

خصوصیات مقاومتی ملات های ماسه سیمان حاوی پودر دیاتومیت خام معدن ممقان

جمشید اسماعیلی^{۱*}، زهرا احمدی^۲، جمیل کسائی^۳، کیوان عندلیبی^۴، سودابه شریفی سیزکوه^۵

۱- دانشیار دانشکده عمران دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده علوم طبیعی دانشگاه تبریز

۳- کارشناس ارشد دانشکده عمران دانشگاه تبریز

۴- دانشجوی دکتری دانشکده عمران دانشگاه تبریز

۵- دانشجوی کارشناسی دانشکده عمران دانشگاه تبریز

J-esmaeili@tabrizu.ac.ir

چکیده

این مقاله نتایج مطالعات بر روی خواص ملات ماسه سیمانی حاوی پودر دیاتومیت خام که جایگزین سیمان شده است را ارائه می دهد. استفاده از حجم زیادی از پودر های پوزولانی، تقاضای سیمان در صنعت ساخت را کاهش داده و بدین گونه هزینه ی تولید بتن کاهش یافته و از آلودگی زیست محیطی ناشی از انتشار گاز CO₂ کارخانه های سیمان کاسته می شود. هدف از این مطالعه بررسی ویژگی های کلیدی ملات سیمانی سازگار با محیط زیست است، که پودر دیاتومیت خام با درصدهای مختلف در آن جایگزین سیمان شده است. در پژوهش پیش رو به بررسی ملات سیمان حاوی ۴ مقدار درصد مختلف از پودر دیاتومیت خام که جایگزین سیمان شده (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۰ درصد وزنی از کل مواد سیمانی) پرداخته شده است. با انجام آزمایش میز روان میزان کارایی ملات سیمانی مورد سنجش قرار گرفته و مقاومت فشاری و کششی در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز به عنوان خواص مقاومتی اندازه گیری شده است. نتایج آزمایش ها نشان می دهد که استفاده از حجم زیادی (تا ۴۰ درصد وزنی) از پودر دیاتومیت خام در ساخت مواد پایه سیمانی سازگار با محیط زیست با توجه به فعالیت پوزولانی قابل توجه این پودر به عنوان جایگزین سیمان، بسیار کارآمد و موفقیت آمیز است.

کلمات کلیدی: دیاتومیت خام، ملات سیمان، مقاومت فشاری، مقاومت کششی.

۱. مقدمه

بتن یکی از پرکاربردترین و قابل استفاده ترین مصالح ساختمانی است که عموماً توسط مخلوط کردن سیمان پرتلند با سنگدانه ها و آب ساخته می شود [۱]. بر اساس میزان بتن تولید شده در سال ۲۰۰۷، می توان تخمین زد که سالانه برای تولید بتن ۲۰۵ میلیارد تن سیمان، یک میلیارد تن آب و ۱۰ میلیارد تن سنگدانه مصرف می شود [۲]. به عبارت دیگر هر تن از سیمان پرتلند که تولید می شود می تواند یک تن دی اکسید کربن را وارد اتمسفر کند [۱]. مصرف زیاد مواد پوزولانی در بتن میزان تقاضای سیمان جهت استفاده در صنعت ساخت و ساز را کاهش داده و بنابراین علاوه بر کاهش هزینه تولید بتن میزان آلودگی محیط زیست در اثر انتشار گاز دی اکسید کربن ناشی از کارخانه های سیمان به اتمسفر کاهش قابل ملاحظه ای می یابد [۳].

دیاتومیت نوعی سنگ رسوبی متشکل از ذرات ریز و بی شکل سیلیسی است که در اثر مکانیسم تجمع پوسته یا اسکلت های فسیل شده جلبک ها و جانوران میکروسکوپی و تک سلولی به نام دیاتومه ایجاد شده اند. دیاتومه ها موجودات تک سلولی

