

ارزیابی دوام سنگدانه‌های بازیافتی بتنی و سنگدانه‌های طبیعی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان

میلاذ عقیلی لطف، کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

مسعود پلاسی*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

امیرمحمد رمضانیان پور، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران

Email: mpalas@ut.ac.ir

دریافت: ۹۶/۱۰/۰۸ - پذیرش: ۹۶/۱۱/۱۹

چکیده

در دهه گذشته، بازیافت نخاله‌های ساخت و تخریب و تولید سنگدانه بازیافتی بتنی به عنوان یک رویکرد زیست‌محیطی رواج فراوانی یافته است. کاربرد این نسل از سنگدانه‌ها در پروژه‌های عمرانی، مانند راه‌سازی، می‌تواند به افزایش عرضه شن و ماسه و حل معضلات ناشی از دفن نخاله کمک شایانی کند. یکی از مشخصه‌های عملکردی این نوع مصالح، دوام در برابر چرخه‌های متوالی ذوب و یخبندان است. تخریب‌های ناشی از اعمال این چرخه یکی از مسائل دوامی برای لایه‌های مختلف راه‌سازی در اقلیم‌های سرد محسوب می‌گردد. از سوی دیگر، با توجه به سهم مصالح سنگدانه‌ای در راه‌سازی، باید عنوان نمود که عملکرد دوامی سنگدانه‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان بر عملکرد لایه‌های راه‌سازی مؤثر است. تاکنون استانداردهای مختلفی به منظور ارزیابی دوام سنگدانه‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان تدوین شده است. اما با توجه به ساختار متفاوت سنگدانه‌های بازیافتی بتنی و کیفیت به مراتب کمتر این نوع سنگدانه‌ها نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، قابلیت کاربرد استانداردهای مذکور برای سنگدانه‌های بازیافتی مورد پرسش است. لذا در این پژوهش، سه استاندارد ASTM C 88، AASHTO T 103 و CSA A23.2-24A به منظور ارزیابی دوام سنگدانه‌های بازیافتی بتنی و طبیعی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان انتخاب شدند. آزمایش‌های جذب آب و سایش در دستگاه لس آنجلس نیز تعیین شده است. نتایج آزمایش‌های دوامی نشان داد که آزمایش AASHTO قدرت تخریب بسیار زیادی دارد و استفاده از آن با چرخه دما-زمان در این پژوهش توصیه نمی‌شود. همچنین، آزمایش سلامت سنگدانه با استفاده از محلول منیزیم سولفات قابل کاربرد برای سنگدانه‌های بازیافتی نیست و نتایج قابل اطمینانی ندارد. اما آزمایش CSA نتایج قابل قبولی متناسب با نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی داشت.

واژه‌های کلیدی: واژه‌های کلیدی: سنگدانه بازیافتی بتنی، سنگدانه طبیعی، منیزیم سولفات، آزمایش سلامت سنگدانه

۱. مقدمه

و ماسه‌ی بیشتر، منجر به استفاده از نخاله‌های بتنی به عنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی شد. نتیجه این امر پدید آمدن مصالحی جدید در ساخت و ساز بود: سنگدانه بازیافتی بتنی. به‌طور کلی، سنگدانه بازیافتی از دو قسمت تشکیل شده است: الف) سنگدانه (های) طبیعی اولیه و ب) ذرات سیمان هیدراته‌ی چسبیده به سنگدانه طبیعی اولیه (ارشد و احمد، ۲۰۱).

هنگامی که از سنگدانه‌های بازیافتی برای تولید بتن، آسفالت یا هر سازه جدیدی استفاده شود، خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی سازه حاصله دستخوش تغییرات زیادی می‌شود. از طرفی نیز سنگدانه‌های بازیافتی ساخته شده از قطعات بتنی متفاوت، خصوصیات مقاومتی و دوامی متفاوتی خواهند داشت (گوکسه و همکاران، ۲۰۱۱). لذا، تعیین مشخصات عملکردی مصالح سنگدانه‌ای بازیافتی بتنی امری ضروری می‌نماید.

یکی از این مشخصات عملکردی، تعیین دوام سنگدانه‌های بازیافتی بتنی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان است. تخریب‌های ناشی از اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان یکی از بزرگ‌ترین مسائل دوامی برای روسازی‌های آسفالتی و بتنی و همچنین سازه‌های بتنی در اقلیم‌های سرد محسوب می‌گردد. در سازه‌های بتنی، سیمان هیدراته شده پتانسیل بسیار زیادی برای تخریب در اثر این مکانیزم را دارد. اما با استفاده از افزودنی‌های هوازا^۱ می‌توان به‌خوبی این معضل را برطرف نمود (پیچن و پلو، ۲۰۱۰). در روسازی‌های آسفالتی نیز می‌توان بیان کرد که عملکرد دوامی مخلوط آسفالتی در برابر ذوب و یخبندان در مجموع باعث کاهش مقاومت مخلوط در برابر تغییرشکل‌های دائمی می‌گردد (لاشانس- ترمبلی و همکاران، ۲۰۱۷). مسئله یخبندان در سایر لایه‌های روسازی نیز بر هر دو عملکرد کوتاه-مدت و بلندمدت لایه روسازی اثر منفی و مخربی

