مجله مهندسی بهداشت محیط زمستان ۱۴۰۱، سال ۱۰، شماره ۲: ۱۳۰- ۱۴۵

بررسی روش‌های بازیافت ضایعات بتنی (مطالعه مروری)

مجید هاشمی[۱،۲]، مهدی رضایی[۱،۲]*

[۱]- مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران.

[۲]- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۲

چکیده

زمینه و هدف: ضایعات ساخت‌وساز و تخریب، از جمله پرحجم‌ترین ضایعات شهری بوده که غالباً از جنس بتن هستند. با توجه به حجم بالای این ضایعات، ضروریست تا از استراتژی بازیافت برای مدیریت ضایعات ساختمانی استفاده کرد. بازیافت، سه مزیت عمده؛ از جمله کاهش تقاضای منابع طبیعی، کاهش هزینه تولید انرژی و افزایش ظرفیت محل دفن را دارا می‌باشد که میتواند تا حد زیادی مدیریت ضایعات بتنی را راحت‌تر کند. بر این اساس، هدف از مطالعه حاضر، مروری بر روش‌های بازیافت ضایعات بتنی می‌باشد.

مواد و روش‌ها: در جستجوی اولیه مقالات، جمعاً ۷۴ مقاله از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۲ میلادی یافت شد که پس از حذف موارد تکراری، این تعداد به ۵۰ رسید. سپس در مرحلهٔ غربالگری، عنوان و چکیده مقالات بررسی شد و در انتها، تعداد ۲۸ مقاله باقی ماند. سپس برای دستیابی به مقالات مرتبط، متن کامل مقالات غربال‌شده مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت، ۲۲ مقاله باقی ماند که در مطالعه حاضر، استفاده شد.

یافته ها: سنگدانه‌های بازیافت‌شده، معمولاً کاربرد محدودی در صنعت ساخت‌وساز دارند؛ اما تکنولوژی‌های مورد بحث در این مطالعه، می‌توانند باعث افزایش کیفیت سنگدانه‌های بازیافت‌شده شوند و بنابراین می‌توان از این سنگدانه‌ها، در مصارف بهتر و بیشتری استفاده کرد.

نتیجه گیری: برای پیشرفت امر بازیافت ضایعات ساختمانی، پیشنهادهایی؛ از جمله تخریب اصولی ساختمان‌ها، بازنگری در روش‌های ساخت‌وساز و تشویق به طراحی سازه‌ها در جهت پتانسیل‌های معماری بومی مطرح است. ابزارهای اصلی برای رسیدن به این اهداف نیز؛ شامل حمایت دولت، افزایش آگاهی عمومی، تأسیس سیستم اداری برای مواد بازیافت‌شده، تصویب قوانین مربوطه و ابداع روش‌های ساخت‌وساز در جهت قابلیت‌های محلی می‌باشد.

کلید واژه: بازیافت ضایعات بتنی، ضایعات ساختمانی، اثرات محیطی.

* گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی کرمان، کرمان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: mahdirezaei1274@gmail.com — شماره تماس: ۰۹۱۳۶۳۶۹۹۰۸

۱- مقدمه

با توسعه اقتصادی و اجتماعی روزافزون در قرن بیست و یکم، فرآیند توسعه شهری، تولید مقادیر عظیمی از ضایعات ساختمانی را منجر شده‌است [۱]. ضایعات ساخت‌وساز و تخریب (CDW: Construction & Demolition Wastes)، یکی از سنگین‌ترین و پرحجم‌ترین ضایعات تولیدی در اتحادیه اروپا است. این ضایعات در حدود ۳۰-۲۵ درصد از کل ضایعات تولیدشده در اتحادیه اروپا به حساب می‌آید و از ترکیبات مختلفی از جمله بتن، آجر، گچ وغیره که توانایی بازیافت شدن را دارند، تشکیل شده‌است [۲]. بتن، که یکی از انواع ضایعات ساختمانی‌ست، اغلب بعنوان یک ماده ساختمانی برای ساخت‌وساز استفاده می‌شود. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA)، نزدیک به ۲۵ میلیون تن از بتن در سراسر جهان بصورت سالانه مصرف می‌شود [۳]، که این مقدار با ۳/۸۰ تن از بتن به ازای هر نفر در سال برابر است [۴].

از نقطه‌نظر زیست‌محیطی، ضرورت حفاظت از منابع و کاهش اثرات انسان بر روی محیط زیست واضح است [۵].

