوطه آن از رابطه (۸) استفاده گردیده است.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Dt} \quad (8)$$

که در آن σ_t مقاومت کششی بر حسب مگاپاسکال MPa بوده و P بار گسیختگی بر حسب نیوتون N و همچنین D قطر نمونه بر حسب میلی متر mm و t هم ضخامت نمونه در مرکز و بر حسب میلی متر mm بوده است.

۶-۲- آزمون اندازه گیری سرعت موج اولتراسونیک P

برای هر طرح اختلاط حداقل ۱۴ نمونه تحت آزمون قرار گرفته اند. این آزمون تحت استاندارد *ASTM C1383-23* [۳۸] انجام گردیده است. این آزمون با دستگاه *Pundit Plus* شرکت *CNS Farnell* انجام گردیده است. شکل ۱۳، نحوه انجام این آزمایش را نشان می دهد [۳۹].



شکل ۱۳- انجام آزمون اندازه گیری سرعت موج P

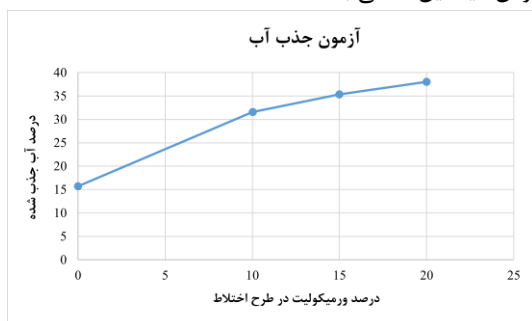
۷-۲- آزمون جذب آب

در این آزمون تعداد ۴ نمونه پس از سن ۲۸ روزگی در آب قرار داده شده و پس از گذشت ۲۴ ساعت کاملاً اشباع گردیده اند. سپس وزن نمونه ها اندازه گیری شده و پس از آن به مدت ۴۸ ساعت در آون با دما ۱۰۵ درجه سانتی گراد قرار داده

جدول ۳- نتایج آزمون جذب آب

Sample ID	درصد جذب آب	انحراف از معیار
V 0	15/73	0/009014
V 10	31/57	1/166149
V 15	35/3	0/257993
V 20	38/03	3/68684

برای بررسی آماری دقیق داده های جدول ۳ با استفاده از روش آماری ANOVA یک طرفه و با در نظر گرفتن مقدار آلفا برابر ۰/۰۵ عدد F برابر ۱۳۴/۴۰ بدست آمد و مقدار F بحرانی نیز ۴/۷۵ می باشد که این بیانگر رد شدن فرض صفر بودن میانگین ها می باشد.



شکل ۱۵- نتایج آزمون جذب آب

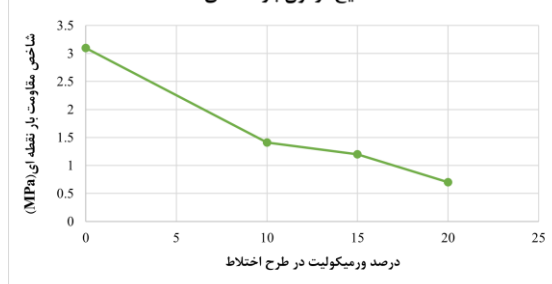
نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری در جدول ۴ قابل مشاهده می باشد. تمامی این نتایج میانگین تکرار ۴ باره هر آزمون برای طرح اختلاط های چهارگانه می باشند.

جدول ۴- نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری

Sample ID	تک محوری	انحراف از معیار
V 0	34/89	1/2761
V 10	7/68	0/1004
V 15	5/81	0/2679
V 20	2/4	0/0564

برای بررسی آماری دقیق داده های جدول ۴ با استفاده از روش آماری ANOVA یک طرفه و با در نظر گرفتن مقدار آلفا برابر ۰/۰۵ عدد F برابر ۲۰۷/۶۰ بدست آمد و مقدار F بحرانی نیز ۳/۵۸ می باشد که این بیانگر رد شدن فرض صفر بودن میانگین ها می باشد. برای درک بهتر تفاوت میان

نتایج آزمون بار نقطه ای



شکل ۱۴- نتایج آزمون بار نقطه ای

در جدول ۲ نتایج آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم (روش برزیلی) آورده شده است. از رابطه ۸ برای بدست آوردن نتایج این آزمون بهره گیری شده است.

