

## بررسی تأثیرات مثبت ولاستونیت و میکروسیلیس بر خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن کامپوزیتی در محیط معمولی و سولفات

یعقوب محمدی \*

استاد گروه مهندسی عمران دانشگاه محقق اردبیلی.

ستار شفیعی

دانشجوی ارشد مهندسی عمران - گرایش سازه، دانشگاه محقق اردبیلی.

### چکیده

در این پژوهش اثرات هم‌افزایی ولاستونیت و میکروسیلیس به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان بر خواص مکانیکی و نفوذپذیری در دو محیط معمولی و سولفات (با غلظت‌های ۵٪ و ۱۰٪ سولفات منیزیم) ارزیابی شد. در مجموع، ۲۸۸ نمونه مکعبی ساخته شده و در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه، آزمایش‌های مقاومت فشاری، نفوذپذیری، مدول الاستیسیته دینامیکی و جذب آب انجام شد. ولاستونیت در درصدهای ۷، ۱۵ و ۲۰ درصد و میکروسیلیس در درصدهای ۴ و ۷ درصد جایگزین سیمان شد. نتایج نشان داد که ترکیب ۷٪ میکروسیلیس و ۲۰٪ ولاستونیت بیشترین کاهش نفوذپذیری (تا ۶۳/۴۶٪) و جذب آب (تا ۱۳/۳۹٪) را به‌ویژه در محیط‌های خورنده سولفات ایجاد کرد. همچنین، مخلوط‌های حاوی ۷/۵٪ ولاستونیت و ۷٪ میکروسیلیس بهبود قابل‌توجهی در مقاومت فشاری نشان داد که تا ۱۷/۱۸٪ افزایش داشت. تحلیل رگرسیون نیز همبستگی قوی بین نفوذپذیری، جذب آب و مقاومت فشاری را در تمامی محیط‌ها نشان داد ( $R^2 > 0.90$ ). همچنین فرایندهای تولید ساده ولاستونیت، آن را تبدیل به ماده همسو با زیست محیط کرده است.

واژه‌های کلیدی: محیط سولفات، میکروسیلیس، ولاستونیت، افزودنی‌های بتن، نفوذپذیری، درصد جذب آب.

\* نویسنده مسئول: yaghoubm@uma.ac.ir

## ۱- مقدمه

روزه ۱۲/۲٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش یافت. Balotiya و همکاران [۱۷] با جایگزینی ۱۰٪ ولاستونیت به جای سیمان و ۱۰٪ خاکستر کف به جای ماسه، مقاومت فشاری را ۱۰/۱۲٪ درصد افزایش داد. علاوه بر خواص مکانیکی بتن، خصوصیات دوام آن مانند نفوذپذیری نیز باید سنجیده شود. زیرا که نفوذ آب و محلول‌های مخرب می‌تواند آسیب‌های جدی را وارد کند. از این رو ارزیابی نفوذ آب به بتن [۱۸] به همراه آزمایشات جذب آب از اهمیت بالایی برخوردار است [۱۹]. Kalla و همکارانش [۲۰] با جایگزینی ولاستونیت در بازه ۲۵-۵ درصد، باعث کاهش ۲۷/۵ درصدی نفوذپذیری شد. Wang و همکاران [۲۱] جایگزینی ۵-۱۰ درصد ولاستونیت مقاومت فشاری و دوام بتن را بهبود داده و با تراکم ریزساختار، عملکرد بهتری نسبت به OPC در برابر خوردگی نشان می‌دهد.

با مقایسه نتیجه ادبیات گذشته در کاربرد تک جزئی و دو جزئی، مشاهده شد که اثرات مثبت ولاستونیت می‌تواند در ترکیب با سایر مواد مکمل سیمانی در بهبود خواص مکانیکی بتن تشدید یابد. بنابراین در پژوهش حاضر از ترکیب میکروسیلیس و ولاستونیت طبیعی استفاده شده است. نوآوری این پژوهش، استفاده از میکروسیلیس و ولاستونیت برای ارزیابی نفوذپذیری آن برای اولین بار در محیط سولفات‌ها می‌باشد. همچنین برای بررسی تأثیرات محیط خوردنده سولفات‌ها، از ۲ غلظت ۵ و ۱۰ درصد وزنی استفاده شد. در ادامه، آزمایشات غیر مخرب جذب آب و مدول الاستیسیته دینامیکی به همراه آزمایشات مقاومت فشاری و نفوذپذیری در سنین ۲۸ و ۹۰ روزگی انجام شد. همچنین مقادیر بهینه ولاستونیت و میکروسیلیس بر اساس نفوذپذیری و مقاومت فشاری، از تحلیل‌های رگرسیون خطی و به دست آوردن R2 آن‌ها، به دست آمد.

## ۲- روش شناسی

## ۲-۱- مصالح مورد استفاده

درشت‌دانه استفاده شده از نوع شکسته‌ی روستای گیلده اردبیل بود. حداکثر قطر شن مورد استفاده ۱۹ میلی‌متر، با وزن مخصوص ۲/۷۵ گرم بر سانتی متر مکعب و ماسه با قطر حداکثر ۴/۷۵ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲/۴ گرم بر سانتی متر مکعب مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از سیمان پرتلند پوزولانی کارخانه سیمان اردبیل به عنوان چسباننده اصلی با وزن مخصوص ۳۱۳۰ کیلوگرم بر

