امکان‌سنجی بازیافت مصالح در بازسازی پس از سانحه (مورد پژوهش بازیافت بتن)

فرید سرتیپی‌پور *

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۱۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۸

چکیده

بازیافت مواد و مصالح ساختمانی از جمله موضوعات مهم در صنعت ساختمان‌سازی است. بازیافت به معنی استفاده مجدد از مصالح یا تولید مصالح جدید از مواد استفاده شده و دور ریختنی از جمله ضایعات بتنی است. استفاده از بتن‌های بازیافتی از طریق تخریب و استفاده مجدد بتن‌های فرسوده منافع بسیاری به‌دنبال دارد که صرفه‌جویی اقتصادی یکی از آن‌هاست. به‌طور تقریبی هر ساله ۲۵ میلیارد تن بتن در جهان تولید می‌شود به‌طوری‌که به ازای هر نفر ۳.۸ تن بتن در سال تولید می‌شود. در ایران نیز رشد روز افزون ساخت‌وساز ساختمان از یک طرف و الزام به بازسازی سازه‌های فرسوده یا تخریب شده ، باعث کاهش ذخایر معادن سنگدانه‌های طبیعی و افزایش نخاله‌های ساختمانی در آینده خواهد شد. به‌همین دلیل بررسی امکان بازیافت بتن از دو جنبه "حجم زیاد بتن دور ریز و غیر قابل مصرف ناشی از تولید کارخانه‌های بتن سازی" و "حجم قابل توجه آوار و نخاله‌های بتنی و ماسه سیمانی ناشی از نوسازی ساختمان‌ها و بازسازی پس از سانحه" می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. کاهش مصرف سنگدانه‌های جدید که از معدن استخراج شده‌اند ، کاهش مساحت زمین‌های مختص به دفع بتن ، کاهش تولید CO_2 در مقایسه با بتن‌های معمولی نیز از دیگر مزایای بازیافت نخاله‌های بتنی ساختمانی است. این مقاله با بررسی و ارزیابی تحقیقات و اقدامات انجام شده در زمینه بازیافت بتن و یافته‌های گوناگون در این زمینه در پی روشن نمودن ضرورت توجه به بازیافت بتن و شیوه‌هایی است که به کمک آن می‌توان از منافع بازیافت در جهت توسعه صنعت ساختمان و حفظ محیط زیست و صرفه‌جویی‌های ناشی از آن استفاده نمود.

واژگان کلیدی: زلزله ، بتن بازیافتی ، توسعه پایدار ، صرفه‌جویی در مصرف انرژی ، مزایای اقتصادی بازیافت ، حفاظت محیط زیست.

* دانش آموخته کارشناسی عمران از دانشکده فنی دانشگاه تهران. fsartipipour@gmail.com

مقدمه

بتن از مصالح با دوام بالا و بازیافت پذیر است که مصرف آن در مقایسه با دیگر مصالح ساختمانی نظیر چوب ، فولاد ، پلاستیک و آلومینیوم به مراتب بیشتر است . بتن نیز مانند بسیاری از مصالح دیگر ممکن است در چرخه تخریب و تبدیل به نخاله و آوار قرار گیرد. سهم اروپا در تولید نخاله‌های بتنی ۵۱۰ میلیون تن در سال است. این در حالی است که آمریکا و ژاپن سالانه ۳۲۵ و ۷۷ میلیون تن نخاله بتنی تولید می کنند.(Hirokazu Shima ,2005) در ایران، شهر تهران به تنهایی در سال ۱۳۹٤روزانه ۵۰ هزار تن نخاله ساختمانی تولید کرده است.(محمد حسن بازگیر ، ۱۳۹٤) به‌عبارت دیگر تهران، به تنهایی، سالانه ۱۸.۲۵ میلیون تن نخاله ساختمانی تولید می‌کند. آمار مطمئنی در مورد تولید نخاله‌های ساختمانی و بتن از دیگر نقاط ایران وجود ندارد اما با توجه به وسعت ساخت‌وساز در کشور و حجم فعالیت‌های عمرانی که از بتن در آن‌ها استفاده می‌شود، همچنین سانحه‌خیزی کشور، می‌توان حدس زد که حجم قابل توجهی نخاله ساختمانی به‌صورت سالانه در کشور تولید می‌شود.

نخاله‌های ساختمانی در ایران عموماً دفع و به مناطق خارج از شهر منتقل می‌شوند. دفع این نخاله‌ها یا از طریق دفن کردن آن‌ها و یا انباشت و شکل‌گیری تپه‌های مصنوعی از نخاله‌های ساختمانی است. هر دو روش علاوه بر هزینه‌های حمل و نقل ، باعث تغییرات زیست محیطی و اکو سیستم محل دفع نخاله می‌شوند که اثرات نامطلوب زیست محیطی را به‌دنبال داشته است. این نخاله‌ها عموماً شامل ضایعات ناشی از تخریب ساختمان ها و آوار باقی مانده از سوانح می‌باشند. اخیراً با توجه به رشد روز افزون سیستم‌های ساختمانی بتنی و گسترش صنعت تولید آن، دفع بتن‌های تازه‌ای که در تراک میکسرها باقی می‌مانند و در پروژه‌ها استفاده نمی‌شوند، به یکی از معضلات مهم کارخانه ها تبدیل شده است. حجم قابل توجه ضایعات باقی مانده از زلزله بم مصداق خوبی برای درک میزان این پسماند های ساختمانی و هزینه‌هایی است که برای دفع نخاله‌ها اختصاص داده شده است. به‌عنوان مثال ، آوار به جا مانده از زلزله بم ۱۲ میلیون تن بود که براساس برآورد ستاد بازسازی بم برای جابه جا کردن این حجم از نخاله ۱۰۰۰ دستگاه کامیون لازم بود(بنیاد مسکن انقلاب اسلامی ، ۱۳۹۰).

ت ۱. نخاله‌های بتنی باقی مانده از زلزله قائن ، سال ۱۳۷٦.

