بررسی آزمایشگاهی تأثیر نانو رس و خاکستر بادی بر مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان

ابراهیم خلیل‌زاده وحیدی[1*]، نوذر مرادی[2]

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه، ایران

چکیده

اضافه کردن نانو مواد به همراه سیمان، از جمله راهکارهای بهبود خواص مکانیکی و ویژگی‌های بتن و ملات، نسبت به نمونه‌های معمولی و رایج می‌باشد. در این تحقیق با اضافه کردن نانو رس تنها معادل ۳٪ و ۵٪ وزنی سیمان و همچنین ۳٪ و ۵٪ نانو رس به همراه ۱۵٪ خاکستر بادی، نمونه‌های ملات ساخته شده و به مقایسه نتایج آن‌ها با نتایج طرح مرجع پرداخته شده است. استفاده از نانو رس و خاکستر بادی، باعث کاهش مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان در سنین کم ۳ و ۷ روزه می‌شود. با این حال اضافه کردن ۳٪ و ۵٪ نانو رس تنها در ملات، بترتیب باعث افزایش ۲۷/۲ و ۱۵/۱ درصدی مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه و افزایش ۲۸/٤ و ۲۲/٤ درصدی آن در سن ۹۰ روزه شده است. در حالی که در نمونه‌های ملات ماسه سیمان دارای خاکستر بادی و نانو رس توام، بترتیب افزایش ۱/٦ و ٤/۵ درصدی مقاومت فشاری را در سن ۲۸ روزه و افزایش ۱۰ و ۱٦ درصدی آن را در سن ۹۰ روزه در پی داشته است.

کلمات کلیدی: مقاومت فشاری، نانو ذرات رس، خاکستر بادی، میکروسکوپ الکترونی SEM

*نویسنده مسئول: ابراهیم خلیل‌زاده وحیدی.

پست الکترونیکی: e_vahidi2000@yahoo.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹٤/۰۷/۰۷، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۱٦

۱- مقدمه

یکی از جنبه‌های اصلی نانو تکنولوژی ماهیت میان‌رشته‌ای آن است. استفاده از این علم در بتن می‌تواند تحولی بزرگ در صنعت ساخت و ساز ایجاد کند. هدف نهایی از بررسی بتن در مقیاس نانو، یافتن مصالح جدید ساختمانی با عملکردهای بالا و با خواصی جدید و متفاوت نسبت به خواص مصالح معمولی است. این ماده چسبنده عموماً حاصل واکنش سیمان‌های هیدرولیکی و آب می‌باشد. بتن از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی است که ویژگی اصلی آن ارزان بودن و در دسترس بودن مواد اولیه آن می‌باشد. کاربرد بتن را می‌توان در تمامی کارهای عمرانی از قبیل ساختمان، مخازن، نیروگاه‌ها، سازه‌های دریایی، جاده‌ها، مسیرهای انتقال آب، سدها و ... مشاهده کرد. تاکنون مطالعات زیادی در زمینه بهبود کیفیت بتن انجام شده که اکثر آن‌ها تغییر در ترکیب بتن را بررسی کرده‌اند، با این حال استفاده از افزودنی‌ها و همچنین جایگزین کردن مواد متداول با مواد جدید در بتن همیشه مورد توجه دست‌اندرکاران صنعت بتن بوده است. از جمله مواد پیشنهادی که موجب ارتقاء خواص مکانیکی و فیزیکی بتن می‌شوند، نانو موادها هستند که با توجه به خصوصیات آن‌ها در سطوح میکروسکوپی می‌توانند صنعت بتن را کاملاً متحول کنند [۱].

نانو فناوری عبارت از شناخت، کنترل و بازسازی ماده در ابعاد نانومتری به‌منظور ساخت مصالحی با خواص و عملکردهایی اساساً نوین می‌باشد. نانو ذرات خود به دو صورت معمول پودر و یا توزیع شده در محلول (کلوئید) در بتن استفاده می‌شوند. از جمله مهم‌ترین نانو ذرات کاربردی می‌توان به نانو ذرات تیتانیوم (TiO_2)، نانو ذرات آلومینیوم (Al_2O_3)، نانو ذرات سیلیس (SiO_2)، نانو ذرات آهن (Fe_2O_3)، نانو ذرات رس(Nano-Clay) اشاره نمود. نانو ابزارها به لوازم و دستگاه‌های مورد استفاده در بررسی خواص مواد در ابعاد نانو گفته می‌شود. از جمله مهم‌ترین و معمول‌ترین نانو ابزارها می‌توان به میکروسکوپ الکترونی[1] (SEM)، طیف‌سنج پرتوایکس[2] (XRD)، تخلخل‌سنجی نفوذ جیوه[3] (MIP) اشاره کرد [۱].

افزودن نانو ذرات به مواد سیمانی موجب می‌شود که تجزیه شیمیایی ناشی از C-S-H (کلسیم-سیلیکات-هیدرات) که در اثر نشست کلسیم در آب رخ می‌دهد، کنترل شده و همچنین موجب جلوگیری از نفوذ آب به داخل بتن شود که هردوی این موارد دوام و مقاومت بتن را افزایش می‌دهند [۲].