بسیار ریزی هستند که متعلق به خانواده جلبک های دریایی می باشند [۴]. رسوبات دیاتومیتی معمولاً ریز دانه بوده و عمدتاً از سیلیس بی شکل اوپالی (اوپال نوع A) تشکیل شده اند. همراه سیلیس معمولاً مقدار کمی موادآلی، رس و ندرتاً رسوبات آتشفشانی هم وجود دارد [۵]. دیاتومیت در حالت طبیعی استفاده میشود و دارای قابلیت های ضد حریق و پرمکنندگی بوده و به عنوان ماده غیر حلال کاربرد دارد. کاربرد اصلی دیاتومیت به عنوان ماده پرمکننده و ماده جذب کننده می باشد. دیاتومیت دارای کاربرد های متنوعی به واسطه داشتن ساختار های منفذ دار است و در جهان به طور گسترده به عنوان پرمکننده، ضد آتش و غیر حلال کاربرد دارد [۶]. دیاتومیت همچنین به عنوان ماده پوزولانی در مواد پایه سیمانی بکار برده شده است. بر اساس مطالعه ی Kastis و همکاران در رابطه با ویژگی ها و هیدراسیون سیمان مخلوط شده با دیاتومیت های آهکی، استفاده از دیاتومیت به دلیل داشتن محتوای سیلیس فعال در صنعت سیمان پیشنهاد گردیده است. همچنین واکنش های پوزولانی دیاتومیت سبب تولید بیشتر مواد حاصل از هیدراسیون به ویژه در سنین بالاتر می شود [۵]. Fragoulis و همکاران ویژگی های فیزیکی و مکانیکی سیمان های مخلوط با دیاتومیت های حاوی رس و مواد آهکی را مطالعه کردند و نتایج مطالعه ی آنها نشان می دهد که وجود سیلیس فعال در پودر دیاتومیت با نرمی زیاد و ریز دانه سبب نبود ویژگی های مکانیکی ملات می شود [۷]. Yilmaz و Degirmenci نقش دیاتومیت را به عنوان یک ماده ی جایگزین با سیمان پرتلند بررسی کردند و نتایج آنها نشان می دهد که آن دسته از سیمان هایی که با مقادیری از دیاتومیت جایگزین شده اند در برابر مواد سولفاته مقاومت بیشتری نسبت به نمونه های شاهد نشان می دهند. آنها همچنین بیان کردند که با افزایش میزان دیاتومیت در نمونه ها، درصد جذب آب نمونه ها کاهش پیدا می کند [۸]. Yilmiz و Ediz نقش دیاتومیت خام و کلسین شده را در تولید سیمان بررسی کردند و نتایج مطالعات آنها نشان می دهد که سیمان پرتلندی که تا نسبت ۱۰ درصد با دیاتومیت خام جایگزین شده است مقدار مقاومت قابل توجهی را نشان می دهد. همچنین کلسین نمودن دیاتومیت سبب تغییر در ساختار منافذ دیاتومیت می شود و سبب افزایش قابلیت خرد و پودر شدن آن می شود [۹]. Krajci و همکاران ویژگی های ترکیب سیمان حاوی دیاتومیت کلسین شده، رس و همچنین متاکائولن را بررسی کرده اند و نتایج مطالعه ی آنها نشان می دهد که واکنش های پوزولانی، ساختار منافذ و مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه شاهد افزایش پیدا می کند [۱۰]. Ergum تاثیر استفاده از دیاتومیت و پودر مرمر را به عنوان جایگزین نسبی سیمان و ویژگی های مکانیکی بتن های حاصل را مطالعه کرده است. نتایج این مطالعه نشان می دهد که جایگزینی سیمان پرتلند توسط دیاتومیت و استفاده از فوق روان کننده های شیمیایی می تواند سبب افزایش ویژگی های مکانیکی مخلوط بتن گردد [۱۱]. Letelier و همکاران ویژگی های بتن حاوی دیاتومیت و سنگدانه های قابل بازیافت را بررسی کرده اند. در این تحقیق، بهترین نتایج در نمونه های بتنی حاوی ۲۵ درصد سنگ دانه بازیافتی و همچنین ۵ درصد دیاتومیت مشاهده گردید [۱۲].

هدف از این مطالعه بررسی نقش دیاتومیت خام استخراج شده از معدن دیاتومیت ممقان به عنوان یک ماده ی پوزولانی طبیعی قابل جایگزین با سیمان پرتلند در نمونه های ملات ماسه سیمان می باشد. همچنین تاثیر پودر دیاتومیت خام بر ویژگی های مقاومتی ملات با انجام آزمایش های مقاومت فشاری و مقاومت کششی مورد ارزیابی قرار گرفت.