کاربرد بتن به عنوان یک ماده کامپوزیتی با مزیت‌های فرایند تولید آسان، فراوانی منابع اولیه و قیمت مناسب، باعث گسترش آن در صنعت شده است که نزدیک به ۲۰۰ سال است که استفاده می‌شود [۱]. با این حال، با استفاده گسترده از بتن، مصرف انرژی و آلودگی محیط زیست اجتناب‌ناپذیر است. اگرچه تولید بی‌رویه آن سبب آلودگی‌های زیست محیطی شده است. طبق آخرین آمار تا سال ۲۰۱۷، تولید سیمان به ۴٫۷ میلیارد تن رسیده است [۲]. این روند باعث افزایش CO<sub>2</sub>، NO<sub>x</sub> و SO<sub>3</sub> شده است [۳، ۴]. از این رو، تامین رشد ساخت و ساز و حفظ محیط زیست جزء اولویت‌های اصلی شده است. استفاده از مواد مکمل سیمانی و سایر روش‌ها به دلیل سازگاری با محیط زیست و افزایش خواص مکانیکی و دوام بتن تبدیل به اولویت‌های تحقیقاتی شده‌اند [۵]. ولاستونیت با ساختارهای کریستالی سوزنی، یک ماده معدنی متاسیلیکات کلسیم طبیعی است که سازگاری خوبی با محیط زیست دارد [۶]. پودر ولاستونیت با توجه به افزایش خواص مکانیکی بتن [۷] در جایگزینی با بخشی از سیمان، می‌تواند عملکرد بتن سنتی را بهبود بخشیده و بر اقتصاد نیز تأثیر مثبت بگذارد، همچنین با کاهش سیمان مصرفی مقدار CO<sub>2</sub> را کاهش دهد [۸-۱۰]. بنابراین، کاربردهای پودر ولاستونیت در زمینه ساخت و ساز عمرانی توجه فزاینده‌ای را از سوی محققان به خود جلب کرده است. فروانی این ماده در هند، چین، فنلاند، مکزیک و ایالات متحده که در سال ۲۰۱۰ تولید جهانی آن در حدود ۵۴۰،۰۰۰ تن برآورد شده بود، باعث افزایش توجه پژوهشگران در جهت استفاده از این ماده برای انجام ساخت و ساز پایدار و سبز شده است [۱۱].

Ren و همکاران [۱۲] در پژوهش خود با حضور محیط سولفات‌ها، به ترکیب بهینه ۵٪ ولاستونیت به همراه ترمولیت و الیاف بازالت کوتاه دست یافتند. Mathur و همکاران [۱۳] نیز با استفاده از ۲۰٪ خاکستر بادی در جایگزینی با سیمان و ۱۰٪ جایگزینی ولاستونیت با ماسه، به ۲/۵۷٪ کاهش جذب آب رسیدند. طبق تحقیقات Yücel و Özcan [۱۴] و Öz HÖ [۱۵] با استفاده از ولاستونیت طبیعی با درصد‌های ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ در جایگزینی با سیمان، نشان دادند که مقدار ۳ درصد جایگزینی باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود. Mohiuddin و همکاران نیز [۱۶] با ترکیب ۱۵٪ ولاستونیت با ۲۰٪ سرباره کوره آهن‌گدازی، مقاومت فشاری ۲۸

جدول ۳- ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس [۲۴]

ترکیبات تشکیل دهنده	درصد
SiO <sub>2</sub>	۹۱/۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲/۱
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۶
CaO	۱/۳
MgO	۱/۳
Na <sub>2</sub> O	۰/۴
K <sub>2</sub> O	۰/۸
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	کم از ۰/۰۱
SO <sub>3</sub>	کم از ۰/۰۱
CL	کم از ۰/۰۱

جدول ۴- منیزیم سولفات خشک (MgSO<sub>4</sub>) [۲۵]

شکل ظاهری	بودر یا کریستال سفید رنگ بدون بو
رنگ	سفید
چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	۲/۶۶
میزان حلالیت (g/l)	۳۶
میزان آهن (درصد)	۰/۰۰۱
میزان کلراید (درصد)	۰/۰۰۲
دمای تخریب (°C)	۱۲۴

## ۲-۲- طرح اختلاط

در این پژوهش، میزان نفوذپذیری و مقاومت فشاری بتن در ۳ محیط (معمولی، سولفاته با غلظت ۵٪ و ۱۰٪) بررسی شد. ولاستونیت با درصدهای ۷/۵، ۱۵ و ۲۰ و میکروسیلیس با درصدهای ۴ و ۷ با جایگزینی سیمان استفاده شد. تعداد ۱۴۴ نمونه مکعبی برای آزمایش مقاومت فشاری و ۱۴۴ نمونه برای آزمایش نفوذپذیری ساخته شد. همچنین از نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴ و میزان روان کننده ۱/۵٪ در همه طرح‌ها استفاده شد. طرح‌های اختلاط مطابق استاندارد ACI-211 در جدول ۵ ذکر شده است. نام‌گذاری طرح‌ها به این صورت است که عدد اول نشان دهنده ردیف، حرف دوم نشان دهنده محیط عمل‌آوری و اندیس بعد آن غلظت محیط عمل‌آوری را نشان می‌دهد. حرف M نشان‌دهنده میکروسیلیس به همراه درصد جایگزینی با سیمان و حرف W نشان‌دهنده ولاستونیت به همراه درصد جایگزینی با سیمان است. به عنوان مثال، 5-S5-M7-W20، طرح اختلاط پنجم که در محیط سولفاته با غلظت ۵٪ عمل‌آوری شده و دارای ۷٪ میکروسیلیس به همراه ۲۰٪ ولاستونیت در جایگزینی با سیمان است.

مترمکعب استفاده شد که مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سیمان [۲۲]

ترکیبات	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>
درصد	۲۲/۰۵	۶۴/۵۹	۵/۰۴	۳/۴۷	۱/۷۳

بسته ۲۵ کیلویی ولاستونیت که توسط شرکت Wolkerm India (Kemolit) Ltd تولید شده که به صورت پودری است و ترکیبات تشکیل دهنده آن مطابق جدول ۲ است. وزن مخصوص ۲/۹ گرم بر سانتی مترمکعب است.

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی ولاستونیت [۲۳]

ترکیبات	درصد
SiO <sub>3</sub>	۴۹
CaO	۴۷
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰/۴۳
MnO	۰/۲۹
MgO	۰/۲
Na <sub>2</sub> O	۰/۰۲
K <sub>2</sub> O	۰/۱۱



شکل ۱- ولاستونیت پودری

میکروسیلیس مورد استفاده در این پژوهش به صورت پودری با وزن مخصوص ۲۰۵ کیلوگرم بر مترمکعب، تولید شده توسط شرکت بنا بنیان زیست فناوری مورد استفاده قرار گرفته است که ترکیبات تشکیل دهنده آن طبق جدول ۳ ذکر شده است. جهت ساخت محیط سولفاته از سولفات منیزیم پودری که توسط شرکت شیمی دارویی نوترون تولید شده است با مشخصات مطابق با جدول ۴ استفاده شد.