مرسی و همکاران[4] در سال ۲۰۱۰ برای بررسی اثر نانو رس متاکائولن بر ملات سیمان، با اضافه کردن نانو رس معادل، ۲، ٤، ٦ و ۸ درصد وزنی سیمان به سیمان پرتلند معمولی و نسبت آب به سیمان ثابت و برابر با ۰/۵، به مطالعه‌ی تأثیر این نانو رس بر خواص مکانیکی و ریزساختار سیمان پرتلند پرداخته‌اند. نتایج بررسی نشان داده که مقاومت فشاری و مقاومت کششی ملات سیمان مخلوط شده با نانو متاکائولن بالاتر از ملات سیمان ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی با همان نسبت آب به سیمان بوده است. افزایش مقاومت کششی در حدود ٤۹٪، در حالی که افزایش مقاومت فشاری بین ۷٪ تا ۸٪ به دست آمده است [۳].

فن، ژان، کاواشیما و سورندرا[5] در سال ۲۰۱۲ ساخت بتن و ملات با خواص مکانیکی بالا و مقاوم در برابر تهاجم نفوذ یون کلراید، به‌وسیله مخلوط سیمان با نانو خاک رس کائولینیت را مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی سیمان پرتلند معمولی با درصدهایی از خاک رس کائولینیت (۰٪، ۱٪، ۳٪، ۵٪، ۷٪ و ۹٪) مخلوط شده که در ساخت تمامی نمونه‌ها نسبت آب به سیمان ثابت و برابر با ۰/۵ بوده است. نتایج آزمون نفوذپذیری با جیوه (MIP[6]) نشان می‌دهد که علاوه بر این‌که خاک رس نفوذپذیری را بهبود می‌بخشد، مقاومت فشاری را نیز

1- Scanning Electron Microscopy
2- X-ray diffraction
3- Mercury Intrusion Porosimetry
4- M. S. Morsy., S.H. Alsayed, M. Aqel.
5- Yingfang Fan, Shiyi, Zhang , Shiho Kawashima, Surendra, P Shah.
6- Mercury Intrusion Porosimetry

افزایش می‌دهد. ملات سیمان ساخته شده با خاک رس ضریب نفوذپذیری کلراید نسبت به ملات ساده را کاهش داده و با ۵٪ خاک رس، مقاومت فشاری ملات سیمان ۱۲٪ افزایش نشان داده است [٤].

فرزادنیا[7] و همکاران در سال ۲۰۱۳ مطالعه بر روی استفاده از نانو رس در سیمان را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه خواص مکانیکی، رفتار و دوام ملات حاوی ۱٪ ، ۲٪ و ۳٪ نانو رس هالوسیتی[8] مورد بررسی قرار گرفته است. مقاومت فشاری نمونه‌های دارای ۳٪ نانو رس حدود ۲٤٪ افزایش و نفوذپذیری با گاز همین نمونه‌ها حدود ٥٦٪ کاهش یافته است [٥].

هاکامی، شیخ و لو۹ (۲۰۱٤) اثر اضافه کردن معادل ۱٪ وزنی سیمان بر کاهش تخلخل، افزایش مقاومت فشاری و خمشی ملات ماسه سیمان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با اضافه کردن ۱٪ وزنی سیمان نانو رس به سیمان پرتلند، کاهش تخلخل ۱٥/٥٪، افزایش مقاومت فشاری ۲٤/۹٪ و مقاومت خمشی۲٦/۲٪ را در پی داشته است [٦].

در مطالعه‌ی حاضر در کلیه نمونه‌های دارای نانو رس و خاکستر بادی، مقادیر این افزودنی‌ها به‌صورت درصدی از وزن سیمان مصرفی انتخاب شده است. در ادامه‌ی بحث برای حفظ اختصار به جای عبارت "درصدی از وزن سیمان" ، از عبارت "درصد"، استفاده خواهد شد.

در این مقاله به بررسی مقاومت فشاری ۳ ، ۷ ، ۲۸ و ۹۰ روزه نمونه‌های ملات ماسه سیمان حاوی ۳٪ و ۵٪ نانو رس تنها و همچنین ۳٪ و ۵٪ نانو رس به همراه ۱۵٪ خاکستر بادی و مقایسه نتایج آن‌ها با نتایج نمونه‌ی مرجع (نمونه‌ی بدون نانو رس و بدون خاکستر بادی) پرداخته شده است. در این بررسی سعی شده که علاوه بر ساخت یک ملات توانمند با افزودن نانو مواد، یک جایگزین مناسب سیمان هم وارد طرح اختلاط شده و تأثیر آن نیز به همراه نانو رس مورد بررسی قرار گیرد.

عملکرد نانو پرکنندگی، با توجه به ابعاد بسیار ریز نانو ذرات و قرارگیری در خلل و فرج نانومتری موجود در ریزساختار خمیر سیمان، منجر به بهبود ویژگی‌های مقاومتی و دوام ملات شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