مقدار زباله تولیدی در هر سال در اتحادیه اروپا نزدیک به ۳ میلیارد تن تخمین زده می‌شود که در حدود ۳۱٪ آن را زباله‌های ناشی از ساخت و تخریب (C&D) تشکیل می‌دهند (مانک- کاپمن، ۲۰۰۳). به‌طور معمول، سنگدانه‌ها بین ۶۰ تا ۸۰ درصد کل وزن بتن مصرفی، بیش از ۹۰٪ آسفالت و به‌طور متوسط بیش از ۸۵٪ حجمی لایه‌های روسازی را تشکیل می‌دهند (دوریتو و سایکیا، ۲۰۱۲). پس می‌توان انتظار داشت که عملکرد مکانیکی و دوامی سنگدانه‌ها نقش به‌سزایی در عملکرد کاربردهای مذکور داشته باشد. حضور سنگدانه ضعیف در بتن می‌تواند منجر به کاهش مقاومت‌های مکانیکی از قبیل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی گردد. یا به‌طور مشابه، در روسازی آسفالتی، مقاومت اصطکاکی سطح راه، مقاومت خمشی و مقاومت کششی با حضور سنگدانه‌های ضعیف به‌شدت کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، در لایه‌های مختلف روسازی راه، مانند اساس یا زیراساس، بعضاً سنگدانه به‌تنهایی به‌عنوان عضو اصلی باربر ایفای نقش می‌کند. لذا، هم‌زمان با افزایش ساخت و ساز، استخراج، بهره‌برداری و مصرف سنگدانه‌های طبیعی به عنوان بزرگ‌ترین جزء تشکیل‌دهنده این سازه‌ها نیز افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که تنها در اتحادیه اروپا سالانه ۳ میلیارد تن سنگدانه طبیعی تولید و مصرف می‌شود (آژانس محیط‌زیست اروپا، ۲۰۰۸).

عواملی همچون محدودیت منابع شن و ماسه طبیعی، عدم بازیافت نخاله‌های ساختمانی، کمبود مدفن‌های زباله، پدید آمدن مسائل متعدد زیست‌محیطی، افزایش هزینه ساخت و تولید به دلیل کمبود بحرانی سنگدانه طبیعی و همچنین اهمیت محیط‌زیست، دولت‌ها را بر آن داشت تا با رویکردی جدید نسبت به این پدیده برخورد نمایند. وجود معضلات مطرح شده، رشد فناوری و در نهایت افزایش توان برای عرضه شن

^۱- Air entraining admixture

آزمایش بر پایه‌ی ایجاد فشار داخلی در ساختار سنگدانه‌ها است که در نهایت منجر به تخریب سنگدانه می‌گردد (کونلهو و همکاران، ۲۰۰۷؛ وو و همکاران، ۱۹۹۸؛ یوانو و همکاران، ۲۰۱۳). در این آزمایش، سنگدانه‌ها در یک بازه‌ی زمانی مشخص در یک چرخه، به صورت اشباع در محلول‌های سدیم سولفات یا منیزیم سولفات قرار می‌گیرند. سپس، نمونه‌ها در داخل گرم‌خانه در دمای زیاد خشک می‌شوند. هنگامی که سنگدانه‌ها به صورت اشباع در محلول قرار دارند، به مرور ذرات نمک به داخل حفرات آن‌ها نفوذ می‌کند و زمانی که در داخل گرم‌خانه تحت دمای زیاد خشک می‌شوند، به دلیل انبساط حجم ذرات نمک، در داخل ساختار سنگدانه‌ها تنش‌های فشاری زیادی به وجود می‌آورند که این تنش‌ها باعث بزرگ‌تر شدن حفرات داخل سنگدانه می‌شود. با تکرار چند چرخه تر و خشک‌شدگی، در نهایت متلاشی شدن سنگدانه‌ها را شاهد خواهیم بود. باید قید نمود که تعداد چرخه‌های اعمالی در این آزمایش معمولاً ۵ چرخه می‌باشد؛ هرچند که استانداردهای مطرح در این مورد تعداد دقیقی مشخص نکرده‌اند. در خصوص آزمایش سلامت سنگدانه می‌توان بیان نمود که علی‌رغم مقاومت مکانیکی و دوام کمتر سنگدانه‌های بازیافتی بتنی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، در آزمایش سلامت سنگدانه با استفاده از محلول منیزیم سولفات، تناقض‌هایی نیز مشاهده شده است (اشنایدر و همکاران، ۱۹۹۴). اما در خصوص استفاده از محلول سدیم سولفات، در بسیاری از تحقیقات، نتایج به‌دست آمده با عملکرد مکانیکی سنگدانه همخوانی خوبی دارند (گوکسه و همکاران، ۲۰۱۱؛ تابش و عبدالفتاح، ۲۰۰۹). تابش و عبدالفتاح (۲۰۰۹) آزمایش سلامت سنگدانه با استفاده از محلول سدیم سولفات را روی سه نوع سنگدانه بازیافتی بتنی اجرا کردند و دوام کمتر سنگدانه‌های بازیافتی بتنی را نسبت به سنگدانه طبیعی مشاهده کردند. آن‌ها دریافتند

به‌جای می‌گذارد. به طوری که هنگام یخبندان، تخریب اصلی صورت نمی‌گیرد. اما هنگام ذوب آب‌های منجمد شده، مقاومت مکانیکی لایه به شدت کاهش می‌یابد. عملکرد بلندمدت نیز شامل تأثیر ذوب و یخبندان بر رفتار پارامترهای تشکیل‌دهنده لایه‌های مذکور (مصالح سنگدانه‌ای، خاک و ...) می‌شود که در این نوع تخریب‌ها ممکن است خود مصالح سنگدانه‌ای دچار خرابی‌های فیزیکی و شیمیایی شوند (مومانی، ۲۰۱۱). در این مقاله، با توجه به اهمیت موضوع و همچنین لزوم ارزیابی دوام سنگدانه‌های بازیافتی بتنی و سنگدانه‌های طبیعی در برابر چرخه‌های متوالی ذوب و یخبندان، سه روش استاندارد ASTM C 88، AASHTO T 103 و CSA A23.2-24A مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. این موضوع، به دلیل تخلخل و درصد جذب آب بیشتر سنگدانه‌های بازیافتی بتنی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی، با پیچیدگی‌هایی همراه است و تاکنون به‌صورت گسترده مورد بررسی قرار نگرفته است. از سوی دیگر، سنگدانه‌های مصرفی در مناطق سردسیر باید در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان دوام مطلوبی داشته باشند. در کنار آزمایش‌های مذکور، درصد جذب آب و همچنین شاخص افت وزنی در دستگاه سایش لس آنجلس نیز تعیین شده است.

