امکان سنجی کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی بتنی در راهسازی

مقاله علمی – پژوهشی

میلاد عقیلی لطف، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، ایران
مسعود پلاسی*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، ایران
امیرمحمد رمضانیان پور، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mpalas@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰– پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵
صفحه ۳۵۲-۳۴۳

چکیده

بازیافت نخاله‌های ساختمانی و تولید مصالح سنگدانه‌ای بازیافتی در حال حاضر به عنوان رویکردی نوین به حل معضلات زیست‌محیطی مانند کمبود منابع سنگدانه‌ای طبیعی، تخریب معادن و زیست بوم‌ها و کمبود مراکز دفن نخاله کمک شایانی نموده است. به‌طورکلی سنگدانه‌های بازیافتی بتنی به مراتب کیفیت و مقاومت مکانیکی کمتری نسبت به سنگدانه ای طبیعی دارند. با این حال باتوجه به محدودیت‌های موجود استفاده از این نوع مصالح بازیافتی در عملیات‌های عمرانی مانند راه‌سازی الزامی می‌نماید. در این مقاله مجموعاً ۹ نمونه شن (۳ نمونه شن بازیافتی بتنی و ۶ نمونه شن طبیعی) به‌منظور ارزیابی عملکرد فیزیکی و مکانیکی سنگدانه درنظر گرفته شد. شن‌های طبیعی از مناطق مختلف شهر تهران جمع آوری شد و شن‌های بازیافتی بتنی نیز از خردایش بتن های معمولی، خودتراکم و بتن مخلوط تولید شد. دلیل این موضوع امکان بررسی کیفیت و نوع بتن اولیه برروی رفتار عملکردی شن‌های بازیافتی بتنی بود. آزمایش‌های جذب آب، چگالی، سایش در دستگاه لوس آنجلس، خردشدگی و ضربه بر روی نمونه‌ها اعمال شد. سپس با استفاده از الزامات آیین‌نامه‌ای مصالح سنگدانه‌ای مصرفی در راه‌سازی امکان‌سنجی کاربرد سنگدانه‌های مورد آزمون بحث و بررسی شد. نتایج نشان داد که مجموعاً شن‌های بازیافتی بتنی امکان استفاده در لایه‌های روسازی آسفالتی مانند رویه، آستر و آسفالت ماستیک را ندارند، اما در سایر لایه‌های راهسازی مانند زیر اساس، اساس، رویه بتنی و شانه راه باتوجه به معیارهای مکانیکی مندرج در آیین‌نامه‌های راه‌سازی می‌توانند استفاده شوند. بررسی نوع بتن اولیه شن‌های بازیافتی بتنی نیز نشان داد که بتن اولیه برروی عملکرد مکانیکی شن‌های بازیافتی بتنی فاقد تأثیر است.

واژه‌های کلیدی: شن بازیافتی بتنی، شن طبیعی، سایش در دستگاه لوس آنجلس، آزمایش ضربه، آزمایش خردشدگی

۱-مقدمه

سنگدانه‌ها به عنوان پرمصرف‌ترین مصالح اولیه در صنعت مهندسی عمران، جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند. در این بین کاربرد سنگدانه در تولید بتن و آسفالت، بالاست راه‌آهن و عملیات راه‌سازی از قبیل ساخت لایه‌های مختلف روسازی مانند بستر، زیر اساس، اساس و شانه راه، بسیار مشهودتر می‌باشد. به‌طور معمول سنگدانه‌ها بین ٪۶۰ تا ٪۸۰ کل وزن بتن مصرفی، بیش از ٪۹۰ آسفالت و به‌طور متوسط بیش‌از ٪۸۵ حجمی لایه‌های روسازی را تشکیل می‌دهند (De Brito & Saikia, 2012). 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 باحضور سنگدانه‌های ضعیف به‌شدت کاهش می‌یابد؛ اما در این بین، عملیات راه‌سازی بیش از ٪۶۰ سنگدانه‌های مصرفی در صنعت مهندسی عمران را به‌خود اختصاص می‌دهد و بیش‌از هر نوع مصالح دیگر، عملکرد مکانیکی و دوامی آن‌ها در عملیات راه‌سازی تعیین‌کننده‌تر می‌باشد؛ زیرا در