این ضایعات، اخیراً تبدیل به یک معضل محیط‌زیستی شده که باعث تشدید گرمایش جهانی، باران‌های اسیدی، آلودگی هوا و تغییرات اقلیمی می‌شوند که این امر، نیازمند اقدامات و راه‌حل‌های جدی است [۶].

بیشتر ضایعات ساختمانی از بتن تشکیل شده و این ماده در حال حاضر، پرکاربردترین ماده برای ساخت‌وساز است. تولید این ضایعات در سال‌های اخیر افزایش یافته و با توجه به اثرات حاصل از دفن این ضایعات و افزایش استفاده از مواد طبیعی، ضروریست تا روش‌های بازیافت برای ضایعات ساختمانی بکار رود [۷]. بعلاوه، ضایعات حاصل از فعالیت صنایع مربوطه نیز باعث ایجاد آلودگی‌های محیطی می‌شود. پساب‌های آلوده و گازهای سمی خارج‌شده از این صنایع، هر لحظه در حال افزایش است [۸].

ضایعات ساختمانی، هر زمان که فعالیتی مرتبط با ساخت‌وساز و تخریب؛ مانند ساختن جاده، پل، زیرگذر، روگذر وغیره انجام گیرد، تولید می‌شوند که عمدتاً شامل مواد بلااستفاده و غیرقابل تجزیه بیولوژیکی (مانند بتن، فلز، آجر، پلاستیک وغیره) هستند. عمده ضایعات ساخت‌وساز و تخریب، جزو زائدات جامد شهری محسوب می‌شوند [۹]. این ضایعات، سنگین و در حجم بسیار بالایی تولید می‌شوند؛ بنابراین هزینه انتقال و دفن آن‌ها قابل توجه خواهد بود و از طرفی بخاطر این موضوع، حجم زیادی از محل‌های دفن را اشغال می‌کنند. پس تعجبی ندارد که اغلب این ضایعات را بصورت تلنبار شده در کنار پروژه‌های ساختمانی و یا مناطق دیگر مشاهده می‌کنیم [۷]. در صورتی که عمده این ضایعات را می‌توان دوباره به چرخه مصرف وارد کرد و از آسیب‌های زیست‌محیطی (افزایش مناطق لندفیل و استفاده از منابع طبیعی وغیره) نیز کاست [۱]. خصوصاً اینکه باید حفاظت از محیط زیست و جلوگیری از کاهش بیش از حد منابع طبیعی، اساس کار توسعه پایدار باشد. به همین منظور، بازیافت ضایعات ساختمانی، مورد نیاز جامعه امروز است [۹].

بازیافت بتن، که شامل تبدیل پسماندهای بتنی به بتن قابل استفاده است، یکی از مؤثرترین روش‌ها در مدیریت ضایعات ساختمانی بوده که علاوه بر فراهم آوردن مصالح جدید، از بروز و تشدید سایر اثرات محیطی ناشی از مدیریت نامناسب این ضایعات نیز می‌کاهد [۶]. فرآیندهای بازیافت بتن در کشورهای مختلف، به دلایل گوناگون با یکدیگر متفاوت‌اند که این‌ها شامل در دسترس بودن تجهیزات تخصصی، فناوری‌های بازیافت و میزان حمایت از طرف دولت می‌باشد. این نکته نیز حائز اهمیت است که هزینه و انرژی، دو مسئله کلیدی در بازیافت بتن هستند [۱۰]. "Tam VWY و همکاران" در سال ۲۰۱۸ میلادی بیان کردند که نرخ بازیافت سنگدانه‌های بتنی در بین کشورها متفاوت است؛ از تقریباً ۱۰۰ درصد در برخی مناطق جهان (مانند هلند با ۹۸ درصد و

دانمارک با ۹۴ درصد) گرفته تا نزدیک صفر درصد در مناطقی که اغلب ضایعات ساختمانی در محل های دفن، دفع می شوند. بعنوان مثال، ژاپن یک کشور پیشرو در بازیافت ضایعات ساختمانی است که نزدیک به ۹۸ درصد این ضایعات را بازیافت و از این مواد برای کاربردهای ساختمانی استفاده می‌کند [۱۱].