۲. روش‌های مختلف ارزیابی دوام سنگدانه

در برابر چرخه‌های متوالی ذوب و یخبندان

اولین آزمایشی که به‌منظور ارزیابی دوام سنگدانه‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان طراحی و اجرا شده است، آزمایش سلامت سنگدانه (ASTM C 88، ۲۰۱۴) با استفاده از محلول‌های سدیم سولفات و منیزیم سولفات بود که همچنان نیز در بسیاری از مناطق مختلف دنیا به عنوان یکی از روش‌های متداول مورد استفاده قرار می‌گیرد. مکانیزم اصلی تخریب در این

خصوص معیار ارزیابی نیز باید ذکر نمود که برای استاندارد AASHTO T 103 معیاری برای پذیرش یا رد سنگدانه تاکنون ارائه نشده است. اما در روش CSA A23.2-24A مؤسسه استاندارد کانادا حداکثر مقدار افت وزنی مصالح سنگدانه‌ای مصرفی در بتن روسازی را در آزمون مذکور به ۶ و ۱۰ درصد محدود کرده است. مقدار ۶٪ برای شرایطی در نظر گرفته می‌شود که رویه بتنی در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان قرار داشته باشد و مقدار ۱۰٪ نیز برای سایر شرایط هوازگی و دوامی اعمال می‌شود (CSA، ۲۰۱۴).

۳. برنامه آزمایشگاهی

۳-۱. مواد و مصالح

در این پژوهش، مجموعاً ۹ نمونه شن (۳ نمونه شن بازیافتی بتنی و ۶ نمونه شن طبیعی) در نظر گرفته شد. به منظور تهیه و انتخاب سنگدانه‌های طبیعی، تلاش زیادی انجام شد تا نهایتاً مجموعه‌ای از سنگدانه‌ها انتخاب شوند که محدوده مقاومتی و دوامی گسترده‌ای را در بر گیرند. عمده این معادن در بخش‌های شمالی شهر تهران قرار داشتند. در بین شن‌های طبیعی، ۴ نوع شن شکسته کوهی و ۲ نوع شن رودخانه‌ای قرار داشت. شن‌های رودخانه‌ای از دو کارخانه متوساک و کارخانه صحرای شن و ماسه تهیه شدند و غالب شن‌های شکسته کوهی را نیز سنگ آهک تشکیل می‌داد. شناسنامه شن‌های طبیعی در جدول ۱ ارائه شده است

که سنگدانه بازیافتی با مقاومت فشاری بتن اولیه بیشتر، دارای عملکرد بهتری نسبت به سایر سنگدانه‌های بازیافتی بتنی است. این موضوع تأثیر مشخصات بتن اولیه را بر مشخصه‌های دوامی سنگدانه‌های بازیافتی بتنی نشان می‌دهد.

در کنار آزمایش سلامت سنگدانه، آزمایش‌های دیگری نیز برای شبیه‌سازی دقیق‌تر و واقعی‌تر این مسئله دوامی طراحی شده‌اند. از جمله این آزمایش‌ها می‌توان به استاندارد AASHTO T 103 (۲۰۰۹) و استاندارد CSA A23.2-24A (۲۰۰۴) اشاره کرد.

استاندارد AASHTO T 103 (روش A) دوام سنگدانه‌های ریز و درشت را در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان به صورت محصور شده ارزیابی می‌کند. به این معنی که مصالح سنگدانه‌ای در دوره یخبندان توسط محلول منجمد شده، محصور می‌شود. این در حالی است که آزمایش CSA A23.2-24A دوام مصالح سنگدانه‌ای را به صورت محصور نشده ارزیابی می‌کند. به عبارت دیگر، در این آزمایش، قبل از شروع دوره یخبندان، محلول موجود در ظرف حاوی نمونه سنگدانه زهکشی شده و در حین یخبندان صرفاً رطوبت موجود در داخل و سطح سنگدانه‌ها منجمد می‌شود و از فضای اطراف نیروی دیگری به آن‌ها اعمال نمی‌گردد. لذا، با در نظرگیری شرایط یکسان از نظر چرخه دما- زمان، محلول مصرفی، غلظت محلول مصرفی و تجهیزات یخبندان، به نظر می‌رسد که روش‌های محصورکننده قدرت تخریبی بیشتری داشته باشند؛ زیرا در کنار تنش‌های داخلی، تنش‌های خارجی توسط محلول منجمد شده نیز به سنگدانه‌ها اعمال می‌گردد. در خصوص تعداد چرخه‌ها نیز باید اشاره کرد که روش استاندارد CSA A23.2-24A پنج چرخه و روش استاندارد AASHTO T 103 حداقل ۲۵ چرخه (و حداکثر ۵۰ چرخه) را شامل می‌شوند. از سوی دیگر، در