جدول ۵- طرح اختلاط ها

نام طرح	ماسه (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	سیمان (کیلوگرم)	ولاستونیت (درصد سیمان)	میکروسیلیس (درصد سیمان)
1-W-Control	۷۲۷	۱۰۲۰	۴۷۵	۰	۰
2-W-M7	۷۲۷	۱۰۲۰	۴۴۱/۷۵	۰	۷
3-W-M7-W7.5	۷۲۷	۱۰۲۰	۴۰۶/۱۲۵	۷/۵	۷
4-W-M7-W15	۷۲۷	۱۰۲۰	۳۷۰/۵	۱۵	۷
5-W-M7-W20	۷۲۷	۱۰۲۰	۳۴۶/۷۵	۲۰	۷
6-W-M4	۷۲۷	۱۰۲۰	۴۵۶	۰	۴
7-W-M4-W7.5	۷۲۷	۱۰۲۰	۴۲۰/۳۷۵	۷/۵	۴
8-W-M4-W15	۷۲۷	۱۰۲۰	۳۸۴/۷۵	۱۵	۴

### ۳-۲- ساخت نمونه‌ها

۲۴ ساعت نمونه‌ها داخل قالب ماندند. بعد از قالب‌گیری، نمونه‌ها طبق شکل ۳ به مخازن عمل‌آوری با دمای  $23 \pm 2$  درجه منتقل شدند. با توجه به تبخیر آب مخازن، برای جلوگیری از تغییر PH آب در درازمدت، غلظت محیط به صورت هفتگی کنترل شده است.

نصف شن و ماسه به صورت یکجا داخل میکسر ریخته شد و سپس در حین اختلاط، کل سیمان اضافه گردید و عمل اختلاط ۱ دقیقه انجام شد. سپس نصف آب اضافه شد و اختلاط ۲ دقیقه انجام شد. و در مرحله آخر، نصف آب، میکروسیلیس و ولاستونیت همراه با روان‌کننده به مخلوط اضافه می‌شود و اختلاط ۵ دقیقه دیگر نیز انجام می‌شود تا ذرات در ترکیب با بتن به صورت همگن درآیند.



شکل ۳- عمل‌آوری نمونه‌ها در محیط معمولی و سولفات‌ه ۵ و ۱۰ درصد

### ۴-۲- قالب‌گیری نمونه‌ها

بعد از انجام اختلاط، مخلوط‌ها طبق شکل ۲ به قالب‌های  $150 \times 150 \times 150$  میلی‌متر مکعبی ریخته می‌شوند.



شکل ۲- قالب‌های استفاده شده در پژوهش

### ۳- آزمایش‌های انجام شده

#### ۳-۱- آزمایش نفوذپذیری بتن

برای اندازه‌گیری نفوذپذیری آب در بتن، معمولاً از استانداردهای BS EN 12390-8 [۲۶] و DIN 1048-5 [۲۷] استفاده می‌شود. در استاندارد BS EN تا قطر ۲۵ میلی‌متر، قالب‌های مکعبی ۱۵۰ میلی‌متر به کار می‌روند. در این پژوهش، طبق استاندارد BS-EN-12390-8 از قالب‌های مکعبی  $150 \times 150 \times 150$  میلی‌متر در سن ۲۸ و ۹۰ روز استفاده شده است، به طوری که نمونه‌ها طبق شکل ۴ به مدت ۳ روز تحت فشار آب

### ۵-۲- عمل‌آوری نمونه‌ها

بعد از ریختن مخلوط‌ها در قالب، برای جلوگیری از تبخیر رطوبت نمونه‌ها، سطح همه نمونه‌ها با ورق‌های پلاستیکی پوشانده شد و تا

پژوهش، اندازه‌گیری جذب آب طبق استاندارد [۲۹] C642 ASTM انجام شده است. نمونه‌های مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) وزن‌کشی شده و سپس در اون با دمای ۱۱۰ سانتیگراد به مدت ۷۲ ساعت خشک می‌شوند که در این حالت وزن خشک (dry) حاصل می‌شود. و در نهایت با استفاده از رابطه ۲ درصد جذب آب محاسبه می‌شود.

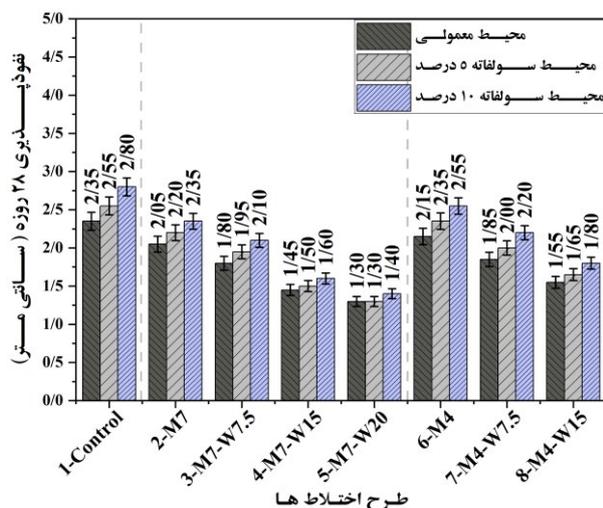
$$WA\% = (m_{ssd} - m_{dry})/m_{dry} \quad \text{رابطه ۲}$$

#### ۴- نتایج و یافته‌های پژوهش

در این بخش با بررسی تأثیر افزودنی‌های معدنی میکروسیلیس و ولاستونیت بر خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری و خواص دوام مانند نفوذپذیری، تأثیرات و برهمکنش مواد بر خواص بتن ارزیابی شد. همچنین با عمل‌آوری نمونه‌ها در سه محیط و تأثیرات آن بر دوام نیز، در مقابل محیط‌های خورنده سنجیده شدند.

#### ۴-۱- نتایج نفوذپذیری بتن

نتایج آزمایش نفوذپذیری ۲۸ و ۹۰ روزه برای نمونه‌های بتن کامپوزینی طبق شکل ۵ و ۶ ارائه شده است. این دو شکل کاهش نفوذپذیری مخلوط‌ها نسبت به نمونه کنترل را نشان می‌دهد. مخلوط 5-M7-W20 دارای کمترین مقدار نفوذپذیری در ۲۸ و ۹۰ روزگی با ۴۴/۶۸٪ و ۵۶/۱۰٪ کاهش در محیط معمولی بود. اثر مواد پوزولانی با همان ترتیب زمان عمل‌آوری در محیط سولفات‌ها ۵٪ برابر ۴۰/۹۱٪ و ۵۰٪ در محیط سولفات‌ها ۱۰٪ برابر ۵۰٪ و ۶۳/۴۶٪ بود.