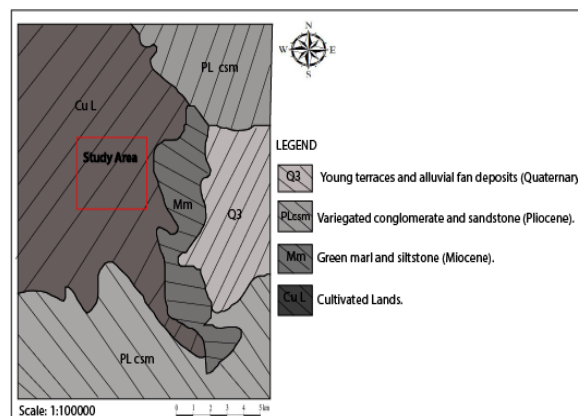
۲. زمین شناسی و ساختار معدنی سنگ های دیاتومیتی منطقه ممقان

با توجه به گزارش سازمان زمین شناسی و اکتشاف معدنی شمال غرب کشور، در ایران مهمترین نهفته های دیاتومیت دار در ناحیه آذربایجان مشاهده شده است که شامل حوضه های رسوبی در اطراف تبریز، شرق دریاچه ارومیه و بخشی از شهرستان میانه (شمال غرب ایران) می شود. کانسار دیاتومیت ممقان در ۵۰ کیلومتری جنوب غرب شهر تبریز، در مسیر جاده ی تبریز به آذرشهر و در جنوب غرب قله ی آتشفشانی سهند واقع است. طول جغرافیایی منطقه مورد مطالعه $37^{\circ} 50' 18/5''$ به $37^{\circ} 58' 53''$ و عرض جغرافیایی آن $46^{\circ} 05' 45/17''$ به $46^{\circ} 15' 55''$ می باشد. عملیات طرح اکتشاف تفصیلی کانسار

دیاتومیت ممقان از اواخر سال ۱۳۶۵ آغاز شده و ۹ افق دیاتومیته در منطقه تشخیص داده شده که عیار هر کدام به طور جانبی تغییر پیدا می کند. این منطقه توسط رسوبات اواخر دوران سنوزوئیک پوشیده شده است. در اواخر دوران سنوزوئیک از نظر زمین شناسی دریاچه کم عمقی کوه های سهند را احاطه کرده و آن را به صورت جزیره یا شبه جزیره در آورده است. پس از آغاز فعالیت آتشفشانی کوه های سهند رسوبات خاکستر آتشفشانی و سایر مواد آذرین خروجی با ورود به حوضه های دریاچه ای دامنه ی کوه های آتشفشانی سهند شرایط برای رشد و تکثیر دیاتومه ها فراهم شد. احتمالاً در یکی از فازهای آتشفشانی مواد خروجی یا گازهای سمی وارد محیط زیست دیاتومه ها شده و سبب مرگ دسته جمعی آنها شده است. پوسته سیلیسی این دیاتومه ها پس از مرگ ته نشست پیدا کرده و در اثر دیازنز، ذخایر لایه ای شکل دیاتومیت را در منطقه ایجاد کرده است (شکل ۱). وجود لایه های مختلف در منطقه، نشانگر تکرار این فرایند در زمان های مختلف است و ضخامت نسبتاً کم آنها گسترش کم دیاتومه ها را نشان می دهد. متلاطم بودن محیط رسوبی سبب اختلاط و پرشدگی شدید حفره ها و حجرات دیاتومه ها با توف و ماسه های در برگیرنده آنها شده است و در نتیجه طول لایه ها کوتاه و اکثراً عدسی شکل و با ضخامت متغییر و مخلوط با ذرات گل و توف است. رنگ این رسوبات سفید تا سبز کم رنگ بوده و قدیمی ترین رسوبات مربوط به دوره ی میوسن است. لایه های دیاتومیت دار اکثراً افقی هستند و از نظر تکتونیکی به دلیل جوان بودن رسوبات، پیچیدگی خاصی مشاهده نمی شود و گسل های بزرگ و فعالی در منطقه وجود ندارند [۱۳]. نتایج مطالعات XRD صورت گرفته توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی شمال غرب کشور نشان می دهد که کانسار دیاتومیت ممقان حاوی فازهای کوارتز کریستوبالیت، اوپال نوع A، هالیت و فلدسپات می باشد. شکل ۲ موقعیت منطقه مورد مطالعه را در نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ آذر شهر نشان می دهد.



شکل ۱- ذخایر لایه ای شکل دیاتومیت در منطقه مورد مطالعه.