¹- Confined

جدول ۱. شناسنامه شن‌های طبیعی

کد سنگدانه	معدن تهیه*	نوع سنگدانه	نوع سنگ / سنگ شناسی	مشخصات رنگ / شکل ظاهری
NA-1	شمال شهر تهران	شکسته کوهی	سنگ رسوبی / سنگ آهکی	قهوه‌ای سوخته / کاملاً تیز گوشه
NA-2	شمال شهر تهران	شکسته کوهی	سنگ رسوبی / سنگ آهکی	شیره‌ای رنگ / ۴۵٪ گرد گوشه و ۵۵٪ شکسته
NA-3	شمال شهر تهران	شکسته کوهی	سنگ رسوبی / سنگ آهکی	سیاه رنگ با رگه‌هایی سفید / کاملاً تیز گوشه
NA-4	شمال شهر تهران	شکسته کوهی	سنگ آذرین / توف	سبز رنگ / کاملاً تیز گوشه
NA-5	کارخانه متوساک - شهریار	رودخانه‌ای	عمدتاً سنگ رسوبی / مخلوط	- / ۳۰٪ تیز گوشه و ۷۰٪ گرد گوشه
NA-6	کارخانه صحرای شن و ماسه - کهریزک	رودخانه‌ای	عمدتاً سنگ رسوبی / مخلوط	- / ۱۵٪ تیز گوشه و ۸۵٪ گرد گوشه

* این منابع به واسطه انجام تحقیقات گذشته، در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تهران موجود بودند.

جدول ۲. مشخصات طرح اختلاط بتن اولیه سنگدانه‌های

بازیافتی بتنی RCA-1 و RCA-2

نوع سنگدانه بازیافتی بتنی		مشخصه
RCA-2	RCA-1	
۰/۳۴	۰/۳۴	W/C
۴۲۰	۳۹۰	سیمان (kg/m ³)
-	۳۰	میکروسیلیس (kg/m ³)
۱۴۲/۸	۱۳۲/۶	آب (kg/m ³)
۳۳۵	۲۵۳	سنگدانه ۱۹-۹/۵ mm (kg/m ³)
۲۵۸	۱۶۰	سنگدانه ۱۲/۵-۴/۷۵ mm (kg/m ³)
۱۲۳۸	۱۱۹۷	سنگدانه ۶-۰ mm (kg/m ³)
-	۱۶۰	پودر سنگ (kg/m ³)

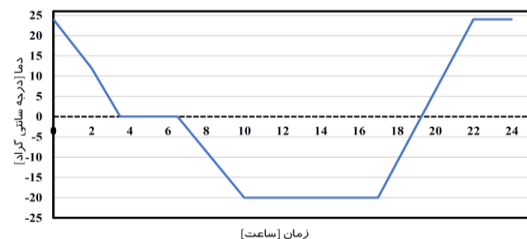
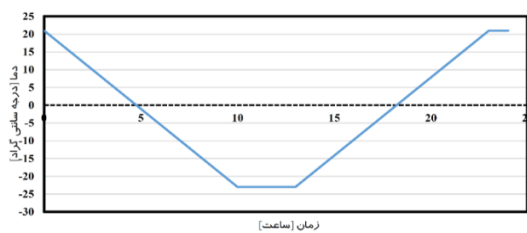
از سوی دیگر، به منظور در نظرگیری شرایطی که بتن اولیه سنگدانه بازیافتی ناشناخته است و یا سنگدانه بازیافتی از خردایش نخاله‌های بتنی مخلوط تولید شده است، در این پژوهش، یک نوع سنگدانه بازیافتی بتنی با بتن اولیه نامشخص در نظر گرفته شد. بدین منظور، نخاله‌های بتنی موجود در محل آزمایشگاه مصالح

به منظور تهیه و تولید سنگدانه بازیافتی بتنی در این پژوهش، سه نوع سنگدانه بازیافتی با بتن اولیه متفاوت در نظر گرفته شد. سنگدانه بازیافتی RCA-1 و RCA-2 به ترتیب از خردایش بتن خودتراکم و بتن معمولی تهیه و تولید شد. این بتن‌ها به صورت نمونه‌های مکعبی ۱۵*۱۵*۱۵ cm³ واقع در محل پروژه شرکت ایران مال (دریاچه چیتگر) تهیه و به محل آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران منتقل شدند. علت اصلی انتخاب بتن خودتراکم، وجود درصد ریزدانه بیشتر نسبت به بتن معمولی و همچنین مواد جایگزین سیمان (مانند میکروسیلیس) در طرح اختلاط آن بوده است. به طور کلی، مقدار ریزدانه بیشتر در طرح اختلاط به مقدار شن طبیعی کمتر و در نتیجه مقدار ملات سیمانی بیشتر می‌انجامد. عمر شکست نمونه‌های بتنی ۹۰±۵ روز بوده است. این نمونه‌ها تا سن ۲۸ روزه در محلول آب-آهک عمل‌آوری شده بودند. مشخصات طرح اختلاط این دو نوع سنگدانه بازیافتی در جدول ۲ ارائه شده است.

¹ - Recycled concrete aggregate-1

۲-۳. طراحی آزمایش‌ها

درصد جذب آب مطابق با استاندارد ASTM C 127 (۲۰۰۴) روی سه نمونه از هر نوع سنگدانه انجام شد و مقدار میانگین به عنوان نتیجه آزمایش ارائه گردید. به منظور تعیین رفتار مکانیکی سنگدانه‌ها، آزمایش سایش در دستگاه لس آنجلس انتخاب شد. این آزمایش مطابق با دستورالعمل استاندارد ASTM C 131 (۲۰۱۴) روی دو نمونه سنگدانه ۹/۵-۱۹ mm اجرا شد. به منظور تعیین رفتار دوامی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی بتنی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان نیز سه آزمایش ASTM C 88 (محلول منیزیم سولفات)، AASHTO T 103-08 (روش A) و CSA A23.2-24A انتخاب شدند. کلیه آزمایش‌های دوامی روی سه نمونه ۴-۲۵/۷۵ mm اجرا شدند. نمودار دما-زمان در استانداردهای ذوب و یخبندان در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است، در طول ۲۴ ساعت، مجموعاً روش CSA سرمای بیشتری را به نمونه اعمال می‌کند. اما به دلیل رطوبت کمتر در سطح و داخل سنگدانه‌ها، عملاً شدت تخریب وارده در این روش کمتر خواهد بود.