بتن بیشترین حجم را در میان زباله‌های ساختمانی دارد. در آمریکا ٦۷ درصد کل زباله‌های ساختمانی را بتن تشکیل می‌دهد. در اروپا سالانه حدود ۵۰ میلیون تن بتن تخریب می‌شود. حدود ۱۱ میلیون تن بتن در انگلستان و حدود ٦۰ میلیون تن بتن در آمریکا سالانه به محل‌های انباشت نخاله‌های ساختمانی حمل می‌شود. در عین حال، در آمریکا سالانه می‌توان حدود ۱۰ تا ۱۲ میلیون تن بتن را به‌نحوی مورد استفاده مجدد قرار داد.

در تحقیقی که در سال ۱۹۵۰ بر روی ضایعات ناشی از بهسازی راه در ایالات متحده آمریکا انجام شد مشخص گردید که در نتیجه بازیافت تعداد دفعات رفت و آمد ماشین آلات ساختمانی تا محل دفن تا ۸۵٪ کاهش می‌یابد. با این مقدار قابل توجه کاهش آمد و شدهای ناشی از حمل

و نقل ، علاوه بر کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی کمک به سزایی در کاهش آلودگی ناشی از حمل ونقل می‌شود که این امر خود از دیگر نکات قابل توجه در راستای دستیابی به اهداف توسعه پایدار است(Howard Klee, 2009).

ت ۲.کارخانه بازیافت بتن.

مقاله پیش رو در پی پاسخ دادن به سئوالات زیر است:

– بازیافت بتن تا چه میزان می‌تواند به کاهش هزینه‌های کالبدی، اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی بازسازی‌های پس از سانحه کمک کند؟

– روش‌های مناسب بازیافت بتن چیست؟

– بازیافت بتن چه تأثیری بر مقاومت بتن ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی دارد؟

روش تحقیق

با توجه به اینکه هدف از نگارش مقاله توجه به استفاده و کاربرد بتن بازیافتی در صنعت ساخت‌وساز است این تحقیق ترکیبی از تحقیقات بنیادی و کاربردی شامل استفاده از نظریه‌ها و موارد عملی است. به‌عبارت دیگر چون این تحقیق برای کمک به حل موضوع علمی بازیافت و ترویج آن انجام شده پژوهشی بنیادی- کاربردی است. برای گردآوری داده‌ها از اطلاعات کمی برای روشن نمودن مقدار و میزان تأثیرگذاری بازیافت و داده‌های کیفی برای روشن نمودن چگونگی توجه به بازیافت در صنعت ساخت‌وساز و اثرات آن بر بازسازی پس از سانحه استفاده شده است. روشی که برای پاسخگویی به سئوالات پژوهش مورد استفاده قرار گرفته با توجه به شناسایی و توصیف و ثبت اجزا و فرایند موضوع بازیافت توصیفی و تبیینی است. برای این منظور با مطالعه مقالات و کتب و اسناد کتابخانه‌ای مختلف اطلاعات، آمار و ارقام مرتبط با پروژه‌های ساختمانی و سوانح، همچنین طریقه بازیافت و مزایای بازیافت بتن تبیین گردیده و نتایج به‌دست آمده از آمار و ارقام با استفاده از روابط بین آن‌ها محاسبه و به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری رسیده است.

پیشینه تحقیق

هر چند پیشینه بازیافت در ساختمان و معماری را می‌توان از گذشته‌های دور شاهد بود اما بازیافت به‌صورت صنعتی و علمی موضوعی است که می‌توان به‌صورت مشخص بعد از جنگ جهانی دوم مشاهده نمود. تحقیقات علمی درباره زمینه استفاده مجدد از بتن تخریب شده و مصالح ساختمانی، به‌عنوان سنگدانه‌هایی برای بتن جدید را می‌توان در پایان جنگ جهانی دوم و بازسازی پس از آن جستجو کرد. به همین ترتیب شروع استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی را نیز در بازسازی‌های پس از جنگ در آلمان دانست اما از حدود ۲۰ سال پیش، استفاده از بتن حاصل از تخریب شاهراه‌ها و

ساختمان‌های بتن آرمه در آمریکا و اروپا سرعت بیشتری گرفته و وارد صنعت بازیافت ضمن پیشرفت از رونق بیشتری برخوردار گردیده است.

در سال ۱۹۹۶، وازکنز[1] و همکارش به بررسی اثر رطوبت سنگدانه بازیافتی روی خواص بتن تازه سخت شده پرداختند. در این مطالعه اثر جذب رطوبت در سنگدانه بازیافتی روی خواص مکانیکی و دوام بتن تازه سخت شده مشخص شد. کاتز[2] در سال ۲۰۰۲ به بررسی خصوصیات بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی از بتن تازه سخت شده پرداخت. او بتن‌هایی با مقاومت ۲۸ روزه MPa ۲۸ را در سن‌های ۱، ۳ و ۲۸ روزه شکست و بازیافت نمود.

در پژوهشی با هدف بررسی استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی که از بتن های قدیمی با مقاومت مشخص بوده نتایج نشان می‌دهد که چگالی ، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته بتن‌های بازیافتی نسبتاً کمتر از بتن‌های مشابه و قدیمی می‌باشد.

بتن‌های تخریبی یکی از بزرگ‌ترین منابع تولید سنگدانه برای بتن‌های جدید می‌باشد و بر روی سنگدانه‌های بازیافتی به‌صورت ماسه زیاد تحقیق نشده است زیرا همه بر این باورند که به خاطر جذب آب بالای این نوع سنگدانه‌های بازیافتی ماسه‌ای چگالی کمتری نسبت به سنگدانه‌های معمولی دارد.