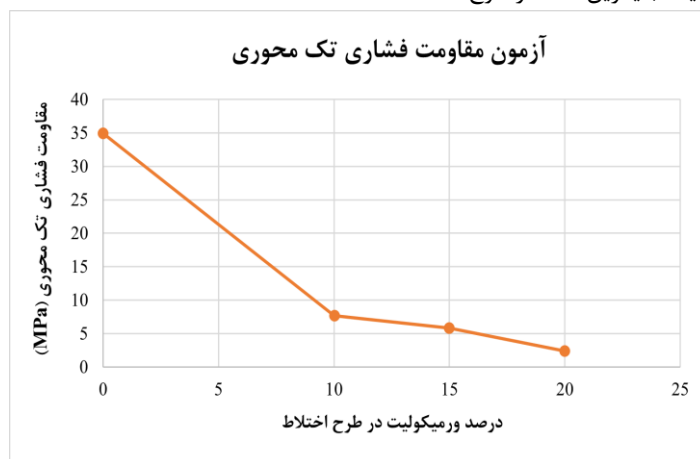
جدول ۲- نتایج آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم (روش برزیلی)

Sample ID	σ_t	انحراف از معیار
V 0	4/86	0/078385
V 10	2/74	0/120524
V 15	2/43	0/168467
V 20	1/35	0/059417

برای بررسی آماری دقیق داده های جدول ۲ با استفاده از روش آماری ANOVA یک طرفه و با در نظر گرفتن مقدار آلفا برابر ۰/۰۵ عدد F برابر ۷۴/۵۹ بدست آمد و مقدار F بحرانی نیز ۳/۸۶ می باشد که این بیانگر رد شدن فرض صفر بودن میانگین ها می باشد. مشاهده می گردد که میزان مقاومت کششی نمونه ها با افزایش میزان ورمیکولیت منبسط شده کاهش داشته است.

نتایج آزمون جذب آب که در جدول ۳ و در شکل ۱۵ قابل مشاهده است حاکی از این مسئله نی باشد که با افزایش میزان ورمیکولیت منبسط شده در طرح اختلاط ملات، میزان جذب آب نیز افزایش داشته است.

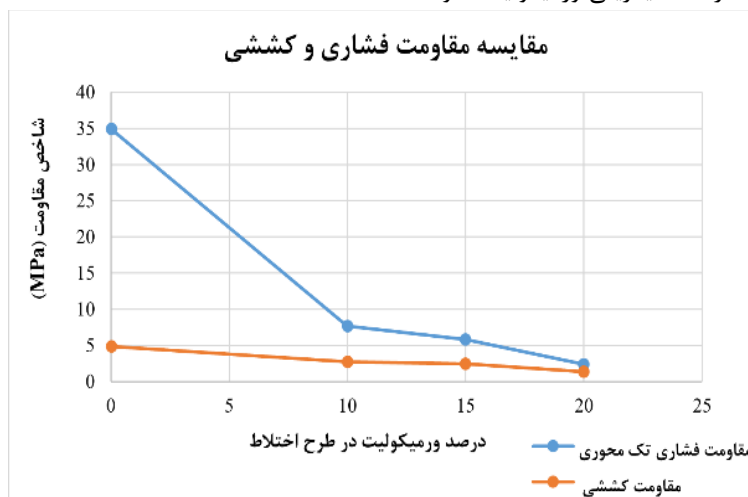
مقاومت تک محوری با درصد های مختلف نمودار این مقاومت ها بر حسب درصد ورمیکولیت جایگزین شده در طرح اختلاط در شکل ۱۶ قابل مشاهده است.



شکل ۱۶- نتایج آزمون مقاومت فشاری تک محوری

چندانی در مقایسه با حالت قبل در مقاومت فشاری تک محوری مشاهده نمی‌گردد و علت آن این مطلب می‌باشد که این سه دسته از نمونه‌ها سنگ دانه‌هایی با خاصیت یکسان دارند و تنها میزان این سنگدانه‌ها متفاوت است. حال باتوجه به دست‌یابی به هردو سری از نتایج مقاومت فشاری و مقاومت کششی در شکل ۱۷ مقایسه‌ای از روند این دو مقاومت آورده شده است.