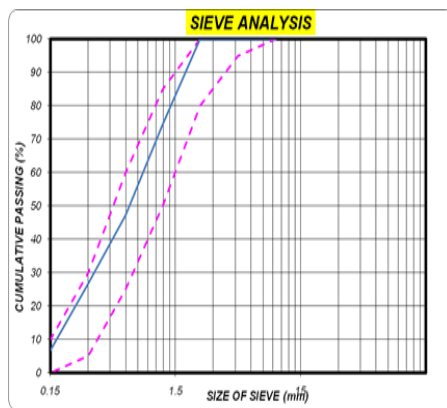
شکل ۲- نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه، اقتباس از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ آذر شهر

۳. مطالعات آزمایشگاهی

۳.۱. مواد اولیه مورد استفاده

سیمان مورد استفاده در این مطالعه، از نوع سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ تولید شده در کارخانه سیمان صوفیان و دیاتومیت خام مورد استفاده از معدن دیاتومیت ممقان واقع در جنوب غرب شهر تبریز، استفاده شده است. ویژگی های شیمیایی سیمان و دیاتومیت و همچنین ویژگی های کلینکر سیمان در جدول ۱ ارائه شده است. میزان نرمی بلین سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱ و دیاتومیت بکار رفته در این تحقیق به ترتیب ۳۹۳۵ و ۱۰۰۱۷ سانتی متر مربع بر گرم تعیین گردید. همچنین در تمام طول آزمایش از ماسه ی رودخانه ای طبیعی به عنوان سنگدانه های ریز و با وزن مخصوص ۲/۶۵ و درصد جذب آب ۲ درصد استفاده شده است. مدول نرمی ماسه مورد استفاده ۲/۷۲ می باشد. منحنی دانه بندی مربوط به ماسه مورد استفاده در شکل ۳ ارائه شده است. در ملات های تهیه شده از فوق روان کننده پایه پلی کربوکسیلات با وزن مخصوص حدود ۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب و میزان مواد جامد ۳۰ تا ۴۰ درصد استفاده شده است.

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان، دیاتومیت خام و ویژگی های کلینکر



شکل ۳- منحنی دانه بندی ماسه

Chemical analysis		
اکسید های اصلی	سیمان (%)	دیاتومیت (%)
SiO ₂	۲۱/۵۷	۹۲/۰
Al ₂ O ₃	۴/۶۵	۰/۰۵
Fe ₂ O ₃	۳/۰۳	۰/۸۲
CaO	۶۳/۳۲	ND
MgO	۲/۴۰	ND
MnO	ND	۰/۰۸
TiO ₂	ND	۰/۱۱
Na ₂ O	۰/۳۲	۰/۵۵
K ₂ O	۰/۸۱	۰/۳۴
P ₂ O ₅	ND	۰/۰۴
L.O.I	۱/۳۳	۶/۰۱
ویژگی های کانی شناسی کلینکر		
	(%)	
C ₃ S	۵۷/۶	
C ₂ S	۲۰/۱	
C ₃ A	۸/۴	
C ₄ AF	۱۱/۰	
ضرایب محاسباتی بوگه		
	(%)	
Lime saturation factor	۹۲/۹	
Silica Ratio	۲/۴	
Alumina Ratio	۱/۵	

ND=Not Detected (<0.01%)
L.O.I=Loss of Ignition (1000°C)

۳.۲. نسبت های اختلاط

نسبت های اختلاط محاسبه شده شامل درصد های مختلفی از دیاتومیت خام می باشد که به جای سیمان جایگزین شده اند. این نسبت ها شامل ۰٪، ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ وزنی دیاتومیت می باشند که به جای سیمان پرتلند جایگزین شده اند. جدول ۲ نسبت های اختلاط بکار رفته در این تحقیق را نشان می دهد. نسبت های اختلاط با نسبت آب به مواد سیمان ثابت و برابر ۰/۴۸ محاسبه شده اند و فوق روان کننده نیز با مقادیر متفاوت جهت رسیدن به کارایی مناسب و در تمام نسبت های اختلاط استفاده گردید.

جدول ۲- نسبت های اختلاط

Mix No	سیمان (kg/m ³)	دیاتومیت (kg/m ³)	W/Cm	آب (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	روان کننده (kg/m ³)
C	۵۴۳	۰	۰/۴۸	۲۶۳	۱۴۹۴	۲/۹
D15	۴۶۲	۸۱	۰/۴۸	۲۶۳	۱۴۸۹	۴/۳
D30	۳۸۰	۱۶۳	۰/۴۸	۲۶۳	۱۴۸۱	۵/۴
D40	۳۲۶	۲۱۷	۰/۴۸	۲۶۳	۱۴۷۳	۸/۱

