

ارزیابی خصوصیات ملات بنایی حاوی سنگدانه بازیافتی و زئولیت با تأکید بر توسعه پایدار

سیدمحمد هاشمی مایوان¹، امیرحسین عندلیب²، امیرعلی زیارتی³، محمدرضا دانش‌پسند⁴، شهرام وهدانی^{5*}

1- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران؛ mo.hashemi@ut.ac.ir

2- کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیر، تهران، ایران؛

amirhossein.andalib@email.kntu.ac.ir

3- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران؛ amirali.ziarati@ut.ac.ir

4- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران؛ reza.daneshpasand96@sharif.edu

5- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران؛ svahdani@ut.ac.ir

خلاصه

در این مقاله، ویژگی‌های ملات بنایی حاوی ماسه بازیافتی و زئولیت به منظور توسعه پایدار مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق شامل هشت طرح اختلاط ملات بنایی است که در آن‌ها ماسه بازیافتی با درصد‌های ۵۰ و ۱۰۰ درصد به جای ماسه طبیعی و زئولیت با درصد‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۵ درصد به جای سیمان مورد استفاده قرار گرفته است. آزمایشات فیزیکی و مکانیکی از جمله جذب آب، مقاومت فشاری و جریان روانی بر روی این ملات‌ها صورت گرفته است. نتایج حاصل از این آزمایشات نشان می‌دهند که ملات‌های بنایی حاوی ماسه بازیافتی و زئولیت مطابق با استانداردهای ملی ملات بنایی هستند و از راهکارهای کاهش استفاده از مصالح طبیعی، توسعه پایدار و رسیدن به ملات‌های سبز حمایت می‌کنند. آزمایش‌های انجام شده بر روی ملات‌های بنایی ساخته شده با ماسه بازیافتی و زئولیت نتایج قابل قبولی به دست داده‌اند که الزامات استاندارد ملی ملات بنایی را برآورده نموده و نشان می‌دهند که استفاده از جایگزینی ۵۰ درصدی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی و جایگزینی ۱۵ درصدی سیمان با زئولیت می‌تواند راهکار خوبی برای کاهش استفاده از مصالح طبیعی، توسعه پایدار و رسیدن به ملات سبز باشد. این تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از ملات‌های بنایی حاوی ماسه بازیافتی و زئولیت می‌تواند به عنوان یک راهکار کلیدی برای کاهش مصرف مصالح طبیعی و تحقق توسعه پایدار در صنعت ساختمان‌سازی ایران مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: ماسه بازیافتی، زئولیت، توسعه پایدار، ملات سبز، ملات بنایی

1. مقدمه

سیمان یکی از اساسی‌ترین اجزای تشکیل‌دهنده بتن و ملات به شمار می‌رود و به همین دلیل حجم تولید قابل توجهی در سراسر دنیا دارد. در گزارشی که سازمان زمین‌شناسی آمریکا در سال ۲۰۱۰ منتشر کرد، بیان نمود که در سال ۲۰۱۰ حدود ۲ میلیارد تن سیمان پرتلند در دنیا تولید شده است که منجر به تولید ۱۲ الی ۱۴ میلیارد تن بتن و ملات بنایی می‌گردد. از سوی دیگر تولید سیمان معضلات زیست محیطی متعددی به همراه دارند؛ لذا ضروری است که به نحو مناسبی آن‌ها را مرتفع نمود تا از شدت تخریب‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید بی‌رویه آن کاسته شود. فرآیند تولید سیمان انرژی



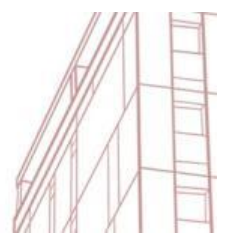
بسیار زیادی مصرف می‌کنند، تا آنجایی که تولید کلینکر سیمان در دمایی نزدیک به ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد. کارخانه‌های تولید بعد از نیروگاه‌های تولید برق، جایگاه دوم در تولید گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن را به خود اختصاص می‌دهند [۱]. به‌طور کلی تولید یک تن سیمان، تولید یک تن دی‌اکسیدکربن را به همراه دارد و مجموعاً صنعت تولید سیمان ۹٪ از کل گازهای دی‌اکسیدکربن تولیدی در جهان را به خود اختصاص می‌دهد؛ لذا بزرگ‌ترین دغدغه در خصوص رسیدگی به مسائل زیست‌محیطی در زمینه تولید سیمان، کاهش هرچه بیشتر گازهای گلخانه‌ای تولیدی در این فرآیند است. یکی از تلاش‌های جهانی برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ناشی از تولید سیمان، استفاده از مواد جایگزین سیمان است [۲].