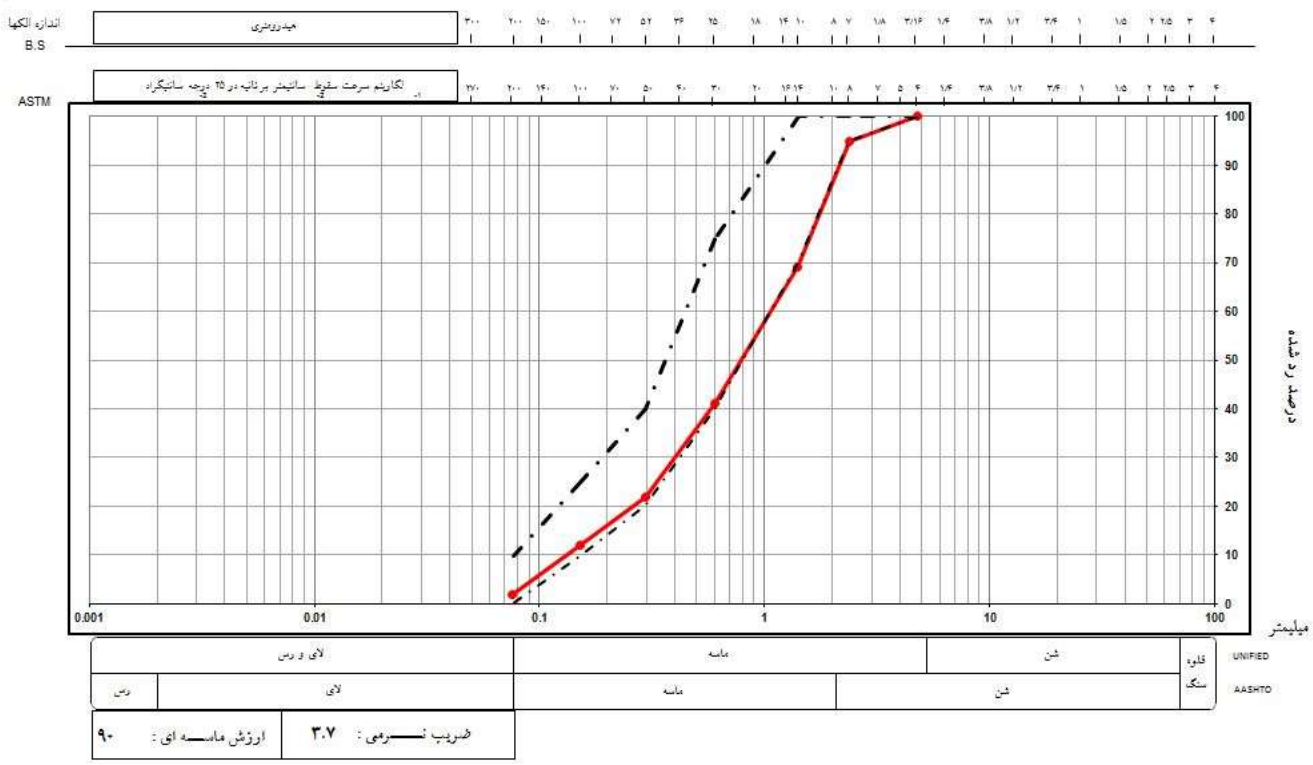
۲-۱-۱- سیمان پرتلند

سیمان مصرفی در این تحقیق، از نوع سیمان پرتلند تیپ ٤۲٥- I (سیمان معمولی) می‌باشد، که بر روی آن آزمایشات شیمیایی و فیزیکی، طبق استانداردهای ملی ایران انجام شده است. نتایج این آزمایشات نشان می‌دهد که سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نظر مرغوبیت و سلامت در محدوده‌ی قابل قبول آیین‌نامه قرار دارد [۷].

۲-۱-۲- ماسه

بر روی ماسه مصرفی، آزمایش وزن مخصوص و جذب آب ماسه مطابق استاندارد ASTM-C127 [۸]، آزمایش عبوری الک ۲۰۰ بر مبنای استاندارد ASTM-C117 [۹] و آزمایش افت وزنی مصالح در مقابل سولفات سدیم طبق استاندارد ASTM-C88 [۱۰] انجام گرفته است. آزمایش دانه‌بندی، پوش حداقل و حداکثر آن طبق استاندارد ASTM-C144 [۱۱] جهت استفاده در ملات انجام و پوش منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی در شکل ۱ نشان داده شده است.

7- N. Farzadnia
8- Halloysit
9- A. Hakamy, F.U.A.Shaikh, I.M.Low



شکل ۱ : پوش منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی.

۲-۱-۳-آب

برای ساخت نمونه‌ها از آب شرب استفاده شده است. کیفیت آب در بتن از آن جهت حائز اهمیت است که ناخالصی‌های موجود در آن ممکن است در گیرش سیمان اثر گذاشته و اختلالاتی در آن به وجود آورند. همچنین آب نامناسب ممکن است روی مقاومت بتن اثر نامطلوب گذاشته و سبب بروز لکه‌هایی در سطح بتن و حتی زنگ زدن آرماتور شود [۱۲]. در اکثر اختلاط‌ها آب مناسب برای بتن آبی است که برای نوشیدن مناسب باشد [۱۲].

۲-۱-٤- نانو رس

مونت موریلونیت تنها رس طبیعی است که به‌عنوان یک نانو رس بیشتر مورد توجه بوده و از آن به دلیل داشتن خصوصیات تعلیق، انتشار و پراکندگی خوب غالباً بیشتر از انواع دیگر رس‌ها استفاده می‌شود [۱۳]. مونت موریلونیت رایج‌ترین نوع رس برای ساخت نانو کامپوزیت‌ها بوده [۱۳] که در این بررسی نیز از این نوع نانو رس استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و ظاهری، هدایت الکتریکی و ضریب تبادل یونی نانو رس مورد استفاده در جدول ۱ و تجزیه‌ی شیمیایی این نوع نانو رس در جدول ۲ نشان داده شده است.