شکل ۵- نفوذپذیری مخلوط‌ها در ۲۸ روزگی

۰/۵ نیوتن بر میلی‌مترمربع قرار می‌گیرند. در نهایت با قرائت حداکثر عمق نفوذ آب از سه نمونه و محاسبه میانگین آن‌ها میزان نفوذپذیری اندازه‌گیری می‌شود.



شکل ۴- دستگاه آزمایش نفوذپذیری بتن

#### ۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری بتن بر روی نمونه‌های مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری، با دستگاه آزمایش فشاری و مطابق با استاندارد ASTM C39 انجام شد.

#### ۳-۳- آزمایش مدول الاستیسیته دینامیکی

این آزمایش براساس استاندارد [۲۸] ASTM C597 انجام می‌گیرد. برای افزایش دقت و جلوگیری از بروز خطا، دو عدد یونولیت دارای سوراخ به قطر قطعه سونیسکوپ و به مرکزیت ابعاد نمونه در کناره آن قرار می‌گیرد.

$$E_D = [V^2 \times Q(1+n)(1-2n)]/[1-n] \quad \text{رابطه ۱}$$

$$V = L/T$$

V سرعت انتقال پالس در بتن (km/s)

L طول مسیر انتقال (km)

T مدت زمان انتقال پالس از میان بتن (s)

ED مدول الاستیسیته دینامیکی

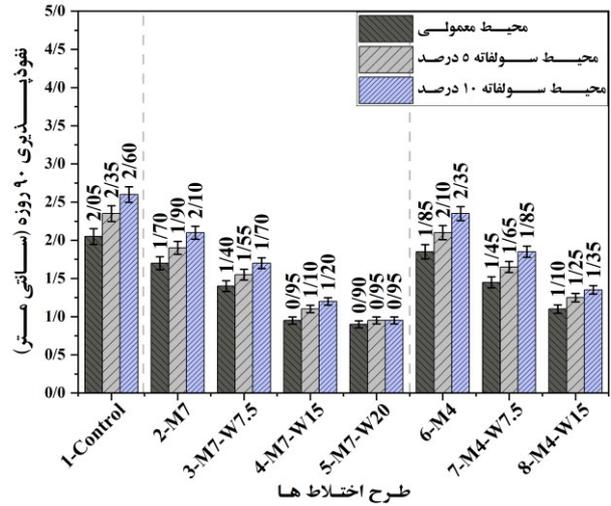
Q دانسیته بتن بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب

n نسبت پواسون برابر ۰/۱۵

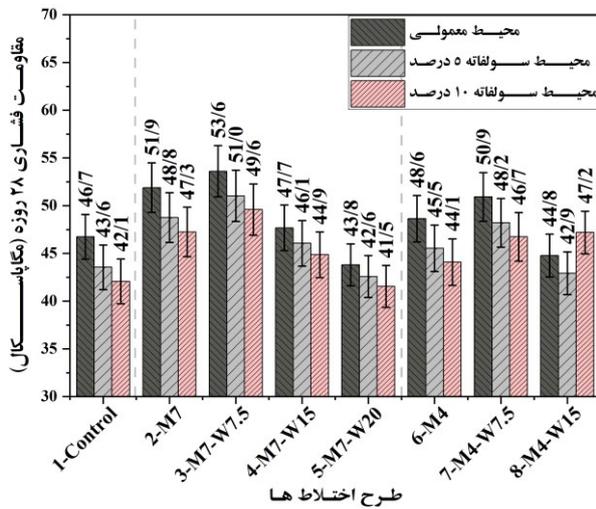
#### ۳-۴- آزمایش درصد جذب آب

یکی از مشخصه‌های بتن، جذب آب آن می‌باشد که بیانگر خلل و فرج و پیوستگی و خصوصیات ریزساختاری آن است. در این

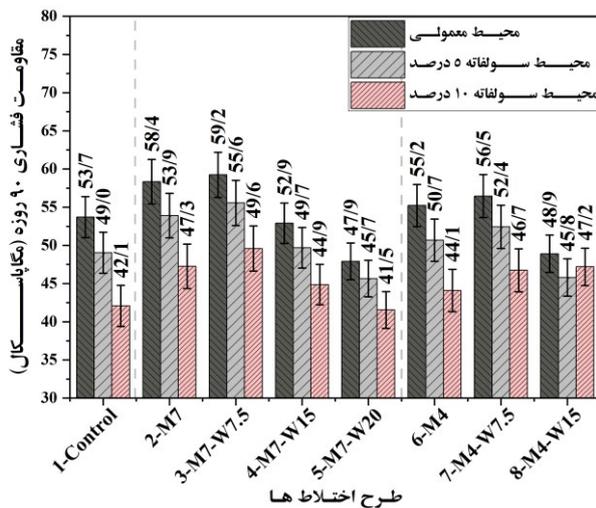
پژوهش Kalla، نفوذپذیری در تمامی مخلوط‌های حاوی ولاستونیت نسبت به نمونه شاهد روند نزولی دارد و در ۲۵٪ جایگزینی، نفوذپذیری ۲۷/۳۴٪ کاهش دارد در حالی که مقاومت فشاری در ۹۰ روزگی با ۲۵٪ ولاستونیت، دارای ۸/۹۴٪ افت مقاومت شده است. برای نتیجه‌گیری بهتر از مخلوط‌ها، با تفسیر داده‌های مخلوط‌های شماره ۱، ۲، ۳، ۴، ۶ و ۷ بین مقاومت فشاری و نفوذپذیری آن‌ها، رگرسیون خطی در ۲ دسته با سنین ۲۸ و ۹۰ روز بررسی شد. مخلوط‌های ۱، ۲ و ۳ در سن ۲۸ و ۹۰ روزگی دارای R2 به ترتیب برابر با ۸۹/۷٪ و ۷۹/۱٪. مخلوط‌های ۱، ۶ و ۷ نیز دارای R2 به ترتیب برابر با ۹۹/۲٪ و ۸۸/۱٪ بود.