در پژوهش دیگری، با توجه به جایگزینی شن و ماسه با سنگ دانه‌های بازیافتی خصوصیات مکانیکی و پایداری بتن با نسبت آب به سیمان و عیار سیمان یکسان مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های ساخته شده در سنین ۳ و ۷ و ۲۱ روزه تحت آزمایش مقاومت فشاری و کشش مستقیم و کشش ناشی از خمش قرار گرفت. طبق نتایج حاصله دریافتند که بتن‌های ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری و کششی و خمشی به ترتیب ۱٪ و ۱۷٪ و ۵/۲ ٪ کمتر نسبت به بتن معمولی و جذب آب بیشتری دارند.(Hansen,1992)

بحث و بررسی

پسماندهای ساختمانی شامل چهار بخش پسماندهای ناشی از ساخت ؛ تخریب ساختمان‌ها؛ تعمیر و سوانح و بلایایی مانند زلزله ، انفجار و ... می‌باشد. مواد زاید ساختمان‌سازی شامل مواد مازاد و مواد حاصله از پاکسازی و تمیز کردن محل است. مواد حامل که به‌صورت مخلوط است بازمانده‌هایی است که برخی از اجزای آن مانند آجر و بلوک سیمانی کمیت و کیفیت مطلوبی برای بازیافت دارند. معمولاً موادی نظیر آسفالت، گچ، بتن، آجر، چوب و ... در نخاله‌ها یافت می‌شوند.[31] اجزای دیگر شامل فلزات، پلاستیک، خاک، سنگ و یا مواد مورد استفاده در ایزولاسیون نظیر قیر و مواد مشابه می‌باشد. دانسیته اجزای متشکله نخاله‌های ساختمانی متفاوت است؛ از آنجا که دانسیته کل نخاله‌های ساختمانی نسبتاً کم است و همچنین هزینه جابجایی و دفن آن بسیار بالاست از این رو بازیافت در عمل به‌عنوان گزینه مطلوب مطرح می‌باشد (تابش ، ۱۳۸۷).

با توجه به استقبال عمومی در سرتاسر جهان که در ساخت سازه‌های بتنی وجود دارد، تولید بتن به یکی از مهم‌ترین پارامترهای اثرگذار در ساخت‌وساز بدل گشته است .نظر به اینکه هر سازه دارای طول عمر مفید مشخصی در زمان بهره برداری خود می‌باشد، خواه ناخواه تخریب سازه‌های قدیمی و ایجاد سازه‌ای جدید اجتناب ناپذیر است. با توجه به اینکه مقدار ساخت‌وساز و تعداد پروژه‌های عمرانی به‌خصوص در کشورهای در حال توسعه در حال گسترش می‌باشد تولید مواد دور ریز و پسماندهای ساختمانی به‌طور قابل ملاحظه‌ای در چند سال اخیر افزایش یافته است. از طرفی عوامل گوناگون مانند بلایای طبیعی نظیر زلزله، سیل و طوفان و بلایای

انسانی نظیر جنگ نیز به‌خودی خود باعث از بین رفتن سازه‌ها از جمله سازه‌های بتنی می‌گردند. در نتیجه حجم آوار ناشی از این تخریب‌ها در جهان روز به روز در حال افزایش بوده و دفن بتن‌های تخریب شده بیش از پیش مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه یکی از راه‌های اصلی در جهت کاهش اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از دفن بتن فرسوده، استفاده مجدد از آن می‌باشد، لذا موضوع بازیافت بتن از نظر زیست محیطی نیز مهم و ضروری شده است(Nagagtaki etal, 2004).

از منظر ویژگی‌هایی که بین اجزا سنگدانه‌های بتن بازیافتی با بتن معمولی وجود دارد می‌توان به تفاوت بین سنگدانه‌ها و مقاومت آن‌ها توجه کرد. سنگدانه‌های بازیافتی بتن را معمولاً می‌توان هم به‌عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه یا درشت‌دانه و هم جایگزین کل ریزدانه یا درشت‌دانه یا هر دو کرد. سنگدانه‌های ناشی از بازیابی بتن عمدتاً جذب آب بالاتر و مقاومت کمتری نسبت به سنگ دانه‌های طبیعی دارند چرا که مقاومت ملات چسبیده از مقاومت سنگدانه کمتر می‌باشد از طرفی ملات موجود در روی سنگ دانه‌های بازیافتی به سبب تخلخل بیشتر نسبت به سنگ دانه، دارای جذب آب بیشتری می‌باشد (Hosseini & etal , 1385).

از نظر شکل، چگالی، جذب آب، دوام و مقاومت مهم‌ترین تفاوت بین سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی به شرح زیراست:

الف) شکل ذره و بافت سطحی: سنگدانه بازیافتی دارای شکل بی‌قاعده‌تری نسبت به سنگدانه معمولی است و بافت ریزتری دارد.

ب) چگالی: چگالی سنگدانه بازیافتی معمولاً پایین‌تر از سنگدانه طبیعی است زیرا در اطراف سنگدانه بازیافتی مقادیری ملات چسبیده و یا اینکه با مصالحی مانند آجر مخلوط هستند.

پ) جذب آب: مهم‌ترین تفاوت ویژگی‌های سنگدانه بازیافتی در مقایسه با سنگدانه طبیعی در خاصیت جذب آب بیشتر آن است. جذب آب سنگدانه بتن بازیافتی بین ۵.۳ تا ۸.۳ درصد تعیین شده است در حالی‌که جذب آب سنگدانه طبیعی بین ۱.۵ تا ۳.۵ درصد است.

ت) دوام: سنگدانه بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی مقاومت کمتری در برابر چرخه‌های یخ زدگی و آب شدن دارند. این موضوع در مورد بتن ساخته شده با آن‌ها نیز صادق است.

از نظر مقاومت فشاری، کششی، خمشی و برشی در ابتدا می‌توان گفت که به‌طور کلی با ۳۰٪ جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، بجای سنگدانه‌های طبیعی می‌توان به بتنی با تغییرات نه چندان متفاوت با بتن شاهد، دست یافت که این ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین راه برای به‌دست آوردن بتن بازیافتی، برای مصارف عمومی می‌باشد. در مقایسه با بتن شاهد، استفاده از درشت‌دانه بازیافتی به همراه ریز دانه طبیعی، ۲۰٪ و استفاده از درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی ۲۱٪ کاهش در مقاومت فشاری را ناشی می‌شود.