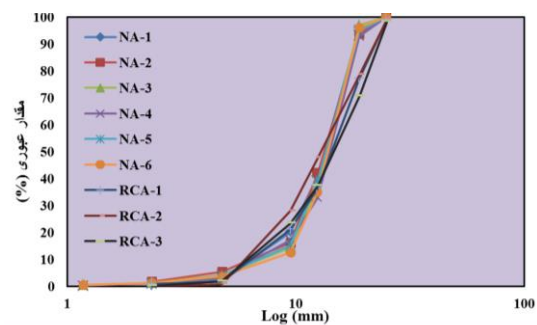


شکل ۲. نمودار چرخه دما-زمان استاندارد AASHTO T 103-08 (بالا) و (ب) استاندارد CSA A23.2-24A (پائین)

ساختمانی تفکیک و خرد شدند. فرایند تولید هر سه نوع سنگدانه بازیافتی به صورت دستی و با استفاده از چکش‌های فولادی صورت پذیرفت. در ادامه، به دلیل دقت کمتر خردایش دستی نسبت به خردایش مکانیکی، سنگدانه‌های بازیافتی با استفاده از الک‌های استاندارد دانه‌بندی شدند. حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها mm ۲۵ در نظر گرفته شد و الک ۴/۷۵ mm نیز به منظور جداسازی ماسه بازیافتی از شن بازیافتی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج آزمایش XRF^۱ روی سنگدانه‌های بازیافتی در جدول ۳ آورده شده است. در شکل ۱ نیز نمودار دانه‌بندی شن‌های طبیعی و بازیافتی ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج آزمایش XRF روی سنگدانه‌های بازیافتی

بتنی			
ترکیب شیمیایی (%)	RCA-1	RCA-2	RCA-3
SiO ₂	۲۷/۵۵	۳۰/۸۷	۳۳/۷۷
Al ₂ O ₃	۵/۶۹	۵/۹۲	۷/۱۲
Fe ₂ O ₃	۳/۰۵	۲/۹۰	۳/۵۲
CaO	۲۶/۷۹	۲۵/۵۳	۲۲/۳۲
MgO	۲/۰۰	۱/۲۵	۱/۷۷
SO ₃	۰/۷۶	۰/۶۶	۰/۵۳
Na ₂ O	۱/۴۲	۱/۲۴	۱/۲۴
K ₂ O	۱/۱۹	۱/۴۱	۱/۵۳



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی شن‌های طبیعی و بازیافتی بتنی

2- CSA A23.2-24A

1- X-ray fluorescence

۴. نتایج و بررسی

۴-۱. نتایج حاصل از آزمایش جذب آب

میانگین نتایج جذب آب در این پژوهش برای هر ۹ نمونه سنگدانه در جدول ۳ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، شن‌های بازیافتی به مراتب دارای درصد جذب آب بیشتری نسبت به شن‌های طبیعی هستند. به طور متوسط، شن‌های بازیافتی ۶/۶ درصد جذب آب بیشتری نسبت به شن‌های طبیعی دارند. در این بین، سنگدانه NA-3 با جذب آب ۰/۴۹ درصد، کمترین جذب آب و سنگدانه بازیافتی RCA-1 با جذب آب ۸/۷ درصد دارای بیشترین مقدار جذب آب می‌باشند. یکی از دلایل جذب آب بیشتر شن RCA-1 نسبت به سایر شن‌های بازیافتی را می‌توان درصد بیشتر ملات چسبیده به سطح سنگدانه‌های بازیافتی عنوان نمود. همچنین، دو شن طبیعی NA-1 و NA-6 نیز نسبت به سایر شن‌های طبیعی، درصد جذب آب بیشتری دارند. با توجه به این نتیجه، می‌توان تخلخل بیشتر این سنگدانه‌ها را نسبت به سایر سنگدانه‌های طبیعی نتیجه‌گیری کرد.

جدول ۳. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های درصد جذب

آب و سایش در دستگاه لس آنجلس

کد سنگدانه	آزمایش	
	LA (%) ^۲	WA (%) ^۱
NA-1	۲۳/۶۸	۲/۰۲
NA-2	۲۶/۱۹	۰/۸۵
NA-3	۸/۲۶	۰/۴۹
NA-4	۱۱/۵۲	۱/۶۵
NA-5	۱۳/۶۹	۱/۶۸
NA-6	۱۵/۹۳	۲/۴۰
RCA-1	۲۹/۲۵	۸/۷۰
RCA-2	۲۷/۷۲	۷/۴۵
RCA-3	۳۱/۲۱	۸/۲۰

^۱ - Water absorption coefficient

^۲ - Los Angeles abrasion value

۴-۲. نتایج حاصل از آزمایش سایش در دستگاه

لس آنجلس

میانگین نتایج آزمایش سایش در دستگاه لس آنجلس برای هر ۹ نمونه سنگدانه در جدول ۳ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که شن‌های بازیافتی به طور متوسط ۱/۷۸ برابر LA بزرگتری نسبت به شن‌های طبیعی دارند. این موضوع نشان‌دهنده کیفیت به مراتب کمتر شن‌های بازیافتی نسبت به شن‌های طبیعی است که دلایل اصلی آن وجود ذرات سست در سطح سنگدانه‌های بازیافتی، وجود پیوندهای ضعیف بین ملات سیمانی و سنگدانه‌های طبیعی اولیه و همچنین مقاومت مکانیکی کمتر ملات سیمانی نسبت به سنگدانه طبیعی اولیه است. سنگدانه NA-3 بهترین و سنگدانه بازیافتی RCA-3 ضعیف‌ترین عملکرد را در این آزمایش داشتند.

