تحقیقات بتن
سال شانزدهم، شمارهٔ دوم
تابستان ۱۴۰۲
ص ۹۶ – ۸۵
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۱

بررسی ویژگی‌های ملات بنایی حاوی ماسه‌ی بازیافتی

میلاد عقیلی لطف
دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی عمران، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
محمد کوروش کریم
کارشناس ارشد مهندسی محیط‌زیست، دانشکده‌ی محیط‌زیست، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
محمد یاسر چمنی
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی عمران، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
امیرمحمد رمضانیان پور*
دانشیار دانشکده مهندسی عمران، پردیس فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

چکیده

در این مقاله ویژگی‌های ملات بنایی ساخته شده با ماسه بازیافتی بتنی بررسی شده است. برای این منظور ۵ طرح اختلاط ملات بنایی در نظر گرفته شده است که در آن‌ها علاوه بر طرح شاهد، ماسه‌ی بازیافتی بتنی با درصدهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ جایگزین ماسه طبیعی در ملات بنایی شد. برای هر دو نوع ملات ساخته شده با ماسه‌ی طبیعی و بازیافتی نیز از دانه‌بندی یکسانی استفاده شد. همچنین نسبت وزنی آب به سیمان ۰/۵۵ و نسبت وزنی سیمان به ماسه نیز ۱:۳ در نظر گرفته شد. جهت سنجش خواص مختلف ملات بنایی ساخته شده با ماسه بازیافتی بتنی، آزمایش‌های جذب آب و چگالی برای ارزیابی خواص فیزیکی، مقاومت فشاری و مقاومت خمشی برای ارزیابی خواص مکانیکی و نهایتاً آزمایش دوام در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد به‌منظور ارزیابی دوام ملات بنایی در محیط‌های سردسیر انجام شد. همچنین آزمایش جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن به‌منظور بررسی جمع‌شدگی در ملات‌های ساخته شده با ماسه بازیافتی انجام شد. در آزمایش مقاومت فشاری، تمام نمونه‌ها مقاومت بیشتر از ۱۰ MPa داشتند که ضوابط استاندارد ملی ملات را برآورده نمود. با افزایش درصد جایگزینی کارایی و زمان کارایی ملات‌ها کاهش یافت. ملات‌های ساخته شده با ماسه‌ی بازیافتی مقاومت خوبی در مقابل چرخه‌های ذوب و انجماد داشتند و جمع‌شدگی بیشتری نیز اتفاق افتاد که به دلیل خمیر سیمان سخت‌شده‌ی چسبیده به سنگ‌دانه‌ها است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ماسه بازیافتی تا ٪۵۰ جایگزینی می‌تواند راهکار خوبی برای کاهش استفاده از مصالح طبیعی و توسعه‌ی پایدار باشد.

واژه‌های کلیدی: **ماسه بازیافتی، جمع‌شدگی، دوام در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد، ملات بنایی.**

* نویسنده مسئول: ramezanian@ut.ac.ir

۱- مقدمه

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 افزایش‌یافته 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، نخاله‌ی ساختمانی به معضلی اساسی تبدیل شده است. همچنین منابع طبیعی موردنیاز برای ساخت‌وساز جدید نیز روزبه‌روز کم‌تر و دسترسی به آن سخت‌تر می‌شود [۱].

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 کرده‌اند [۲-۴]. در دهه‌های اخیر تولید و استفاده از سنگ‌دانه‌های حاصل از خردایش قطعات بتنی به‌عنوان یک رویکرد نوآورانه جهت حل معضلات اشاره شده در مسأله، مورد استفاده قرار گرفته است. سنگ‌دانه‌ی بازیافتی عموماً به دو صورت شن [۱] و ماسه [۲] مورداستفاده قرار می‌گیرند که می‌توان در کارهای سازه‌ای و غیرسازه‌ای استفاده کرد و تحقیقات فراوانی روی این مورد انجام شده است [۵-۸]. کیفیت شن و ماسه‌ی بازیافتی با توجه به عوامل مختلفی از جمله کیفیت و ویژگی‌های بتن مادر که از آن سنگ‌دانه‌ی بازیافتی به دست آمده است، نوع و مقدار خرد کردن بتن برای تحصیل شن و ماسه‌ی بازیافتی، نوع سنگ‌دانه‌ی مورد استفاده و سن بتن مادر بستگی دارد [۹]. با استفاده از سنگ‌دانه‌ی با کیفیت که از بتن با کیفیت بالا به‌دست آمده است می‌توان تا ٪۱۰۰ نیز سنگ‌دانه‌ی طبیعی را با بازیافتی جایگزین کرد و انتظار داشت بتن یا ملاتی که با این سنگ‌دانه ساخته می‌شود نیز کیفیت بالایی داشته باشد. در حالت کلی اما چون از کیفیت و نوع بتن مادر معمولاً اطلاعات چندانی در دسترس نیست و این نوع نخاله های ساختمانی عموماً شامل مقادیر متفاوتی از نخاله‌های بی‌کیفیت مانند قطعات ساخته شده از گچ، بلوک‌های ساختمانی، چوب و ... است، باید آزمایش‌های متعددی جهت سنجش مرغوبیت و کیفیت سنگ‌دانه یازیافتی انجام پذیرد. از دیگر سو مقایسه خواص مختلف شن و ماسه بازیافتی نشان می‌دهد که ماسه‌ی بازیافتی به دلیل داشتن سیمان چسبیده‌ی بیشتر، خواص ضعیف‌تری نسبت به شن بازیافتی دارد و نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی آن این مهم را نشان داده است [۱۰،۱۱] و به همین دلیل استفاده از ماسه‌ی بازیافتی در کارهای سازه‌ای که نیاز به کیفیت بالای مصالح دارند همچنان مورد پرسش است. در این بین در ملات بنایی که با دامنه کاربرد وسیع در یک سازه مورد استفاده قرار می گیرد و در بسیاری از موارد حتی نقش غیر سازه دارد، می‌توان از ماسه‌ی بازیافتی استفاده کرد که در پژوهش‌های متعددی به این موضوع پرداخته شده است که در نتایج این آزمایش‌ها نشان داده شده است که درصد جایگزینی مهم‌ترین عامل اثرگذار در خواص ملات تازه و سخت شده است و تا درصد جایگزینی ٪۵۰ به عنوان درصد جایگزینی مطلوبی مطرح شده است [۱۲-۱۴]. در تحقیقی که توسط مارتینز و همکاران [۳] [۱۲] انجام گرفت سه نوع ماسه‌ی بازیافتی مورد استفاده قرار گرفت که با درصدهای جایگزینی ٪۵۰ و ٪۷۵ و ٪۱۰۰ در ملات استفاده شده بودند و استفاده از ماسه‌ی بازیافتی باعث کاهش تراکم، افزایش درصد جذب آب و عملکردی ضعیف‌تر در خواص مکانیکی شده است. در تحقیق دیگری که توسط تانگ و همکاران [۴] [۱۳] انجام گرفت تأثیر رطوبت اولیه‌ی ماسه‌ی بازیافتی و سایر عوامل بر خواص ملات تازه مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که رطوبت اولیه‌ی ماسه‌ی بازیافتی تأثیر بسیار زیادی بر خواص ملات تازه دارد. در تحقیقی که توسط لدسما و همکاران [۵] [۱۴] انجام گرفت خواص کلی ملات ساخته شده با ماسه‌ی بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که درصد جایگزینی بر خواص ملات تازه و ملات سخت شده بیشترین تأثیر را دارد و جایگزینی