یکی از جایگزین‌های مناسب سیمان، می‌تواند زئولیت طبیعی، آلومینوسیلیکات هیدراته از کاتیون‌های قلیایی و قلیایی خاکی باشد که از زمان‌های قدیم به طور گسترده در ساخت‌وسازها مورد استفاده قرار گرفته است. باین‌حال، کاربرد آن به‌عنوان یک نوع محبوب از پوزولان‌های طبیعی در ساخت سیمان‌های پوزولانی از اوایل دهه‌ی قرن بیستم آغاز شد و روند روبه‌رشدی را نشان می‌دهد. زئولیت حاوی مقدار زیادی SiO_2 و Al_2O_3 فعال است که به طور شیمیایی با هیدروکسید کلسیم تولید شده توسط هیدراتاسیون سیمان ترکیب می‌شود و ژل C-S-H و آلومینات‌های اضافی را تشکیل می‌دهد و در نتیجه ریزساختار سیمان سخت شده را بهبود می‌بخشد. تحقیقات انجام شده بر روی بتن‌های حاوی زئولیت نشان دهنده افزایش مقاومت این بتن‌ها بوده است. استفاده از زئولیت به عنوان یک افزودنی پوزولانی با درصد جذب بالا (نزدیک به ۴۰٪ وزن خود) باعث ایجاد یک عمل‌آوری داخلی در بتن می‌گردد که نتیجه آن نفوذپذیری پایین و دوام بالا در یک نسبت آب به سیمان پایین است. همچنین بتن‌های حاوی زئولیت از نظر زیست‌محیطی عملکرد بسیار مناسب تری نسبت به سیمان دارند به طوری که جایگزینی ۲۰٪ سیمان با زئولیت، می‌تواند شاخص گرمایش جهانی بتن تولید شده را تا ۷۰٪ کاهش دهد. که این امر از نظر توسعه پایدار استفاده از زئولیت را توجیه می‌کند.

از دیگر سو در سال‌های اخیر باتوجه به استفاده روزافزون از مواد و مصالح طبیعی برای ساخت‌وساز و افزایش مصرف بتن، دسترسی به مصالح سنگ‌دانه‌ای طبیعی سخت‌تر شده است. از دیگر سو، با تخریب سازه‌های قدیمی نیاز به محل‌های دفن نخاله‌های ساختمانی به‌شدت افزایش یافته است که باعث آلودگی زیست‌محیطی و اشغال زمین‌های حاشیه شهرها با نخاله‌های ساختمانی شده است. در بسیاری از کشورها به دلیل پرشدن فضای اطراف شهرها و نبود محل مناسب برای دفن نخاله‌های ساختمانی، نخاله‌های ساختمانی به معضلی اساسی تبدیل شده است [۳]. همچنین منابع طبیعی موردنیاز برای ساخت‌وساز جدید نیز روزبه‌روز کم‌تر و دسترسی به آن سخت‌تر می‌شود. یک راهکار مناسب و مبتنی بر توسعه پایدار استفاده از نخاله‌های ساختمانی برای ساخت‌وسازهای جدید است که می‌تواند نیاز به مصالح طبیعی را بر طرف نموده و آلودگی ناشی از دفن نخاله‌های ساختمانی را کاهش دهد. در این راستا تحقیقات زیادی در سال‌های اخیر انجام شده است و بسیاری از کشورها آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌هایی برای بازیافت بتن و استفاده در ساخت بتن و ملات بنایی تدوین کردند [۴].

از دیدگاه زیست‌محیطی، استفاده از سنگدانه بازیافتی ریز به‌عنوان شن و ماسه می‌تواند چندین مزیت را به همراه داشته باشد از جمله: (۱) استخراج شن و ماسه را کاهش می‌دهد که باعث اثرات زیست‌محیطی عظیمی در سراسر جهان می‌شود؛ (۲) مصرف انرژی و انتشار دی‌اکسیدکربن را کاهش می‌دهد؛ و (۳) مانع از دفن‌های غیرقانونی بخش‌های ریز مواد بازیافتی می‌شود [۵، ۶، ۷]. محققان زیادی به نوآوری در بتن سبز، و عملکرد زیست‌محیطی چرخه عمر آن‌ها توجه کردند. البته بتن سنگدانه بازیافتی نوعی بتن سبز است. با این حال محققان تلاش کرده‌اند تا استراتژی‌هایی را برای سبتر کردن آن بررسی کنند [۸، ۹، ۱۰].

این پژوهش به بررسی ویژگی‌ها و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بتن سنگدانه بازیافتی ساخته شده با ماسه‌ی بازیافتی و زئولیت به‌عنوان مصالح جایگزین سیمان پرداخته است که در کارهای عمرانی بسیار کاربرد دارد و با استفاده از مصالح بازیافتی