۴-۳. نتایج حاصل از آزمایش سلامت سنگدانه

(ASTM C 88)

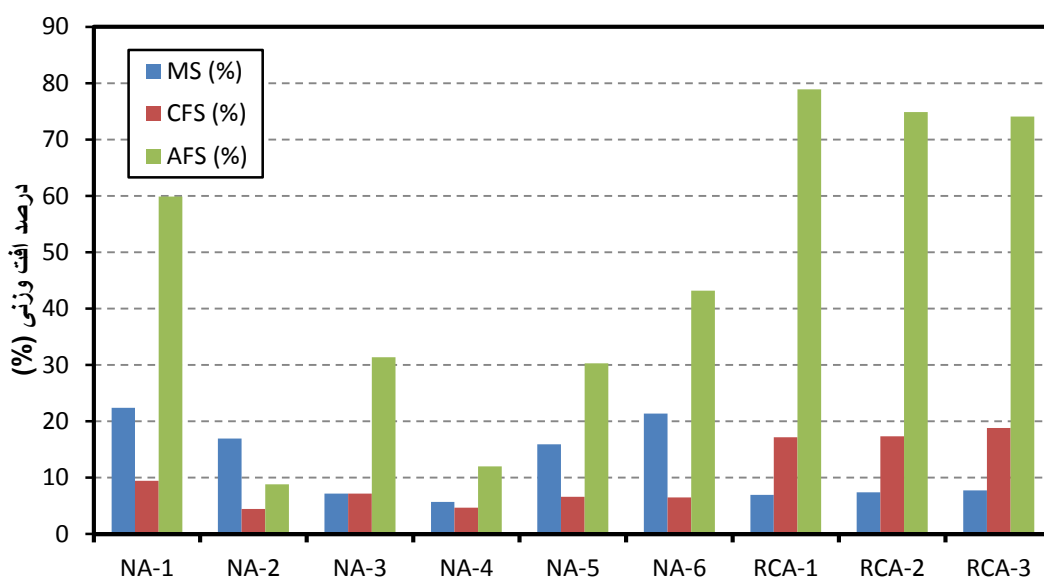
نتایج حاصل از آزمایش سلامت سنگدانه در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج آزمایش سلامت سنگدانه (در محلول منیزیم سولفات) نشان می‌دهد که برخلاف انتظار، به طور میانگین، شن‌های بازیافتی به مراتب عملکرد بسیار بهتری نسبت به شن‌های طبیعی دارند. نتایج نشان می‌دهد که به طور متوسط، شن‌های طبیعی ۲/۰۳ برابر افت وزنی (MS%) بیشتری نسبت به شن‌های بازیافتی دارند. استاندارد AASHTO MP 16-07 (۲۰۰۹) که الزامات شن‌های بازیافتی در بتن را منتشر کرده نیز به احتمال وقوع این نتیجه اشاره کرده است. در این استاندارد، آورده شده که ارزیابی سلامت سنگدانه‌های بازیافتی با استفاده از محلول منیزیم

^۳ - Weight loss in magnesium sulphate soundness test

نموده‌اند (ASTM، ۲۰۰۹؛ AASHTO MP 16-07، ۲۰۰۹؛ BS، ۲۰۱۶؛ ۲۰۰۸؛ معاونت برنامه‌ریزی، ۱۳۹۲). مطابق با حد ۱۸٪، باید عنوان نمود که همه سنگدانه‌های بازیافتی را می‌توان در لایه‌های راه‌سازی و تولید بتن استفاده کرد. اما در بین شن‌های طبیعی، استفاده از شن‌های NA-1 و NA-6 به دلیل افت وزنی بیشتر از ۱۸٪ در لایه‌های مختلف راه‌سازی و تولید بتن به تأیید دستگاه نظارت وابسته است. استفاده از سایر شن‌های طبیعی نیز بلامانع است.

سولفات، برخلاف سنگدانه‌های طبیعی، نتایج قابل قبول‌تری نسبت به محلول سدیم سولفات ارائه می‌کند. شن طبیعی NA-4 با افت وزنی ۵/۷ درصد، دارای بهترین و شن طبیعی NA-1 با افت وزنی ۲۲/۳۷ درصد دارای ضعیف‌ترین عملکرد در آزمایش سلامت سنگدانه هستند.