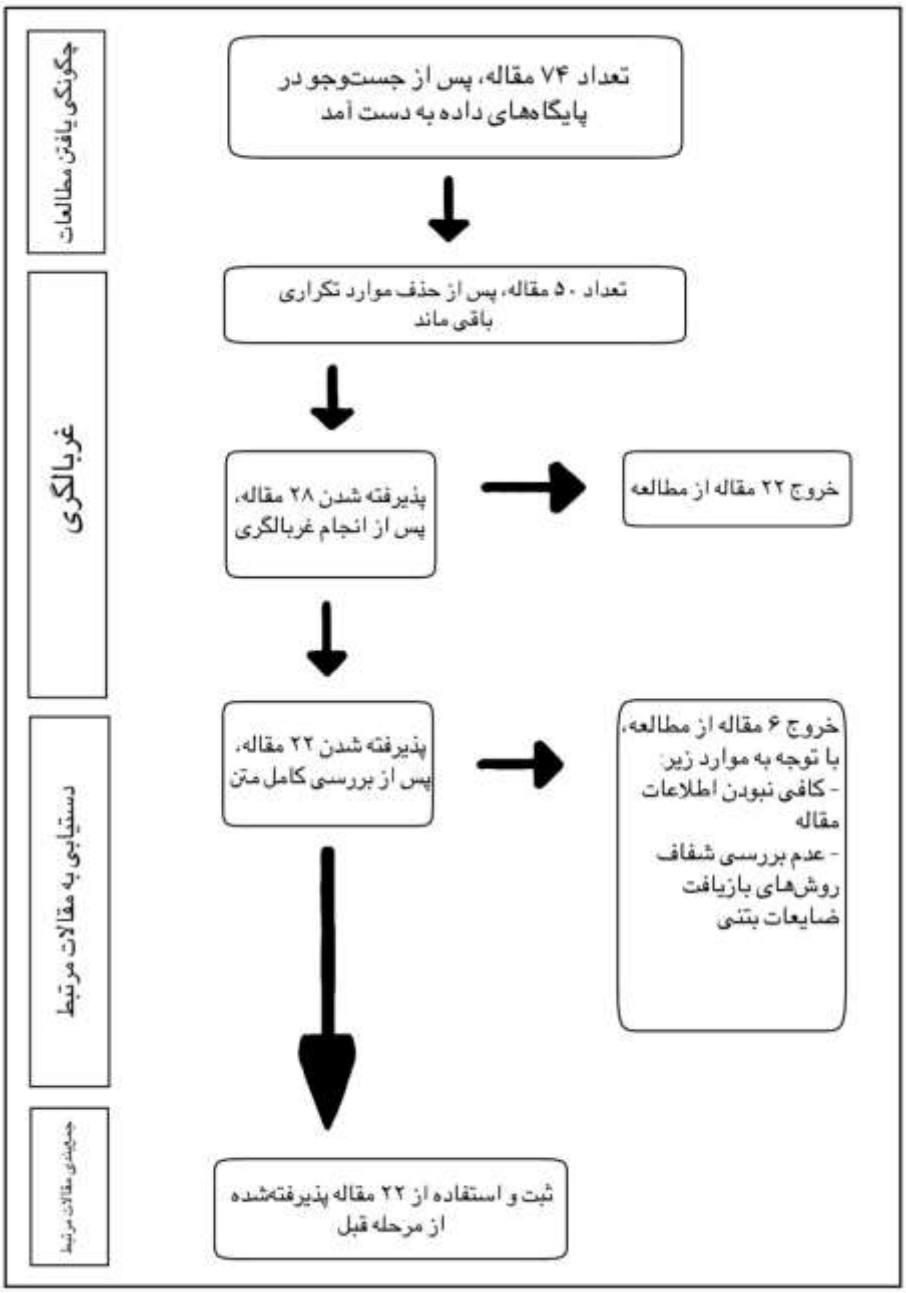
در کشور ایران، بسیاری از ساختمان‌ها اساساً بدلیل سپری شدن طول عمرشان، حوادث طبیعی (مانند زلزله)، عدم رعایت استانداردهای لازم و یا نیاز به ساختمان چندطبقه، هر ساله تخریب می‌شوند. کیفیت پایین ساخت‌وساز، نگهداری ضعیف و عدم توانایی ساختمان‌ها در تطابق پیدا کردن با تغییرات محیطی و نیاز کاربران عواملی هستند که طول عمر ساختمان‌ها را کاهش می‌دهند. ساختمان‌هایی که در ایران تخریب می‌شوند، اغلب در دهه ۱۹۶۰ میلادی ساخته شده‌اند. آن‌ها عمدتاً با آجرهای خشتی ساخته‌شده‌اند و اغلب بدون وسایل خاصی تخریب می‌شوند. فقط مصالحی مانند آجر، فلز، درها و پنجره‌ها بازیافت می‌شوند و بقیه مصالح توسط پتک خرد شده و بدون جداسازی، به محل‌های دفن منتقل می‌شوند. "Saghafi M و همکاران" در سال ۲۰۱۱ میلادی، خاطرنشان کردند که تخریب ساختمان‌ها در تهران، منجر به تولید حدود ۴۲۰۰ تن ضایعات ساختمانی در روز شده‌است. از طرفی دیگر، افزایش جمعیت جوان و پدید آمدن تغییرات در سبک زندگی افراد منجر به رشد نیاز خانه‌سازی شده‌است که این امر، باعث افزایش نرخ مصرف مواد خام برای ساخت‌وسازهای جدید می‌شود. معمولاً تولید ضایعات ساختمانی در ایران، بسیار بیشتر از اغلب کشورهای دیگر، خصوصاً کشورهای توسعه‌یافته است؛ بعنوان مثال، میانگین تولید ضایعات ساختمانی در ایالات متحده، در حدود ۰/۷۷ کیلوگرم به ازای هر نفر در روز است در حالی که این میزان در تهران به ۴/۶۴ کیلوگرم به ازای هر نفر در روز می‌رسد. از آنجایی که در خارج از محدوده شهرهای ایران، زمین‌های بایر زیادی برای دفن این ضایعات وجود دارد، توجه کافی به مسائل بازیافت این مواد و اثرات زیست‌محیطی آن نشده‌است. با این حال، لازم به ذکر است که گنجایش زمین محدود است. علاوه بر این، وجود ضایعات ساختمانی در محل‌های دفن، اثرات شیمیایی و فیزیکی ناخوشایندی بر محیط زیست می‌گذارد [۱۲].