در این زمینه می‌توان در مصرف مصالح ارزشمند طبیعی صرفه‌جویی کرد و از مصالح طبیعی در زمینه‌های حساس‌تر که نیاز به مصالح باکیفیت بالا و یک‌دست دارند استفاده کرد. همچنین باعث کاهش نیاز به زمین‌های وسیع در اطراف شهرها برای دپوی نخاله‌های ساختمانی می‌شود که هم‌اکنون نیز در حال تبدیل شدن به معضلی بزرگ در شهرهای بزرگ کشور است و همچنین در مطالعات توسعه پایدار در اثر جایگزینی سیمان با زئولیت، مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای (شاخص گرمایش جهانی) کاهش می‌یابد. در تحقیقات پیشین برخی مشخصات ماسه‌ی بازیافتی و زئولیت مانند دانه‌بندی متغیر بوده است که این مهم می‌تواند بر ویژگی‌ها و خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ملات ساخته شده تأثیرگذار باشد؛ لذا در پژوهش حاضر به جهت کاهش متغیرهای دخیل در نتایج آزمایش‌ها، از دانه‌بندی یکسان برای ماسه‌ی طبیعی و بازیافتی استفاده شده است. از طرف دیگر کارایی همه‌ی ملات‌های بنایی نیز در محدوده‌ی خاصی محدود شد و برای جلوگیری از اثر تغییرات رطوبت در مصالح، از سنگ‌دانه‌های اشباع با سطح خشک استفاده شده است.

2. مواد مورد استفاده و طرح اختلاط

1.2. ویژگی‌های مصالح مورد استفاده

در این مطالعه از سیمان پرتلند تیپ ۲ تولید کارخانه سیمان تهران استفاده شده است. این نوع سیمان در موارد گرمای هیدراتاسیون متوسط و مقاومت متوسط در برابر حملات سولفات استفاده می‌شود. ماسه‌ی طبیعی مورد استفاده در این تحقیق از نوع رودخانه‌ای با حداکثر اندازه‌ی ۴/۷۵ میلی‌متر است. ماسه‌ی بازیافتی نیز از خرد کردن نمونه‌های بتنی موجود در محل تخلیه‌ی نخاله‌ی ساختمانی مشتمل بر مواد معدنی، که در آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران انجام شد، تهیه شد. این نمونه‌ها با الک کردن به اندازه‌ی مورد نیاز آماده شدند. در جدول ۱، مشخصات بتن اولیه شامل ماسه بازیافتی ارائه شده است. همچنین در جدول ۲ مشخصات فنی سنگ‌دانه‌های مصرفی گزارش شده است. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که مقدار جذب آب ماسه‌ی بازیافتی به مراتب بیشتر از مقدار جذب آب ماسه طبیعی است. این اختلاف احتمالاً به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی متفاوت ماسه‌ی بازیافتی نسبت به ماسه طبیعی است. معمولاً، ماسه‌های بازیافتی دارای سطح جذب بیشتری برای آب هستند که این می‌تواند به دلیل وجود سطح‌های بیشتری با خواص جذبی مختلف در ماسه‌های بازیافتی نسبت به ماسه طبیعی باشد. همچنین چگالی ظاهری ماسه بازیافتی کمتر از چگالی ظاهری ماسه طبیعی است. یکی از مهم‌ترین دلایل تفاوت این مقادیر، وجود ذرات سیمان هیدراته شده چسبیده به سطوح ماسه‌های بازیافتی است. زئولیت مورد استفاده نیز از کارخانه تولید فرا افزونه واقع در سمنان تهیه گردید. در جدول ۳ نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی سیمان پرتلند و زئولیت ارائه شده است. همچنین در جدول ۴ مواد سازنده‌ی ماسه‌ی بازیافتی استفاده شده، آورده شده است.



جدول 1- مشخصات بتن اولیه سنگ‌دانه‌های بازیافتی بتنی

	مشخصه
۰/۳۴	W/C
۴۲۰	سیمان (kg/m^3)
۱۴۲/۸	آب (kg/m^3)
۳۳۵	سنگ‌دانه ۹/۵ - ۱۹ میلی‌متر (kg/m^3)
۲۵۸	سنگ‌دانه ۴/۷۵ - ۱۲/۵ میلی‌متر (kg/m^3)
۱۲۳۸	سنگ‌دانه ۰ - ۶ میلی‌متر (kg/m^3)

جدول 2- خصوصیات فنی سنگ‌دانه‌های مصرفی

مشخصه	جذب آب (%)	چگالی (Ton/m^3)
ریزدانه طبیعی	۳/۴۱	۲/۵۱
ریزدانه بازیافتی	۱۲/۳۹	۲/۲۸

جدول 3- ساختار شیمیایی مواد مورد استفاده

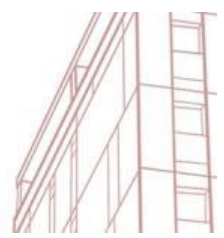
ترکیب شیمیایی (%)	سیمان	ژئولیت
SiO_2 (%)	۲۷/۳	۶۴/۹۰
Al_2O_3 (%)	۴/۶	۱۲/۳۰
Fe_2O_3 (%)	۲/۷	۰/۳۶
CaO (%)	۴۶/۷	۲/۱۰
MgO (%)	۳/۵	۰/۹۰
SO_3 (%)	۲/۰۴	۰/۱۹
Na_2O (%)	۰/۳۴	-
K_2O (%)	۰/۵۲	-
Equivalent alkali (%)	۰/۶۸	-
LOI (%)	۴/۸۴	۴/۱۸