---

۱ Recycled Concrete Coarse Aggregate (RCCA)
۲ Recycled Concrete Fine Aggregate (RCFA)
۳ Martinez et al
۴ Thang et al
۵ Ledesma et al

ماسه‌ی طبیعی با بازیافتی تا ٪۴۰ می‌تواند روش خوبی برای استفاده از ماسه‌ی بازیافتی و هم‌زمان به دست آوردن خواص مطلوب باشد. در کنار همه این مسائل و اهمیت موضوع، به دلایل متعددی همچنان مبانی توسعه پایدار در کشور مورد بی مهری سیاست گذاران صنعت ساخت قرار گرفته است. با این حال به جهت آشنایی دست اندرکاران صنعت ساخت با مقوله بازیافت نخاله‌های ساخت و تخریب و به‌طور ویژه کاربرد ماسه بازیافتی در تولید ملات بنایی، این پژوهش طراحی و اجرا شد.

این پژوهش به بررسی ویژگی‌ها و خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و دوامی ملات بنایی ساخته شده با ماسه‌ی بازیافتی پرداخته است که در تحقیقات پیشین برخی آزمایش‌ها و بررسی های حاضر مانند مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد انجام نگرفته بود و عملکرد این نوع ملات به خصوص در مورد دوام بررسی نگردیده بود. با استفاده از مصالح بازیافتی 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 تبدیل‌شدن به معضلی بزرگ در شهرهای بزرگ کشور است.

در تحقیقات پیشین برخی مشخصات ماسه‌های طبیعی و بازیافتی مانند دانه‌بندی متغیر بوده است که این مهم می‌تواند بر ویژگی‌ها و خصوصیات مکانیکی و دوامی 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[1] استفاده شده.

۲- مواد مورداستفاده و طرح اختلاط

۲-۱- ویژگی‌های مصالح مورداستفاده

در برنامه این پژوهش از سیمان پرتلند تیپ ۲ شرکت تولید سیمان تهران استفاده شده است. ماسه‌ی طبیعی مورداستفاده در این تحقیق از نوع رودخانه‌ای با حداکثر اندازه‌ی ۴/۷۵ میلی‌متر است. ماسه‌ی بازیافتی نیز از خردکردن نمونه‌های بتنی موجود در محل تخلیه‌ی نخاله‌ی ساختمانی موجود در محل دفن نخاله در آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران تهیه شد که با الک کردن به اندازه‌ی موردنظر رسید. در جدول ۱ مواد سازنده‌ی ماسه‌ی بازیافتی استفاده شده، آورده شده است.

جدول ۱- مواد سازنده‌ی ماسه‌ی بازیافتی

مواد سازنده	درصد وزنی
بتن و سیمان	۹۴/۳۲
کلینکر و ذرات آجر	۲/۲۷
مواد سرامیکی	۰/۳۴
سایر مواد معدنی	۲/۰۴
آسفالت	۰/۷۶
سایر مواد	۰/۲۷

ماسه‌ی بازیافتی مورد استفاده دارای مقدار کمی ناخالصی است که باتوجه‌به شرایط خردایش قطعات بتنی در محیط آزمایشگاه، طبیعی است. در جدول ۲ ویژگی‌های فیزیکی ماسه‌ی طبیعی و بازیافتی مورداستفاده در این پژوهش آورده شده است. بررسی این نتایج نشان می‌دهد که مقدار جذب آب ماسه‌ی بازیافتی به‌مراتب بیشتر از مقدار جذب آب ماسه طبیعی است. 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.

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی ماسه‌ی طبیعی و بازیافتی

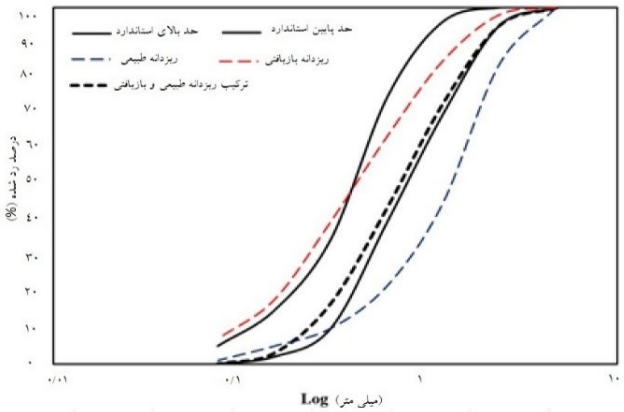
	ماسه‌ی طبیعی	ماسه‌ی بازیافتی
چگالی ظاهری (Ton/m^3)	۲/۵۶	۲/۲۸
جذب آب (٪)	۳/۸۴	۱۲/۳۹

در این تحقیق همان‌طور که گفته شد از دانه‌بندی مشابهی برای نمونه‌های ساخته شده با مصالح طبیعی و بازیافتی استفاده شد. برای رسیدن به این هدف هر دو نوع مصالح طبیعی و بازیافتی در شش اندازه‌ی مختلف جدا شدند (۰/۷۵ - ۰/۱۵، ۰/۱۵ - ۰/۳، ۰/۳ - ۰/۶۳، ۰/۶۳ — ۱/۱۸، ۱/۱۸ — ۲/۳۶، ۲/۳۶ — ۴/۷۵ میلی‌متر) و سپس با نسبت وزنی معینی با یکدیگر مخلوط شدند تا ضوابط دانه‌بندی مشخص شده در استاندارد ASTM C144 [2] رعایت

[1] Saturated Surface Dry (SSD)

[2] American Society for Testing and Materials

شود [۱۵]. 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. در شکل ۱ تغییرات دانه‌بندی نشان‌داده‌شده است.



شکل ۱- تغییرات دانه‌بندی پس از الک کردن

۲-۲- طرح اختلاط

در این تحقیق پنج طرح اختلاط طراحی شد که اولین طرح اختلاط با ماسه‌ی طبیعی و چهار طرح اختلاط دیگر با ماسه‌ی بازیافتی با درصدهای جایگزینی ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و ٪۱۰۰ ساخته شدند. برای رسیدن به کارایی مناسب، روانی ملات تازه باتوجه‌به استاندارد EN 1015-3 [۱۶]، ۱۰ ± ۱۷۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد که برای رسیدن به این روانی، ابتدا برای طرح اختلاط با درصد جایگزینی ٪۵۰ نسبت‌های مختلف آب به سیمان امتحان شد تا مقدار مناسب برای رسیدن به روانی موردنظر پیدا شود. آزمایش‌های مربوط به این قسمت در جدول ۳ نشان‌داده‌شده است.