"Kelayeh IM و همکاران" در سال ۲۰۱۰ میلادی، بیان کردند که متأسفانه در کشور ایران، تکنولوژی‌های جدید بتن (به جز پروژه‌های ملی و ویژه ساخت‌وساز)، به ندرت بکار گرفته می‌شود و دانش پیشرفته استفاده از بتن در طراحی و ساخت سازه‌ها بکار گرفته نشده‌است [۸]. "Saghafi M و همکاران" در سال ۲۰۱۱ میلادی، بیان کردند که اگر استفاده از دانش جدید و برخورد با این بحران تا زمانی که مناطق وسیعی از زمین با ضایعات ساختمانی پوشیده شود، به تعویق بیافتد؛ ممکن است که برطرف کردن این خسارات، غیرممکن شود [۱۲]. بر این اساس، هدف از مطالعه حاضر، مروری بر روش‌های بازیافت ضایعات بتنی می‌باشد.

۲- روش کار

برای انجام مطالعه حاضر، کلیدواژه‌های ((Concrete waste) AND (recycling); (Concrete waste) AND (Recycling) AND (Methods); (Concrete waste) AND (Recycling) OR (Methods); (Concrete waste) AND (Recycling) AND (Iran); (Concrete waste) AND (Environmental impacts); (Concrete waste) AND (Recycling) AND (Methods) AND (Iran); (Concrete (waste) AND (Recycling) OR (Methods) AND (Iran) همزمان در قسمت عنوان و چکیده مقالات، در پایگاه های اطلاعاتی «ScienceDirect, Google Scholar, ResearchGate, J-Stage, Civilica» جست‌وجو شدند. پس از عمل جستجو، جمعاً ۷۴ مقاله از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۲ میلادی یافت شد که پس از حذف موارد تکراری، این تعداد به ۵۰ مقاله رسید. سپس در مرحله غربالگری، عنوان و چکیده مقالات مورد بررسی قرار گرفت و در نتیجه آن، تعداد ۲۸ مقاله باقی ماند.

سپس برای دستیابی بـه مقـالات مـرتبط، مـتن کامـل مقـالات باقی‌مانده مورد بررسی شایسـتگی قـرار گرفـت و در نهایـت، تعداد ۲۲ مقاله ثبت و در مطالعه حاضر استفاده شد (شکل ۱). معیار ورود مقالات به مطالعه، ارائه مطالب مرتبط با روش‌های بازیافت ضایعات بتنی و معیـار خـروج مقـالات نیـز تکـراری بودن آن‌هـا، ناکـافی بـودن اطلاعـات، عـدم ارائـه روش‌هـای بازیافت بصورت واضح و صرفاً بحث بر روی سنگدانه‌ها پس از بازیافت بوده‌است.