لایه‌های مختلف روسازی راه مانند اساس یا زیر اساس بعضاً سنگدانه به‌تنهایی به‌عنوان عضو اصلی باربر ایفای نقش می‌کند. لذا به‌منظور اطمینان از عملکرد مطلوب سنگدانه‌ها در عملیات‌های عمرانی به‌خصوص عملیات راه‌سازی، تعیین مشخصه‌های جامع مصالح سنگدانه‌ای از جمله مشخصه‌های فیزیکی، مکانیکی و دوامی ضروری به‌نظر می‌رسد. کمبود منابع سنگدانه‌ای، تخریب معادن، بروز معضلات اکولوژیکی و همچنین تغییر زیست بوم های اطراف معادن تولید شن و ماسه از جمله پدیده های مخرب زیست محیطی استفاده بی‌رویه از منابع سنگدانه ای طبیعی به شمار می روند (Debieb et al., 2009 و Le, 2016). از سوی دیگر با تخریب سازه‌های فرسوده یا ترمیم سازه‌های قدیمی، زباله بسیار زیادی تولید می‌شود. این زباله‌ها که به زباله‌های ساخت و تخریب شناخته می‌شوند، شامل مصالح اولیه مصرف‌شده در صنعت مهندسی عمران می‌شوند. از جمله این مصالح می‌توان به قطعات بتنی تخریب شده، آرماتور، آجر و بلوک‌های فشاری، شیشه، گچ متبلور شده، چوب و ... اشاره نمود. در پس تولید بیش از حد زباله‌های ساخت و تخریب نیز مجدداً مسائل زیست‌محیطی بسیاری پدید آمده است که از جمله‌ی آن می‌توان به کمبود محل‌های دفن زباله اشاره نمود. بادرنظرگیری این توضیحات و توجه به مسئله زباله‌های ساخت و تخریب، می‌توان بازیافت این زباله‌ها را به‌عنوان یک رویکرد برد-برد هم به منظور تأمین مصالح سنگدانه ای و هم به منظور حذف نخاله های ساخت و تخریب مطرح نمود. اجرای این ایده نه‌تنها معضلاتی همچون کمبود محل‌های دفن زباله و آلودگی‌های زیست‌محیطی را برطرف می‌نماید، بلکه حفظ منابع طبیعی و افزایش در میزان عرضه مصالح مصرفی را به‌دنبال خواهد داشت. امروزه تولید سنگدانه‌های بازیافتی به‌طور چشم‌گیری روبه افزایش است. عموماً این سنگدانه‌ها از زباله‌های مستحکم صنعتی مانند سرباره کوره‌های آهن‌گدازی، شیشه، پلاستیک، لاستیک تایرهای فرسوده و قطعات بتنی تشکیل می‌شوند. اما عمده این نوع سنگدانه‌ها غالباً از خردایش قطعات بتنی تشکیل شده‌اند. این نوع مصالح که به سنگدانه‌های بازیافتی بتنی شناخته می‌شوند، حدوداً بیش‌از ۸۵٪ وزنی آن‌ها را نخاله‌های بتنی و آسفالتی تشکیل می‌دهد و ناخالصی‌هایی مانند قطعات آجر، سرامیک، گچ متبلور شده، شیشه و چوب نیز در درصدهای پایین‌تر در ساختار آن‌ها یافت می‌شود. به‌طورکلی سنگدانه بازیافتی بتنی از دو قسمت اصلی تشکیل شده است: الف) سنگدانه (های) طبیعی اولیه و ب) ملات سیمان هیدراته‌ی چسبیده به سطح سنگدانه (های) طبیعی اولیه (McGinnis et al., 2017 و Wang et al., 2017). در شکل ۱ اجزای سازنده سنگدانه بازیافتی بتنی نشان داده‌شده است.

شکل ۱. اجزای اصلی تشکیل‌دهنده سنگدانه بازیافتی بتنی

سنگدانه‌های بازیافتی بتنی بسیار غیریکنواخت، متخلخل و آمیخته با مقادیر زیادی ناخالصی هستند. لذا کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی بتنی در صنعت ساخت و ساز با چالش‌های متعددی همراه است. همچنین مدل‌کردن و پیش‌بینی نتایج مشخصه‌های سازه ساخته‌شده با سنگدانه بازیافتی دشوار است؛ اگرچه شناخت بهتر مشخصات سنگدانه‌های بازیافتی اطمینان لازم را برای استفاده از آن در ساخت و سازهای جدید افزایش می‌دهد (Ahmadi et al., 2017 و Al-Mufti & Fried, 2017 و Sadati & Khayat, 2016). سنگدانه بازیافتی بتنی بیشترین کاربرد را در صنعت راهسازی و به خصوص لایه‌های اساس و زیراساس، رویه های بتنی و آسفالتی دارد و تاکنون تحقیقات گسترده‌ای برروی کاربرد این نوع سنگدانه‌ها در راه‌سازی به‌عمل آمده است (Arshad & Ahmed, 2017 و Radević et al.,2017 و Surya et