علت سقوط کاهش شدید مقاومت فشاری تک محوری را می‌توان در خواص ورمیکولیت منبسط‌شده جستجو نمود. همانطور که در شکل ۲ قابل مشاهده است این ماده همانند یک آکاردئون باز می‌باشد که خواص اصلی آن وزن بسیار سبک و تخلخل بالا می‌باشد که خود باعث کاهش شدید مقاومت تک محوری نسبت به نمونه شاهد می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۶ و جدول ۴ قابل مشاهده است میان نمونه‌هایی با ۱۰ و ۱۵ و ۲۰ درصد جایگزینی ورمیکولیت تفاوت

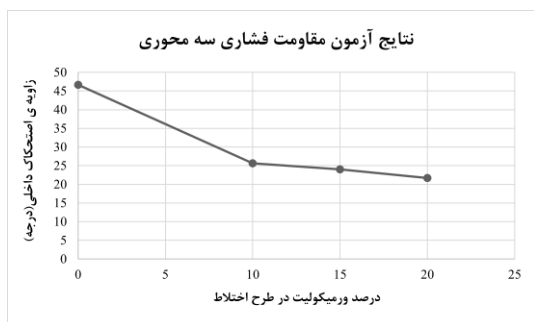


شکل ۱۷- مقایسه مقاومت فشاری و کششی

ی متفاوت ۱/۵ و ۱ و ۱/۵ مگاپاسکال اندازه‌گیری شده است. ارزیابی این نتایج با استفاده از نرم افزار *RocData* ورژن ۳/۰۱۳ صورت گرفته است. این نتایج بر اساس معیار موهر-

در شکل ۱۷ استنباط می‌گردد که نسبت کاهش مقاومت فشاری به مقاومت کششی ۱/۵۷ برابر کاهش یافته است. نتایج آزمون مقاومت سه محوری برای سه فشار همه جانبه

باشد.



شکل ۱۹-نسبت تغییرات چسبندگی به میزان ورمیکولیت منبسط شده

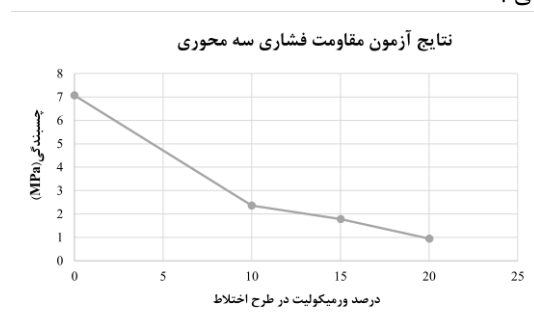
همانطور که در شکل ۱۹ مشاهده می گردد، میزان چسبندگی در نمونه با ۱۰ درصد جایگزینی ورمیکولیت منبسط شده نسبت به نمونه شاهد افت شدید ۶۶/۶ درصدی را تجربه کرده است. ولی در میان سه نمونه ی دارای ورمیکولیت این روند بسیار کند تر شده است به طوری که تفاوت چسبندگی نمونه ها با ۱۰ درصد ورمیکولیت منبسط شده با ۲۰ درصد ورمیکولیت منبسط شده تنها ۲۰ درصد است. این مسئله به دلیل افزایش تخلخل ناشی از حضور ورمیکولیت منبسط شده در سنگدانه نمونه ها می باشد با افزایش تخلخل شدید نسبت به نمونه های شاهد چسبندگی کاهش شدیدی را تجربه کرده است در صورتی که به ازای افزایش به میزان مشابه ورمیکولیت منبسط شده در سنگ دانه نمونه ها یک سوم حالت قبل چسبندگی کاهش یافته است. دوایر موهر برای هر چهار حالت متفاوت از طرح اختلاط در شکل ۲۰ قابل مشاهده می باشد.

کولمب بدست آمده است. تمامی این نتایج در جدول ۵ گزارش گردیده است.