شکل (۱): فلوچارت جست‌وجوی «پریسما»

۳- یافته‌ها

۳-۱دستگاه‌های بازیافت ضایعات ساختمانی

یک دستگاه بازیافت، تقریباً مشابه یک دستگاه تولید سنگدانه‌های طبیعی خردشده است. روش ساده و پایه بازیافت ملات و ضایعات بتنی، خرد کردن آن‌ها برای تولید محصول دانه‌ای در اندازه ذرات معین است.

دستگاه‌های پردازش اینگونه ضایعات، معمولاً بر اساس قابلیت حرکت، نوع خردکننده، روش جداسازی ذرات وغیره از هم متمایز می‌شوند؛ اما بطور کلی، این دستگاه‌ها، در دو دسته قرار می‌گیرند: ثابت و متحرک.

۱) دستگاه متحرک (Mobile plant):

این نوع دستگاه، از یک خردکننده و تعدادی ابزار جداکننده تشکیل شده‌است. عمل حذف فولاد و سایر آلاینده‌ها، معمولاً بصورت دستی و یا با الکترومگنت‌ها انجام می‌پذیرد. در برخی موارد، این دستگاه می‌تواند دو خردکننده داشته باشد. در دستگاه متحرک، مواد اصلی (ملات و ضایعات بتنی) خرد و غربال شده، و ناخالصی‌های آهنی نیز توسط جداساز مغناطیسی جدا می‌شوند. این دستگاه، خودش می‌تواند به محل تخریب منتقل شود.

۲) دستگاه ثابت (Stationary plant):

این دستگاه، معمولاً دارای یک خردکن بزرگ بوده که همراه با یک خردکن دوم، کار می‌کند. همچنین دارای ابزارهای لایروبی و جداساز متنوعی است که در نتیجه، باعث تولید سنگدانه‌های باکیفیت می‌شود.

همچنین الکترومگنت‌های خودتمیزشونده، غربالگرها و جداسازی دستی برای تولید سنگدانه‌های بازیافتی نسبتاً تمیز از مواد مخلوط و آلوده ورودی، بکار گرفته شده‌است. در بریتانیا، این دستگاه معمولاً از دو خردکننده فکی (Jaw Crusher) تشکیل شده و قادر است تا طیفی از محصولات درجه‌بندی‌شده را حاصل کند.

۳-۲ روش‌های بازیافت ضایعات ساختمانی

۱) خردسازی مکانیکی (Mechanical Grinding Method):

خردسازی مکانیکی، روشی است که برای تولید سنگدانه‌های ریز و درشت، با قسمت‌بندی یک استوانه افقی به بخش‌های کوچک‌تر توسط یکسری تیغه و بکارگیری توپ‌های آهنی برای خردسازی بتن و چرخش تیغه‌ها، استفاده می‌شود [۹].

در آغاز، فرآیند خردسازی عمدتاً برای حذف ناخالصی‌ها؛ مانند فلز، شیشه و چوب از ضایعات بتنی استفاده می شود. بعد از آن، دو مرحله از خردسازی و غربال‌گری برای حذف بیشتر ناخالصی در فرآیند غربال‌گری انجام می شود و در نهایت، سنگدانه‌های بازیافت‌شده با اندازه‌های متفاوت به دست می‌آید [۱۳].

همانطور که ذکر شد، در این روش، عمدتاً از خردکننده‌ها استفاده می‌شود؛ خردکننده‌های فکی تک‌بازویی (Single-Toggle Jaw Crusher)، معمولاً برای خردسازی اولیه بتن‌های تخریب‌شده، برای تبدیل آن‌ها به اندازه ۵۰-۴۰ میلی‌متر (با صرف نظر از کیفیت نهایی سنگدانه‌های بازیافت‌شده) استفاده می‌شوند.

هنگامی که ماده اصلی (بتن تخریب‌شده) توسط یک نوار نقاله وارد پردازش بعدی می‌شود، مواد خارجی (مانند تکه‌های چوب، پلاستیک وغیره) بصورت دستی خارج شده و مواد فلزی نیز توسط جداکننده‌های مغناطیسی، جدا می‌شوند.

سپس مواد خارجی که جدا شده‌اند، بر اساس نوع کاربردشان دستخوش تصفیه‌های گوناگونی می‌شوند. خردکننده‌های ضربه‌ای (Impact Crusher)، برای خردسازی ثانویه و ثالثیه (زمانی که سنگدانه‌های با کیفیت کم تا متوسط تولید می‌شوند) کاربرد دارند.