(al., 2013 و Pasandin & Perez, 2015). به‌منظور ارزیابی رفتار عملکردی سنگدانه‌های مصرفی در راه‌سازی آزمایش‌های مختلفی طراحی شده است. آزمایش سایش در دستگاه لوس آنجلس، آزمایش ضربه و آزمایش خردشدگی نمونه‌هایی از این آزمایش‌ها می‌باشند. استانداردهای مرتبط نیز برمبنای نتایج این آزمایش‌ها معیارهایی را به‌منظور کاربرد یا عدم کاربرد مصالح سنگدانه‌ای در راه‌سازی وضع نموده‌اند. در این بین آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه شماره ۲۳٤، ۱۳۹۰). و استانداردهای آمریکا (ASTM, 2016) و استانداردهای انگلیس (BS-EN, 2008) به عنوان پرکاربردترین مراجع در این زمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند. همه آزمایش‌های مذکور در حال حاضر نیز برای سنگدانه‌های بازیافتی بتنی اعمال می‌شوند. در تحقیقاتی که دی جوان و گوتیرز (De Juan & Gutiérrez, 2009) برروی انواع سنگدانه‌های بازیافتی بتنی انجام دادند، مشاهده کردند که در حالت کلی با افزایش مقدار ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی بتنی، درصد افت وزنی در آزمایش سایش لوس آنجلس تمایل به افزایش دارد. همچنین با کاهش مقاومت فشاری بتن مادر، مقدار افت وزنی روندی افزایشی را دنبال می‌کند. این موضوع در تحقیقات تاپکو (Topcu, 1997) نشان داده شده است. تابش و عبدالفتاح (Tabsh & Abdelfatah, 2009) نیز بر روی سه نوع سنگدانه بازیافتی بتنی آزمایش سایش لوس آنجلس را اجرا کردند و مقاومت کمتر سنگدانه‌های بازیافتی بتنی را نسبت به سنگدانه طبیعی مشاهده کردند. در این پژوهش دو نوع سنگدانه بازیافتی بتنی با مقاومت‌های فشاری بتن اولیه ۵۰ و ۳۰ مگاپاسکال و یک نوع سنگدانه بازیافتی بتنی بدون شناسنامه استفاده شد. نتایج نشان داد که مجموعاً سنگدانه‌های بازیافتی بتنی مقاومت کمتری نسبت به سنگدانه طبیعی دارند و همچنین 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 روی مشخصه‌های مکانیکی سنگدانه‌های بازیافتی بتنی نشان می‌دهد. در پژوهشی که بوتلر و همکاران (Butler et al., 2011)، برروی ارزیابی رفتار مکانیکی دو نوع سنگدانه بازیافتی بتنی و یک نوع سنگدانه طبیعی انجام دادند، مشاهده کردند که سنگدانه‌های بازیافتی بتنی به مراتب دارای درصد افت وزنی بیشتری نسبت به سنگدانه طبیعی هستند. در این پژوهش آزمایش‌های خردشدگی و سایش در دستگاه میکرو دوال بر روی سنگدانه‌ها انجام شد. پوون و همکاران (Poon et al., 2004) در پژوهش مذکور خود برروی سنگدانه‌های بازیافتی معمولی و توانمند مقدار ۱۰٪ افت وزنی در آزمایش خردشدگی را برای سنگدانه طبیعی ۱۸۹/٤، برای سنگدانه بازیافتی توانمند ۱۲۳/۸ و برای سنگدانه بازیافتی معمولی ۱۰۱/۹ کیلونیوتن محاسبه نمودند. این موضوع نیز مجدداً برروی تأثیر کیفیت بتن مادر سنگدانه بازیافتی تأکید دارد و بیان می‌کند که سنگدانه بازیافتی با بتن مادر مقاوم‌تر، عملکرد مکانیکی مطلوب‌تری خواهد داشت. در سایر تحقیقات انجام شده نیز مجموعاً مقاومت خردشدگی کمتر سنگدانه‌های بازیافتی بتنی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی نتیجه‌گیری شده است (Poon et al., 2009) و (Rao et al., 2011) و (Tam et al, 2008) و (Limbachia et al., 2000). در زمینه ارزیابی مقاومت ضربه‌ای سنگدانه‌های بازیافتی بتنی نیز لازم به ذکر است که این نوع سنگدانه‌ها با استناد به نتایج تحقیقات گذشته (Rao et al., 2011) و (Tam et al, 2008) و (Limbachia et al., 2000) مقاومت ضربه‌ای بسیار کمتری نسبت به مقاومت ضربه‌ای سنگدانه‌های طبیعی دارند. باتوجه به اهمیت موضوع و لزوم تغییر رویکردهای مدیریتی در زمینه توسعه کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی بتنی در ساخت و سازهای جدید، در این مقاله عملکرد مکانیکی سنگدانه‌های بازیافتی بتنی با سنگدانه‌های طبیعی با هدف کاربرد در راه‌سازی با یکریگر مقایسه خواهند شد. لذا برای ارزیابی مشخصه‌های فیزیکی، آزمایش‌های تعیین جذب آب و چگالی مورد استفاده قرار گرفت و در زمینه ارزیابی مشخصه‌های مکانیکی نیز آزمایش‌های خردشدگی، ضربه و سایش در دستگاه لوس آنجلس در نظر گرفته شده است. نوآوری‌های این پژوهش را می‌توان در ۲ مورد بیان نمود. نوآوری اول آن است که آیا سنگدانه‌های بازیافتی بتنی الزامات موجود در آیین‌نامه‌های طراحی لایه‌های مختلف راه‌سازی را برآورده می‌کنند یا خیر. نوآوری دوم نیز به بررسی تأثیر بتن اولیه برروی عملکرد سنگدانه‌های بازیافتی بتنی می‌پردازد. این موضوع از آن نظر حائز اهمیت است که در بیشتر منابع تهیه سنگدانه‌های بازیافتی، عموماً نوع بتن اولیه متفاوت است.

۲-برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح

در این پژوهش مجموعاً ۹ نمونه شن (۳ نمونه شن بازیافتی بتنی و ٦ نمونه شن طبیعی) به‌منظور ارزیابی عملکرد فیزیکی و مکانیکی درنظر گرفته شد. به‌منظور تهیه و انتخاب سنگدانه‌های طبیعی تلاش زیادی انجام شد تا نهایتاً مجموعه‌ای از سنگدانه‌ها انتخاب شوند که محدوده مقاومتی و دوامی گسترده‌ای را دربر بگیرند. این سنگدانه‌ها در ۵ سال گذشته در بخشی از پروژه تحقیقاتی دانشجویان فعال در آزمایشگاه

مکانیک سنگ دانشگاه تهران مورد استفاده قرار گرفته و از معادن اطراف شهر تهران جمع‌آوری شده بودند. عمده این معادن در بخش‌های شمالی شهر تهران قرار داشتند. در مجموع ۱۱ نوع سنگدانه طبیعی برای بررسی اولیه درنظر گرفته شد و در نهایت با وارسی‌های ظاهری و توجه به نیازهای مسئله، ٦ نوع سنگدانه انتخاب شد. در این بین ٤ نوع سنگدانه شکسته کوهی و ۲ نوع سنگدانه رودخانه‌ای قرار داشتند. سنگدانه‌های رودخانه‌ای از دو کارخانه متوساک و کارخانه صحرای شن و ماسه تهیه شدند و غالب سنگدانه‌های شکسته کوهی را نیز سنگ آهک تشکیل می‌داد. در جدول ۱ شناسنامه شن‌های طبیعی ارائه شده است.