جدول ۵- نتایج آزمون مقاومت فشاری سه محوری

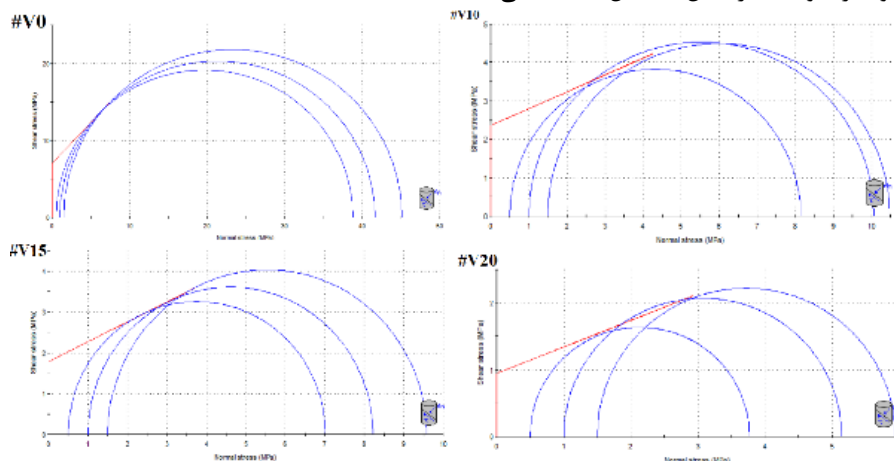
Sample ID	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مقاومت فشاری تک محوری (Mpa)
V 0	7/067	46/617	35/53
V 10	2/359	25/664	7/219
V 15	1/783	23/989	5/706
V 20	0/943	21/684	2/78

برای درک شهودی بهتر در شکل ۱۸ نسبت مقایسه ای چسبندگی نسبت به مقادیر مختلف ورمیکولیت قابل مشاهده می باشد.



شکل ۱۸- نسبت تغییرات چسبندگی به میزان ورمیکولیت منبسط شده

میزان تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نسبت به میزان ورمیکولیت موجود در نمونه ها در شکل ۱۹ قابل مشاهده می



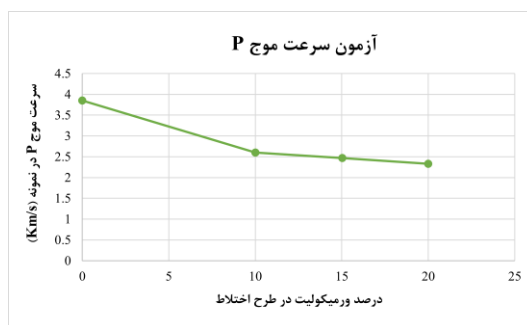
شکل ۱۹- دوایر موهر در هر سه حالت مختلف

نتایج آزمون سنجش سرعت موج اولتراسونیک P در جدول ۶ قابل مشاهده می باشد.

جدول ۶- نتایج آزمون سرعت موج اولتراسونیک P

Sample ID	سرعت موج P (Km/s)	انحراف از معیار
V 0	3/85	0/291365
V 10	2/60	0/036316
V 15	2/47	0/005052
V 20	2/33	0/01128

برای درک شهودی بهتر مقایسه نتایج بدست آمده برحسب میزان ورمیکولیت منبسط شده در طرح اختلاط در شکل ۲۱ نمودار مقایسه ای آورده شده است.



شکل ۲۰- نمودار مقایسه ای مقادیر مختلف سرعت در نمونه ها

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از بخش سوم، در این بخش جمع بندی کلی از نتایج به شرح زیر می باشد:

- با افزایش میزان ورمیکولیت منبسط شده در نمونه ها، میزان چسبندگی نمونه های بدست آمده به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. به گونه ای که با افزایش ۱۰ درصدی ورمیکولیت منبسط شده میزان چسبندگی ۶۶/۶ درصد کاهش یافته است. ولی با افزایش مجدد ۱۰ درصدی یعنی از ۱۰ به ۲۰ تنها ۲۰/۴ درصد چسبندگی کاهش داشته است.
- با افزایش میزان ورمیکولیت منبسط شده در نمونه ها، مقدار مقاومت فشاری تک محوری اکیدا کاهش می یابد. به نحوی که با افزودن ۱۰ درصدی ورمیکولیت منبسط شده مقاومت فشاری تک

محوری شدیدا و به مقدار ۸۸ درصد کاهش می یابد. درحالی که با افزایش از ۱۰ به ۲۰ درصد ورمیکولیت منبسط شده ۱۵/۴ درصد مقاومت فشاری تک محوری کاهش را تجربه می نماید.