جدول ۳- نسبت آب به سیمان و روانی

نسبت آب به سیمان	مقدار روانی روی میز جریان (میلی‌متر)
۰/۵	۱۵۳
۰/۵۳	۱۶۹
۰/۵۶	۱۸۰
۰/۵۹	۱۹۰
۰/۶۲	۱۹۷

تحلیل این نتایج به نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ انجامید. از طرف دیگر نسبت سیمان به ماسه ۱:۳ در نظر گرفته شد. جزئیات اجزای تشکیل‌دهنده هر طرح اختلاط در جدول ۴ آورده شده است. 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 به‌صورت اشباع با سطح خشک مورد استفاده قرار گرفتند. برای این منظور مقدار ماسه موردنیاز هر طرح، ۲۴ ساعت قبل در آب اشباع شده و دو ساعت قبل از ساخت طرح، با استفاده از گرم‌کن‌های برقی مانند سشوار و همچنین ورز دادن ماسه‌های طبیعی و بازیافتی، به رطوبت اشباع با سطح خشک رسانیده می‌شدند.

جدول ۴- طرح‌های اختلاط ساخته شده

طرح اختلاط	NM	RM-25	RM-50	RM-75	RM-100
سیمان (kg/m^3)	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰	۴۵۰
آب (kg/m^3)	۲۴۷/۵	۲۴۷/۵	۲۴۷/۵	۲۴۷/۵	۲۴۷/۵
نسبت آب به سیمان	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۵
ماسه‌ی طبیعی حالت اشباع (kg/m^3)	۱۳۵۰	۱۰۱۲/۵	۶۷۵	۳۳۷/۵	۰
ماسه‌ی بازیافتی حالت اشباع (kg/m^3)	۰	۳۳۷/۵	۶۷۵	۱۰۱۲/۵	۱۳۵۰

۳- روش تحقیق و آزمایش‌های ملات بنایی

آزمایش‌های مربوط به ملات بنایی در دو حالت تازه و سخت‌شده سنجیده می‌شوند. در ادامه این بخش، مشروحی از آزمایش‌های طراحی شده برای این پژوهش و استانداردهای مورد استفاده آورده شده است.

۱-۳- خواص ملات تازه

روانی ملات تازه باتوجه به استاندارد EN 1015-3 [۱۶] و زمان کارایی نیز با استاندارد EN 1015-9 [۱۷] هر ۱۵ دقیقه یک بار و چگالی انبوهی ملات تازه نیز با استاندارد EN 1015-6 [۱۸] اندازه‌گیری شده‌اند.

۲-۳- خواص ملات سخت شده

مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های سخت شده با استاندارد EN 1015-11 [۱۹] در سنین ۷ و ۲۸ روز اندازه‌گیری شد. همچنین آزمایش تعیین ضریب جذب آب نیز به این صورت اندازه‌گیری شد که ابتدا نمونه‌ها برای ۲۴ ساعت در آب با دمای ۲±۲۵ C° نگه‌داشته شدند، سپس وزن حالت اشباع با سطح خشک آن‌ها اندازه‌گیری شد و در نهایت در دمای ۵±۱۱۰ °C خشک شدند تا وزن حالت خشک آن‌ها نیز اندازه‌گیری شود. آزمایش تعیین ضریب جذب مویینه نیز با توجه به استاندارد ۱۸-۱۰۱۵ EN [۲۰] و چگالی انبوهی ملات سخت شده با استفاده از استاندارد ۱۰-۱۰۱۵ EN [۲۱] اندازه گیری شد. برای سنجش دوام ملات در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد، نمونه‌های با سن ۹۰ روز مورداستفاده قرار گرفت. آزمایش به این صورت انجام شد که نمونه‌های مورد آزمایش به مدت ۱۶ ساعت در یخچال در دمای ۲۰ °C- قرار گرفتند و سپس ۸ ساعت در آب در دمای ۲±۲۵ °C قرار داده شدند. به‌عنوان معیار سنجش دوام نمونه‌های ملات بنایی در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد، تغییرات وزن و ظاهر نمونه‌ها در هر ۵ دوره‌ی آزمایش بررسی و محاسبه می‌شود. نمونه‌ها در معرض ۳۰ چرخه‌ی ذوب و انجماد قرار گرفتند که هر چرخه ۲۴ ساعت طول می‌کشید و در پایان آزمایش برای مقایسه، مقاومت فشاری این نمونه‌ها با نمونه‌ی شاهد مقایسه شد. این آزمایش طبق استاندارد ASTM C ۶۶۶ (procedure B) [۲۲] انجام گرفت. ابعاد و تعداد نمونه‌های استفاده شده در آزمایش در جدول ۵ آورده شده‌اند.در پایان نیز برای سنجش میزان جمع‌شدگی از استاندارد ASTM C 1148 [۲۳] استفاده شد. برای انجام آزمایش جمع‌شدگی، طول نمونه‌ها در سنین ۲، ۳، ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ و ۳۵ روز اندازه‌گیری شد. ابعاد و تعداد نمونه‌های آزمایش در جدول ۵ آورده شده است.

٤- نتایج آزمایش‌ها

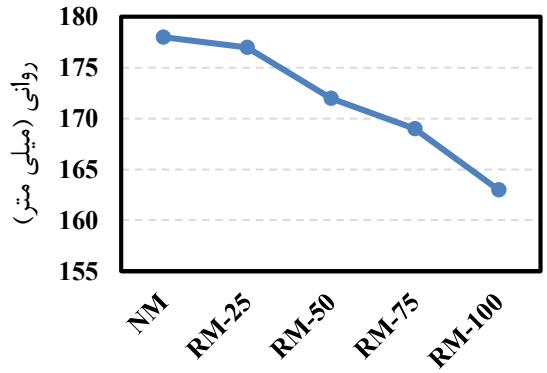
٤-۱- روانی و زمان کارایی ملات تازه

مقدار روانی برای نمونه‌ی شاهد و طرح‌های دارای درصدهای جایگزینی ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و ٪۱۰۰ به ترتیب برابر با مقادیر ۱۷۸، ۱۷۷، ۱۷۲، ۱۶۹ و ۱۶۳ میلی‌متر به‌دست آمد. بررسی نتایج کسب شده نشان می‌دهد که علی‌رغم درنظرگرفتن یک نسبت ثابت آب به سیمان و همچنین کاربرد ماسه بازیافتی در حالت اشباع با سطح خشک، به‌ازای افزایش نسبت جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی، روانی ملات تازه کاهش می‌یابد. با جایگزینی ٪۲۵ از ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی، تغییر محسوسی در روانی ملات تازه مشاهده نمی‌شود اما با جایگزینی بیشتر از ٪۲۵ روانی ملات تازه، با شتاب بیشتری شروع به کاهش می‌کند.