۳.۳. آماده سازی نمونه ها

به منظور آماده سازی و ساخت ملات ماسه سیمان، ابتدا ماسه به همراه بخشی از آب (به میزان جذب آب ماسه) در مخلوط کن به مدت ۳۰ ثانیه مخلوط گردید. پس از آن به ترتیب سیمان و دیاتومیت به مخلوط اضافه شده و هرکدام به مدت ۶۰ ثانیه ترکیب گردید. در نهایت ترکیب مابقی آب و روان کننده به تدریج به داخل مخلوط کن ریخته شده و به مدت ۱۲۰ ثانیه مخلوط گردید. بعد از اتمام ساخت ملات های حاوی درصد های مختلفی از دیاتومیت آزمایش هایی روی ملات تازه جهت تعیین و اندازه گیری قطر بازشدگی ملات تازه انجام گرفت. نمونه های مکعبی شکل با ابعاد ۵×۵×۵ سانتی متر جهت اندازه گیری مقاومت فشاری و نمونه های پاپیونی شکل با ابعاد ۷۶ میلیمتر طول و با ضخامت ۲۵ میلیمتر به منظور اندازه گیری مقاومت کششی ساخته شده اند. پس از ریختن ملات در قالب ها، نمونه ها در کابین عمل آوری با دمای حدود ۲۳ درجه سانتی گراد و میزان رطوبت بیش از ۹۵ درصد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شدند. سپس نمونه های ساخته شده در مخزن آب اشباع شده با اهک تا رسیدن به زمان انجام آزمایش عمل آوری گردیدند.

۳.۴. روش آزمایش

آزمایش تعیین میزان قطر بازشدگی ملات برای اندازه گیری میزان قابلیت جریان ملات تازه بر اساس استاندارد ASTM C230 انجام شد [۱۴]. آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز بر اساس استاندارد ASTM C109 انجام یافت [۱۵]. آزمایش اندازه گیری مقاومت کششی، نمونه های پاپیونی شکل، در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز بر اساس استاندارد ASTM C190 [۱۶] (شکل ۴) انجام شد.



شکل ۴- آزمایش تعیین مقاومت کششی

۴. بحث و نتیجه گیری

۴.۱. کارایی

آزمایش میز جریان بر روی تمامی ملات های تازه انجام شده و کارایی اختلاط های دارای درصد هایی از پودر دیاتومیت مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آزمایش در جدول ۳ آورده شده است. قابلیت جاری شدن ملات تازه با افزودن پودر دیاتومیت به طور قابل ملاحظه ای کاهش میابد. این کاهش روانی با افزودن مقداری فوق روان کننده در اختلاط ملات جبران شده است. نتایج میز جریان در همه ی اختلاط ها بین اعداد ۱۶۰ تا ۱۸۵ میلیمتر متغیر است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده میشود مقدار ابر روان کننده با افزایش مقدار پودر دیاتومیت استفاده شده در اختلاط ۶ افزایش میابد. مقدار روان کننده استفاده شده در اختلاط ۴۰ درصد دیاتومیت حدوداً ۲/۸ برابر نمونه شاهد است. این کاهش قابل توجه کارایی در ملات میتواند مربوط به ریزی بیش از حد و سطح مخصوص پودر دیاتومیت باشد. همانطور که در جدول ۳ نشان داده شده، نرمی بلین دیاتومیت ۲/۵ برابر بیشتر از سیمان و وزن مخصوص دیاتومیت ۱۰٪ کمتر از سیمان است. این افزایش چشمگیر در سطح مخصوص و همچنین کم بودن وزن مخصوص در پودر دیاتومیت در مقایسه با سیمان، منجر به افزایش قابل توجه جذب آب در پودر دیاتومیت شده و کاهش قابل ملاحظه ای در کارایی پدید می آورد.

در واقع ساختار اسفنجی و سوراخ دار ذرات دیاتومیت به همراه فشار بسیار بالای ناشی از کشش کاپیلاره موجب جذب بسیار بالای طرح اختلاط توسط آن میگردد.