بر طبق نتایج منتشر شده سال ۱۹۹۶ انیستیتوی بتن امریکا، مقاومت فشاری بتن بازیافتی را می‌توان بالا برد و حتی به میزانی بیشتر از مقاومت بتن شاهد رساند. آزمایشات بر روی دو نوع سنگدانه با مشخصات معین که از بتن تخریبی دو محل متفاوت به‌دست آمده‌اند نشان می‌دهند که اگر مقاومت فشاری بتن اولیه که برای بازیافت بکار می‌رود، بیشتر از مقاومت بتن شاهد باشد مقاومت بتن با سنگدانه‌های بازیافتی بیشتر از بتن شاهد خواهد بود. مقاومت کششی بتن با سنگدانه بازیافتی در حدود ۲۰٪ تا ۲۵٪ کمتر از بتن شاهد می‌باشد. کاهش مقاومت خمشی بتن با سنگدانه بازیافتی در حدود ۲۰٪ می‌باشد.

کاهش مقاومت برشی بر اثر استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی تقریباً ۴۰٪ است که مقدار زیادی است. از آنجا

که از بتن، انتظار زیادی در برابر تحمل کشش، خمش و برش نمی‌رود و این مقاومت‌ها با مسلح کردن بتن قابل تقویت هستند، لذا کمتر به آن‌ها پرداخته شده است.

خواص مصالح بازیافتی تابعی از خواص دانه‌های بازیافتی است. عموماً با توجه به اهداف مورد نظر، مناسب بودن مصالح مصرفی در روسازی یا پی ساختمان با یک استاندارد خاص سنجیده می‌شود. این گونه خواص در مصالح تولید شده تأثیراتی را به‌دنبال دارد. با وجود شباهت‌های زیاد در خواص دانه‌های طبیعی و بازیافتی، برخی از خواص دانه‌های بازیافتی متفاوت با نوع طبیعی آن است که برخی از آن‌ها به‌صورت زیر می‌باشد:

– از آنجا که دانه‌ها از شکستن بتن اولیه حاصل می‌شوند، لذا معمولاً این قبیل دانه‌ها زبر و زاویه‌دار می باشند.

– غالباً به سطح دانه‌ها ملات و خمیر سیمان متصل است. مقدار این ملات، بسته به نحوهٔ شکست وخواص بتن اولیه بین ۳۶ تا ۶۰ ٪ متغیر است.

– به‌دلیل اتصال ملات در سطح دانه‌ها، این قبیل دانه‌ها نسبت به دانه‌های طبیعی دارای وزن حجمی کمتری می‌باشند. دانه‌های بازیافتی دارای ظرفیت چسبندگی کم هستند.

– مقاومت سایشی کم از مشخصات دانه‌های بازیافتی است.

– وجود مواد مضر احتمالی به‌همراه دانه‌های بازیافتی از قبیل خاک رس، گچ، آجر، چوب، شیشه و فلز، از نکات منفی برای این قبیل دانه‌ها محسوب می‌شود.

– کیفیت دانه‌های بازیافتی مستقیماً متناسب با کیفیت بتن اولیه است.

– وجود ملات در سطح دانه‌ها باعث جذب آب بیشتر می‌شود.

حمل ونقل

در جریان ساخت بزرگراه ادن[3] در شیکاگو (سال ۱۹۵۰) تحقیقی بر امکان بازیافت ۳۰۰.۰۰۰ تن نخاله بتن تولید شده انجام شد. کاهش چشمگیر مصرف انرژی و زمان انجام پروژه در صورت بازیافت کردن این حجم از بتن از نتایج این تحقیق بود که برخی از نتایج این تحقیق در جدول شماره ۱ آورده شده است:

بدون بازیافت	بازیافت
۳۵۰.۰۰۰ تن نخاله که باید به محل دفن منتقل می‌شد	۵۲.۵۰۰ تن نخاله که باید به محل دفن منتقل می‌شد
۷۹۰۰ سفر برای رسیدن به محل دفن و ۷۹۰۰ سفر برای برگشت به سایت پروژه	۱۲۰۰ سفر برای رسیدن به محل دفن و ۱۲۰۰ سفر برای برگشت به سایت پروژه
1.64×10^{11} MJ انرژی مصرفی	0.249×10^{11} MJ انرژی مصرفی

ج ۱. مقایسه مزایای بازیافت بتن برای بازسازی بزرگراه Eden شیکاگو.

در این پروژه هر کامیون قابلیت حمل ٤٤ تن نخاله را داشت و برای ۱ کیلومتر جا به‌جایی ۱ تن نخاله ۱.۲۲ MJ انرژی مصرف می‌شد. با مطالعه جدول بالا و در نظر گرفتن نسبت نخاله‌هایی که در هر دو حالت بازیافتی و غیر بازیافتی باید به محل دفن حمل می‌شد، می‌توان دریافت که ۸۵٪ از نخاله‌های بتن قابلیت بازیافت داشتند(Howard Klee , 2009).

در زلزله بم حدود ۱۲ میلیون تن نخاله ساختمانی ناشی از آوار زلزله به جای ماند که بنا به اظهار مسئولین بازسازی ۱۰۰۰ دستگاه کامیون برای حمل این حجم از نخاله در نظر گرفته شده بود. (بنیاد مسکن انقلاب اسلامی، ۱۳۹۰) چنانچه حجم قابل بارگیری هر کامیون به‌طور متوسط چیزی در حدود ۱۰ مترمکعب در نظر گرفته شود می‌توان برآورد نمود که هر کامیون از این ناوگان حدود ۱۲۰۰ سفر برای انتقال این حجم از نخاله به‌عهده داشته است[4]. این نخاله‌ها در فاصله ۲۰ تا ۳۰ کیلومتری شهر و در چهار جهت جغرافیایی به‌طور نامنظم پخش گردیدند. هر چند که بیشترین میزان نخاله در

شمال شهر در منطقه نارپیچ دفع شد. با فرض اینکه فاصله مکان‌های دفن از مرکز شهر ۲۰ کیلومتر منظور شود کل مسافت طی شده برای دفع این نخاله‌ها ۴۸۰۰۰ کیلومتر بوده است.