با افزایش میزان ورمیکولیت منبسط شده در نمونه ها، مقدار زاویه ی اصطکاک داخلی اکیدا کاهش می یابد. به گونه ای که با افزایش ۱۰ درصدی ورمیکولیت منبسط شده میزان زاویه ی اصطکاک داخلی ۴۵ درصد کاهش یافته است. ولی با افزایش مجدد ۱۰ درصدی یعنی از ۱۰ به ۲۰ تنها ۸/۵ درصد زاویه ی اصطکاک داخلی کاهش داشته است.

با افزایش میزان ورمیکولیت منبسط شده در نمونه ها، مقدار شاخص مقاومت بار نقطه ای کاهش می یابد. به گونه ای که با افزایش ۱۰ درصدی ورمیکولیت منبسط شده میزان شاخص مقاومت بار نقطه ای ۵۴/۴ درصد کاهش یافته است. و با افزایش مجدد ۱۰ درصدی یعنی از ۱۰ به ۲۰ میزان ۲۱/۵ درصد شاخص مقاومت بار نقطه ای کاهش داشته است.

با افزایش میزان ورمیکولیت منبسط شده در نمونه ها، مقاومت کششی اکیدا کاهش می یابد. به نحوی که در ابتدا با افزایش میزان درصدی ورمیکولیت منبسط شده ۴۳/۷ درصد میزان مقاومت کششی کاهش یافت سپس با افزایش ۱۰ درصدی مجدد ورمیکولیت منبسط شده از ۱۰ به ۲۰ درصد میزان مقاومت کششی ملات ۲۹/۳ درصد مجددا کاهش یافت.

با افزایش میزان ورمیکولیت منبسط شده در نمونه ها، سرعت حرکت موج P در نمونه کاهش می یابد. به گونه ای که به ازای تغییر ۱۰ درصدی میزان ورمیکولیت منبسط شده ۳۲/۵ درصد از سرعت موج کاسته می گردد این خود بیانگر جذب موج و جاذب بودن انرژی می باشد که مانع یا کاهنده سرعت موج اولتراسونیک P می باشد. علت این مهم این است که با افزایش میزان ورمیکولیت

با افزایش میزان ورمیکولیت منبسط می باشد، می توان نتیجه گرفت که در سیکل ذوب و یخبندان تعداد ترک ها و سرعت رشد ترک ها در حالت یخبندان روند صعودی خواهد داشت. از نتایج آزمون سرعت موج و آزمون جذب آب می توان نتیجه گیری نمود که از ملات حاوی ورمیکولیت منبسط شده می توان در امور غیر سازه ای همچون عایق سازی در مقابل عبور امواج (صدا) و حرارت و ... استفاده نمود.

سپاس گذاری

از جناب آقای مهندس شیخانی کارشناس مسئول محترم آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تربیت مدرس و جناب آقای مهندس جواد خداوردی و جناب مهندس علیرضا دولتشاهی که در انجام مراحل آزمایشات به صورت فیزیکی و ذهنی یاریگرمان بودند کمال تشکر را داریم.

منبسط شده در ملات سیمان، تخلخل افزایش یافته و در نتیجه امواج برای عبور از این فضاهای متخلخل به دلیل اینکه از محیط جامد تغییر محیط داده و سپس وارد محیط سیال می گردند از سرعت آنان کاسته می گردد. پس در نتیجه خاصیت جذب امواج را نشان می دهد. که می تواند برای آکوستیک کردن فضا های ساختمانی کابری داشته باشد.