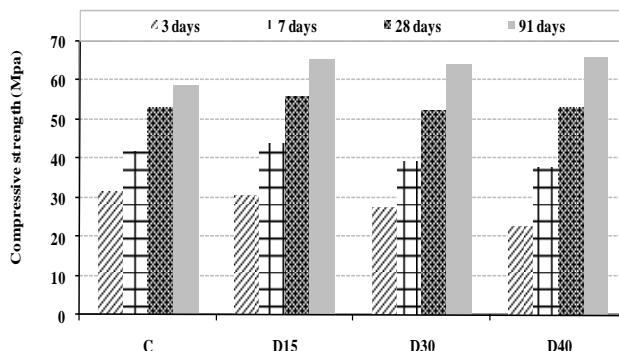
۴.۲. مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه های ملات ماسه سیمانی حاوی مقادیر مختلفی از پودر دیاتومیت در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز در جدول ۳ و شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می گردد، روند تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها با افزایش مقادیر دیاتومیت در سنین مختلف متفاوت می باشد. در نمونه های ۳ روزه، با افزایش مقدار پودر دیاتومیت در طرح اختلاط، مقاومت فشاری نمونه ها کاهش می یابد. این کاهش مقاومت فشاری در بیشترین مقدار خود (D40) حدوداً ۳۸ درصد می باشد. شدت این روند کاهش مقاومت فشاری با افزایش مقدار دیاتومیت در سنین بالاتر کاهش می یابد. به طوری که بیشترین مقدار کاهش مقاومت فشاری در نمونه های ۷ روزه به حدود ۱۲ درصد می رسد و این در حالی است که در نمونه های ۲۸ روزه این مقدار به حدود ۱ درصد کاهش پیدا می کند و در نمونه های ۹۱ روزه نه تنها کاهش مقاومت جبران شده بلکه به بیش از مقاومت نمونه های شاهد می رسد. در واقع نتایج به دست آمده حاکی از این امر می باشد که کاهش مقاومت فشاری نمونه ها در اثر افزایش مقدار پودر دیاتومیت، با افزایش سن نمونه ها جبران می گردد به طوری که در نمونه های ۲۸ روزه، مقاومت فشاری D40 که حاوی بیشترین مقدار دیاتومیت است تقریباً با مقاومت فشاری نمونه شاهد برابر می باشد و در نمونه های ۹۱ روزه مقاومت فشاری D40 به اندازه ۱۲ درصد بیشتر از مقاومت فشاری نمونه شاهد می باشد. به نظر می رسد که با افزایش سن نمونه ها، واکنش پوزولانی پودر دیاتومیت در حضور سیمان کامل تر شده و منجر به جبران افت در مقاومت فشاری می گردد. واکنش پوزولانی ما بین سیلیس آمورف موجود در دیاتومیت و هیدراکسید کلسیم ایجاد شده در اثر واکنش هیدراسیون سیمان منجر به ماده نهایی متراکم تر و همگن می گردد. این سیلیس آمورف موجود در SiO_2 با Ca(OH)_2 واکنش داده و در نهایت Calcium Silicate Hydrates (CSH) ایجاد می گردد که همان دلیل اصلی افزایش مقاومت می باشد. در بیشتر تحقیقات انجام یافته بر روی اثر استفاده از پوزولان دیاتومیت بر خصوصیات مواد پایه سیمانی، تا حداکثر ۲۰-۱۵ درصد از سیمان توسط دیاتومیت جایگزین شده است. از طرفی به منظور هر چه فعال تر نمودن دیاتومیت از لحاظ خاصیت

پوزولانی، در اکثر موارد از پودر دیاتومیت کلسین شده استفاده شده است. در این تحقیق با توجه به بالا بودن میزان SiO_2 دیاتومیت به کار رفته که خود بیانگر کیفیت بالای آن از لحاظ خصوصیات پوزولانی می باشد، مقادیر بیشتری از سیمان (تا ۴۰ درصد) توسط دیاتومیت خام (کلسین نشده) جایگزین شده است. نتایج مربوط به مقاومت فشاری نمونه ها حاکی از استفاده موثر از این پوزولان طبیعی در تولید ماده پایه سیمانی زیست محیطی و مقرون به صرفه می باشد. از طرفی نتایج دیگر تحقیقات انجام یافته بیانگر این است که نرمی زیاد و مقدار بیشتر دیاتومیت نسبت به سیمان منجر به کاهش تخلخل مخلوط های سیمانی می گردد که این امر به واسطه ی انسداد حفره ها و اثر پرکنندگی دیاتومیت می باشد.