به‌منظور تهیه و تولید سنگدانه بازیافتی بتنی در این پژوهش ۳ نوع سنگدانه بازیافتی با بتن اولیه متفاوت درنظر گرفته شد. سنگدانه بازیافتی RCA-1 و RCA-2 به‌ترتیب از خردایش بتن خودتراکم و بتن معمولی تهیه و تولید شدند. این بتن‌ها به‌صورت نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی متری از محل پروژه شرکت ایران‌مال (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. به‌طور کلی مقدار ریزدانه بیشتر در طرح اختلاط به مقدار شن طبیعی کمتر و درنتیجه مقدار ملات سیمانی بیشتر می‌انجامد. در جدول ۲ مشخصات طرح اختلاط این دو نوع سنگدانه بازیافتی ارایه شده است.

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 تیزگوشه
NA-2	شمال شهر تهران	شکسته کوهی	سنگ رسوبی/ سنگ آهکی	شیره‌ای رنگ/ ٤٥٪ گردگوشه و ٥٥٪ شکسته
NA-3	شمال شهر تهران	شکسته کوهی	سنگ رسوبی/سنگ آهکی	سیاه رنگ با رگه‌هایی سفید/ کاملاً تیزگوشه
NA-4	شمال شهر تهران	شکسته کوهی	سنگ آذرین/ توف	سبز رنگ/ کاملاً تیزگوشه
NA-5	کارخانه متوساک- شهریار	رودخانه‌ای	عمدتاً سنگ رسوبی/ مخلوط	-/ ۳۰٪ تیزگوشه و ۷۰٪ گردگوشه
NA-6	کارخانه صحرای شن و ماسه- کهریزک	رودخانه‌ای	عمدتاً سنگ رسوبی/ مخلوط	-/ ۱۵٪ تیزگوشه و ۸۵٪ گردگوشه

جدول ۲. مشخصات طرح اختلاط بتن اولیه سنگدانه‌های بازیافتی بتنی RCA-1 و RCA-2

مشخصه	نوع سنگدانه بازیافتی بتنی	
	RCA-1	RCA-2
W/C	۰/۳٤	۰/۳٤
سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	۳۹۰	٤۲۰
میکروسیلیس (کیلوگرم بر متر مکعب)	۳۰	-
آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱۳۲/۳	۱٤۲/۸
سنگدانه ۹/۵-۱۹ (کیلوگرم بر متر مکعب) میلی‌متر	۲۵۳	۳۳۵
سنگدانه ٤/۷۵-۱۲/۵ (کیلوگرم بر متر مکعب) میلی‌متر	۱٦۰	۲۵۸
سنگدانه ۰-٦ (کیلوگرم بر متر مکعب) میلی‌متر	۱۱۹۷	۱۲۳۸
پودر سنگ (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱٦۰	-

از سوی دیگر به‌منظور درنظرگیری 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 درنظر گرفته شد. بدین منظور نخاله‌های بتنی موجود در محل آزمایشگاه مصالح ساختمانی تفکیک و خرد

شدند. فرآیند تولید هر سه نوع سنگدانه بازیافتی به صورت دستی و با استفاده از چکش‌های فولادی صورت پذیرفت. در ادامه به دلیل دقت پایین‌تر خردایش دستی نسبت به خردایش مکانیکی، سنگدانه‌های بازیافتی با استفاده از الک‌های استاندارد دانه‌بندی شدند. حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد و الک ٤/۷۵ میلی‌متر نیز به‌منظور جداسازی ماسه بازیافتی از شن بازیافتی مورد استفاده قرار گرفت.

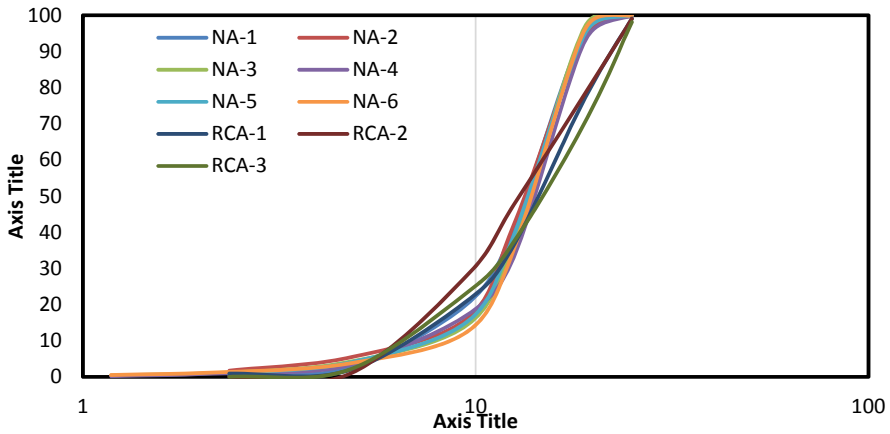
در جدول ۳ ترکیبات تشکیل‌دهنده شن‌های بازیافتی مطابق با استاندارد آلمان (DIN, 2002) نشان داده‌شده است. استاندارد فوق مجموعاً ٤ طبقه‌بندی برای سنگدانه‌های بازیافتی مطرح می‌کند که سنگدانه‌های RCA-1 و RCA-2 در طبقه‌بندی اول (بهترین کیفیت) و سنگدانه RCA-3 در طبقه‌بندی دوم این استاندارد قرار گرفتند. در شکل ۲ نیز نمودار دانه‌بندی شن‌های طبیعی و بازیافتی ارائه شده است.