کلیه استانداردهای مرتبط با راه‌سازی و همچنین استانداردهای کاربرد سنگدانه در بتن، حد ۱۸٪ افت وزنی را برای شن در محلول منیزیم سولفات تعیین



شکل ۳. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های ارزیابی دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان

سنگدانه‌های طبیعی دارند. سنگدانه طبیعی NA-2 با CFS ۴/۴۷ درصد بهترین و سنگدانه بازیافتی RCA-3 با CFS ۱۸/۸۲ درصد ضعیف‌ترین عملکرد را در آزمایش CSA دارند. استاندارد A23.1-09/A23.2-09 (۲۰۱۴) حداکثر افت وزنی در آزمایش CSA را برای سنگدانه‌های مصرفی در بتن، هنگامی که بتن در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان قرار دارد به ۶٪ و برای سایر شرایط محیطی خورنده دیگر به ۱۰٪ محدود می‌کند. با مقایسه نتایج و الزامات این استاندارد می‌توان دریافت که هیچ‌یک از سنگدانه‌های بازیافتی حدود مجاز ۶ و ۱۰ درصد را رعایت نکرده و در نتیجه مطابق

۴-۴. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های CSA A23.2-24A و AASHTO T 103-08

نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های CSA A23.2-24A و AASHTO T 103-08 در شکل ۳ آورده شده است. در خصوص نتایج حاصل از انجام این آزمایش‌ها می‌توان بیان کرد که برخلاف آزمایش سلامت سنگدانه، این نتایج همبستگی قابل قبول‌تری با نتایج حاصل از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی دارند. در آزمایش CSA، به‌طور متوسط، سنگدانه‌های بازیافتی بتنی ۲/۷۴ برابر افت وزنی (CFS%) بیشتری نسبت به

¹ - Weight loss in CSA A23.2-24A test

در برابر ذوب و یخبندان انتخاب شد که به نظر می‌رسد اعمال ۲۵ چرخه از این آزمایش روی سنگدانه‌ها موجب بروز تخریب‌های بسیار شدیدی می‌گردد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، سنگدانه‌های طبیعی بعد از اتمام ۲۵ چرخه دچار خرابی‌های زیادی شده‌اند. سنگدانه‌های بازیافتی نیز عملاً به‌طور کامل بازیافت شدند؛ به‌طوری که کلیه ملات‌های سیمانی متلاشی شده و سنگدانه‌های طبیعی اولیه بازتولید شدند. در شکل ۵، سنگدانه بازیافتی RCA-1 قبل و بعد از اتمام آزمایش نشان داده شده است. لازم به ذکر است که هیچ‌گونه معیار پذیرش یا رد سنگدانه مطابق با این استاندارد در مراجع معتبر درج نشده است. این استاندارد به‌طور کلی چندان مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و مجموعاً استاندارد جدیدی به‌شمار می‌آید. اما به دلیل ارائه روش‌های تسریع شده در ارزیابی دوام سنگدانه در برابر ذوب و یخبندان (روش‌های B و C) به نظر می‌رسد با گذشت زمان مورد استفاده بیشتری قرار خواهد گرفت.

با این استاندارد اجازه استفاده در بتن در معرض شرایط محیطی خورنده و نامطلوب را ندارند. اگرچه باید قید نمود که این استاندارد بسیار سخت‌گیرانه عمل می‌کند. به‌طوری که از بین سنگدانه‌های طبیعی فقط NA-2 و NA-4 الزامات این استاندارد را به‌طور کامل برآورده می‌کند و سایر سنگدانه‌های طبیعی نیز صرفاً در صورتی که بتن در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان قرار نداشته باشند، می‌توانند استفاده شوند. در آزمایش AASHTO نیز همانند آزمایش CSA، سنگدانه‌های بازیافتی به‌مراتب کیفیت بسیار کمتری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی دارند. به‌طور متوسط، شن‌های بازیافتی ۲/۶۴ برابر افت وزنی (% AFS) بزرگتری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی دارند. سنگدانه NA-2 با AFS ۷/۸۰ درصد بهترین و سنگدانه بازیافتی RCA-1 با AFS ۷۸/۹ درصد، ضعیف‌ترین عملکرد را در آزمایش AASHTO دارند. در خصوص مقادیر زیاد افت وزنی در این آزمایش باید اشاره کرد که سخت‌گیرانه‌ترین (طولانی‌ترین چرخه دما-زمان) شرایط در این آزمایش به‌منظور ارزیابی دوام سنگدانه‌ها

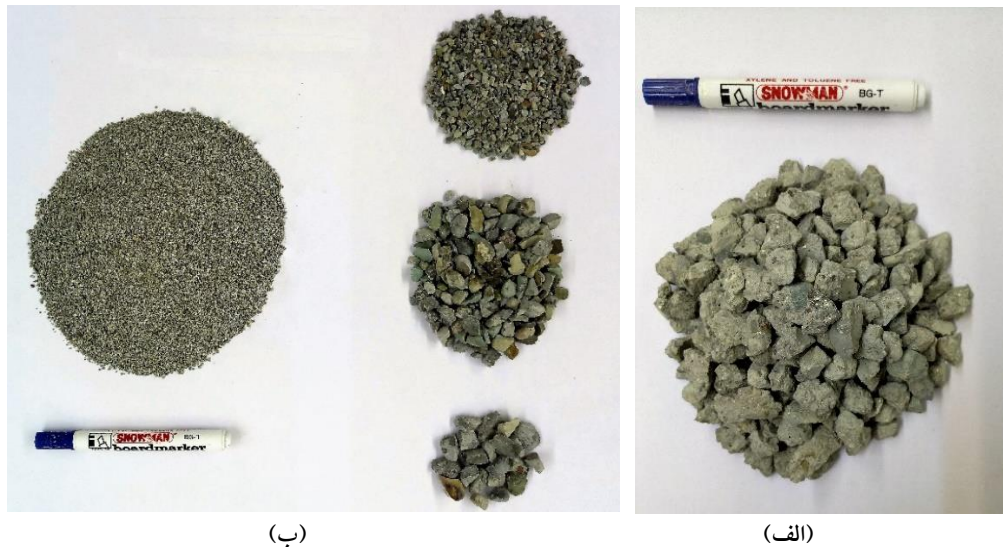


(ب)



(الف)

شکل ۴. سطح سنگدانه‌های الف) NA-1 و ب) NA-6 بعد از اتمام ۲۵ چرخه ذوب و یخبندان مطابق با استاندارد AASHTO