با این حال از انواع دیگر رس می‌توان برای ساخت نانو کامپوزیت‌ها استفاده کرد. این موضوع بستگی به خصوصیات مورد انتظار از محصول نهایی دارد. از انواع این کانی‌های رسی می‌نوان به هکتوریت‌ها[10] که از صفحات بسیار کوچکی تشکیل می‌شوند و هم‌چنین به بنتونیت‌ها[11]

10- Hectorite
11- Bentonite

اشاره کرد [۱۳]. از جمله رس‌های مصنوعی هیدروتالیست[12] می‌باشد که به صورت بسیار خالص تهیه و از صفحات بسیار کوچکی تشکیل شده است. صفحات این نوع رس می‌تواند بار مثبت داشته باشد که ته نشینی سریع آنها را نتیجه می‌دهد، در حالی که مونت موریلونیت‌ها حامل بار منفی هستند که به آن‌ها قابلیت انتشار و پراکندگی خوبی می‌دهد [۱۳].

جدول۱ : مشخصات فیزیکی و ظاهری، هدایت الکتریکی و ضریب تبادل یونی نانو رس(مونت موریلونیت)

نوع کانی	چگالی (kg/m^3)	اندازه ذرات (nm)	مساحت سطح ویژه (m^2/gr)	هدایت الکتریکی (MV)	ضریب تبادلی یونی (meg/ 100 gr)	فاصله خالی بین ذرات(A°)	رنگ	رطوبت (٪)
مونت موریلونیت	۳۰۰-۳۷۰	۱-۲	۲۲۰-۲۷۰	۲۵	٤۸	٦۰	زرد	۱-۲

جدول۲ : تجزیه‌ی شیمیایی نانو رس

Na_2O(%)	MgO(%)	Al_2O_3(%)	SiO_2(%)	K_2O(%)	CaO(%)	TiO_2(%)	Fe_2O_3(%)	L.O.I
۰/۹۸	۳/۲۹	۱۹/٦	۵۰/۹۵	۰/۸٦	۱/۹۷	۰/٦۲	۵/٦۲	۱۵/٤۵

۲-۱-۵- خاکستر بادی

خاکستر بادی محصول فرعی سوخت ذغال‌سنگ بوده، که شامل سیلیس و آلومین و اکسیدهای آهن و کلسیم است [۱٤]. خاکستر بادی از نظر ترکیب و خواص کانی‌شناسی می‌تواند به دو گروه، که اساساً در مقدار کلسیم باهم تفاوت دارند، تقسیم شوند. خاکسترهای گروه اول که به نوع F معروف‌اند Cao تجزیه‌ای در آن‌ها کمتر از ۱۰ درصد بوده و به‌طور کلی محصول احتراق آنتراسیت و ذغال سنگ قیری‌اند. خاکسترهای گروه دوم که به نوع C معروف‌اند معمولاً دارای ۱۵ تا ۳۵ درصد Cao تجزیه‌ای بوده که خود خاصیت چسپندگی داشته [۱۲] و به طور کلی محصول احتراق لیگنیت و ذغال سنگ نیمه قیری‌اند [۷]. خاکستر بادی که در این بررسی از آن استفاده شده از نوع F می‌باشد که تجزیه‌ی شیمیایی این نوع خاکستر بادی در جدول ۳ نشان داده شده است. کاربرد خاکستر بادی به صورت بخشی از سیمان پرتلند در بتن علاوه بر خصوصیات و مزایای فنی می‌تواند راه حل بسیار ساده‌ای برای صرفه‌جویی در مصالح خام سیمان و نیز در منابع انرژی باشد. صرفه‌جویی در منابع طبیعی نیز نوعی حفاظت از محیط زیست محسوب می‌شود که خود بسیار با اهمیت است [۷].

جدول۳ : تجزیه‌ی شیمیایی پودر خاکستر بادی

SiO_2(%)	Al_2O_3(%)	CaO(%)	Na_2O(%)	K_2O(%)	Fe_2O_3(%)	SO_3(%)	L.O.I	Density
٥٤	۲۰	۹	۰/۹	۰/۹	۱۰	۱/۳	۲/٥	۲

۲-۱-٦- فوق روان کننده

در این بررسی از افزودنی‌های بتن شرکت کریزو[13]، نسل جدید افزودنی‌های بتن بر پایه پلی‌کربوکسیلات، سوپر فوق روان کننده بتن با نام تجاری Optima ۲۸۰ استفاده شده است.

۲-۲- طرح اختلاط

12- Hydrvtalyst
13- Chryso

نمونه‌های ملات ماسه سیمان مطابق ضوابط طرح اختلاط استاندارد ASTM4-C270 [۱۵] ساخته شده که در تمام آن‌ها نسبت مجموع آب و مواد فوق روان‌کننده به مجموع سیمان و مواد افزودنی ثابت و برابر ۰/۳٦ می‌باشد.

برای جلوگیری از کلوخه شدن نانو رس در داخل ملات، قبل از اضافه کردن آن به ملات، بایستی مخلوط آب و نانو رس توسط همزن آلتراسونیک (مغناطیسی)[14] کاملاً به هم زده شود تا به شکل محلول همگنی درآید [۵،٦]. همزن‌های آلتراسونیک در بسیاری از علوم نانوتکنولوژی، بیوتکنولوژی، زیست‌شناسی و ... کاربرد دارند. از جمله مهم‌ترین کاربردهای این دستگاه، ایجاد محلول همگن از ترکیب آب و نانو مواد می‌باشد (شکل۲).

شکل۲ : همزن آلتراسونیک.