جدول ۵- تعداد و ابعاد نمونه‌های مورد آزمایش

آزمایش	تعداد نمونه‌های مورد آزمایش	ابعاد نمونه (میلی‌متر)
تعیین ضریب جذب آب	۳	۱۶۰*۴۰*۴۰
تعیین ضریب جذب مویینه	۲	۱۶۰*۴۰*۴۰
چگالی انبوهی	۳	۱۶۰*۴۰*۴۰
مقاومت خمشی	۳	۱۶۰*۴۰*۴۰
مقاومت فشاری	۶	۴۰*۴۰
دوام در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد	۳	۱۶۰*۴۰*۴۰
جمع‌شدگی	۳	۲۷۵*۲/۵*۲/۵

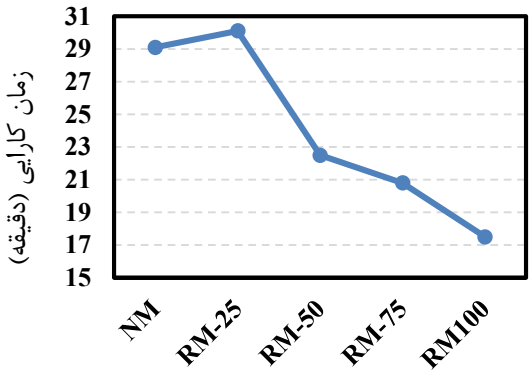
از جمله دلایل کاهش روانی در ملات بنایی ساخته شده با ماسه بازیافتی می‌توان به شکل گوشه‌دارتر و همچنین زبری سطح بیشتر ماسه بازیافتی نسبت به ماسه طبیعی اشاره کرد. به‌طوری‌که در طرح دارای ٪۱۰۰ ماسه بازیافتی، روانی ملات تازه٪ ۸/۴ کاهش می‌یابد. این نتایج در شکل ۲ و جدول ۶ آورده شده است.



شکل ۲- روانی طرح اختلاط‌های ساخته شده

طبق تعریف استاندارد، زمان کارایی به مدت زمانی گفته می‌شود که طول می‌کشد تا روانی ملات تازه ۳۰ میلی‌متر نسبت به اولین اندازه‌گیری روانی که ۱۰ دقیقه بعد از شروع اختلاط انجام شده

است، کاهش یابد. زمان کارایی برای نمونه‌ی شاهد ساخته‌شده با ماسه‌ی طبیعی و درصدهای جایگزینی ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و ٪۱۰۰ به ترتیب برابر با مقادیر ۲۹/۱، ۳۰/۱، ۲۲/۵، ۲۰/۸ و ۱۷/۲ دقیقه محاسبه شد. مجدداً با افزایش درصد جایگزینی مصالح طبیعی با مصالح بازیافتی تا ٪۲۵ مانند نتایج آزمایش روانی، زمان کارایی تغییر محسوسی نمی‌کند و حتی به میزان یک دقیقه افزایش می‌یابد که با این‌که تغییر معناداری نیست اما نشان‌دهنده‌ی آن است که جایگزینی تا ٪۲۵ تغییری در زمان کارایی ندارد. اما با جایگزینی بیش از ٪۲۵ ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی مقدار زمان کارایی افت قابل‌ملاحظه‌ای می‌کند. به‌طوری‌که به‌ازای نسبت‌های جایگزینی ٪۵۰ و ٪۱۰۰ ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی، زمان کارایی به ترتیب ٪۲۲/۷ و ٪۴۰ کاهش می‌یابد. به تعبیر دیگر زمان کارایی ملات ساخته شده با ٪۱۰۰ ماسه‌ی بازیافتی ۱۰ دقیقه از زمان کارایی ملات طرح شاهد کم‌تر بود که نشان می‌دهد کاربرد ماسه بازیافتی در ساخت ملات بنایی تأثیر منفی بر عملکرد کارایی دارد. این نتایج در شکل ۳ و جدول ۶ آورده شده است. این نتیجه مشابه با نتیجه‌ی آزمایش دیگری است که توسط لیت و همکاران [24] انجام گرفت و مشخص شده که استفاده از سنگ‌دانه بازیافتی و به خصوص ماسه بازیافتی تأثیر بسیار زیادی بر روانی بتن دارد.



شکل ۳- زمان کارایی طرح اختلاط‌های ساخته شده

جدول ۶- نتایج آزمایش‌های مربوط به ملات تازه و ملات سخت شده

آزمایش	NM	RM-25	RM-50	RM-75	RM-100
ضریب جذب آب (٪)	۶/۹۶	۸/۰۵	۸/۴۶	۸/۸	۹/۳۶
ضریب جذب مویینه (kg/m^2min^{-1})	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۶	۰/۵۸	۰/۶۳
چگالی انبوهی ملات تازه (Ton/m^3)	۲/۱۱	۲/۰۷	۱/۹۱	۱/۹۶	۱/۸۹
چگالی انبوهی ملات سخت‌شده (Ton/m^3)	۲/۱۲	۲/۱	۲/۰۳	۱/۹۶	۱/۸۹
روانی ملات تازه (میلی‌متر)	۱۷۸	۱۷۷	۱۷۲	۱۶۹	۱۶۳
زمان کارایی ملات تازه (دقیقه)	۲۹/۱	۳۰/۱	۲۲/۵	۲۰/۸	۱۷/۲

۲-٤- چگالی انبوهی ملات تازه و سخت شده

در این پژوهش چگالی انبوهی ملات تازه‌ی ساخته شده با ماسه‌ی طبیعی و درصدهای جایگزینی ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و ٪۱۰۰ به ترتیب برابر با مقادیر ۲/۱۱، ۲/۰۷، ۱/۹۱، ۱/۹۲ و ۱/۸۴ Ton/m^3 محاسبه شد. همچنین چگالی انبوهی ملات سخت شده نیز برای ملات سخت شده‌ی ساخته‌شده با ماسه‌ی طبیعی و درصدهای جایگزینی ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و ٪۱۰۰ به ترتیب برابر با ۲/۱۲، ۲/۱، ۲/۰۳، ۱/۹۶ و ۱/۸۹ Ton/m^3 محاسبه شد. بررسی نتایج آزمایش نشان می‌دهد که در مجموع با افزایش نسبت جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی، چگالی انبوهی ملات تازه و سخت شده کاهش می‌یابد. یکی از دلایل کاهش چگالی انبوهی در ملات ساخته شده با ماسه بازیافتی، تخلخل بیشتر ماسه بازیافتی نسبت به ماسه طبیعی است. همچنین تیز گوشه بودن ماسه بازیافتی و داشتن سطح زبر، باعث می‌شود تا مقدار هوایی که به‌صورت تصادفی در ملات محبوس می‌شود نیز افزایش یابد که نتیجتاً کاهش چگالی انبوهی را در پی خواهد داشت. نتایج مربوط به این بخش در جدول ۶ آورده شده است. در تحقیقی توسط جیزز و همکاران [۲۵] انجام گرفت نیز چگالی انبوهی با استفاده از ماسه‌ی بازیافتی کاهش یافت که تأیید کننده‌ی نتایج این تحقیق است.