جدول 4- مواد سازنده‌ی ماسه‌ی بازیافتی

درصد وزنی	مواد سازنده
۹۴/۳۲	بتن و سیمان



۲/۲۷	کلینکر و ذرات آجر
۲/۰۴	سایر مواد معدنی
۰/۷۶	آسفالت
۰/۳۴	مواد سرامیکی
۰/۲۷	سایر مواد



ماسه طبیعی مصرفی در این پروژه از کارخانه صحرای شن و ماسه تهیه شد اما به دلیل عدم انطباق منحنی دانه‌بندی آن با الزامات مندرج در استاندارد ASTM C144 [۱۱] که مشخصات سنگ‌دانه‌های مصرفی در تولید ملات بنایی را قید نموده است، منحنی دانه‌بندی به صورت دستی و با عمل سرند کردن تغییر داده شد. برای این منظور ماسه مذکور به شش بازه $۰/۰-۱۵۰/۰۷۵$ ، $۰/۰-۳۰۰/۱۵۰$ ، $۰/۳۰۰-۰/۶۳۰$ ، $۰/۶۳۰-۰/۱۱۸۰$ ، $۰/۱۱۸۰-۰/۱۸۰$ ، $۰/۱۸۰-۰/۳۶۰$ ، $۰/۳۶۰-۰/۷۵۰$ تفکیک شده و سپس با نسبت وزنی معینی با یکدیگر مخلوط شدند تا ضوابط دانه‌بندی مشخص شده در استاندارد ASTM C144 رعایت شود. قبل از تغییر دانه‌بندی، ماسه طبیعی درشت‌دانه‌تر و ماسه بازیافتی ریزدانه‌تر بود که پس از تغییر دانه‌بندی، آن‌ها در محدوده‌ی قابل قبول استاندارد قرار گرفتند.

2.2. طرح اختلاط

در این تحقیق یک طرح پایه (طرح شاهد) بدون استفاده از ژئولیت و سنگ‌دانه بازیافتی و همچنین هفت طرح اختلاط دیگر با جایگزینی ژئولیت به جای سیمان و ریزدانه بازیافتی به جای ریزدانه طبیعی مورد استفاده قرار گرفته است. این هفت طرح اختلاط با درصدهای جایگزینی ژئولیت ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۵٪ و درصدهای جایگزینی ماسه بازیافتی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ ساخته شدند. با تحلیل نتایج میز جریان، طرح پایه نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ انتخاب گردید. همچنین در این طرح نسبت مواد سیمانی به ماسه ۱:۳ در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که به جهت درصد جذب آب بالای ماسه بازیافتی و امکان ایجاد خطا در ساخت مخلوط ملات بنایی، هر دو نوع ماسه مصرفی در این پژوهش به صورت اشباع با سطح خشک مورد استفاده قرار گرفتند. برای این منظور مقدار ماسه مورد نیاز هر طرح، ۲۴ ساعت قبل در آب اشباع شده و دو ساعت قبل از ساخت طرح، با استفاده از گرم‌کن‌های برقی مانند ششوار و همچنین ورز دادن ماسه‌های طبیعی و بازیافتی، به رطوبت اشباع با سطح خشک رسانیده می‌شدند. عمل اختلاط در دمای ۲۵ ± ۲ صورت گرفت. در پایان نیز نمونه‌ها بعد از ۲۴ ± ۲ ساعت از قالب خارج شده و در محلول آب - آهک عمل‌آوری شدند.



جدول 5- طرح‌های اختلاط ساخته شده

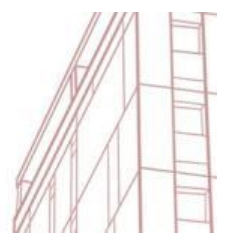
25ZRM-50	15ZRM-50	10ZRM-100	10ZRM-50	RM-100	RM-50	10ZM	NM	طرح اختلاط
۳۳۷/۵	۳۸۲/۵	۴۰۵	۴۰۵	۴۵۰	۴۵۰	۴۰۵	۴۵۰	سیمان (kg/m ³)
۱۱۲/۵	۶۷/۵	۴۵	۴۵	۰	۰	۴۵	۰	زئولیت (kg/m ³)
۲۴۷/۵	۲۴۷/۵	۲۴۷/۵	۲۴۷/۲۵	۲۴۷/۵	۲۴۷/۵	۲۴۷/۵	۲۴۷/۵	آب (kg/m ³)
۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	نسبت آب به سیمان
۶۷۵	۶۷۵	۰	۶۷۵	۰	۶۷۵	۱۳۵۰	۱۳۵۰	ریزدانه طبیعی حالت اشباع (kg/m ³)
۶۷۵	۶۷۵	۱۳۵۰	۶۷۵	۱۳۵۰	۶۷۵	۰	۰	ریزدانه بازیافتی حالت اشباع (kg/m ³)