مصرف سوخت هر کامیون ۰.۱۵ لیتر بر ساعت بر اسب بخار است. اگر هر کامیون به‌طور میانگین از توان ۱۰۰ اسب بخاری استفاده کند، برای هر ساعت استفاده از کامیون ۱۵ لیتر سوخت لازم بوده است (حسینی، ۱۳۹٤).

با فرض اینکه هر کامیون با سرعت متوسط ٤۰ کیلومتر بر ساعت این مسافت را طی کند حدود ۱۲۰۰ ساعت کار برای هر کامیون لازم بوده تا حجم نخاله مربوط به خود را جابه جا نمایید به‌عبارت دیگر ۱۵۰ روز به ازای روزی ۸ ساعت کار برای هر کامیون منظور شده است. در نهایت هر کامیون برای انتقال نخاله‌های به جا مانده از زلزله بم ۱۸۰۰۰ لیتر سوخت مصرف کرده است[۵] که این مقدار برای کل کامیون‌های موجود در حمل و انتقال نخاله‌ها ۱۸ میلیون لیتر سوخت بوده است. چنانچه فقط قیمت این مقدار سوخت بر اساس نرخ بین المللی آن در سال ۱۳۸۲ در نظر گیریم ۳.۳۷۵ میلیون دلار۵ فقط برای سوخت هزینه شده است. بدیهی است که در صورت بازیافت حتی بخشی از این نخاله صرفه‌جویی قابل توجهی در هزینه‌های سوخت به‌دست می‌آمد. چنانچه صرفه‌جویی‌های ناشی از تهیه مصالح جدید، کاهش آلایندگی ناشی از پایین آمدن سطح تردد کامیون‌ها و عوارض زیست محیطی و ... به ارقام فوق اضافه شوند ابعاد مختلف مزایای بازیافت برای صنعت ساخت‌وساز کشور روشن می‌شود.

بنابراین چنانچه در مواقع بازسازی پس از سانحه به جای دفن نخاله‌های ساختمانی، سایت‌هایی برای بازیافت در نظر گرفته شود و در صورت استقرار بهینه محل‌های قرارگیری آن‌ها صرفه‌جویی عظیمی در مصرف سوخت، استفاده از سنگدانه‌های بکر و کاهش مسافت طی شده برای انتقال مصالح از یکطرف و حفظ محیط زیست و کاهش آلودگی‌های محیطی به‌دست خواهد آمد.

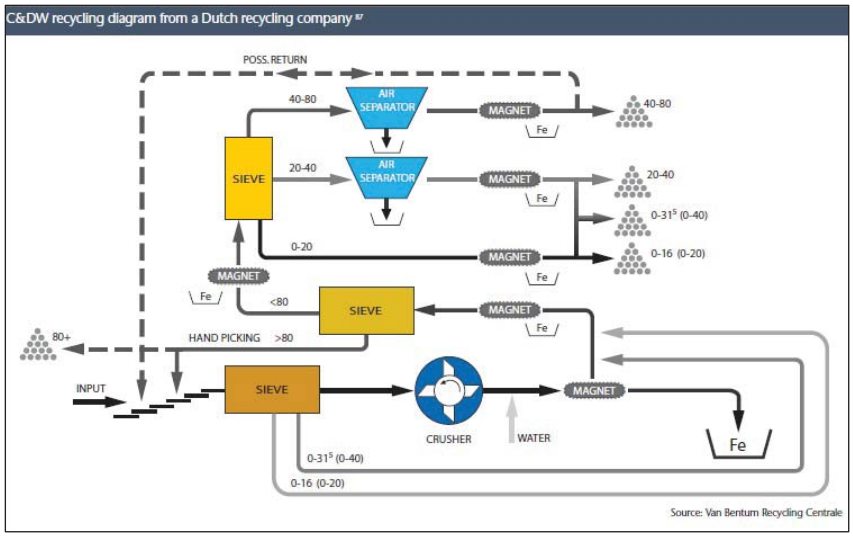
ت ۳. تصویر هوایی شهر بم در سال ۱۳۹۰ ، لکه‌های روشن در اطراف شهر پهنه‌هایی است که آوار در آنجا پخش شده است. (ماخذ: google earth).

روش‌های بازیافت

روش‌هـای مختلفـی بـرای بازیافـت بـتن وجـود دارد. رایـج‌تـرین روش بازیافـت بـتن خـرد کـردن آن توسـط ساینده‌ها و خرد کننده‌های مکانیکی اسـت. دسـتگاه‌هـا و ادوات سیار بازیافت بتن می‌توانند در سایت پروژه نصب و راه اندازی شوند تا در کاهش هزینـه‌هـای حمـل نقـل کمک کنند. البته لازم به ذکر است که کارخانه‌هـای ثابـت بازیافت بتن کیفیـت مطلـوبتری در تولیـد سـنگدانه‌هـای بازیافتی ارائه می دهند. جدا سازی مواد زاید مانند چوب، پلاستیک و فوم‌های درزگیر که وزن کمتری نسبت به بتن دارند توسط دمنده‌های بادی صـورت مـی‌گیـرد. مصـالح فلزی که وزن بیشتری دارند توسط آهن‌رباهـای قـوی از نخاله‌های ورودی جدا می‌شوند.

روش‌های دیگری برای بازیافت بـتن در حـال مطالعـه هستند که از جمله می‌توان به بازیافت با شوک الکتریکی، بازیافت از طریق حرارت دادن و بازیافـت بـا اسـتفاده از اشعه‌های مایکروویو اشاره کرد.