جدول ۳. ترکیبات شن‌های بازیافتی بتنی

اجزاء	کد سنگدانه بازیافتی بتنی		
	RCA-1	RCA-2	RCA-3
بتن و سنگدانه‌های طبیعی اولیه مطابق با استاندارد DIN 4226-1	۹۸	۹۸/۵	۸۷/٤
قطعات آجری، آجر ملات اندود	–	–	٤/۲
ماسه سنگ آهکی	–	–	–
مواد معدنی دیگر*	۲	۱	۵
آسفالت	–	۰/۵	۲
سایر مواد خارجی**	–	–	۱/٤

*برای مثال: آجر متخلخل، بتن سبک، بتن متخلخل، بتن هوادار، اندود ملات، سرباره متخلخل و مواد مشابه

**برای مثال: شیشه، سرامیک، سرباره‌های غیر آهنی، گچ، لاستیک، فرآورده‌های پلاستیکی، فلزها، چوب، کاغذ و مواد مشابه



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی شن‌های طبیعی و شن‌های بازیافتی بتنی

۲-۲- طراحی آزمایش‌ها

برای تعیین مشخصه‌های فیزیکی سنگدانه‌ها، آزمایش‌های تعیین چگالی و درصد جذب آب انتخاب مورد استفاده قرار گرفتند. این آزمایش‌ها مطابق با استاندارد آمریکا (ASTM, 2004) برروی سه نمونه از هر نوع سنگدانه انجام شد و مقدار میانگین به عنوان نتیجه آزمایش ارائه گردید. به‌منظور تعیین مشخصه‌های مکانیکی سایش، خردشدگی و مقاومت ضربه‌ای سنگدانه‌ها، ۳ آزمایش سایش در دستگاه لوس آنجلس، آزمایش مقاومت خردشدگی و آزمایش تعیین مقاومت ضربه‌ای انتخاب شدند. آزمایش سایش در دستگاه لوس آنجلس مطابق با دستورالمعل استاندارد آمریکا (ASTM, 2014) برروی دو نمونه سنگدانه ۹/۵ -۱۹ میلی‌متر اجرا شد.

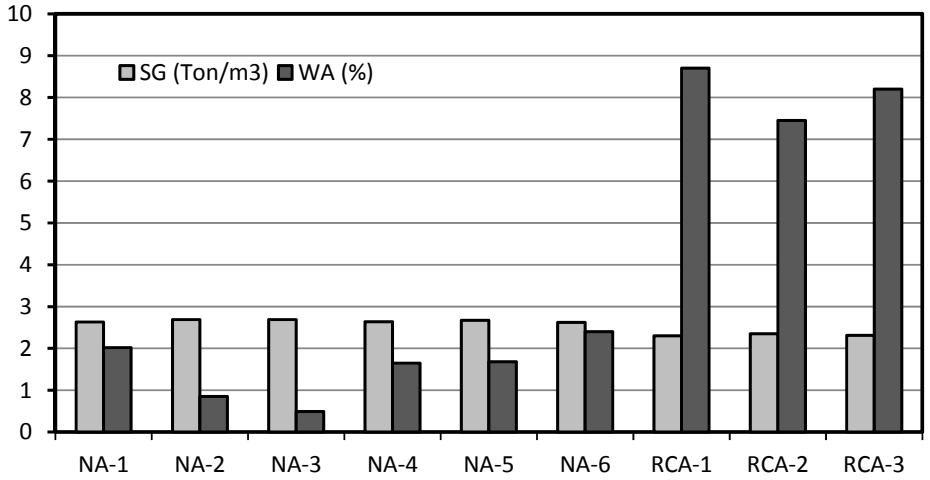
تعداد دورها ۵۰۰ عدد و تعداد گوی‌های فلزی ۱۱ عدد در نظر گرفته شد. الک ۱/۷ میلی‌متر نیز به عنوان الک شاخص مطابق با استانداردداستفاده شد. آزمایش خردشدگی نیز مطابق با استاندارد انگلیس (BS 812.Part 110, 1990) برروی دو نمونه سنگدانه در محدوده ۹/۵–۱۲/۵ میلی‌متر اجرا شد. در این آزمایش الک ۲/۳۶ میلی‌متر به عنوان الک شاخص مورد استفاده قرار گرفت. آزمایش تعیین مقاومت ضربه‌ای نیز مطابق با استاندارد انگلیس (BS 812.Part 112, 1990) تعیین شد. برای این منظور ٤ نمونه سنگدانه در محدوده ۹/۵–۱۲/۵ میلی‌متر انتخاب و الک ۲/۳٦ میلی‌متر نیز به عنوان الک شاخص درنظر گرفته شد.