شکل ۵. سنگدانه بازیافتی (RCA-1 الف) قبل و (ب) بعد از اعمال ۲۵ چرخه ذوب و یخبندان در استاندارد AASHTO

۵. نتیجه‌گیری

طبیعی اولیه، مجموعاً شن‌های بازیافتی بتنی مقاومت مکانیکی بسیار کمتری نسبت به شن‌های طبیعی دارند. - با مقایسه نتایج آزمایش‌های دوامی می‌توان گفت که آزمایش AASHTO قدرت تخریب بسیار زیادی دارد و استفاده از آن با چرخه دما-زمان استفاده شده در این پژوهش به منظور ارزیابی دوام سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی در برابر ذوب و یخبندان توصیه نمی‌شود. همچنین، آزمایش سلامت سنگدانه با استفاده از محلول منیزیم سولفات قابل کاربرد برای سنگدانه‌های بازیافتی نیست و به نتایج قابل اطمینانی ختم نمی‌شود. اما آزمایش CSA نتایج بسیار قابل قبولی متناسب با نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی ارائه نمود.

بر مبنای تحقیقات انجام شده در این پژوهش، نتایج زیر ارائه می‌گردد:

- شن‌های بازیافتی بتنی به مراتب درصد جذب آب بیشتری نسبت به شن‌های طبیعی دارند. تخلخل بسیار زیاد و همچنین چگالی کمتر ملات هیدراته شده نسبت به سنگدانه‌های طبیعی علل اصلی این موضوع می‌باشند. - بررسی عملکرد مکانیکی شن‌های بازیافتی با استفاده از آزمایش سایش در دستگاه لس آنجلس نشان داد که به دلیل ساختار متخلخل و کیفیت کمتر سنگدانه‌های بازیافتی بتنی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی و همچنین وجود پیوندهای ضعیف بین ملات سیمانی و سنگدانه

۶. مراجع

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. (۱۳۹۲). "مشخصات فنی عمومی راه". نشریه شماره ۱۰۱، تجدید نظر دوم.

Munck-Kampmann, B. (2003). "European trends in waste generation and waste management". In: Recycling and Reuse of Waste Materials, Thomas Telford Publishing, pp. 1-22.

De Brito, J. and Saikia, N. (2012). "Recycled aggregate in concrete: Use of industrial, construction and demolition waste". Springer Science & Business Media.

- European Environment Agency. (2008). "Effectiveness of Environmental Taxes and Charges for Managing Sand, Gravel and Rock Extraction in Selected EU Countries". EEA Report No. 2/2008.
- Arshad, M. and Ahmed, M. F. (2017). "Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements". *Constr. Build. Mater.*, 151: 83-97.
- Gokce, A., Nagataki, S., Saeki, T. and Hisada, M. (2011). "Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete". *Constr. Build. Mater.*, 25(5): 2426-2431.
- Pigeon, M. and Pleau, R. (2010). *Durability of concrete in cold climates*. CRC Press.
- Lachance-Tremblay, É., Perraton, D., Vaillancourt, M. and Di Benedetto, H. (2017). "Degradation of asphalt mixtures with glass aggregates subjected to freeze-thaw cycles". *Cold Reg. Sci. Technol.*, 141: 8-15.
- Mummaneni, S. K. (2011). "Evaluation of Canadian unconfined aggregate freeze-thaw tests for identifying nondurable aggregates. PhD Dissertation, Kansas State University.
- ASTM C 88. (2014). "Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate". American Society for Testing and Materials.
- Cuelho, E., Mokwa, R. and Obert, K. (2007). "Comparative analysis of coarse surfacing aggregate using Micro-Deval, LA abrasion and sodium sulfate soundness tests". Project Report, Montana State University, Bozeman.
- Wu, Y., Parker, F. and Kandhal, P. (1998). "Aggregate toughness/abrasion resistance and durability/soundness tests related to asphalt concrete performance in pavements". *Transportation Research Record: J. Transport. Res. Board*, 1638: 85-93.
- Ioannou, I., Fournari, R. and Petrou, M. F. (2013). "Testing the soundness of aggregates using different methodologies". *Constr. Build. Mater.*, 40: 604-610.
- Snyder, M. B., Van den Bossche, J. M., Smith, K. D. and Wade, M. (1994). "Synthesis on Recycled Concrete Aggregate". Interim Report, Task A. DTFH61-93-C00133, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Tabsh, S. W. and Abdelfatah, A. S. (2009). "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete". *Constr. Build. Mater.*, 23(2): 1163-1167.
- AASHTO T 103-08. (2009). "Standard method of test for soundness of aggregates by freezing and thawing". American Association of State Highway and Transportation Officials.
- CSA A23.2-24A. (2004). "Test method for the resistance of unconfined coarse aggregate to freezing and thawing". Canadian Standards Association.
- A23.1-09/A23.2-09. (2014). "Concrete materials and methods of concrete construction". *Test Methods and Standard Practices for Concrete*.
- ASTM C 127. (2004). "Standard test method for density, relative density (Specific gravity), and absorption of coarse aggregate". *Annual Book of ASTM Standards*.
- ASTM C 131/C 131 M. (2014). "Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles Machine".
- AASHTO MP 16-07. (2009). "Reclaimed concrete aggregate for use as coarse aggregate in hydraulic cement mortar".

ارزیابی دوام سنگدانه‌های بازیافتی بتنی و سنگدانه‌های طبیعی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان

ASTM C33/C33M-16e1. (2016). "Standard specification for concrete aggregates". ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.

BS EN 12620. (2008). "Aggregates for concrete". British Standard Institution, www.bsigroup.com.