• با افزایش میزان ورمیکولیت منبسط شده در نمونه ها، میزان جذب آب نمونه ها افزایش می یابد. به نحوی که به ازای ۱۰ درصد افزایش ورمیکولیت میزان جذب آب ۱۰۰/۷ درصد افزایش می یابد و به ازای افزایش ۵ درصدی میزان ورمیکولیت جذب آب ۲۴/۴ درصد افزایش را نشان می دهد. این مسئله بیانگر عایق رطوبت بودن نیز می تواند قلمداد گردد. این مسئله بیانگر این خواهد بود که اگر در شرایط ذوب و یخبندان ملات سیمان حاوی ورمیکولیت قرار گیرد. با توجه به میزان جذب آب بالا که خود ناشی از افزایش تخلخل ملات سیمان

۵- منابع

- [1] Záleská, M., Pavlíková, M., Vyšvařil, M., & Pavlík, Z. (2021). Effect of aggregate and binder type on the functional and durability parameters of lightweight repair mortars. *Sustainability*, 13(21), 11780.
- [2] Hassanpour, M., Shafiqh, P., & Mahmud, H. B. (2012). Lightweight aggregate concrete fiber reinforcement—A review. *Construction and Building Materials*, 37, 452-461.
- [3] Agrawal, Y., Gupta, T., Sharma, R., Panwar, N. L., & Siddique, S. (2021). A comprehensive review on the performance of structural lightweight aggregate concrete for sustainable construction. *Construction Materials*, 1(1), 39-62.
- [4] Xiong, B., Falliano, D., Restuccia, L., Di Trapani, F., Demartino, C., & Marano, G. C. (2023). Mortar with substituted recycled pet powder: Experimental characterization and data-driven strength predictive models. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(9), 04023312.
- [5] Zhang, M. H., & Gjørsv, O. E. (1991). Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete. *Materials Journal*, 88(2), 150-158.
- [6] Muñoz-Ruipérez, C., Rodríguez, A., Gutiérrez-González, S., & Calderón, V. (2016). Lightweight masonry mortars made with expanded clay and recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 118, 139-145.
- [7] Kai, M. F., Hou, D. S., Sanchez, F., Poon, C. S., & Dai, J. G. (2023). Nanoscale insights into the influence of seawater (NaCl) on the behavior of calcium silicate hydrate. *The Journal of Physical*

- Chemistry C, 127(18), 8735-8750.
- [8] Corinaldesi, V., Nardinocchi, A., & Donnini, J. (2014). Lightweight aggregate mortars for sustainable and energy-efficient building. *Advanced Materials Research*, 980, 142-146.
- [9] Güneysi, E., Gesoğlu, M., Altan, I., & Öz, H. Ö. (2015). Utilization of cold-bonded fly ash lightweight fine aggregates as a partial substitution of natural fine aggregate in self-compacting mortars. *Construction and Building Materials*, 74, 9-16.
- [10] Kai, M. F., Li, G., Yin, B. B., & Akbar, A. (2023). Aluminum-induced structure evolution and mechanical strengthening of calcium silicate hydrates: An atomistic insight. *Construction and Building Materials*, 393, 132120.
- [11] Dadd, L., Xie, T., Bennett, B., & Visintin, P. (2024). Exploring the physical and mechanical characteristics of multi-generation recycled aggregate concrete at equivalent compressive strengths. *Journal of Cleaner Production*, 451, 141965.
- [12] Koksai, F., Gencel, O., & Kaya, M. (2015). Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 88, 175-187.
- [13] Mo, K. H., Lee, H. J., Liu, M. Y. J., & Ling, T. C. (2018). Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 179, 302-306.
- [14] El-Gamal, S. M. A., Hashem, F. S., & Amin, M. S. (2012). Thermal resistance of hardened cement pastes containing vermiculite and expanded vermiculite. *Journal of Thermal analysis and Calorimetry*, 109(1), 217-226.
- [15] Köksai, F., Serrano-López, M. A., Şahin, M., Gencel, O., & López-Colina, C. (2015). Combined effect of steel fibre and expanded vermiculite on properties of lightweight mortar at elevated temperatures. *Materials and Structures*, 48, 2083-2092.
- [16] Koksai, F., Sahin, Y., & Gencel, O. (2020). Influence of expanded vermiculite powder and silica fume on properties of foam concretes. *Construction and Building Materials*, 257, 119547.
- [17] Koksai, F., Mutluay, E., & Gencel, O. (2020). Characteristics of isolation mortars produced with expanded vermiculite and waste expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 236, 117789.
- [18] Assis Neto, P. C. D., Sales, L. P. B., Oliveira, P. K. S., Silva, I. C. D., Barros, I. M. D. S., Nóbrega, A. F. D., & Carneiro, A. M. P. (2023). Expanded vermiculite: a short review about its production, characteristics, and effects on the properties of lightweight mortars. *Buildings*, 13(3), 823.
- [19] Assis Neto, P. C. D., Sales, L. P. B., Oliveira, P. K. S., Silva, I. C. D., Barros, I. M. D. S., Nóbrega, A. F. D., & Carneiro, A. M. P. (2023). Expanded vermiculite: a short review about its production, characteristics, and effects on the properties of lightweight mortars. *Buildings*, 13(3), 823.
- [20] Cintra, C. L. D., Paiva, A. E. M., & Baldo, J. B. (2014). Masonry mortars containing expanded vermiculite and rubber aggregates from recycled tires-Relevant properties. *Cerâmica*, 60, 69-76.
- [21] Schackow, A., Effting, C., Folgueras, M. V., Güths, S., & Mendes, G. A. (2014). Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent.