۳-٤- ضریب جذب آب و ضریب جذب مویینه‌ی ملات سخت شده

ضریب جذب آب ملات بنایی سخت شده برای نمونه‌ی شاهد و درصدهای جایگزینی ماسه‌ی طبیعی با بازیافتی ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و

٪۱۰۰ به ترتیب ٪۶/۹۶، ٪۸/۰۵، ٪۸/۴۶، ٪۸/۸ و% ۹/۳۶ اندازه‌گیری شد. باتوجه‌به اختلاف معنادار ضریب جذب آب ماسه طبیعی (٪۳/۸۴) و ماسه بازیافتی (٪۱۲/۳۹)، نتایج به‌دست‌آمده در این آزمایش را تأیید می‌نماید. بررسی نتایج نشان می‌دهد که در درصد جایگزینی ٪۱۰۰ ضریب جذب آب ٪۲/۴ افزایش می‌یابد. نتایج مربوط به این بخش در جدول ۶ آمده است.

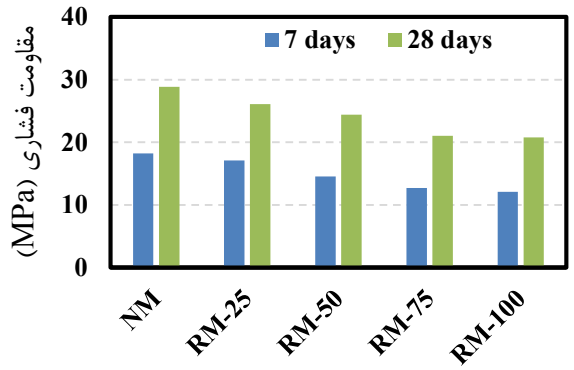
نتایج آزمایش تعیین ضریب جذب مویینه ملات سخت شده نیز نشان داد که مجموعاً جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی باعث افزایش ضریب جذب مویینه می‌شود. درصد جذب مویینه برای نمونه‌ی شاهد و طرح‌های دارای درصدهای جایگزینی ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و ٪۱۰۰ ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی، به ترتیب ۰/۵۳، ۰/۵۵، ۰/۶، ۰/۵۸، ۰/۶۳. محاسبه شد. با افزایش درصد جایگزینی از صفر به ٪۲۵ ابتدا نفوذپذیری افزایش‌یافته و این افزایش تا ٪۵۰ جایگزینی نیز ادامه دارد اما با جایگزینی ٪۷۵ از ماسه‌ی طبیعی با بازیافتی، مقدار نفوذپذیری ۰/۰۲ واحد کاهش می‌یابد که با گذر از این مقدار و رسیدن به ٪۱۰۰ جایگزینی ماسه‌ی طبیعی با ماسه بازیافتی، دوباره نفوذپذیری افزایش می‌یابد.

از جمله دلایل افزایش ضریب جذب مویینه ملات بنایی ساخته شده از ماسه بازیافتی، می‌توان به مشخصات فیزیکی ماسه بازیافتی شامل ضریب جذب آب بالای ماسه بازیافتی و خصوصیات ظاهری ماسه بازیافتی (زبری سطح و ...) و همچنین وجود ذرات سیمان هیدراته شده چسبیده به سطوح ماسه‌های بازیافتی اشاره کرد. نتایج مربوط به این بخش در جدول ۶ آمده است. نتایج به دست آمده همسو با نتایج تحقیقی هستند که توسط هوشیا و همکاران [۲۶] انجام گرفت و در آن‌جا نیز با افزایش درصد جایگزینی، تخلخل و جذب آب ملات سخت شده افزایش یافت.

٤-٤- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های شکسته شده در آزمایش مقاومت خمشی انجام گرفت. مقاومت فشاری نمونه‌ی ۷ روزه‌ی شاهد که با ماسه‌ی طبیعی ساخته شده بود، ۱۸/۲ مگاپاسکال برآورد شد و با افزایش درصد جایگزینی ماسه‌ی طبیعی با ماسه بازیافتی به ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و ٪۱۰۰ مقاومت فشاری به ترتیب به ۱۷/۱، ۱۴/۵، ۱۲/۷ و ۱۲ مگاپاسکال رسید که نشان‌دهنده‌ی به ترتیب ٪۶، ٪۲۰، ٪۳۰ و ٪۳۴ کاهش در مقاومت فشاری است. با بررسی نسبت‌های جایگزینی مختلف، مشاهده می‌شود که نسبت جایگزینی ٪۲۵، مقاومت فشاری ۷ روزه را تنها به میزان ٪۶ کاهش می‌دهد اما با جایگزینی بیشتر از این مقدار، مقاومت فشاری سن ۷ روزه با شتاب بیشتری کاهش می‌یابد.

مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ روزه‌ی شاهد که تماماً از ماسه‌ی طبیعی ساخته‌شده بودند به ۲۸/۸ مگاپاسکال رسیدند که با افزایش درصد جایگزینی به ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و ٪۱۰۰ مقاومت فشاری به ترتیب به ۲۶/۱، ۲۴/۴، ۲۱ و ۲۰/۷ مگاپاسکال رسید که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ٪۹، ٪۱۵، ٪۲۷ و ٪۲۸ کاهش در مقاومت فشاری است. از نتایج این آزمایش نیز این نتیجه به دست می‌آید که تا ٪۲۵ جایگزینی ماسه‌ی طبیعی با بازیافتی مقاومت فشاری ملات بنایی کاهش چشمگیری ندارد اما با افزایش بیش از این، مقاومت فشاری سن ۲۸ روزه کاهش چشمگیری می‌یابد. این نتایج در شکل ۴ آورده شده است. همچنین مقایسه نتایج دو سن ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد که نرخ کاهش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه کمتر از نرخ کاهش مقاومت فشاری در سن ۷ روزه به‌ازای افزایش نسبت جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی است. به تعبیر دیگر با افزایش شن نمونه‌ها، اختلاف مقاومت فشاری بین نمونه‌های ساخته‌شده با ماسه‌ی طبیعی و بازیافتی کاهش می‌یابد.