همانطور که در تصویر ٤ مشخص شده، در نتیجه فراینـد بازیافت، سنگدانه‌ها با دانه‌بندی‌های متفاوت درشت و ریـز حاصل می‌شود کـه بـه تبـع تفـاوت فراینـد تولیـد هـر رده دانه‌بندی، قیمت‌های واحد متفاوتی دارند. هر یـک از ایـن سنگدانه‌ها می‌توانند قابلیت کاربری خاصی داشته باشند.



ت ٤. تصویر شماتیک از فرایند بازیافت بتن.

سنگدانه‌های درشت بازیافتی

رایج‌ترین استفاده از درشت‌دانه‌های بازیافتی مصـارف آن بـرای ایجـاد لایـه‌هـای اسـاس و زیـراسـاس راه‌سازی‌هاست. مقاومت بالای این سنگدانه‌ها ، کم کردن ضخامت لایه‌های اساس و زیراساس و بـه طبـع کـاهش ضخامت کلی لایه رو سازی را در پی دارد. وجود سیمان در این سـنگدانه‌هـا باعـث ایجـاد پیوسـتگی بیشـتر بـین سنگدانه‌ها می‌شود کـه مقاومـت بـالای آن‌هـا را در پـی خواهد داشت. در برخی موارد ایـن سـنگدانه‌هـا در تولیـد آسفالت هم به‌کار رفته‌اند. مطالعات زیادی بر روی اسـتفاده از این سنگدانه‌ها در روسازی‌ها انجام شده است. با تکیه بر گزارشات سازمان ملی بتن آماده آمریکا [٦] از سـنگدانه‌هـای بازیافتی نمی‌توان برای تولید بتن سازه‌ای استفاده کرد. البتـه جایگزین کـردن ۱۰٪ از سـنگدانه‌هـای بازیـافتی بـه جـای

سنگدانه‌های معمولی بلا مانع اعلام شده است. این در حالی است که در کشور های انگلستان و آلمان ، با توجه به زمینه‌های موجود، استفاده از درشت‌دانه‌های بازیافتی برای تولید بتن سازه‌ای به ترتیب تا ۲۰٪ و تا ٤٥٪ مجاز اعلام شده است(Howard Klee , 2009).

سنگدانه‌های درشت بازیافتی به‌دلیل خاصیت جذب آب بالای زیاد نیاز به آب بیشتری در فرایند تولید بتن دارند. بدیهی است که با افزایش نسبت W/C مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. در برخی موارد نیز استفاده از این سنگدانه‌ها افزایش مصرف سیمان برای تولید بتن را نیز در پی داشته است.

ت ۵. بالا : مجتمع مسکونی WaldSpirale در آلمان. پایین: مدرسه The-Leutschenbach در زوریخ نمونه‌هایی از بناهایی که با استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در بتن ساخته شده‌اند.

سنگدانه‌های ریز بازیافتی

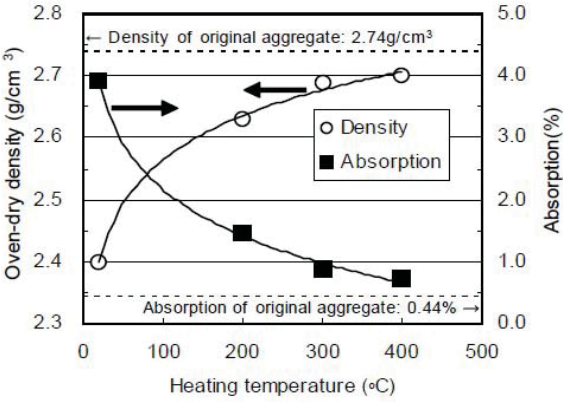
سنگدانه‌های ریز بازیافتی می‌توانند در بتن به جای ماسه استفاده شوند. اگرچه استفاده از این سنگدانه‌ها، به‌علت جذب بالای آب بر روی دوام، مقاومت و انقباض بتن تأثیرگذار است اما مزایای آن چه از نظر اقتصادی و چه در راستای تحقق بخشیدن به اهداف برنامه توسعه پایدار، بیشتر است. استفاده از این سنگدانه‌ها برای محیط‌های مرطوب نظیر مناطق ساحلی و مناطق نزدیک رودخانه‌ها بسیار مناسب است. خاصیت جذب آب بالای آن‌ها استفاده از این نوع بتن را در سطوح پایینی سازه‌ها مانند پی و شناژها توجیه پذیر می‌کند[Howard Klee,2009].

بازیافت به روش گرم کردن و سایش[۷]

این نوع بازیافت فرایندی برای تولید سنگدانه‌های با کیفیت است که با گرم کردن و خرد کردن بتن انجام می‌شود. سنگدانه‌های تولیدی در این روش می‌توانند در تولید بتن آماده مورد استفاده قرار بگیرند. پودر حاصل شده که به پودر HRM معروف است علاوه بر استفاده در فرایند تولید سیمان می‌تواند به‌عنوان پایدار کننده‌های شیروانی‌های خاکی[۸] نیز مورد استفاده قرار بگیرد. همچنین جایگزینی ۱۰٪ این پودر به جای سیمان برای تولید بتن تغییری در مقاومت فشاری بتن ایجاد نمی‌کند. با وجود اینکه در این فرایند از سوخت برای گرم کردن و سایش استفاده می‌شود اما آنالیزهای انجام شده کاهش تولید گاز CO_2 را در اثر فرایند تولید سیمان گزارش می‌دهند. در روش HRM وقتی بتن خرد شده تا دمای 300°c گرما می‌بیند، ملات سیمان به‌علت فرایند دی هیدراتاسیون، شکننده می‌شود. برای جدا کردن ملات سیمان، خرده‌های بتن دوباره بر روی غلتک‌های سایشی می‌روند.