جدول٤ : طرح اختلاط نمونه‌ها

شماره نمونه	سیمان (gr)	ماسه اشباع (gr)	آب (cc)	نانو رس (gr)	خاکستر بادی (gr)	فوق روان کننده (gr)
نمونه شماره ۱ (بدون نانو و خاکستر بادی)	٦۰۰۰	۱۵۹۰۰	۲۱۰۰	–	–	۳۰گرم- ۰/۵درصد وزنی سیمان
نمونه شماره۲ (۳٪ وزنی نانو رس)	۵۸۲۰	۱۵۹۰۰	۲۱۰۰	۱۸۰	–	۳۰ گرم – ۰/۵درصد وزنی سیمان
نمونه شماره۳ (۵٪ وزنی نانو رس)	۵۷۰۰	۱۵۹۰۰	۲۱۰۰	۳۰۰	–	۳۰ گرم – ۰/۵درصد وزنی سیمان
نمونه شماره٤ (۳٪ وزنی نانو رس + ۱۵٪ وزنی خاکستر بادی)	٤۹۲۰	۱۵۹۰۰	۲۱۰۰	۱۸۰	۹۰۰	۳۰ گرم – ۰/۵درصد وزنی سیمان
نمونه شماره۵ (۵٪ وزنی نانو رس+ ۱۵٪ وزنی خاکستر بادی)	٤۸۰۰	۱۵۹۰۰	۲۱۰۰	۳۰۰	۹۰۰	۳۰ گرم – ۰/۵درصد وزنی سیمان
جمع کل	۲۷۲٤۰	۷۹۵۰۰	۱۰۵۰۰	۹٦۰	۱۸۰۰	۱۵۰

تمامی نتایج به دست آمده از نمونه‌های ملات ماسه سیمان با نتایج نمونه‌ی مرجع (نمونه‌ی بدون نانو رس و بدون خاکستر بادی) مقایسه شده و مورد ارزیابی قرار گرفته است. جهت ساخت هر نمونه با در نظر گرفتن مقادیر جدول ٤، به ترتیب زیر اقدام شده است:

ریختن ماسه اشباع به داخل همزن و اضافه کردن سیمان، اضافه کردن مقداری از آب اختلاط به همراه مقداری از فوق روان کننده، اضافه کردن محلول نانو رس به همزن، اضافه کردن خاکستر بادی به همزن که از قبل توسط همزن هیدرومتری با مقداری آب کاملاً مخلوط شده و به شکل یک محلول همگن در آمده [۱۲]، اضافه کردن آب و فوق روان کننده باقی‌مانده، به هم زدن کامل مخلوط ملات بعد از ریختن تمام مواد آن به مدت حدود ۵ دقیقه و در انتها تخلیه ملات از همزن و پر کردن قالب‌های مکعبی مورد نیاز جهت انجام آزمایش‌ها.

14- Ultrasonic homogenizer mixer

۲-۳- شرح آزمایش

جهت بررسی مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان، از قالب‌های مکعبی ۵*۵*۵ سانتیمتر استفاده شده است. هر یک از قالب‌ها در سه لایه و هر لایه با ۲۵ ضربه چکش تراکم مخصوص، مطابق شکل ۳ با ملات پر شده است. سطح جانبی هر یک از نمونه‌ها بعد از بیرون آوردن از حوض با یک پارچه کنفی خشک شده (حالت اشباع با سطح خشک) و سپس در زیر جک ملات شکن قرار می‌گیرد (شکل‌های ٤ و٥) [١٦].

جذب آب نیم ساعته مطابق استاندارد BS-1881 [١٧] بر روی نمونه‌ها انجام گرفته و نتایج آن در بند۳-۳ بیان شده است. هم‌چنین جهت بررسی ریزساختار خمیر سیمان به لحاظ پیوستگی، از عکس میکروسکوپ الکترونی نیز استفاده شده است.

شکل۳ : قالب مکعبی ۵*۵*۵ پر شده با ملات.

شکل٤ : جک ملات شکن.

شکل٥ : نحوه شکست نمونه.

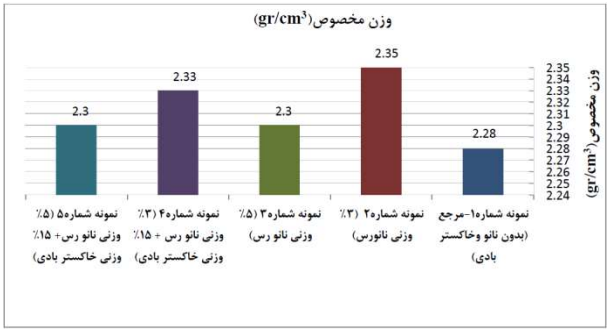
۲-٤- نگهداری و عمل‌آوری نمونه‌ها

مطابق روش استاندارد BS-1881 [١٨]، نمونه‌های پر شده با ملات در مدت ٢٤ ساعت اولیه، قبل از خارج شدن از قالب در داخل دستگاه عمل‌آوری مرطوب قرار داده شده‌اند. دمای حوض آب ۲±۲۰ درجه سانتی‌گراد بوده و تعویض آب حوض هر ماه یک‌بار انجام شده است.