شکل ۴- مقاومت فشاری نمونه‌های ملات بنایی

مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده حداقل‌های آئین‌نامه‌های استاندارد ملی ایران [۲۷] را برآورده می‌کند و همگی در رده‌ی مقاومتی ۲۰ MPa (بالاترین رده‌بندی مقاومت فشاری ملات بنایی در ایران) قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده‌ی کیفیت بالای ملات ساخته‌شده است.نسبت سیمان به ماسه ۱:۳ باعث افزایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات بنایی شد به‌طوری‌که بر اساس اعلام استاندارد ملی ایران، مقاومت فشاری بین ۱ تا ۲۰ MPa برای ملات

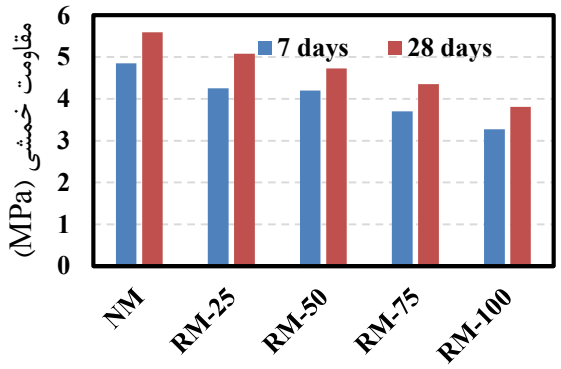
بنایی درنظر گرفته شده است. با این حال با در نظر گرفتن نسبت سیمان به ماسه ۱:۳ و ٪۱۰۰ جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی، همچنان می توان بالاترین رده مقاومت فشاری اشاره شده در استاندارد ملی ایران (ملات برای کارهای بنایی) را احراز نمود. این نتایج نیز مشابه با نتایج آزمایش‌های انجام شده در گذشته [۱۱،۲۶] می‌باشد که در آن آزمایش نیز با استفاده از ماسه بازیافتی مقاومت فشاری کاهش یافت.

۵-٤- مقاومت خمشی

بررسی نتایج حاصل شده در هر دو سن ۷ و ۲۸ روزه نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی، مشابه نتایج مأخوذه برای مقاومت فشاری، مقاومت خمشی کاهش می‌یابد. این نتایج با نتایج پژوهش‌های پیشین که در تحقیقات گذشته به‌دست‌آمده بود، مطابقت دارد [۲۸]. در نمونه‌های سن ۷ روزه مقاومت خمشی نمونه‌ی شاهد که با ماسه‌ی طبیعی ساخته شده بود ۴/۸ مگاپاسکال و برای درصدهای جایگزینی ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و ٪۱۰۰ مقاومت خمشی به ترتیب برابر با ۴/۲، ۴/۲، ۳/۷ و ۳/۲ مگاپاسکال برآورد شد. این مقادیر به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ٪۱۲، ٪۱۴، ٪۲۴ و ٪۳۳ کاهش در مقاومت خمشی است. برای نمونه‌های سن ۲۸ روزه نیز مقاومت خمشی نمونه‌ی شاهد ۵/۵ مگاپاسکال محاسبه شد و برای درصدهای جایگزینی ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و ٪۱۰۰ مقاومت خمشی به ترتیب برابر با ۵، ۴/۷، ۴/۳، ۳/۸ مگاپاسکال به دست آمد که به ترتیب نشان‌دهنده‌ی ٪۹، ٪۱۵، ٪۲۲ و ٪۳۲ کاهش در مقاومت خمشی است. به تعبیر دیگر در هر دو سن ۷ و ۲۸ روزه جایگزینی کامل ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی مقاومت خمشی را یک‌سوم کاهش می‌دهد. نتایج آزمایش مقاومت خمشی در شکل ۵ آمده است

٦-٤- دوام در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد

نتایج آزمایش دوام نمونه‌های منشوری ملات بنایی در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد بعد از سپری شدن ۳۰ چرخه در جدول ۷ آورده شده است. همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد جهت سنجش عملکرد دوامی نمونه‌های ملات بنایی، درصد تغییرات وزن نمونه و همچنین درصد تغییرات مقاومت فشاری در نظر گرفته شده است. در این آزمایش نمونه‌های ساخته‌شده با ماسه‌ی طبیعی دچار ٪۰/۴۱ افزایش وزن و نمونه‌های ساخته شده با ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و ٪۱۰۰ ماسه‌ی بازیافتی به ترتیب دارای ٪۰/۳۶+، ٪۰/۰۹+، ٪۲/۱۲+ و ٪۱/۰۵- افزایش یا کاهش مقاومت فشاری شدند. به تعبیر دیگر در عموم نمونه‌ها نه‌تنها مقاومت فشاری بعد از سپری شدن ۳۰ سیکل ذوب و انجماد کاهش نیافت، بلکه در چهار طرح NM، RM-25، RM-50 و RM-75 مقاومت فشاری افزایش یافت اما در طرح RM-100 مقاومت فشاری نمونه نسبت به طرح مبنا (مقاومت فشاری ۲۸ روزه پیش از آغاز چرخه‌های ذوب و انجماد) حدود ٪۱ کاهش داشت.



شکل ۵- مقاومت خمشی نمونه‌های ملات بنایی

در خصوص درصد تغییرات وزن نمونه‌ها قبل و بعد از اجرای ۳۰ چرخه ذوب و انجماد، باید عنوان نمود که نمونه‌ی شاهد ساخته شده با ماسه‌ی طبیعی ٪۰/۱۱+ افزایش وزن را تجربه کرد و نمونه‌های ساخته شده با درصدهای جایگزینی ٪۲۵، ٪۵۰، ٪۷۵ و ٪۱۰۰ به ترتیب ٪۰/۲۶+، ٪۰/۱۵+، ٪۰/۰۴- و ٪۰/۱۹+ افزایش یا کاهش وزن داشتند. همچنین در خصوص بازرسی ظاهری نمونه‌ها هم باید عنوان نمود که کلیه نمونه‌ها در همه سطوح سالم و بی‌عیب بودند و ارزیابی سطحی بسیار رضایت‌بخش بود. به تعبیر دیگر با درنظرگرفتن روش آزمایش اجرا شده در این پژوهش و همچنین طرح اختلاط پیشنهادی و حتی درنظرگرفتن نسبت جایگزینی ٪۱۰۰ ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی، عملکرد دوامی قابل قبولی در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد کسب می‌شود. از دیگر سو بر اساس نتایج تغییرات وزن نمونه‌ها و درنظرگرفتن فرایند آزمایش (ASTM C 666/ Procedure B) می‌توان عنوان کرد که فرایند B مندرج در این دستورالعمل، برای سنجش دوام نمونه‌های ملات بنایی در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد مناسب نیست. در پژوهش‌های آتی توصیه می‌گردد فرایند A اشاره شده در