- Construction and building materials, 57, 190-197.
- [22] Silva, L. M., Ribeiro, R. A., Labrincha, J. A., & Ferreira, V. M. (2010). Role of lightweight fillers on the properties of a mixed-binder mortar. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 19-24.
- [23] Palomar, I., Barluenga, G., & Puentes, J. (2015). Lime–cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance. *Construction and Building Materials*, 75, 306-314.
- [24] Xu, Y., Ye, F., Xiong, B., & Demartino, C. (2024). Mortar with natural light-weight expanded vermiculite aggregate: Physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 440, 137226.
- [25] Koksall, F., del Coz Diaz, J. J., Gencel, O., & Alvarez Rabanal, F. P. (2013). Experimental and numerical analysis of new bricks made up of polymer modified-cement using expanded vermiculite. *Comput. Concr*, 12(3), 319-335.
- [26] Xu, B., Ma, H., Lu, Z., & Li, Z. (2015). Paraffin/expanded vermiculite composite phase change material as aggregate for developing lightweight thermal energy storage cement-based composites. *Applied Energy*, 160, 358-367.
- [27] Tie, T. S., Mo, K. H., Alengaram, U. J., Kaliyavaradhan, S. K., & Ling, T. C. (2022). Study on the use of lightweight expanded perlite and vermiculite aggregates in blended cement mortars. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(8), 3612-3631.
- [28] International Organization for Standardization (ISO). (2009). *Cement, Test Methods, Determination of Strength*. ISO 679.
- [29] Lai, D., Demartino, C., & Xiao, Y. (2022). High-strain rate compressive behavior of fiber-reinforced rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 319, 125739.
- [30] ASTM, ASTM C1260: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), American Society for Testing Materials, 2023.
- [31] ASTM, ASTM C305: Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, American Society for Testing Materials, 2023.
- [۳۲] شیرین آبادی، رضا، موسوی، احسان و طهماسبی، محمد علی. (۱۴۰۰). تحلیل آزمایشگاهی و عددی به منظور ارزیابی تأثیر هندسه و اندازه مغزه بر مقاومت فشاری تک محوره بتن. *نشریه علمی-پژوهشی مکانیک سنگ*, ۵(شماره ۴)، ۶۳-۷۵.
- [33] ASTM, A. (1986). *Standard test method of unconfined compressive strength of intact rock core specimens*. ASTM Publication.
- [34] ASTM, ASTM D2664-04: *Standard Test Method for Triaxial Compressive Strength of Undrained Rock Core Specimens Without Pore Pressure Measurements (Withdrawn 2005)*, American Society for Testing Materials, 2017.
- [35] ASTM, ASTM D5731-16: *Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications*, American Society for Testing Materials, 2017.
- [۳۶] هوک و براون (۱۳۷۶)، سازه های زیر زمینی در سنگ (ترجمه احمد فهیمی فر)، آزمایشگاه فنی مکانیک خاک وزارت راه و

ترابری، تهران.