شکل ۶- نفوذپذیری مخلوط‌ها در ۹۰ روزگی



شکل ۷- مقاومت فشاری نمونه‌ها در ۲۸ روزگی



شکل ۸- مقاومت فشاری نمونه‌ها در ۹۰ روزگی

### ۳-۴- نتایج مدول الاستیسیته دینامیکی بتن

همانطور که پارامتر نفوذپذیری نشان داد، با افزایش ولاستونیت، میزان نفوذپذیری هم کاهش یافت. از این رو با کاهش نفوذپذیری،

با مقایسه نتایج این پژوهش با نتایج Balotiya و همکارانش [۱۷] که از ترکیب خاکستر کف با جایگزینی ماسه و ولاستونیت با جایگزینی سیمان با درصد‌های ۱۰٪+۱۰٪ برای کاهش نفوذپذیری استفاده شد که منجر به کاهش ۲۵٪ درصدی شد. همچنین ولاستونیت ۱۰٪، نفوذپذیری را ۸/۹۳٪ کاهش داد که مشابه با نتایج این پژوهش مخلوط 6-W-M4 در ۲۸ روزگی نفوذپذیری را ۸/۵۱٪ کاهش داد. از این لحاظ می‌توان جایگزینی ۴٪ میکروسیلیس با ۱۰٪ ولاستونیت را برابر دانست.

### ۴-۲- نتایج مقاومت فشاری بتن

نتایج مقاومت فشاری مطابق شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. مخلوط 3-M7-W7.5 بیشترین مقاومت فشاری در ۲۸ و ۹۰ روزگی در محیط معمولی به ترتیب، ۱۴/۷٪ و ۱۰/۳۰٪ افزایش را کسب کرده است. در ۲۸ و ۹۰ روزگی و محیط‌های سولفات ۵٪ و ۱۰٪ این روند افزایش به ترتیب ۱۷/۱۸٪ و ۱۳/۳۲٪ و در محیط سولفات ۵٪، ۱۰٪ به ترتیب ۶/۱٪ و ۳/۳۷٪ است.

طبق پژوهش Kalla و همکارانش [۲۰] در زمینه جایگزینی ولاستونیت در بازه‌ی ۵ تا ۲۵ درصد، در بازه‌ی ۵-۱۰ درصد روند افزایشی و در بازه‌ی ۱۵-۲۵ درصد، روند کاهشی بود. بیشترین مقدار افزایش در مقاومت فشاری ۹۰ روزه با جایگزینی ۱۰٪ ولاستونیت، ۳/۲۳٪ بود. همچنین باید افزود که ولاستونیت ۱۵٪ مقاومت فشاری را ۱/۱۰٪ کاهش داده است، در صورتی که در پژوهش ما با افزودن ۷٪ میکروسیلیس در ترکیب با ۱۵٪ ولاستونیت، مقاومت فشاری ۹۰ روزه ۱/۴۹٪ کاهش داشته است. همچنین لازم به ذکر است که در

با بررسی الگوی رفتاری مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته دینامیکی، ارتباط نزدیکی بین آن‌ها یافت شد. به طوری که با استفاده از رگرسیون خطی بین این ۲ پارامتر، میزان  $R^2$  در محیط معمولی برابر ۹۸/۰۵٪ و در محیط سولفاته ۹۵/۲٪ و در محیط سولفاته ۱۰٪ برابر مقدار ۹۹/۰۳٪ است. لازم به ذکر است که در محیط سولفاته ۵٪ با حذف ۲ مخلوط ۴ و ۸ توانستیم دقت ۹۵/۲٪ را کسب کنیم.

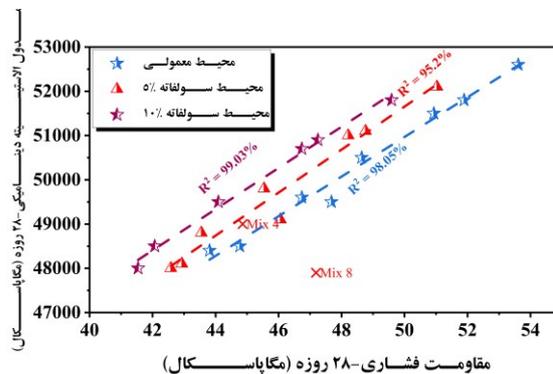
#### ۴-۴- نتایج جذب آب بتن

مطابق شکل ۱۲ و ۱۳ نتایج جذب آب برای بتن حاوی میکروسلیس و ولاستونیت ارائه شده است. ولاستونیت تمایل طبیعی به دفع آب دارد. محققان مواد ترکیب شده با ولاستونیت را برای جذب آب آزمایش کرده‌اند؛ این (جذب آب) به طور غیرمستقیم به ما نشان می‌دهد که ماتریس سیمان-ولاستونیت چقدر متراکم است. اگر جذب آب زیاد باشد، به این معنی است که منافذ زیادی در ماتریس وجود دارد. پس نتیجه گرفته می‌شود که ماتریس سبک است [۳۰].

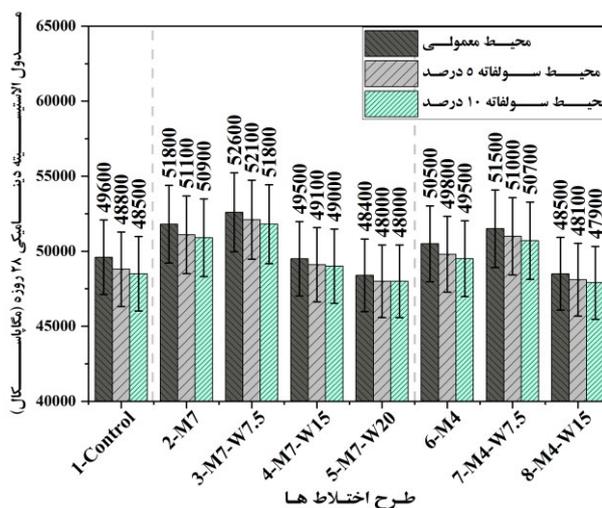
Ransinchung و همکاران [۳۱] همه عوامل جذب آب نشان دادند که بالاترین میزان جایگزینی مخلوط سیمان با ۱۵٪ ولاستونیت و ۷/۵٪ میکروسلیس، کمترین مقادیر را در بین سایر مخلوط‌ها دارد. کمترین مقدار را می‌توان به تراکم ماتریس هیدراتاسیون (هیدراتاسیون و ذرات ریز پر کننده منافذ) و ناپیوستگی منافذ نسبت داد. هر چند که، Mathur و همکاران [۳۲] نیز در بررسی‌های خود به تأثیر ولاستونیت در تغییر شکل منافذ اشاره کردند. بطوریکه شکل منافذ به صورت قیفی یا شیشه مرکب تغییر کرده و باعث اختلاف فشار می‌شود در نتیجه مانع عبور آب و مایعات می‌شود. طبق پژوهش Ransinchung، کمترین میزان جذب برای نمونه‌ی حاوی ۲۰٪ خاکستر بادی به جای سیمان و ۱۰٪ ولاستونیت به جای ماسه به مقدار ۲۲/۲۴٪ کاهش مشاهده شد. در پژوهش Mathur نیز، با جایگزینی ۷/۵٪ میکروسلیس و ۱۵٪ ولاستونیت مه مشابه مخلوط‌های این پژوهش نیز می‌باشد، ۴۸/۳۰٪ کاهش جذب آب مشاهده شد.