۳- بررسی و تفسیر نتایج

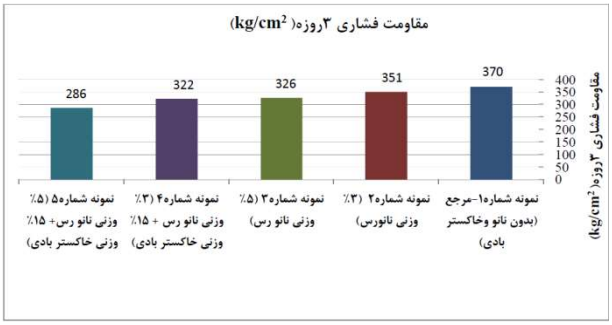
۳-۱- با توجه به نتایج وزن مخصوص نمونه‌ها که در شکل ٦ نشان داده شده، بکار بردن ۳٪ نانو رس تنها و همچنین ۳٪ نانو رس به همراه ۱۵٪ خاکستر بادی، تراکم و وزن مخصوص ملات را به ترتیب ۳ و ۲/۱ درصد افزایش داده است. ولی اضافه کردن ۵٪ نانو رس تنها و نیز ۵٪ نانو رس به همراه ۱۵٪ خاکستر بادی، تراکم و وزن مخصوص ملات ماسه سیمان را فقط ۰/۹٪ افزایش داده است. با عملکرد نانو پرکنندگی، ذرات نانو در خلل و فرج ملات قرار گرفته و به دلیل بالا بودن وزن مخصوص نانو رس نسبت به هوا باعث افزایش وزن مخصوص ملات گشته است. با افزایش درصد نانو رس، تمام فضای خالی ملات پرشده و مازاد

آن جای مواد سیمانی را گرفته و به دلیل اینکه وزن مخصوص نانو رس کمتر از مواد سیمانی می‌باشد، وزن مخصوص ملات ماسه سیمان کاهش یافته است (شکل ٦).

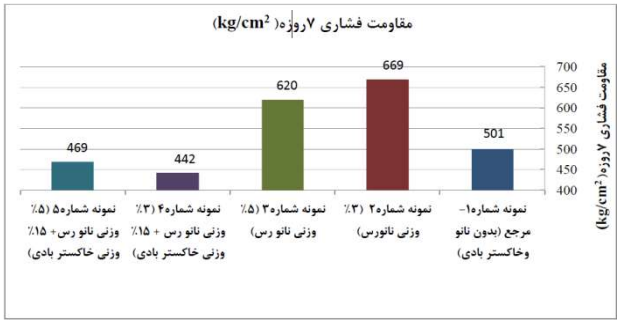


شکل٦ : تأثیر نانو رس و خاکستر بادی بر روی وزن مخصوص ملات ماسه سیمان.

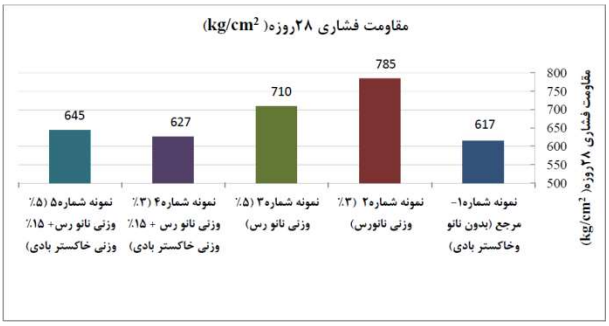
۳-۲- اضافه کردن ۳٪ و ۵٪ نانو رس تنها، به ترتیب باعث افزایش ۳۳/۵ و ۲۳/۸ درصدی مقاومت فشاری در سن ۷ روزه، افزایش ۲۷/۲ و ۱۵/۱ درصدی مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه و افزایش ۲۸/٤ و۲۲/٤ درصدی مقاومت فشاری در سن ۹۰ روزه شده است. در حالی که در طرح‌های شماره ٤ و ۵ یعنی ملات‌های دارای نانو رس به همراه خاکستر بادی، به دلیل روند کاهشی آبگیری سیمان، کاهش مقاومت فشاری را در سنین کم ۳ و۷ روزه داشته ولی افزایش مقاومت فشاری ۱/٦و ٤/۵ درصدی را در سن ۲۸ روزه و افزایش ۱۰ و ١٦ درصدی را در سن۹۰ روزه داشته‌ایم (شکل‌های ۷ الی ۱۰).



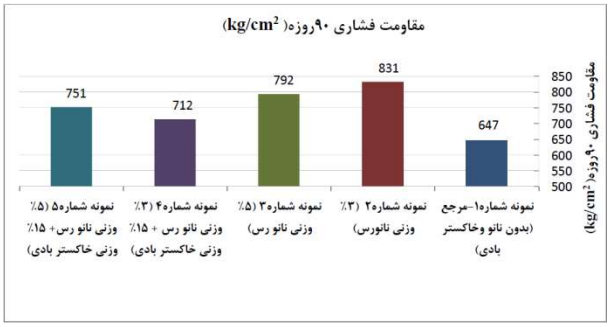
شکل۷ : تأثیر نانو رس و خاکستر بادی بر روی مقاومت فشاری ۳ روزه ملات ماسه سیمان.



شکل۸ : تأثیر نانو رس و خاکستر بادی بر روی مقاومت فشاری ۷ روزه ملات ماسه سیمان.

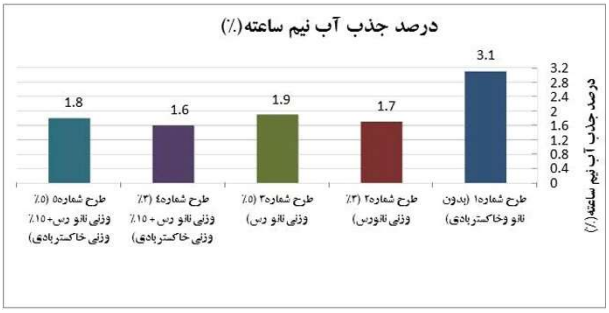


شکل۹ : تأثیر نانو رس و خاکستر بادی بر روی مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات ماسه سیمان.