تحقیقات نشان می‌دهند که با حرارت دادن بتن تا دمای 500°C تغییری بر روی چگالی و خاصیت جذب آب سنگدانه‌ها رخ نمی‌دهد. درجه سایش با توجه به سرعت

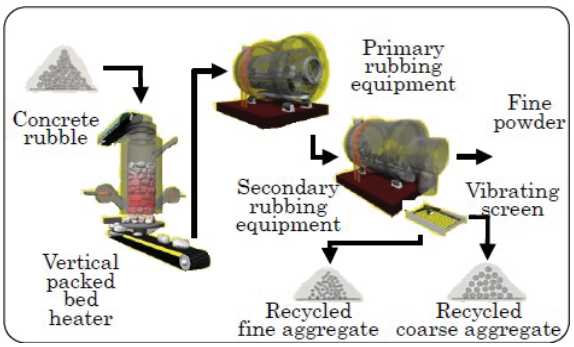
دورانی ساینده‌ها متغیر است. میزان ملات سیمانی به جا مانده که معیاری برای اندازه‌گیری کیفیت سنگدانه است، با تغییر سرعت دورانی ساینده‌ها می‌تواند کنترل شود.



ن۱ . تأثیر گرم کردن بر روی کیفیت سنگدانه‌های درشت.

با توجه به شرایط مکانی و محدودیت‌های اقتصادی پروژه می‌توان از سایت‌های سیار HRM که قابلیت بازیافت ۵ تن بر ساعت را دارند استفاده کرد. این سایت‌ها از ۲۰ قطعه جدا از هم تشکیل شده‌اند که به آسانی می‌توانند به محل پروژه متصل شوند و سرهم شوند.

تصویر ٦ ترتیب کارکرد این فرایند را نمایش می‌دهد. نخاله‌های خرد شده که سایز کمتر از ۵۰ میلیمتر دارند تا دمای 300°C حرارت می بینند. بتن حرارت دیده وارد ساینده اصلی می‌شود که از دو استوانه درونی و بیرونی تشکیل شده است. بتن حرارت دیده بین صفحات این دو استوانه توسط گوی‌های فلزی ساییده می‌شود و ملات‌های جدا شده توسط استوانه داخلی تخلیه می‌شوند تا کارایی سیستم افزایش یابد. درشت‌دانه‌ها و ملات‌های جدا شده به ساینده دوم منتقل می‌شوند تا ملات‌های چسبیده به ریزدانه‌ها توسط سایش با درشت‌دانه‌ها ، جدا شوند. در مرحله بعدی دستگاه ویبره، ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها را از هم جدا می‌کند. پودر حاصل شده در ساینده دوم با دمیدن هوا جدا شده و درون کیسه‌هایی نگهداری می‌شود. نسبت وزنی درشت‌دانه‌ها ، ریزدانه‌ها و پودر HRM به‌دست آمده به ترتیب برابر ۳۵٪ ، ۳۰٪ و ۳۵٪ است.

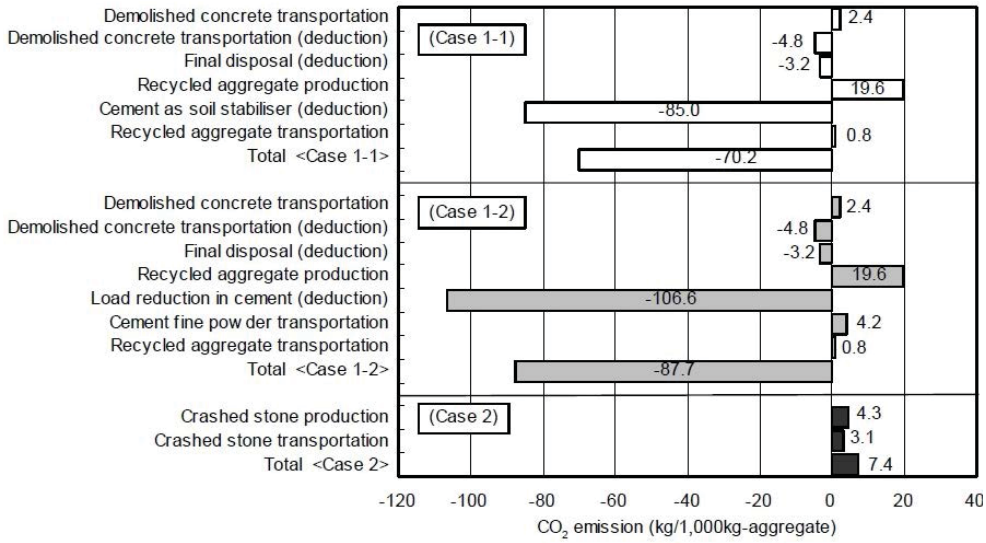


ت ٦ . بالا: کارخانه سیار HRM ؛
پایین: فرایند شماتیک HRM.

روش HRM میزان قابل توجهی انرژی برای گرم کردن بتن مصرف می‌کند. با توجه با اینکه پودر HRM می‌تواند به‌عنوان مقاوم کننده خاک یا به‌عنوان ماده اولیه تولید سیمان استفاده شود ، تحقیقاتی بر روی CO2 تولید شده و انرژی مصرفی در بازه زمانی زیاد برای ارزیابی تکنولوژی HRM انجام شده است.

در نمونه ۱-۱ سنگدانه‌ها بازیافتی‌اند و از پودر HRM برای مقاوم‌سازی خاک استفاده شده است. در مورد نمونه ۱-۲ از پودر HRM برای تولید سیمان استفاده شده است و در نهایت در مورد ۲ خرد کردن سنگدانه‌های بکر مورد بررسی قرار گرفته است.

همانطور که از نمودار شماره ۲ پیداست در نمونه های ۱-۱ و ۱-۲ با کاهش تولید گاز CO2 مواجه هستیم. در نمونه اول (یعنی حالتی که مقاوم‌سازی خاک انجام شده است) به ازای هر ۱۰۰۰ کیلوگرم سنگدانه خرد شده، ۷۰.۲ کیلوگرم CO2 کمتری در مقایسه با حالت تولید سیمان به روش رایج، تولید شده است. در نمونه شماره ۲ ۸۷.۷ کیلوگرم کاهش تولید CO2 را داشتیم (Hirokazu Shima , 2005).