3.2. خواص ملات بنایی

مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایش با استاندارد EN ۱۰۱۵-۱۱ [۱۲] در سنین ۷ و ۲۸ روز اندازه‌گیری شد. آزمایش تعیین ضریب جذب آب به این صورت انجام شد که ابتدا نمونه‌ها را برای ۲۴ ساعت در آب با دمای 25 ± 2 درجه سانتی‌گراد نگه داشتیم. سپس وزن حالت اشباع با سطح خشک آن‌ها را اندازه‌گیری کرده و در نهایت آن‌ها را در دمای 110 ± 5 درجه سانتی‌گراد خشک کردیم تا وزن حالت خشک آن‌ها نیز اندازه‌گیری شود. ابعاد و تعداد نمونه‌های استفاده شده در آزمایش در جدول ۶ آورده شده‌اند.

جدول 6- تعداد و ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش

ابعاد نمونه	تعداد نمونه‌های مورد آزمایش	آزمایش
۱۶۰*۴۰*۴۰ میلی‌متر	۳	تعیین ضریب جذب آب
۴۰*۴۰ میلی‌متر	۶	مقاومت فشاری



3. نتایج آزمایش‌ها

1.3. درصد جذب آب ملات سخت شده

درصد جذب آب ملات بنایی سخت شده برای نمونه‌ی پایه و درصد‌های جایگزینی ماسه‌ی طبیعی با بازیافتی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ به ترتیب ۶/۹۶٪، ۸/۴۶٪ و ۹/۳۶٪ اندازه‌گیری شد. باتوجه‌به اختلاف معنادار ضریب جذب آب ماسه طبیعی (۳/۴۱) و ماسه بازیافتی (۱۲/۳۹٪)، نتایج به‌دست‌آمده در این آزمایش را تأیید می‌نماید. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در درصد جایگزینی ۱۰۰٪ درصد جذب آب ۲/۴٪ افزایش می‌یابد. درصد جذب آب ملات بنایی سخت شده برای نمونه با مقادیر یکسان ماسه‌ی طبیعی و بازیافتی با درصد‌های جایگزینی ژئولیت ۰٪، ۱۰٪ و ۱۵٪ به ترتیب ۸/۴۶٪، ۸/۱۷٪، ۸/۴۹٪ و ۸/۱۵٪ اندازه‌گیری شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی ژئولیت تأثیری چندانی بر درصد جذب آب ملات بنایی سخت شده ندارد. نتایج مربوط به این بخش در جدول ۷ آمده است.

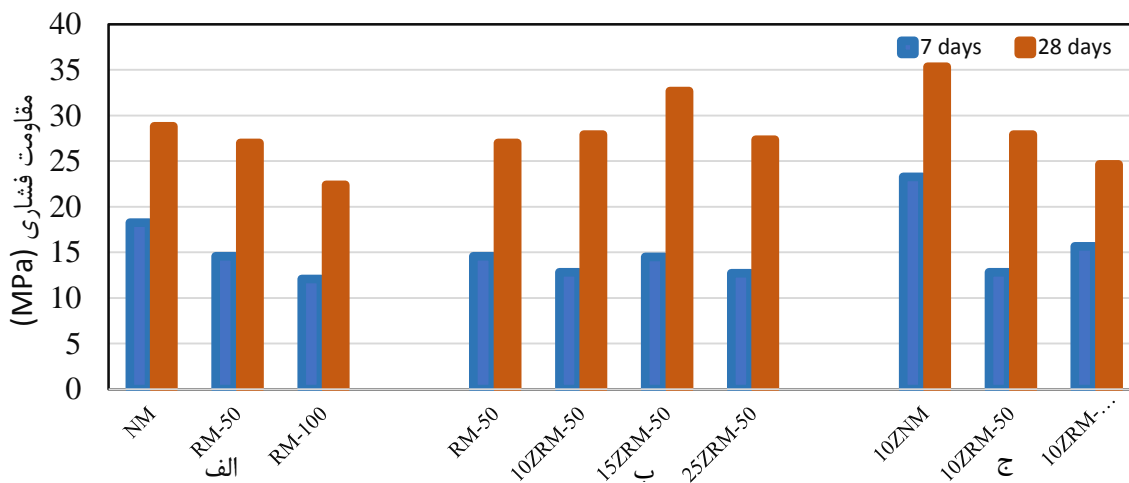
جدول 7- نتایج آزمایش‌های مربوط به ملات تازه و ملات سخت شده