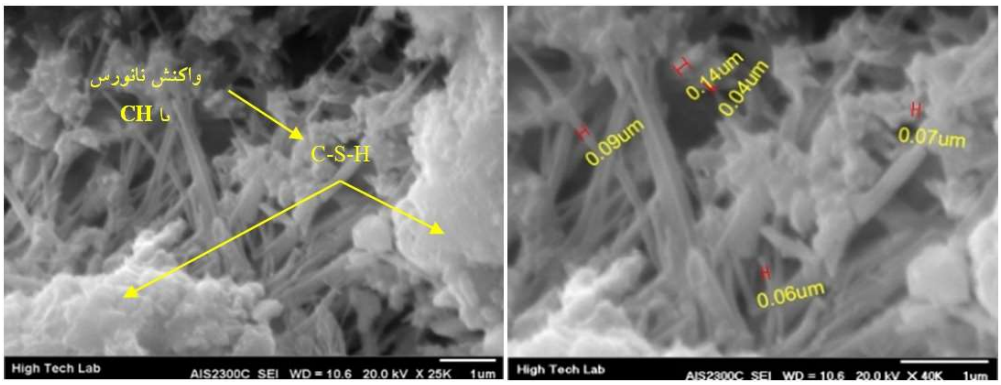
شکل۱۰ : تأثیر نانو رس و خاکستر بادی بر روی مقاومت فشاری ۹۰ روزه ملات ماسه سیمان.

۳-۳- با توجه به شکل۱۱، بکار بردن ۳٪ نانو رس به همراه ۱۵٪ خاکستر بادی، کاهش ٤٨/٤ درصدی جذب آب در ملات را در بر داشته است. افزایش وزن مخصوص ملات باعث کاهش خلل و فرج و در نتیجه کاهش جذب آب نمونه شده است.

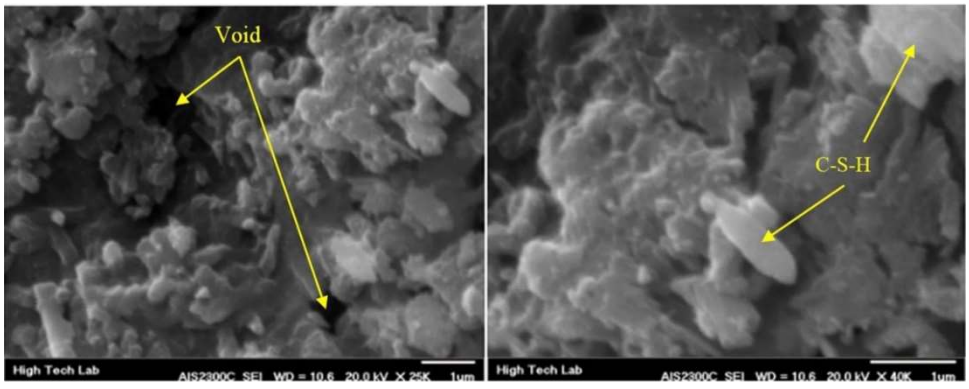


شکل۱۱ : تاثیر نانو رس و خاکستر بادی بر روی جذب آب نمونه‌های ملات ماسه سیمان ۲۸ روزه.

۳-٤- مقایسه نتایج عکس میکروسکوپ الکترونی(SEM) مربوط به نمونه‌ی شماره ۲ یعنی نمونه‌ی دارای ۳٪ نانو رس تنها در شکل۱۲ با نمونه مرجع مطابق شکل۱۳، نشان دهنده مقدار ژل (C-S-H) بیشتر در نمونه‌ی شماره ۲ بوده که انسجام و پیوستگی در ریزساختار خمیر سیمان این نمونه را به‌خوبی نشان می‌دهد که همین عامل، افزایش مقاومت فشاری نمونه شماره ۲ را در پی داشته است.



شکل۱۲ : عکس میکروسکوپ الکترونی جهت بررسی ریزساختار نمونه شماره ۲.



شکل۱۳ : عکس میکروسکوپ الکترونی جهت بررسی ریزساختار نمونه‌ی مرجع (نمونه‌ی بدون خاکستر بادی و بدون نانو رس).

٤- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی مقاومت فشاری نمونه‌های ملات ماسه سیمان دارای ۳٪ و ۵٪ نانو رس تنها و همچنین ۳٪ و ۵٪ نانو رس به همراه ۱۵٪ خاکستر بادی و مقایسه نتایج آن‌ها با نمونه‌ی مرجع (نمونه‌ی بدون نانو رس و بدون خاکستر بادی) پرداخته شد. هم‌چنین سعی گردید که علاوه بر ساخت یک ملات توانمند با افزودن نانو مواد، یک جایگزین مناسب سیمان هم وارد طرح اختلاط شده و تأثیر آن نیز به همراه نانو رس مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به مطالب ارائه شده می‌توان نتایج اصلی را به شرح زیر بیان نمود:

- در تمام نمونه‌های حاوی نانو رس و خاکستر بادی، به علت پر شدن خلل و فرج خمیر سیمان، افزایشی تا حدود ۳٪ در وزن مخصوص ملات نسبت به نمونه مرجع مشاهده شده است.
- اضافه کردن نانو رس به همراه خاکستر بادی به دلیل کم شدن روند سرعت آبگیری سیمان، باعث کاهش مقاومت فشاری ملات ماسه سیمان در سنین کم ۳ و ۷ روزه می‌شود.
- اضافه کردن ۳٪ و ۵٪ نانو رس تنها به ملات ماسه سیمان، به ترتیب باعث افزایش ۳۳/۵ و ۲۳/۸ درصدی مقاومت فشاری در سن ۷ روزه، افزایش ۲۷/۲ و ۱۵/۱ درصدی در سن ۲۸ روزه و افزایش ۲۸/٤ و۲۲/٤ درصدی در سن ۹۰ روزه شده است.
- اضافه کردن ۳٪ و ۵٪ نانو رس به همراه ۱۵٪ خاکستر بادی به ملات ماسه سیمان، به ترتیب باعث افزایش ۱/٦ و ٤/۵ درصدی مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه و افزایش ۱۰ و ۱٦ درصدی در سن ۹۰ روزه شده است.
- وجود ۳٪ نانو رس به همراه ۱۵٪ خاکستر بادی، جذب آب را ٤۸/٤ درصد کاهش داده و در نتیجه میزان نفوذپذیری در مقابل مواد خورنده را کاهش می‌دهد.

واکنش تدریجی خاکستر بادی با هیدرو اکسید کلسیم و قلیایی‌های حاصل از آبگیری سیمان باعث ایجاد مقدار ژل بیشتر (C-S-H) و مسدود شدن فضاهای خالی و افزایش انسجام و پیوستگی به استناد عکس‌های میکروسکوپ الکترونی در ریزساختار خمیر سیمان و درنتیجه افزایش مقاومت فشاری ملات نسبت به نمونه مرجع شده است.

مراجع

[۱] کوچکی،ابوالقاسم ،عباسی،علی، افشاری،حامد، شکی، حسین، هراتی فر،عمادالدین، میردامادیان، امیرحسین «*فناوری نانو در صنعت ساختمان و کاربردهای آن*» چاپ دوم، دبیرخانه ستاد ویژه توسعه فناوری نانو.۱۳۹۱.

[2] Florence Sanchez, Konstantin Sobolev.; "Nanotechnology in concrete – A review"; Construction and Building Materials, 24, pp. 2060–2071.(2010).

[3] M. S. Morsy., S. H. Alsayed .,M. Aqel.; "*Effect of Nano-clay on Mechanical Properties and Microstructure of Ordinary Portland Cement Mortar*"; International Journal of Civil & Environmental Engineering(IJCEE). 2010.

[4] Yingfang, Fan ., Shiyi, Zhang ., Shiho, Kawashima ., Surendra, P Shah.; "*Influence of kaolinite clay on the chloride diffusion property of cement-based materials*"; Cement & Concrete Composites 45 (2014) 117–124.

[5] Nima, Farzadnia ., Abang Abdullah Abang, Ali ., Ramazan, Demirboga ., Mohammed Parvez ,Anwar.; "*Effect of halloysitenanoclay on mechanical properties, thermal behavior and microstructure of cement mortars*"; Cement and Concrete Research 48 (2013) 97–104.

[6] A,Hakamy, F.U.A., Shaikh, I.M. Low; "*Characteristics of hemp fabric reinforced nanoclay–cement nanocomposites*"; Cement & Concrete Composites50 (2014) 27–35.

[۷] پاکومارمهتا، پائولوج. م. مونته ئیرو «*ریزساختار ، خواص، و اجزای بتن تکنولوژی بتن پیشرفته*» ترجمه دکتر علی‌اکبر رمضانیانپور، دکتر پرویز قدوسی، دکتر اسماعیل گنجیان. انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، چاپ پنجم، زمستان ۱۳۹۲.

[8] American Society for Testing and Material; "*Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*"; ASTM C127. (2015).

[9] American Society for Testing and Material; "*Standard Test Method for Materials Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*"; ASTM C117. (2013).
[10] American Society for Testing and Material; "*Method of Test for Soundness of Coarse Aggregates by Use of Sodium Sulfate, or Magnesium Sulfate* "; ASTM C89.(1937).
[11] American Society for Testing and Material; "*Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar*"; ASTM C144. (2011).
[۱۲] آ. ام. نویل، جی. جی. بروک «*تکنولوژی بتن*»؛ ترجمه علی‌اکبر رمضانیانپور، محمدرضا شاه‌نظری. انتشارات علم و صنعت. چاپ سیزدهم. ۱۳۸٤.
[۱۳] سالاری،مریم، رضایی،مسیح، موسوی‌خویی، سید محمد، مرعشی،پیروز، مصحفی،زهرا «*مطالعات امکان سنجی مقدماتی تولید نانو رس در ایران*» جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر. پاییز ۱۳۹۰.
[١٤] وزارت راه و شهرسازی «مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران: طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه» ویرایش چهارم. ۱۳۹۲.
[15] American Society for Testing and Material. "*Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*". ASTM C270. (2014).
[16] American Society for Testing and Material." *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*".ASTM C109. (2013).
[17] British Standard (BS). "*Method for determination of water absorption*", BS1881-part122. (1983).
[18] British Standard (BS). "*Making and curing test cubes, Making and curing no-fines test cubes,Making and curing test beams, Making and curing test cylinders,Method for accelerating the curing of test specimens: 1) the 55ºC method 2) the 82ºC method*".BS1881-part3. (1970).