۳-نتایج و بررسی

۳-۱- نتایج حاصل از آزمایش‌های جذب آب و چگالی

میانگین نتایج جذب آب و چگالی در این پژوهش برای هر ۹ نمونه سنگدانه در شکل ۳ نشان داده‌شده است. در این شکل SG چگالی و WA درصد جذب آب است. همانگونه که مشاهده می‌شود، شن‌های بازیافتی به‌مراتب دارای درصد جذب آب بیشتر و چگالی کمتری نسبت به شن‌های طبیعی هستند. به‌طور متوسط شن‌های بازیافتی ٦/٦٪ جذب آب بیشتری نسبت به شن‌های طبیعی دارند. در این بین سنگدانه NA-3 با درصد جذب آب ۰/٤۹٪ کمترین درصد جذب آب و سنگدانه بازیافتی RCA-1 با درصد جذب آب ۸/۷۰٪ دارای بیشترین درصد جذب آب هستند. 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. باتوجه به این نتیجه می‌توان تخلخل بیشتر این سنگدانه‌ها را نسبت به سایر سنگدانه‌های طبیعی نتیجه‌گیری کرد. از سوی دیگر شن‌های طبیعی به‌طور میانگین حدوداً ۱۵٪ چگالی بیشتری نسبت به شن‌های بازیافتی دارند.

علت اصلی درصد جذب آب بیشتر و چگالی کمتر شن‌های بازیافتی نسبت به شن‌های طبیعی را می‌توان تخلخل بیشتر و چگالی کمتر ملات سیمانی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی عنوان کرد. ملات سیمانی به شدت ظرفیت جذب آب در سنگدانه‌های بازیافتی را افزایش می‌دهد.

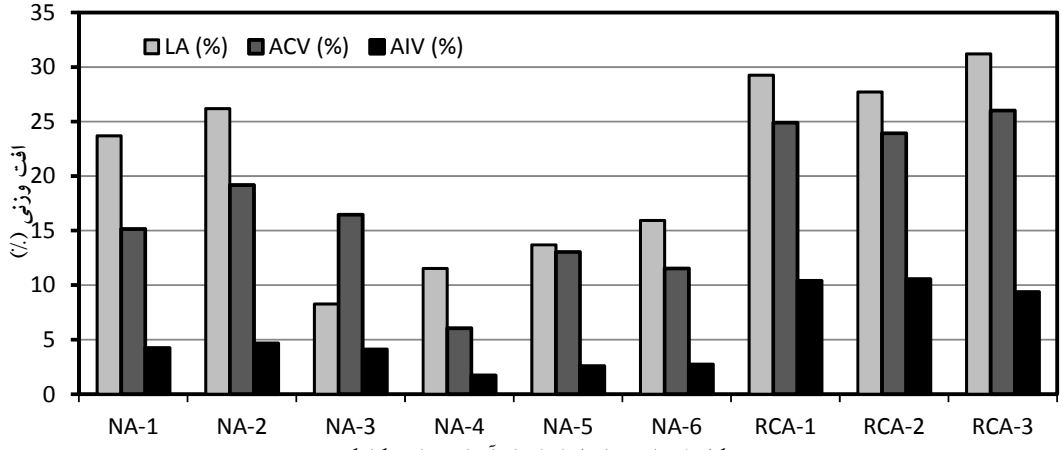


شکل ۳. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های جذب آب و چگالی

۳-۲- نتایج حاصل از آزمایش‌های مکانیکی

میانگین نتایج آزمایش‌های مکانیکی برای هر ۹ نمونه سنگدانه در شکل ٤ نشان داده شده است. در این شکل LA شاخص افت وزنی در دستگاه لوس آنجلس، AIV شاخص افت وزنی در آزمایش ضربه و ACV شاخص افت وزنی در آزمایش خردشدگی است. نتایج حاصل از آزمایش سایش در دستگاه لوس آنجلس نشان می‌دهد که شن‌های بازیافتی به‌طور 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 هستند. سنگدانه NA-3 بهترین و سنگدانه بازیافتی RCA-3 ضعیف‌ترین عملکرد را در این آزمایش دارند. به‌منظور کاربرد سنگدانه در لایه‌های مختلف راه‌سازی، آزمایش سایش در دستگاه لوس آنجلس به عنوان اصلی‌ترین معیار مکانیکی سنگدانه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول ٤ الزامات لایه‌های مختلف راه‌سازی برای آزمایش سایش در دستگاه لوس آنجلس مطابق با (نشریه شماره ۲۳٤، ۱۳۹۰)، (نشریه شماره ۱۰۱، ۱۳۹۲)، (نشریه شماره ۳۰۱، ۱۳۸٤) و (نشریه شماره ۳۹٤، ۱۳۹٤) آورده‌شده است. بامقایسه شکل ٤ و جدول ٤ می‌توان دریافت که سنگدانه‌های NA-2، RCA-1 و RCA-2 امکان کاربرد در لایه رویه روسازی آسفالتی را ندارند. همچنین سنگدانه بازیافتی RCA-3 نیز الزامات لایه‌های رویه و آستر روسازی آسفالتی، آسفالت ماستیک و بالاست راه‌آهن را برآورده نمی‌کند. در خصوص سنگدانه‌های مصرفی در بتن سازه‌ای نیز استانداردهای آمریکا (ASTM, 2016) و انگلیس (BS-EN, 2008) حداکثر مقدار LA را به ۵۰٪ محدود کرده‌اند که باتوجه به نتایج اخذشده کلیه نمونه‌ها را می‌توان در تولید بتن استفاده کرد.