چگالی انبوهی ملات تازه Ton/m ³	چگالی انبوهی ملات سخت شده Ton/m ³	جذب آب (٪)	روانی ملات تازه (میلی‌متر)	زمان کارایی ملات تازه (دقیقه)	آزمایش
۲/۱۱	۲/۱۲	۶/۹۶	۱۷۸	۲۹/۱۴	NM
۲/۱۲	۲/۱۵	۶/۳۶	۱۷۸	۲۱/۵	10ZNM
۱/۹۱	۲/۰۳	۸/۴۶	۱۷۲	۲۲/۵۲	RM-50
۱/۸۴	۱/۸۹	۹/۳۶	۱۶۳	۱۷/۲۱	RM-100
۱/۹۳	۱/۹۷	۸/۱۷	۱۷۶	۱۸/۲	10ZRM-50
۱/۸۳	۱/۹۴	۷/۰۲	۱۷۰	۱۴/۱	10ZRM-100
۱/۹۵	۲/۰۲	۸/۴۹	۱۷۷	۱۳/۶	15ZRM-50
۱/۹۵	۱/۹۸	۸/۱۵	۱۷۲	۱۱/۷	25ZRM-50



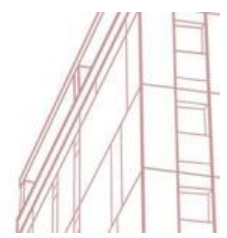
2.3. مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های شکسته شده در آزمایش مقاومت خمشی انجام گرفت. مقاومت فشاری نمونه‌ی ۷ روزه‌ی پایه که با ماسه‌ی طبیعی ساخته شده بود، ۱۸/۲۴ مگاپاسکال برآورد شد و با افزایش درصد جایگزینی ماسه‌ی طبیعی با ماسه بازیافتی به ۵۰٪ و ۱۰۰٪ مقاومت فشاری به ترتیب به ۱۴/۵۶ و ۱۲/۰۸ مگاپاسکال رسید که نشان‌دهنده‌ی به ترتیب ۲۰٪ و ۳۳٪ کاهش در مقاومت فشاری است؛ بنابراین افزایش مقدار سنگ‌دانه بازیافتی با کاهش مقاومت رابطه مستقیم دارد. در نتیجه می‌توان گفت به طور میانگین به‌ازای هر ۱۰٪ جایگزینی ماسه بازیافتی، ۳/۳٪ افت در مقاومت فشاری نمونه ۷ روزه مشاهده می‌شود. مقاومت فشاری نمونه‌ی ۲۸ روزه‌ی پایه که با ماسه‌ی طبیعی ساخته شده بود، ۲۸/۸۳ مگاپاسکال برآورد شد و با افزایش درصد جایگزینی ماسه‌ی طبیعی با ماسه بازیافتی به ۵۰٪ و ۱۰۰٪ مقاومت فشاری به ترتیب به ۲۶/۹۹ و ۲۲/۳۹ مگاپاسکال رسید که نشان‌دهنده‌ی به ترتیب ۶/۴٪ و ۲۲/۳٪ کاهش در مقاومت فشاری است (شکل ۱-الف). بنابراین افزایش مقدار سنگ‌دانه بازیافتی با کاهش مقاومت رابطه مستقیم دارد. با مقایسه افت مقاومت ۷ و ۲۸ روزه می‌توان یافت که به‌ازای افزایش جایگزینی ماسه‌ی طبیعی با ماسه بازیافتی، افت مقاومت در نمونه‌های ۷ روزه بیشتر از نمونه‌های ۲۸ روزه بوده است.



شکل 1- مقاومت فشاری 7 و 28 روزه نمونه‌های ملات بنایی با افزایش مقدار جایگزینی (الف) ماسه بازیافتی در طرح پایه (ب) ژئولیت در طرح حاوی مقادیر برابر ماسه طبیعی و بازیافتی (ج) ماسه بازیافتی در طرح حاوی ژئولیت

مقاومت فشاری نمونه‌ی ۷ روزه‌ی با نسبت یکسان ماسه‌ی طبیعی و بازیافتی (بدون ژئولیت) ساخته شده بود، ۱۴/۵۶ مگاپاسکال برآورد شد و با افزایش درصد جایگزینی سیمان با ژئولیت به ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ مقاومت فشاری به ترتیب ۱۲/۸، ۱۴/۵ و ۱۲/۷ مگاپاسکال رسید که نشان‌دهنده‌ی به ترتیب ۱۲٪، ۴٪ و ۱۲/۸٪ کاهش در مقاومت فشاری است. مقاومت فشاری نمونه‌ی ۲۸ روزه‌ی با نسبت یکسان ماسه‌ی طبیعی و بازیافتی (بدون ژئولیت) ساخته شده بود، ۲۶/۹۹ مگاپاسکال برآورد شد و با افزایش درصد جایگزینی سیمان با ژئولیت به ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ مقاومت فشاری به ترتیب ۲۷/۹، ۲۲/۶۸ و



۲۷/۳۶ مگاپاسکال رسید که نشان دهنده‌ی به ترتیب $3/37\%$ ، $21/08\%$ و $1/37\%$ کاهش در مقاومت فشاری است (شکل ۱-۱). همچنین روند مشابهی با شکل ۱-الف در خصوص کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه‌های با مقادیر ثابت زئولیت در اثر افزایش جایگزینی ماسه بازیافتی مشاهده گردید که می‌توان نتیجه گرفت در صورت وجود زئولیت نیز افزایش جایگزین ماسه بازیافتی اثر کاهنده‌ای بر مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه دارد (شکل ۱-ج). اما وجود زئولیت مقاومت فشاری ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه‌ها را در مقایسه با نمونه‌های بدون زئولیت (شکل ۱-الف) افزایش داده است که علت آن را نقش فیبری و پوزولانی زئولیت می‌توان دانست.