در این پژوهش نیز مخلوط 4-W-M7-W15 دارای ۱۲/۲۴٪ کاهش و بیشترین کاهش به مقدار ۱۳/۳۹٪ در مخلوط 5-W-M7-W20 مشاهده شد. بطور کلی ولاستونیت و میکروسلیس در

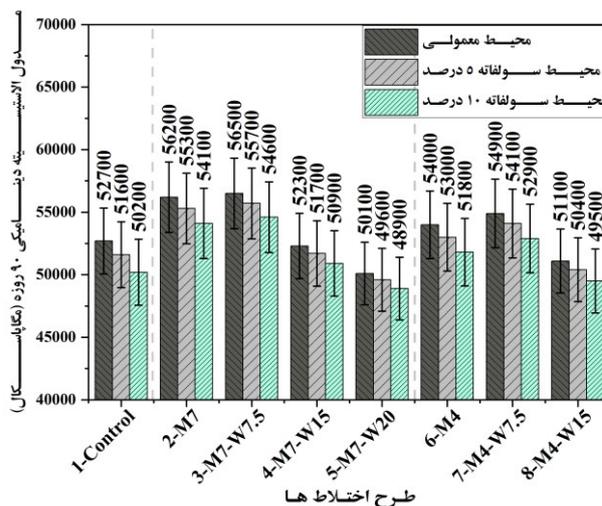
میزان تراکم ماتریس بتن نیز افزایش می‌یابد. این عامل می‌تواند در سرعت عبوری امواج اولتراسونیک و افزایش تراکم ماتریس بتن موثر باشد. نتایج مدول الاستیسیته بتن کامپوزیتی حاوی میکروسلیس و ولاستونیت مطابق شکل ۹، ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۹- رگرسیون بین مدول الاستیسیته دینامیکی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مکاپاسکال)



شکل ۱۰- مدول الاستیسیته دینامیکی ۲۸ روزه



شکل ۱۱- مدول الاستیسیته دینامیکی ۹۰ روزه

ضایعات صنعتی سنتز کرد. دلگرم کننده است که برخی از محققان در حال حاضر مواد زائد مانند سرباره کوره بلند، گرد و غبار مرمر، خاکستر پوسته برنج و اکسی کلرید زیرکونیوم را به عنوان مواد اولیه برای تولید ولاستونیت مصنوعی در آزمایشگاه به کار گرفته‌اند [۱۴، ۳۳].

ولاستونیت سنتز شده در آزمایشگاه نه تنها مشکل بهره‌برداری گسترده از منابع طبیعی ولاستونیت را حل می‌کند، بلکه به طور مؤثر ضایعات صنعتی را نیز بازیافت می‌کند. در آینده، تولید صنعتی پودر ولاستونیت در مقیاس بزرگ با موفقیت محقق خواهد شد. به طور کلی، استفاده از ولاستونیت برای جایگزینی جزئی سیمان به عنوان چسباننده، نه تنها می‌تواند در فرایند تولید سیمان در مصرف منابع و انرژی صرفه‌جویی کند، بلکه هزینه‌های تولید و نگهداری کامپوزیت‌های سیمانی را نیز کاهش می‌دهد، بنابراین مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی قابل توجهی دارد.

#### ۵- بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش با بررسی تأثیرات ولاستونیت و میکروسیلیس برای ارزیابی نفوذپذیری، مقاومت فشاری، جذب آب و مدول الاستیسیته دینامیکی بیان شده است که منجر به افزایش خواص مکانیکی و دوام بتن شده است که در ادامه نتایج مربوط به آن‌ها ذکر شده است:

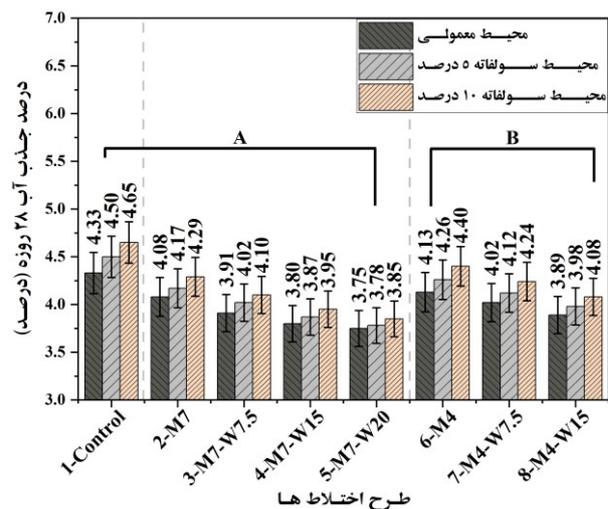
#### ۵-۱- نفوذپذیری

افزودن ولاستونیت در کل مخلوط‌ها نفوذپذیری را به مقدار محسوسی کاهش داد و عملکرد این ماده معدنی در ترکیب با میکروسیلیس تشدید یافت. مخلوط 5-M7-W20 بیشترین کاهش را در هر سه محیط داشت و این مقدار در بازه ۴۴/۶۸٪ تا ۶۳/۴۶٪ بود. علاوه بر تأثیر میکروسیلیس، ذرات ولاستونیت به عنوان پرکننده و شکل آن‌ها در محدود کردن نفوذپذیری تأثیر داشت. همچنین همبستگی بین نفوذپذیری و مقاومت فشاری به طور جداگانه بین مخلوط‌های دو جزئی با مقدار میکروسیلیس ۴ و ۷ درصد برقرار بود.