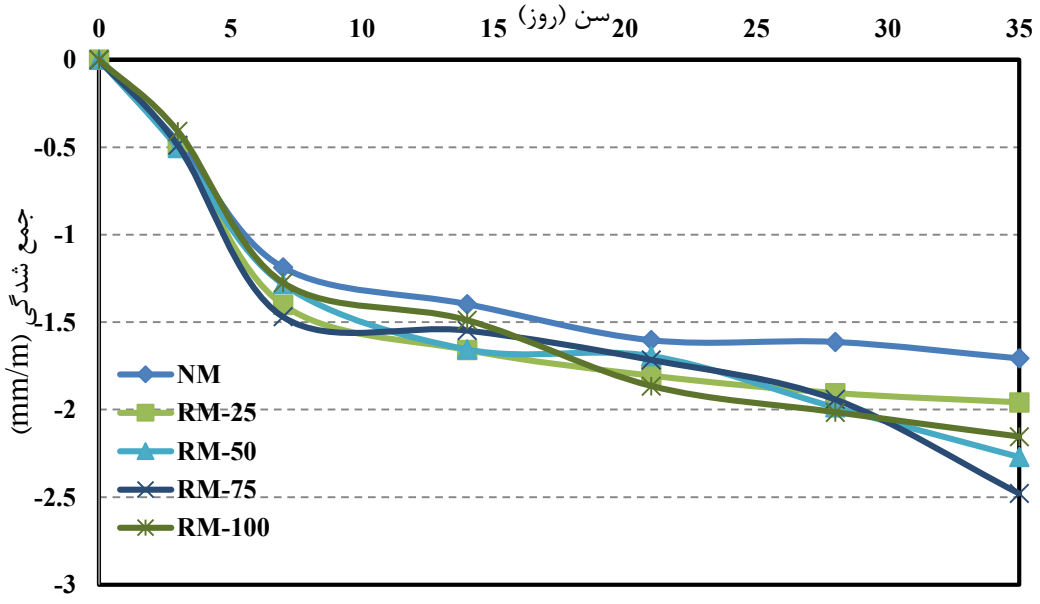
استاندارد ASTM C 666 که در آن نمونه مستغرق در آب است، نیز جهت سنجش دوام نمونه‌های منشوری ملات بنایی در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد مورداستفاده قرار گیرد. نتایج این آزمایش در جدول ۷ آمده است

جدول ۷- نتایج حاصل از آزمایش دوام در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد

طرح اختلاط	تغییرات مقاومت فشاری در انتهای آزمایش (٪)	تغییر وزن در انتهای آزمایش (٪)	وضعیت ظاهری
NM	+۰/۴۱	+۰/۱۱	خوب
RM-25	+۰/۳۶	+۰/۲۶	خوب
RM-50	+۰/۰۹	+۰/۱۵	خوب
RM-75	+۲/۱۲	-۰/۰۴	خوب
RM-100	-۱/۰۵	+۰/۱۹	خوب

۷-٤- جمع‌شدگی

در شکل ۶ نتایج محاسبات جمع‌شدگی برای نمونه‌های ملات بنایی در سنین ۲، ۳، ۷، ۱۴، ۲۱، ۲۸ و ۳۵ آورده شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که تا قبل از سن ۷ روز، عملاً تفکیک مناسبی بین نتایج جمع‌شدگی طرح‌های مختلف نمی‌توان انجام داد. اما بعد از سن ۷ روز، به‌وضوح مشاهده می‌شود که طرح شاهد دارای کمترین میزان جمع‌شدگی نسبت به طرح‌های دارای ماسه بازیافتی است. همچنین در پایان سن ۳۵ روز، طرح RM-75 دارای بیشترین مقدار جمع‌شدگی بین سایر طرح‌ها بود. اگرچه نظم مشخصی در روند تغییرات جمع‌شدگی طرح‌های شامل ماسه بازیافتی به دلیل متغیر بودن ویژگی های ماسه بازیافتی و پیچیده بودن رفتار آن مشاهده نمی‌شود اما می‌توان این نتیجه‌گیری را کرد که استفاده ماسه بازیافتی در ملات بنایی به دلایل متعدد مانند درصد جذب آب بالا، خواص و مشخصات ظاهری ماسه‌های بازیافتی و همچنین وجود ذرات سیمان هیدراته شده چسبیده به سطح سنگ‌دانه‌ها، جمع‌شدگی نمونه‌های منشوری ملات بنایی افزایش می‌یابد. به همین علت ضروری است در بخش‌هایی که مسئله جمع‌شدگی حائز اهمیت ویژه‌ای است، از کاربرد نسبت‌های جایگزینی بالا (بیش از ٪۵۰) در ساخت ملات بنایی اجتناب کرد. در تحقیقی که توسط ما و همکاران [۲۹] انجام گرفت نیز نتایج مشابهی به دست آمد و با افزایش درصد جایگزینی ماسه طبیعی با بازیافتی تغییر خطی و متناسب با درصد جایگزینی گزارش نشده است.



شکل ۶ - نتایج آزمایش جمع‌شدگی

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش مطالعات و آزمایش‌های جامعی بر روی مشخصات کارایی، فیزیکی، مکانیکی و دوامی ملات ساخته شده با ماسه بازیافتی صورت گرفت. در مجموع باتوجه‌به 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 ضروری می‌نماید. در ادامه اهم نتایج مأخوذه در این پژوهش ارائه شده است.

- با افزایش درصد جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی، کارایی ملات تازه کاهش محسوسی می‌یابد به صورتی که کارایی برای نمونه‌ی شاهد برابر با ۱۷۸ میلی‌متر و برای نمونه‌ی دارای ٪۱۰۰ ماسه‌ی بازیافتی برابر با ۱۶۳ میلی‌متر بود.

- به دلیل تخلخل بیشتر و وزن مخصوص کم‌تر ماسه بازیافتی نسبت به ماسه طبیعی، چگالی انبوهی ملات حاوی ماسه بازیافتی کاهش می‌یابد اما ضریب جذب آب و ضریب جذب مویینه افزایش می‌یابد.

- مقاومت فشاری و مقاومت خمشی 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 و مقاومت خمشی کاهش می‌یابند و مقاومت فشاری برای نمونه‌ی شاهد در سن ۲۸ روز به ۲۸/۸ مگاپاسکال و برای نمونه‌ی دارای ٪۱۰۰ ماسه‌ی بازیافتی به ۲۰/۷ مگاپاسکال رسید. مقاومت خمشی نیز در سن ۲۸ روز برای نمونه‌ی شاهد برابر ۵/۵ مگاپاسکال و برای نمونه‌ی ساخته شده با ٪۱۰۰ ماسه‌ی بازیافتی برابر ۳/۸ مگاپاسکال به دست آمد. اگرچه مطابق با استاندارد ملی ایران مقاومت فشاری نمونه‌ها در حدود قابل‌قبول قرار داشتند.