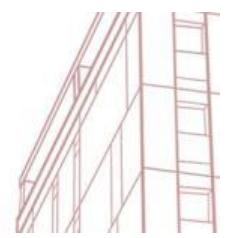
با توجه به داده‌های مقاومت فشاری نمونه‌های سن ۷ و ۲۸ روزه، مشاهده می‌شود که طرح بهینه از نظر مقاومت و زیست‌محیطی (بتن سبز)، طرحی است که شامل ۱۵ درصد زئولیت به عنوان جایگزین سیمان و ۵۰ درصد ماسه بازیافتی به عنوان جایگزین ماسه طبیعی (15ZRM-50) است. این انتخاب به دلیل داشتن مقادیر بالای زئولیت و همچنین ماسه بازیافتی صورت گرفته است. این طرح، با استفاده از زئولیت به جای بخشی از سیمان و ماسه بازیافتی به جای نیمی از ماسه طبیعی، بهبود عملکرد فیبری و پوزولانی زئولیت جایگزین شده و همچنین عمل‌آوری داخلی سنگ‌دانه بازیافتی جایگزین شده را بهبود می‌بخشد. این بهینه‌سازی زیست‌محیطی از طریق استفاده از زئولیت به جای بخشی از سیمان و ماسه بازیافتی به جای نیمی از ماسه طبیعی، به وضوح مشخص است.

علاوه بر موارد فوق، علت تفاوت قابل توجه مقاومت ۲۸ روزه این طرح با طرح بدون زئولیت (RM-50) که در سن ۷ روزه مقاومت مشابهی داشتند را می‌توان در واکنش تأخیری زئولیت (واکنش پوزولانی) دانست، همین علت را نیز می‌توان دلیل عدم تفاوت مقاومت فشاری ۷ روزه سه طرح حاوی زئولیت شکل ۱-ب با طرح بدون زئولیت دانست. مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده حداقل‌های آئین‌نامه‌های استاندارد ملی ایران [۱۳] را برآورده می‌کند و همگی در رده‌ی مقاومتی ۲۰ مگاپاسکال (بالاترین رده‌بندی مقاومت فشاری ملات بنایی در ایران) قرار می‌گیرند که نشان دهنده‌ی کیفیت بالای ملات ساخته‌شده است. نسبت سیمان به ماسه $1:3$ باعث افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات بنایی شد به طوری که بر اساس اعلام استاندارد ملی ایران، مقاومت فشاری بین ۱ تا ۲۰ مگاپاسکال برای ملات بنایی در نظر گرفته شده است. با این حال با در نظر گرفتن نسبت سیمان به ماسه $1:3$ و $1:10$ جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی، همچنان می‌توان بالاترین رده مقاومت فشاری اشاره شده در استاندارد ملی ایران (ملات برای کارهای بنایی) را احراز نمود.

4. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش مطالعات و آزمایش‌هایی بر روی مشخصات مکانیکی ملات ساخته شده با ماسه بازیافتی و زئولیت صورت گرفت. در مجموع با توجه به محورهای مطرح در توسعه پایدار و لزوم سوق صنعت ساخت در کشور به سمت این محورها، استفاده از مواد جایگزین مصالح سنگ‌دانه و همچنین بازیافت نخاله‌های ساخت و تخریب و استفاده کمتر از سیمان و استفاده از مواد جایگزین سیمان مانند زئولیت ضروری می‌نماید. در ادامه اهم نتایج مأخوذه در این پژوهش ارائه شده است.

- همان‌طور که مشخص است با افزایش جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی درصد جذب آب بتن افزایش می‌یابد به طوری که با جایگزینی 100% ماسه بازیافتی جذب آب بتن تا $2/4\%$ افزایش می‌یابد. اما هیچ روند افزایشی یا کاهشی در درصد جذب آب با افزایش جایگزینی سیمان با زئولیت مشاهده نمی‌شود.
- مقاومت فشاری ملات دارای ماسه بازیافتی در هر دو سن ۷ و ۲۸ روزه کم‌تر از ملات ساخته شده با ماسه طبیعی است. همچنین با افزایش درصد جایگزینی ماسه‌ی طبیعی با ماسه بازیافتی، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد و مقاومت فشاری