شکل ٤. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های مکانیکی

جدول ٤. حداکثر مقادیر مجاز LA در لایه‌های مختلف راه‌سازی

لایه راه‌سازی	حداکثر مقدار LA (٪)
رویه روسازی آسفالتی	۲۵
آستر روسازی آسفالتی	۳۰
آسفالت ماستیک	۳۰
بالاست راه‌آهن	۳۰
مخلوط آسفالت سرد	٤۰
رویه بتنی	٤۰
اساس سنگدانه‌ای (دانه‌ای)	٤۵
زیر اساس سنگدانه‌ای (دانه‌ای)	۵۰
شانه راه سنگدانه‌ای (دانه‌ای)	۵۰

در خصوص نتایج آزمایش ضربه نیز می‌توان مشاهده کرد که شن‌های بازیافتی مقاومت ضربه‌ای کمتری نسبت به شن‌های طبیعی دارند. به‌طور متوسط شن‌های بازیافتی ۳/۰۳ برابر افت وزنی بزرگتری نسبت به شن‌های طبیعی دارند. علت اصلی این موضوع را می‌توان به وجود پیوندهای ضعیف بین ملات سیمانی و سنگدانه‌های طبیعی اولیه نسبت داد که در اثر اعمال بار ضربه‌ای از این نواحی متلاشی می‌شوند. شن طبیعی NA-4 دارای بیشترین مقاومت ضربه‌ای و شن بازیافتی RCA-2 دارای کمترین مقاومت ضربه‌ای هستند. مطابق با استاندارد BS EN 12620 کلیه شن‌های طبیعی و بازیافتی را می‌توان در تولید بتن سازه‌ای استفاده کرد. اما باید توجه نمود که در صورت کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی در لایه‌های

سنگدانه‌ای مانند اساس یا زیراساس سنگدانه‌ای، در صورتی که اعمال بارهای دینامیکی زیادی مورد انتظار باشد، لازم است دستگاه نظارت باتوجه به شرایط محلی الزاماتی را برای استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی وضع نماید. همانند آزمایش‌های سایش در دستگاه لوس آنجلس و ضربه، شن‌های بازیافتی بتنی به مراتب افت وزنی بیشتری نسبت به شن‌های طبیعی در آزمایش خردشدگی دارند. به‌طور متوسط شن‌های بازیافتی ۱/۸٤ برابر ACV بزرگتری نسبت به شن‌های طبیعی دارند. علت اصلی این موضوع را می‌توان به مقاومت و کیفیت کمتر ملات سیمانی در شن‌های بازیافتی مرتبط نمود که در اثر اعمال بار استاتیکی متلاشی می‌شوند. شن NA-4 بهترین عملکرد و شن بازیافتی RCA-3 ضعیف‌ترین عملکرد را در آزمایش خردشدگی دارند. با مقایسه نتایج اخذشده و الزامات مندرج در استاندارد انگلیس (BS, 1992) کلیه سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی را می‌توان در تولید بتن مورد استفاده قرار داد اگرچه استاندارد مذکور درحال حاضر منسوخ شده است اما همچنان معیار آن برای آزمایش‌های مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مجموع با بررسی کلیه نتایج آزمایش‌های مکانیکی می‌توان بیان نمود در صورتی که صرفاً معیارهای مکانیکی مد نظر باشد، سنگدانه‌های بازیافتی را می‌توان با درنظرگیری تمعهیداتی در لایه‌های مختلف راه‌سازی و همچنین تولید بتن استفاده کرد.

٤-نتیجه‌گیری

برمبنای تحقیقات انجام شده نتایج زیر ارائه می‌گردد.

-شن‌های بازیافتی بتنی به مراتب درصد جذب آب بیشتر و چگالی کمتری 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 آزمایش‌های رایج برای شن‌های طبیعی نشان داد که این آزمایش‌ها قابلیت کاربرد برای شن‌های بازیافتی بتنی را نیز دارند. اما در خصوص نتایج باید عنوان نمود که به دلیل ساختار متخلخل و کیفیت کمتر سنگدانه های بازیافتی بتنی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی و همچنین وجود پیوندهای ضعیف بین ملات سیمانی و سنگدانه طبیعی اولیه، مجموعاً شن‌های بازیافتی بتنی مقاومت مکانیکی بسیار کمتری نسبت به شن‌های طبیعی دارند. در بین این آزمایش‌ها، شن‌های بازیافتی بتنی حساسیت بیشتری نسبت به آزمایش ضربه دارند. به‌طوری که میانگین افت وزنی شن‌های بازیافتی در آزمایش ضربه حدوداً ۳ برابر افت وزنی شن‌های طبیعی به‌دست آمد. لذا توصیه می‌گردد در روسازی‌هایی که مقاومت در برابر ضربه مورد نیاز است (مانند روسازی فرودگاه یا بالاست راه‌آهن) در کاربرد شن‌های بازیافتی بتنی ملاحظات عملکردی درنظر گرفته شود. در خصوص نتایج آزمایش سایش در دستگاه لوس آنجلس نیز باید بیان کرد که شن‌های بازیافتی بتنی امکان کاربرد در روسازی‌های مختلف آسفالتی مانند لایه رویه، آستر و آسفالت ماستیک را ندارند. اگرچه مطابق با دستورالعمل‌های موجود، کاربرد این سنگدانه‌ها در لایه‌های اساس، زیر اساس، شانه راه و رویه‌های بتنی بلامانع است.

-با بررسی عملکرد فیزیکی و مکانیکی شن‌های بازیافتی و مقایسه بایکدیگر، باید عنوان نمود که نوع بتن اولیه سازنده این نوع سنگدانه‌ها (بتن معمولی، بتن خودتراکم و بتن مخلوط) برروی ارزیابی رفتار عملکردی فاقد تأثیر است.