- دوام در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد در نمونه‌های حاوی ماسه بازیافتی تفاوت چندانی با نمونه‌های ساخته شده با ماسه‌ی طبیعی ندارد و با افزایش درصد جایگزینی روند کاهشی یا افزایشی مشخصی مشاهده نمی‌شود.

- نتایج آزمایش جمع‌شدگی نیز نشان‌دهنده‌ی جمع‌شدگی بیشتر ملات‌های ساخته‌شده با ماسه‌ی بازیافتی است که به دلیل حجم بیشتر خمیر سیمان رخ می‌دهد. به همین دلیل برای استفاده در پروژه‌هایی که مقدار جمع‌شدگی حائز اهمیت ویژه‌ای است، توصیه می‌گردد نسبت جایگزینی ماسه طبیعی با ماسه بازیافتی محدود گردد.

در یک نتیجه‌گیری کلی نیز می‌توان عنوان نمود که استفاده از ماسه‌ی بازیافتی به دلیل کیفیت پایین‌تر، باعث کاهش کیفیت ملات نیز می‌گردد اما از دیگر سو باتوجه‌به نیازهای روزافزون برای استفاده از این ضایعات و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، می‌توان تا ٪۲۵ ماسه‌ی طبیعی را با ماسه‌ی بازیافتی جایگزین کرد و انتظار عملکرد کیفی، مکانیکی و دوامی قابل قبولی از ملات بنایی به‌دست‌آمده داشت

٦- مراجع

[1] Tošić N, Marinković S, Dašić T, Stanić M. Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. Journal of Cleaner Production. 2015;87(1):766–76.

[2] Debieb F, Courard L, Kenai S, Degeimbre R. Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. Construction and Building Materials. 2009 Nov;23.

[3] Poon C-S, Chan D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. Resources, Conservation and Recycling. 2007 May;50.

[4]Xiao J, Xie H, Zhang C. Investigation on building waste and reclaim in Wenchuan earthquake disaster area. Resources, Conservation and Recycling. 2012 Apr;61.

[5] Martín-Morales M, Zamorano M, Ruiz-Moyano A, Valverde-Espinosa I. Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. Construction and Building Materials. 2011 Feb;25.

[6] Marinković S, Radonjanin V, Malešev M, Ignjatović I. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. Waste Management. 2010 Nov;30(11).

[7] Levy SM, Helene P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. Cement and Concrete Research. 2004 Nov;34.

[8] Ajdukiewicz A, Kliszczewicz A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. Cement and Concrete Composites. 2002 Apr;24.

[9] Kou SC, Poon CS. Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials. 2015 Feb 15;77:501–8.

[10] Khatib JM. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. Cement and Concrete Research. 2005 Apr;35.

[11] Evangelista L, de Brito J. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement and Concrete

Composites. 2007 May;29.
[12] Saiz Martínez P, González Cortina M, Fernández Martínez F, Rodríguez Sánchez A. Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. Journal of Cleaner Production. 2016 Apr;118.
[13] Le T, Rémond S, le Saout G, Garcia-Diaz E. Fresh behavior of mortar based on recycled sand – Influence of moisture condition. Construction and Building Materials. 2016 Mar;106.
[14] Ledesma EF, Jiménez JR, Fernández JM, Galvín AP, Agrela F, Barbudo A. Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials. 2014 Nov;71.
[15] ASTM C 144. Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar. 2004.
[16] BS EN. 1015-3 (1999). Methods of test for mortar for masonry part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).
[17] BS EN 1015-9. (1999). Methods of test for mortar for masonry Part 9: Determination of workable life and correction time of fresh mortar.
[18] BS EN 1015-6. (1999). Methods of test for mortar for masonry Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar.
[19] BS EN 1015-11. (1999). Methods of test for mortar for masonry Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.
[20] BS EN 1015-18. (1999). Methods of test for mortar for masonry Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar.
[21] BS EN 1015-10. Methods of test for mortar for masonry Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. 1999.
[22] ASTM C666 / C666M-03. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2008.
[23] ASTM C 1148. Standard test method for measuring the drying shrinkage of masonry mortar. 2008.
[24] Leite, M.B., Figueire do Filho, J.G.L. & Lima, P.R.L. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. Mater Struct 46, 1765–1778 (2013).
[25] Sara Jesus, Cinthia Maia, Catarina Brazão Farinha, Jorge de Brito, Rosário Veiga, Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste, Construction and Building Materials,Volume 229, 2019.
[26] Huixia Wu, Changqing Wang, Zhiming Ma, Drying shrinkage, mechanical and transport properties of sustainable mortar with both recycled aggregate and powder from concrete waste, Journal of Building Engineering, Volume 49, 2022.
[27]ملات بنایی- ویژگی ها- قسمت دو: ملات برای کارهای بنایی. مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران. ۱۳۹۲
[28] Cuenca-Moyano GM, Martín-Pascual J, Martín-Morales M, Valverde-Palacios I, Zamorano M. Effects of water to cement ratio, recycled fine aggregate and air entraining/plasticizer admixture on masonry mortar properties. Construction and Building Materials. 2020 Jan 10;230.
[29] Zhiming Ma, Jiaxin Shen, Changqing Wang, Huixia Wu, Characterization of sustainable mortar containing high-quality recycled manufactured sand crushed from recycled coarse aggregate, Cement and Concrete Composites, Volume 132, 2020.

A study on properties of masonry mortar containing recycled fine aggregate

Milad Aghililotf
Ph.D Candidate, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
Mohammad Kuroshkarim
BS Graduate, Faculty of Environmental Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
Mohammad Yaser Chamani
Msc. Student, Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
AmirMohammad Ramezanianpour *
Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

In this paper, the fresh and hardened properties of mortars containing different percentages of recycled sand made from crushed concrete blocks were studied. For this purpose, natural sand was substituted with recycled sand in 0, 25, 50, 75, and 100 percentages. The same particle size distribution for both natural and recycled materials was used. Also, the water to cement ratio was considered 0.55, and the cement to sand weight ratio was considered to be 1:3. Physical properties including water absorption, water permeability, and bulk density of fresh and hardened mortar, and mechanical properties including compressive and bending strength, resistance against freezing and thawing cycles, and drying shrinkage were examined. The experimental results suggest that mortars made with recycled sand had acceptable compressive strengths all above 10 MPa. By increasing the substitution ratio, the workability and workable time of mortars were reduced. Masonry mortar made with recycled fine aggregate had acceptable resistance against freezing and thawing cycles according to ASTM C666. Results of the drying shrinkage test showed that masonry mortar made with recycled sand had more drying shrinkage than mortars made with natural sand which is a result of a more hardened cement volume ratio in the samples containing recycled sand. Overall, it can be concluded that up to 50% replacement level of aggregate can have reasonable mechanical and durability properties and may be suitable for sustainable development.

Keywords: Recycled concrete fine aggregate, drying shrinkage, masonry mortar, resistance against freezing and thawing cycles.

* Corresponding Author: ramezanian@ut.ac.ir