- [37] ASTM Committee D-18 on Soil and Rock. (2016). Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens. ASTM International.
- [38] ASTM, ASTM C1383-23:Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, American Society for Testing Materials, 2024.
- [39] Moradian, Z. A., & Behnia, M. (2009). Predicting the uniaxial compressive strength and static Young's modulus of intact sedimentary rocks using the ultrasonic test. *International Journal of Geomechanics*, 9(1), 14-19.
- [40] ASTM C642, A. (2013). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. ASTM, ASTM International.



Evaluation of the Mechanical Properties of Cement Mortar Containing Expanded Vermiculite Aggregate

Mohammad Hossein Mokhtarzadeh¹; Ehsan Taheri^{1*}

1- Department of Rock Mechanics, Faculty of Mining and Materials, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 14 July 2024 Accepted: 21 September 2024
(*Corresponding author: e_taheri@modares.ac.ir)

Keywords

Lightweight Mortars
Mechanical Properties
Expanded Vermiculite
Mortar with Expanded Vermiculite
Aggregate

Final English Extended Abstract

One of the latest and most significant topics in civil engineering, materials science, and rock mechanics is the use of natural and mineral aggregates as a partial replacement for cement or aggregates in cement mortar or concrete. The objective of this approach is to enhance the properties of concrete or mortar by incorporating these materials. One such material that has recently gained attention is Expanded Vermiculite. Given its insulating properties against waves and heat, the use of mortar with expanded vermiculite additives has become increasingly common to improve efficiency. However, a comprehensive study on the mechanical properties of this type of mortar has

not yet been conducted. The present study investigates the mechanical properties of cement mortar containing expanded vermiculite, including uniaxial compressive strength, cohesion, internal friction angle, tensile strength, water absorption, and P-wave velocity. This research was carried out in the Rock Mechanics Laboratory at Tarbiat Modares University. The results indicate that with an increase in vermiculite content, most mechanical parameters (except for water absorption) significantly decrease.

Introduction

Lightweight aggregates, such as expanded vermiculite (EVA), enhance mortar performance by reducing density and improving thermal and acoustic insulation. Research shows that incorporating EVA decreases compressive and flexural strength while significantly lowering thermal conductivity, making it effective for insulation. Additionally, EVA improves fire resistance and sound absorption, particularly in the 2000–5000 Hz range. However, a comprehensive study covering all aspects of EVA mortar is lacking, highlighting the need for further research on mechanical properties of mortar with expanded vermiculite.

Methodology and Approaches

The mechanical property tests were conducted at the Rock Mechanics Laboratory of Tarbiat Modares University. The following tests were performed according to standard procedures:

- Uniaxial Compressive Strength (UCS): Conducted using a Santam testing machine with four samples per mix design, following ASTM D2938.
- Triaxial Compressive Strength: Performed with a Santam machine and a Hoek cell, testing at least three samples per mix design, based on ASTM D2664.
- Point Load Test: Conducted with a Haico hydraulic jack on at least four samples per mix design, following ASTM D5731.
- Indirect Tensile Strength (Brazilian Test): Performed on at least four samples per mix design according to ASTM D3967.



- P-wave Velocity Measurement: Conducted on at least 14 samples per mix design using a Pundit Plus device from CNS Farnell, following ASTM C1383-23.
- Water Absorption Test: Four samples were immersed in water for 24 hours after 28 days of curing, then dried at 105°C for 48 hours, based on ASTM C642-21.

These standardized tests ensure accurate assessment of the mechanical properties of expanded vermiculite mortar.

Results and Conclusions

Based on the findings from Section 3, the overall conclusions are as follows:

- With an increase in the amount of expanded vermiculite in the samples, cohesion significantly decreases.
- With an increase in the amount of expanded vermiculite in the samples, uniaxial compressive strength decreases considerably.
- With an increase in the amount of expanded vermiculite in the samples, the internal friction angle strictly decreases.
- As the amount of expanded vermiculite in the samples increases, the point load resistance index decreases.
- With an increase in the amount of expanded vermiculite in the samples, tensile strength markedly declines.
- With an increase in the amount of expanded vermiculite in the samples, the P-wave velocity decreases, indicating the wave absorption property of the material.
- With an increase in the amount of expanded vermiculite in the samples, water absorption increases.

The conclusion suggests that mortar containing expanded vermiculite is only suitable for non-structural applications, such as insulation against sound and heat transmission.