٥- مراجع

- نشریه شماره ۲۳٤ (۱۳۹۰). آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران. *سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.*

- نشریه شماره ۱۰۱ (۱۳۹۲). مشخصات فنی عمومی راه. *سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور..*

- نشریه شماره ۳۰۱ (۱۳۸٤). مشخصات فنی عمومی روسازی راه‌آهن. *سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.*

- استاندارد ملی شماره ۳۰۲ (۱۳۹٤). ویژگی‌های سنگدانه‌های بتن. *سازمان ملی استاندارد ایران.*

-Al-Mufti, R. L., & Fried, A. N. (2017). Improving the strength properties of recycled asphalt aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 149, 45-52.

-Arshad, M., & Ahmed, M. F. (2017). Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 151, 83-97.

- Butler, L., West, J. S., & Tighe, S. L. (2011). The effect of recycled concrete aggregate

-BS 812.Part 112. (1990). Methods for determination of aggregate impact value (AIV). *British Standards Institution*.

-BS 882 (1992). Specification for aggregate from natural sources for concrete. *British Standard Institution*.

-BS EN 12620 (2008). Aggregates for concrete, *British Standards Institution*.

-De Brito, J., & Saikia, N. (2012). Recycled aggregate in concrete: use of industrial, construction and demolition waste. *Springer*.

-DIN 4226-100 (2002). Aggregates for mortar and concrete. Part 100: Recycled aggregates. *DIN Standards*.

-Limbachiya, M.C., Leelawat, T., & Dhir, R.K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high strength concrete. *Materials and Structures,* 33(9), 574–580.

-McGinnis, M. J., Davis, M., de la Rosa, A., Weldon, B. D., & Kurama, Y. C. (2017). Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 154, 258-269.

-Radević, A., Đureković, A., Zakić, D., & Mladenović, G. (2017). Effects of recycled concrete aggregate on stiffness and rutting resistance of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 136, 386-393.

-Rao, M.C., Bhattacharyya, S.K., & Barai, S.V. (2011). Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. *Construction and Building Materials,* 25(1), 69–80.

-Sadati, S., & Khayat, K. H. (2016). Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 126, 691-700.

-Surya, M., VVL, K. R., & Lakshmy, P. (2013). Recycled aggregate concrete for transportation infrastructure. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 104, 1158-1167.

-Tabsh, S. W., & Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1163-1167.

-Tam, V.W.Y., Wang, Y., & Tam, C.M. (2008). Assessing relationships among properties of demolished concrete recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *J. of Hazardous Materials*, 152(2), 703–714.

-Topcu, I. B. (1997). Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. *Cement and concrete research*, 27(12), 1817-1823.

properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. *Cement and Concrete Research*, 41(10), 1037-1049.

- De Juan, M. S., & Gutiérrez, P. A. (2009). Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 23(2), 872-877.

-Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. (2009). Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3382-3387.

- Le, T., Rémond, S., Le Saout, G., & Garcia-Diaz, E. (2016). Fresh behavior of mortar based on recycled sand–Influence of moisture condition. *Construction and Building Materials*, 106, 35-42.

-Pasandin, A. R., & Perez, I. (2015). Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 74, 151-161.

-Poon, C.S., Kou, S.C., Wan, H.W., & Etxeberria, M. (2009). Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates. *Waste Management*, 29(8), 2369–2377.

-Poon, C.S., Shui Z.H., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials* 18(6), 461–468.

- Wang, L., Wang, J., Qian, X., Chen, P., Xu, Y., & Guo, J. (2017). An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 144, 432-441.

-Ahmadi, M., Farzin, S., Hassani, A., & Motamedi, M. (2017). Mechanical properties of the concrete containing recycled fibers and aggregates. *Construction and Building Materials*, 144, 392-398.

-ASTM C 127 (2004). Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. *American society for testing and materials*.

-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. *American society for testing and materials*.

-ASTM C33 / C33M-16e1 (2016). Standard specification for concrete aggregates. *American society for testing and materials*

-BS 812.Part 110. (1990). Methods for determination of aggregate crushing value (ACV). *British Standards Institution*.

Evaluating the Utilization of Recycled Concrete Aggregate for Road Applications

Milad Aghili Lotf, M.Sc., Grad., School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
Massoud Palassi, Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
Amir Mohammad Ramezanianpour, Associate Professor, School of Civil Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

E-mail: mpalas@ut.ac.ir

Received: June 2023- Accepted: November 2023

ABSTRACT
In recent years, reusing or recycling crushed concrete pieces and producing recycled concrete aggregate (RCA) has emerged as an effective way for controlling and managing construction and demolition waste, reducing the need for natural aggregates, protecting the environment, and saving landfill space. The purpose of this study was to investigate the feasibility of utilizing RCAs as an unconfined aggregate in road structure courses. Six types of natural aggregates (NAs) and three different types of RCAs were selected. All natural aggregates were located in suburb of Tehran. Four samples comprised of crushed aggregates used locally in building construction and two of them were river run gravel based. Also, three different types of RCAs were considered, denoted as RCA-1, RCA-2 and RCA-3. RCA-1 was chosen from a self-consolidating concrete and RCA-1 was selected from a conventional concrete and finally, RCA-3 was chosen from a landfill that consisted of several unknown concrete resources, crushed concrete and impurities. Various physical and mechanical tests including water absorption, specific weight, impact test, crushing test and Los Angles abrasion test were performed on these aggregates. The results indicated that all RCAs were accepted for general applications in road construction, expect for asphaltic layers such as surface course, binder course and mastic asphalt course. Furthermore, the results illustrated that the parent concrete quality of RCAs had no considerable impact on the mechanical performance of RCAs.

Keywords: Recycled Concrete Aggregate, Natural Aggregate, Los Angles Abrasion Test, Impact Test, Crushing Test