جدول ۳. نتایج مربوط به خصوصیات ملات های سیمان حاوی درصد های مختلف دیاتومیت

Mix No	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)				مقاومت کششی (مگاپاسکال)				قطر بازشدگی ملات بر حسب میلیمتر	وزن مخصوص خشک (kg/m ³)
	روز ۳	روز ۷	روز ۲۸	روز ۹۱	روز ۳	روز ۷	روز ۲۸	روز ۹۱		
C	۳۱/۴	۴۱/۹	۵۳/۱	۵۸/۸	۲/۹۴	۳/۳۷	۴/۳۶	۴/۶۷	۱۸۵	۲۰۷۶
D15	۳۰/۸	۴۳/۷	۵۵/۹	۶۵/۳	۲/۸۰	۴/۰۵	۵/۶۰	۵/۸۱	۱۷۵	۲۰۸۳
D30	۲۷/۳	۳۹/۲	۵۲/۴	۶۴/۴	۲/۵۵	۴/۲۷	۵/۶۰	۵/۹۰	۱۷۰	۲۰۴۶
D40	۲۲/۷	۳۷/۶	۵۳/۳	۶۵/۹	۲/۰۳	۴/۱۶	۵/۳۰	۵/۶۲	۱۶۰	۲۰۴۰

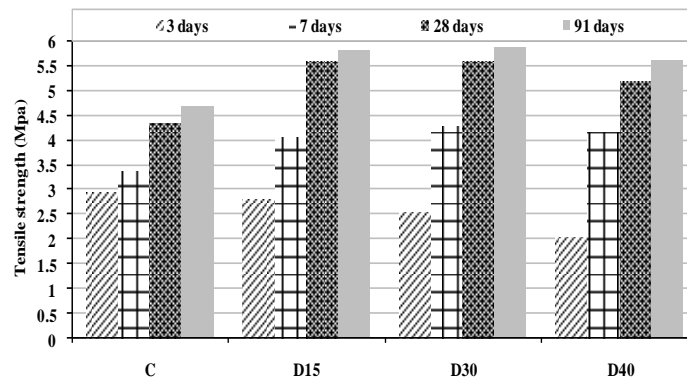


شکل ۶- نتایج مقاومت فشاری

۴.۳. مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه های ملات ماسه سیمانی حاوی مقادیر مختلفی از پودر دیاتومیت در سنین ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز در جدول ۳ و شکل ۷ نشان داده شده است. همانند نتایج به دست آمده در قسمت مقاومت فشاری، روند تغییرات مقاومت کششی نمونه ها نیز با افزایش مقدار دیاتومیت در سنین مختلف متفاوت می باشد. در نمونه های ۳ روزه، با افزایش مقدار پودر دیاتومیت در طرح اختلاط، مقاومت کششی نمونه ها کاهش می یابد. این کاهش مقاومت کششی در بیشترین مقدار خود (D40)، حدوداً ۴۵ درصد می باشد. کاهش مقاومت کششی در نمونه های حاوی دیاتومیت، با افزایش سن نمونه ها نه تنها جبران گردیده بلکه مقاومت کششی نمونه های ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه حاوی دیاتومیت نسبت به نمونه شاهد افزایش قابل توجهی داشته است. این افزایش مقاومت کششی در بیشترین مقدار خود (در نمونه D15 ۲۸ روزه) حدوداً ۲۸ درصد نسبت به نمونه شاهد می باشد. همان طور که در قسمت مقاومت فشاری اشاره گردید، با افزایش سن نمونه ها، واکنش پوزولانی پودر دیاتومیت در حضور سیمان کامل تر شده و منجر به جبران افت و حتی افزایش مقاومت کششی می گردد.

همانطور که مشاهده می گردد با وجود جایگزینی سیمان توسط مقادیر زیادی از دیاتومیت خام (کلسین نشده) در نسبت های اختلاط (تا ۴۰ درصد)، مقاومت کششی نمونه های حاوی دیاتومیت بیشتر از نمونه شاهد می باشد که نشانگر عملکرد مناسب ماده زیست محیطی نهائی از لحاظ مکانیکی می باشد.



شکل ۷- نتایج مقاومت کششی

۵. نتیجه گیری

بررسی و تحلیل نتایج آزمایش های انجام گرفته بر روی نمونه های ملات حاوی درصد های مختلفی از دیاتومیت منجر به نتیجه گیری ذیل گردید:

- روانی ملات تازه با افزایش جایگزینی سیمان توسط دیاتومیت به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. البته این میزان کاهش روانی را می توان با افزایش مقدار فوق روان کننده در نسبت های اختلاط جبران نمود.
- مقاومت فشاری نمونه های حاوی دیاتومیت در سنین اولیه (۳ روز) با افزایش مقدار دیاتومیت نسبت به نمونه شاهد کاهش می یابد. شدت کاهش مقاومت فشاری با افزایش سن نمونه ها کاهش یافته به طوری که در نمونه های ۲۸ روزه کاملاً جبران گردیده و در نمونه های ۹۱ روزه به بیش از مقاومت فشاری نمونه شاهد می رسد.
- مقاومت کششی نمونه های حاوی دیاتومیت در سنین اولیه (۳ روز) با افزایش مقدار دیاتومیت نسبت به نمونه شاهد کاهش می یابد. این کاهش مقاومت کششی نه تنها با افزایش سن نمونه ها جبران گردیده بلکه به بیش از مقاومت کششی نمونه شاهد می رسد. در واقع مقاومت کششی نمونه های ۷، ۲۸ و ۹۱ روزه حاوی دیاتومیت بیشتر از مقاومت کششی نمونه شاهد می باشد و این افزایش مقاومت در بیشترین مقدار خود حدود ۲۸ درصد می باشد.
- با در نظر گرفتن توام نتایج مربوط به خصوصیات مقاومتی ملات سیمانی حاوی دیاتومیت و همچنین فعالیت پوزولانی قابل توجه این پودر به عنوان جایگزین سیمان می توان نتیجه گرفت که ماده ای سبز و سازگار با محیط زیست را می توان با جایگزینی سیمان توسط مقادیر زیادی (تا ۴۰ درصد) از دیاتومیت تولید نمود. افزایش مقدار دیاتومیت در اختلاط، کاهش روانی ملات را به همراه دارد که این کاهش کارایی را می توان با افزایش مقدار فوق روان کننده جبران نمود.

۶. منابع

- [1] Mehta P.K, Monteiro P.J.M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill; fourth edition, 2013 Dec 3.
- [2] Li Z. Advanced Concrete Technology. Wiley Blackwell; 2011 Jan 19; Available from: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470950067>
- [3] Safiuddin M, West JS, Soudki KA. Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash. Cement and Concrete Composites [Internet]. Elsevier BV; 2010 Oct;32(9):708–17. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.006>
- [4] Dolley TP. Diatomite. Ceramic Bulletin; 1991; 70(5):860.

- [5] Kastis D, Kakali G, Tsivilis S, Stamatakis MG. Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite. *Cement and Concrete Research* [Internet]. Elsevier BV; 2006 Oct;36(10):1821–6. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.005>
- [6] Ivanov SÉ, Belyakov AV. Diatomite and its applications. *Glass and Ceramics* [Internet]. Springer Nature; 2008 Jan;65(1-2):48–51. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s10717-008-9005-6>
- [7] Fragoulis D, Stamatakis MG, Papageorgiou D, Chaniotakis E. The physical and mechanical properties of composite cements manufactured with calcareous and clayey Greek diatomite mixtures. *Cement and Concrete Composites* [Internet]. Elsevier BV; 2005 Feb;27(2):205–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.008>
- [8] Degirmenci N, Yilmaz A. Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars. *Construction and Building Materials* [Internet]. Elsevier BV; 2009 Jan;23(1):284–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.008>
- [9] Yilmaz B, Ediz N. The use of raw and calcined diatomite in cement production. *Cement and Concrete Composites* [Internet]. Elsevier BV; 2008 Mar;30(3):202–11. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.003>
- [10] Krajči L, Kuliffayová M, Janotka I. Ternary Cement Composites with Metakaolin Sand and Calcined Clayey Diatomite. *Procedia Engineering* [Internet]. Elsevier BV; 2013;65:7–13. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.003>
- [11] Ergün A. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials* [Internet]. Elsevier BV; 2011 Feb;25(2):806–12. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.002>
- [12] Letelier V, Tarela E, Muñoz P, Moriconi G. Assessment of the mechanical properties of a concrete made by reusing both: Brewery spent diatomite and recycled aggregates. *Construction and Building Materials* [Internet]. Elsevier BV; 2016 Jul;114:492–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.177>
- [13] Geological Survey & Mineral Exploration of Iran. Azerbaijan's Diatomite [Internet]. Tehran: Geological Survey & Mineral Exploration of Iran; 2008. Available from: <http://gsi.ir/fa/ReportsData.page>
- [14] Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. ASTM International; Available from: http://dx.doi.org/10.1520/c0230_c0230m-14
- [15] Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM International; Available from: http://dx.doi.org/10.1520/c0109_c0109m-16a
- [16] Method of Test for Tensile Strength of Hydraulic Cement Mortars. ASTM International.