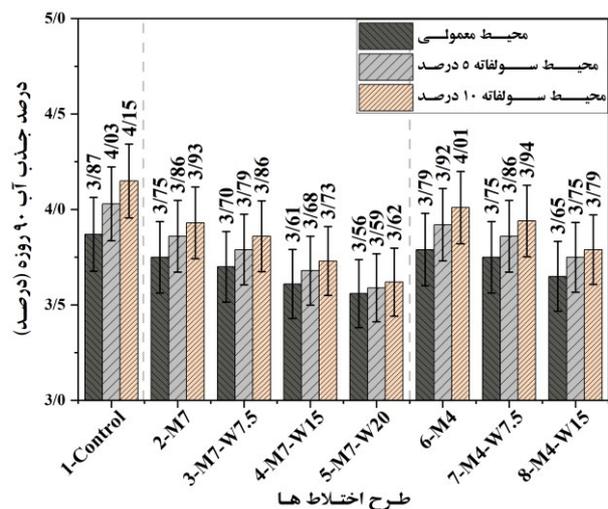
#### ۵-۲- مقاومت فشاری

به جز مخلوط‌های ۵ و ۸ در محیط معمولی و سولفات ۵٪ و مخلوط‌های ۴، ۵ و ۶ در محیط سولفات ۱۰٪ که کاهش مقاومت داشتند، مابقی مخلوط‌ها افزایش مقاومت داشته. عملکرد

کاهش جذب آب در هر سه محیط تأثیرات مثبتی داشتند. برای بررسی بهتر و دقیق‌تر رفتار جذب آب و نفوذپذیری، از رگرسیون خطی بین این دو شاخص استفاده شد. دسته‌ی اول (نمونه کنترل و مخلوط‌های شماره ۲-۵) در ۲۸ و ۹۰ روزگی دارای R2 برابر با ۹۳/۶٪ و ۹۶/۹٪ بود. دسته‌ی دوم (نمونه کنترل و مخلوط‌های شماره ۶-۸) نیز در ۲۸ و ۹۰ روزگی دارای R2 برابر با ۹۲/۶٪ و ۹۲/۸٪ بود.



شکل ۱۲- درصد جذب آب ۲۸ روزه مخلوط‌ها



شکل ۱۳- درصد جذب آب ۹۰ روزه مخلوط‌ها

#### ۴-۵- مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی

پودر ولاستونیت طبیعی نیازی به کلسینه شدن در فرایند تولید ندارد و فقط شامل فرایندهای تولید ساده‌ای مانند خرد کردن، مرتب‌سازی و آسیاب کردن است. علاوه بر این ولاستونیت طیف وسیعی از منابع را دارد و می‌توان آن را در آزمایشگاه با استفاده از

- [6] Ameri F, Shoaie P, Zareei SA, Behforouz B, 2019 Geopolymers vs. alkali-activated materials (AAMs): A comparative study on durability, microstructure, and resistance to elevated temperatures of lightweight mortars. *Construction and Building Materials*; 222:49–63.
- [7] Zhao Z, Cai X, Chen F, Gong Y, Xiao P, Lu L, 2025 Effect of wollastonite content on rheology and mechanical properties of 3D printed magnesium potassium phosphate cement-based material of MgO-SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>. *Construction and Building Materials*; 458:139729.
- [8] Khan RI, Ashraf W, 2019 Effects of ground wollastonite on cement hydration kinetics and strength development. *Construction and Building Materials*; 218:150–61.
- [9] Soliman A, Nehdi M, 2014 Effects of shrinkage reducing admixture and wollastonite microfiber on early-age behavior of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*; 46:81–9.
- [10] Dinh-Cong D, Keykhosravi MH, Alyousef R, Salih MN, Nguyen H, Alabduljabbar H, et al., 2019 The effect of wollastonite powder with pozzolan micro silica in conventional concrete containing recycled aggregate. *Smart Structures and Systems, An International Journal*; 24(4):541–52.
- [11] Wang Y-S, Meng L-Y, Chen L, Wang X-Y, 2025 An innovative strategy for CO<sub>2</sub> conversion and utilization: Semi-wet carbonation pretreatment of wollastonite to prepare carbon-fixing products and produce LC3. *Cement and Concrete Composites*; 160:106050.
- [12] Ren D, Yan C, Duan P, Zhang Z, Li L, Yan Z, 2017 Durability performances of wollastonite, tremolite and basalt fiber-reinforced metakaolin geopolymer composites under sulfate and chloride attack. *Construction and Building Materials*; 134:56–66.
- [13] Mathur R, Misra A, Goel P, 2007 Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete. *Journal of Scientific and Industrial Research*; 66(12):1029.
- [14] Yücel HE, Özcan S, 2019 Strength characteristics and microstructural properties of cement mortars incorporating synthetic wollastonite produced with a new technique. *Construction and Building Materials*; 223:165–76.
- [15] Öz H, Yücel H, Güneş M, Malkoç B, 2020 The Effects on High Performance Mortars of Natural Wollastonite. *NOHU J Eng Sci*; 9:966–74.
- [16] Mohiuddin MG, Malagavelli V, kumar Balguri P, 2022 Influence of wollastonite-GGBS on properties of ternary blended self compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*; 62:3027–

ولاستونیت ۷/۵٪ با میکروسیلیس ۴ و ۷ درصد باعث افزایش مقاومت شد. بطوریکه در محیط معمولی و سولفات ۵٪، مخلوط‌های 2-M7 دارای ۱۱/۰۲٪ و ۱۱/۹۶٪ و 3-M7-W7.5 دارای ۱۴/۷٪ و ۱۷/۱۸٪ افزایش بودند. اما در محیط سولفات ۱۰٪، مخلوط 2-M7 با بیشترین افزایش مقدار ۱۲/۳۱٪ و 3-M7-W7.5 دارای ۶/۱٪ افزایش بود.

### ۳-۵- مدول الاستیسیته بتن

مدول الاستیسیته دینامیکی با رگرسیون‌های انجام شده که دقت بالایی داشتند، نشان داد که می‌توان با مقاومت فشاری این بتن را با رابطه خطی برآورد کرد.