برای نمونه‌ی پایه در سن ۲۸ روز برابر ۲۸/۸۳ مگاپاسکال و برای نمونه‌ی دارای ۱۰۰٪ ماسه‌ی بازیافتی به ۲۲/۳۹ مگاپاسکال رسید. همچنین با افزایش مقدار جایگزینی سیمان با ژئولیت مقاومت فشاری ۷ روزه تغییر چندانی نکرده ولی در مقاومت ۲۸ روزه شاهد افزایش مقاومت خواهیم بود. به طوری که مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با نسبت یکسان ماسه طبیعی و بازیافتی ۲۶/۹۹ مگاپاسکال و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با نسبت یکسان ماسه طبیعی و بازیافتی با ۱۵٪ جایگزینی ژئولیت به ۳۲/۶۸ مگاپاسکال رسید. اگرچه مطابق با استاندارد ملی ایران مقاومت فشاری نمونه‌ها در حدود قابل قبول قرار داشتند. در یک نتیجه‌گیری دیگر نیز می‌توان عنوان نمود که استفاده از ماسه‌ی بازیافتی به دلیل کیفیت پایین‌تر، باعث کاهش کیفیت ملات نیز می‌گردد اما این کاهش کیفیت می‌تواند با جایگزین کردن ژئولیت تا حد بسیار قابل قبولی جبران نمود از طرف دیگر با به‌کارگیری ژئولیت در کاهش مصرف سیمان و کاهش آلودگی زیست‌محیطی کمک شایان نمود. از دیگر سو باتوجه‌به نیازهای روزافزون برای استفاده از ضایعات ساختمانی و جلوگیری از تخریب محیط‌زیست، می‌تواند باتوجه‌به عملکرد کیفی و مکانیکی مناسب ماسه‌ی طبیعی را با ماسه‌ی بازیافتی جایگزین کرد تا به مفهوم بتن سبز رسید.

5. مراجع

1. De Brito, J., & Saikia, N. (2012). Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste. Springer Science & Business Media.
2. Paul, S. C., Van Rooyen, A. S., van Zijl, G. P., & Petrik, L. F. (2018). Properties of cement-based composites using nanoparticles: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 189, 1019-1034.
3. Pešta, J., Pavlů, T., Fořtová, K., & Kočí, V. (2020). Sustainable masonry made from recycled aggregates: LCA case study. *Sustainability*, 12(4), 1581.
4. Kim, J. (2021). Properties of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume mix design. *Construction and Building Materials*, 301, 124091.
5. Martínez, I., Etxeberria, M., Pavón, E., & Díaz, N. (2013). A comparative analysis of the properties of recycled and natural aggregate in masonry mortars. *Construction and Building Materials*, 49, 384-392.
6. Ghanbari, M., Abbasi, A. M., & Ravanshadnia, M. (2018). Production of natural and recycled aggregates: the environmental impacts of energy consumption and CO2 emissions. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(2), 810-822.
7. Eguchi, K., Teranishi, K., Nakagome, A., Kishimoto, H., Shinozaki, K., & Narikawa, M. (2007). Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1542-1551.
8. Evangelista, L., & De Brito, J. M. C. L. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 9-14.
9. Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., & Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste management*, 30(11), 2255-2264.



10. Hafez, H., Kurda, R., Cheung, W. M., & Nagaratnam, B. (2019). A systematic review of the discrepancies in life cycle assessments of green concrete. *Applied Sciences*, 9(22), 4803.
11. ASTM C 144. Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar. 2004.
12. Corinaldesi V, Moriconi G (2009) Influence of mineral additions on the performance of 100 % recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater* 23(8):2869–2876
13. مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. (1392)، " ملات بنایی - ویژگی‌ها - قسمت دو: ملات برای کارهای بنایی، " <https://inbr.ir/wp-content/uploads/2016/08/mabhas-5.pdf>



Assessment of the Properties of Concrete Containing Recycled Aggregates and Zeolite with Emphasis on Sustainable Development

**Syedmohammad Hashemi mayvan¹, Amirhossein Andalib², Amirali Ziarati³,
Mohammad Reza Daneshpasand⁴, Shahram Vahdani^{5*}**

1- M.Sc. graduate, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2- M.Sc. graduate, Faculty of Civil Engineering, K. N. Tosi University of Technology, Tehran, Iran

3- Ph.D. Candidate, School of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

4- Ph.D. Candidate, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

5- Associate Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT

This study investigates the properties of mortar containing recycled sand and zeolite for sustainable development. It comprises eight mortar mixing designs where recycled sand replaces natural sand at 50% and 100%, and zeolite replaces cement at 10%, 15%, and 25%. Physical and mechanical tests including water absorption, compressive strength, and flow rate were conducted on these mortars. The results indicate that mortars containing recycled sand and zeolite comply with national mortar standards and support strategies for reducing the use of natural materials, sustainable development, and achieving green mortars. The experiments on mortars made with recycled sand and zeolite yielded acceptable results, meeting national mortar standards. Substituting 50% of natural sand with recycled sand and 15% of cement with zeolite can be a viable solution for reducing the use of natural materials, promoting sustainable development, and achieving green mortars. These findings suggest that mortars containing recycled sand and zeolite can serve as a key solution for reducing the consumption of natural materials and achieving sustainable development in the Iranian construction industry.

Keywords: Recycled Sand, Zeolite, Sustainable Development, Green Mortar, Masonry Mortar