ن ۲. میزان CO_2 تولید شده در فرایند HRM.

نتیجه

بازیافت نخاله‌های بتنی و برگرداندن آن به چرخه استفاده مصالح ساختمانی مزایای زیادی هم در شرایط بازسازی پس از سانحه و هم شرایط عادی دارد. با شکستن و خرد کردن بتن های باقی مانده از آوار سانحه می‌توان سنگدانه‌های جدید برای حجم انبوه تولید بتن مورد نیاز بازسازی و نوسازی تأمین کرد. از دیگر موارد استفاده که نتایج بسیار خوبی نیز داشته، استفاده از این سنگدانه‌ها برای مصرف در لایه اساس زیرسازی‌های راه و شبکه معابر آسیب‌دیده در سوانح است. مصالح مذکور می‌تواند در مرمت معابر شهری و روستایی به‌کار گرفته شود. از طرفی پودر و غباری که در فرایند خرد کردن بتن به‌دست می‌آید به‌عنوان ماده اولیه سیمان یا ترکیبی برای تولید ملات و پایدارکننده خاک در مناطقی که پدیده شن‌های روان وجود دارد خصوصاً مناطق کویری کاربرد دارد. با توجه به اینکه هزینه خرد کردن بتن بسیار کم است، استفاده از پودر حاصل آلودگی ناشی از فرایند تولید سیمان را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد.

برخی از دیگر مزایای مهم بازیافت بتن کاهش نخاله و زمین‌های مختص دفن نخاله‌های ساختمانی؛ جایگزین نمودن سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های بکر و کاهش هزینه‌های استخراج سنگدانه‌های بکر؛ کاهش تولید CO2 در نتیجه استفاده از پودر بازیافتی تولید شده در ساخت سیمان؛ تسریع در بازسازی ابنیه پس از سانحه؛ کاهش هزینه‌های حمل و نقل و کاهش هزینه‌های دفع و دفن نخاله‌ها است.

البته باید توجه کرد که خواص بتن اولیه تأثیر بسیار مهمی بر خواص مکانیکی سنگدانه‌های بازیافت شده بتن دارد.

باید توجه داشت لازم است سنگدانه‌های بازیافتی مانند سنگدانه‌های طبیعی شکل و خواص خود را حفظ کنند و وظایف مورد نظر را در طول عمر طراحی سازه انجام دهند. تحقیقات انجام شده برای مقایسه مقاومت بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی و بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های طبیعی در برابر سیکل‌های ذوب و یخ تناقضات فاحشی دارند. به‌علت وجود این تناقضات و کم بودن آزمایشات انجام شده در این زمینه‌ها لازم است تحقیقات وسیع‌تری انجام گیرد. همچنین انجام تحقیقات در زمینه استفاده از بتن بازیافتی در بتن مسلح و بررسی جمع‌شدگی و خزش در بتن‌های بازیافتی ضروری است.

با این وجود نباید فراموش کرد بازیافت بتن با کاهش آلودگی ناشی از تولید سیمان قدمی در راستای تحقق بخشیدن به اهداف برنامه توسعه پایدار است.

پی نوشت

1. Vazqnez
2. Katz
3. Eden

٤. وزن هر متر مکعب نخاله ۱ تن فرض شده است.

۵. قیمت هر بشکه گازوئیل آمریکایی که هر بشکه چیزی در حدود ۱۶۰ لیتر است در سال ۱۳۸۲ برابر ۳۰ دلار بود.

6. NRMCA (National Ready-Mix Concrete Association)
7. HRM(Heating & Rubbing Method)

۸. ترانشه‌ها و شیب‌های عرضی مسیرهای راه

فهرست منابع

– بازیگر، محمدحسن؛ (۱۳۹٤). سازمان حفاظت محیط زیست تهران.

– تابش، حسین(۱۳۸۷). استفاده از زواید و ضایعات صنعتی و مدنی در تولید مصالح ساختمانی، مجله کیمیا، شماره ۷، سال سوم.

– چوبانگلوس، جورج، کریت، فرانک (۱۳۸۹)، راهنمای کاربردی مدیریت پسماند، مترجمان: خانی، محمدرضا، پورعطایی، مهدی، خسرو محمود خانی، روح الله، جلد اول و دوم، انتشارات شهرداری ها و دهیاری های کشور.

– حسینی، عبدالله؛ (۱۳۹٤). درس ماشین آلات ساختمانی؛ دانشکده فنی دانشگاه تهران.

– گزارش عملکرد حوزه معاونت بازسازی و مسکن روستایی؛ بنیاد مسکن انقلاب اسلامی؛ تهران ۱۳۹۰.

- Hosseini P, Booshehrian A, Delkash M, Ghavami S, Zanjani M," Improvement interfacial transition zone of green concrete by utilization of nano-SiO2 particles" , 1387
- Adjukiewiz, A., kliszezewiez., A., "influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC, " cement and concrete composites, Vol 24. 2002, pp. 269-279
- Hirokazu Shima , Hisashi Tateyashiki. An Advanced Concrete Recycling Technology and Its Applicability Assessment Through Input-Output Analaysis . Journal of Advance Concret Technology, vol3 , February 2005.
- Hansen, T. C. (Editor), "Recycling of demolished concrete and masonry," RILEM (the international-union of testing and research labratories for materials and structures), Reports, 1992.
- Howard Klee . The Cement Sustainability Initiatve . World Business Counsil for Sustainable Development 2009
- Katz, A.,"properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete." Cement and concrete research, Vol 33.2003, pp. 703-711
- Nagataki S, Gokce A, Saeki T, Hisada M, "Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates", cement and concrete research, 2004, 34(6), pp. 965-971
- Padmini, A.K., Ramamurthy, K., and Mathews, M.S. "influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete""Construction and building materials" vol. 23, 2009, 151-160.
- Vazqnez, E., Bara, M., "the influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete," Waste management, volume 16, issues 1-3, 1996, pp. 113-117