### ۴-۵- درصد جذب آب

بر اساس یافته‌های این پژوهش رفتار نفوذپذیری و جذب آب نمونه‌ها به دو دسته بر اساس مقدار میکروسیلیس تقسیم شد. دسته‌ی A حاوی ۷٪ و دسته‌ی B حاوی ۴٪ میکروسیلیس، که بر اساس دسته بندی، رگرسیون خطی بین ۲ فاکتور نفوذپذیری و جذب آب دارای در دسته‌ی A دارای R2 به ترتیب در ۲۸ و ۹۰ روزگی ۹۳/۶٪ و ۹۶/۹٪ و در دسته‌ی B، ۹۲/۶٪ و ۹۲/۸٪ بود. مخلوط‌های 4-M7-W15 و 5-M7-W20 در هر سه محیط بیشترین کاهش جذب آب را داشتند.

### ۶- مراجع

- [1] Cao M, Ming X, He K, Li L, Shen S, 2019 Effect of macro-, micro-and nano-calcium carbonate on properties of cementitious composites—A review. *Materials*; 12(5):781.
- [2] Wang D, Shi C, Farzadnia N, Shi Z, Jia H, Ou Z, 2018 A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials*; 181:659–72.
- [3] Ashraf W, Olek J, Jain J, 2017 Microscopic features of non-hydraulic calcium silicate cement paste and mortar. *Cement and Concrete Research*; 100:361–72.
- [4] Saxena S, Kumar M, Chundawat D, Singh N, 2020 Utilization of wollastonite in cement manufacturing. *Materials Today: Proceedings*; 29:733–7.
- [5] Zhu D, Wen A, Tang A, 2023 Mechanical properties, durability and environmental assessment of low-carbon cementitious composite with natural fibrous wollastonite. *Environmental Research*; 234:116552.

- [31] Ransinchung G, Kumar B, Kumar V, 2009 Assessment of water absorption and chloride ion penetration of pavement quality concrete admixed with wollastonite and microsilica. *Construction and Building Materials*; 23(2):1168–77.
- [32] Mathur R, Misra A, Goel P, 2007 Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete.
- [33] Wang Y, Song J, Guo Q, Xi X, Hou G, Wei G, et al., 2018 The environmental sustainability of synthetic wollastonite using waste from zirconium oxychloride production. *Journal of Cleaner Production*; 172:2576–84.
- [17] Balotiya G, Gaur A, Somani P, Sain A, 2023 Investigating mechanical and durability aspects of concrete incorporating Wollastonite and bottom ash. *Materials Today: Proceedings*.
- [18] Kubissa W, Jaskulski R, 2013 Measuring and time variability of the sorptivity of concrete. *Procedia Engineering*; 57:634–41.
- [19] Jalal M, Pouladkhan AR, Norouzi H, Choubdar G, 2012 Chloride penetration, water absorption and electrical resistivity of high performance concrete containing nano silica and silica fume. *Journal of American science*; 8(4):278–84.
- [20] Kalla P, Rana A, Chad YB, Misra A, Csetenyi L, 2015 Durability studies on concrete containing wollastonite. *Journal of Cleaner Production*; 87:726–34.
- [21] Wang Y-S, Lim J-Y, Lim S, Lee B-S, Lin R, and Wang X-Y, 2025 Alternative application of wollastonite in limestone calcined Hwangtoh clay cement (LC3 (systems: Engineering properties, microanalysis and resistance to sulfuric acid attack. *Construction and Building Materials*; 475:141214.
- [22] Espandar. Analysis 2: Espandar; [updated 2025–09–29. Available from: <https://aacc.espandar.com/analysis-2/>
- [23] Ltd. WI. Products: Wollastonite TDS: Wolkem India Ltd.; [updated 2025–09–29. Available from: <https://www.wolkem.com/products-wollastonite-tds.htm>.
- [24] Co. BBZF. Microsilica (Silica Fume): Bana Bony; a Zist Fanavar; [updated 2025–09–29. Available from : <https://banabonyan.ir/product/%D9%85%DB%8C%DA%A9%D8%B1%D9%88%D8%B3%DB%8C%D9%84%DB%8C%D8%B3-microsilica/>
- [25] Shimistore. Magnesium sulfate: Shimistore; [updated 2025–09–29. Available from: <https://shimistore.com/product/magnesium-sulfate>.
- [26] BS EN 12390-8., 2009 testing hardened concrete, Part 8 Depth of penetration of water under pressure.
- [27] DIN 1048-5, Testing methods for concrete; hardened concrete, specially prepared specimens. 1991 editor.
- [28] ASTM C597 Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, 2009.
- [29] ASTM, C642-13: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. .
- [30] Nair NA, Sairam V, 2021 Research initiatives on the influence of wollastonite in cement-based construction material-A review. *Journal of Cleaner Production*; 283:124665.

## **Investigating the positive effects of wollastonite and micro-silica on the mechanical properties and permeability of composite concrete in normal and sulfated environment**

**Yaghoub Mohammadi \***

**Professor, Civil Engineering Department, University Of Mohaghegh Ardabili.**

**Sattar Shafie**

**M.Sc, Department of Civil - Structural Engineering, University of Mohaghegh Ardabili.**

### **Abstract**

This research investigates the combined effects of wollastonite and micro-silica as partial cement replacements on the mechanical properties and durability performance of composite concrete under both standard curing and corrosive environment (sulfate exposure) conditions (5% and 10% MgSO<sub>4</sub> solutions). A total of 288 concrete cube specimens were cast and tested for compressive strength, water permeability, dynamic modulus of elasticity, and water absorption at 28 and 90 days. Wollastonite was incorporated at replacement levels of 7.5%, 15%, and 20%, while microsilica was added at 4% and 7%. The results revealed that the mixture containing 20% wollastonite and 7% micro-silica exhibited the highest reduction in water permeability (up to 63.46%) and water absorption (up to 13.39%), particularly in sulfate-rich environments. Furthermore, mixtures with 7.5% wollastonite and 7% microsilica showed a notable improvement in compressive strength, with increases of up to 17.18% under 5% sulfate exposure. Regression analysis indicated strong correlations between compressive strength, water absorption, and permeability across all curing conditions ( $R^2 > 0.90$ ). These findings suggest that the use of wollastonite, particularly in combination with microsilica, can significantly enhance the mechanical performance and durability of concrete, while also offering environmental and economic benefits due to its natural availability, low energy processing, and potential synthesis from industrial waste materials. Also, wollastonite's simple production processes have made it an environmentally friendly material.

**Keywords:** Wollastonite, Micro-silica, Concrete Durability, Sulfate Attack, Permeability, Compressive Strength.

---

\* Corresponding Author: yaghoubm@uma.ac.ir