۲) سایش مکانیکی (Mechanical Scrubbing Method):

در تکنیک موسوم به «سایش مکانیکی»، خرده‌های بتن در یک ماشین استوانه‌ای گریز از مرکز عمودی و یا ماشین تیغه‌دار افقی وارد شده و همدیگر را می‌سایند تا با حذف خمیر سیمان چسبیده به سنگدانه‌ها، سنگدانه‌های بازیافت‌شده درشت و تمیز تولید شود. سپس، سنگدانه‌های ریز هم مشابه با سنگدانه‌هایی که اندازه کمتر از حد مشخص‌شده دارند، تولید می‌شوند [۱۴]. تکنیک شافت روتور گریز از مرکز (Eccentric-Shaft Rotor Method) نیز مانند حالت اول روش سایش مکانیکی است. در این روش، تکه‌های بتنی خردشده، بین یک استوانه خارجی و داخلی، به سمت پایین حرکت می‌کنند که استوانه داخلی، توسط نیروی گریز از مرکز، با سرعتی بالا به چرخش در آمده تا از طریق اثر خردسازی، توده‌های بتن را به سنگدانه درشت و ملات، تبدیل و سپس جداسازی کند [۹].

۳) گرمایش و سایش (Heating and Rubbing Method (HRM)):

در این روش، از تصفیه گرمایی بین دو خردساز اولیه و ثانویه استفاده می‌شود. هنگامی که ضایعات بتنی برای اولین بار خرد می‌شوند، دستگاه گرمایش بکار می‌رود تا باعث گرم شدن بتن تا دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس شود. در همین حین، ملات سیمان موجود در سطح بتن به دلیل عمل دهیدراتاسیون (آب‌زدایی)، شکننده شده و عمل چسبیدن سنگدانه‌ها به یکدیگر کاهش می‌یابد [۱۵]. بمنظور حذف خمیر سیمان از سطح سنگدانه‌ها، بتنِ داغ‌شده در یک آسیاب، توسط یکسری توپ‌های فولادی (که به عنوان مدیای محفظه شناخته می‌شوند) ساییده می‌شود. درجه سایش بر اساس مقدار مدیا یا سرعت چرخش آسیاب، متفاوت است. همچنین مشخص شده‌است که مقدار خمیر سیمان یا ملات، که کیفیت سنگدانه‌ها را تعیین می‌کند، توسط درجه سایش تغییر می‌کند؛ بنابراین کیفیت سنگدانه‌ها می‌تواند با تغییر مقدار مدیا یا سرعت چرخش آسیاب، کنترل شود.

در یک کارخانه بازیافت بتن تخریب‌شده، در ابتدا تکه‌های بتن که تا اندازه کمتر از ۵۰ میلی متر خرد شده‌اند، تا دمای ۳۰۰ درجه سلسیوس داخل یک آتش‌دان گرم می‌شوند. بتن گرمادیده به محفظه سایش ابتدایی فرستاده می‌شود. این محفظه، یک آسیاب تیوب‌مانند است که دارای استوانه‌های داخلی و خارجی است. در این محفظه، بتن گرمادیده توسط یکسری توپ‌های فولادی بعنوان مواد ساینده (مدیا)، ساییده شده و بمنظور افزایش بازده تصفیه توسط این آسیاب، ملات تولید شده از طریق صفحه‌ای که روی استوانه داخلی قرار دارد، تخلیه می‌شود. سپس سنگدانه‌های درشت بتن و ملاتِ حذف‌شده، وارد محفظه سایش ثانویه شده که سیمان چسبیده به سنگدانه‌های ریز، توسط خودِ سنگدانه‌های درشت (بعنوان مدیا) حذف شوند. تمام سنگدانه‌های موجود در آسیاب ثانویه، از یک صفحه لرزشی با منافذ ۵ میلی متر عبور داده شده تا سنگدانه‌های ریز و درشت از هم جداسازی شوند. گردهای ریزی که در آسیاب ثانویه تولید شده‌اند، توسط جریان هوا در صافی‌های پارچه‌ای، جمع‌آوری می‌شوند [۱۶].

٤) تغلیظ ثقلی (GravityConcentration Method):

در این روش، بعد از پردازش بتن تخریب‌شده با یک خردکننده فکی، یک خردکننده ضربه‌ای و یک دستگاه تقویت‌کننده؛ سنگدانه‌های بالای ۸ میلی‌متر به سنگدانه‌های بازیافت‌شده درشت و ذرات ملات تقسیم می‌شوند. سنگدانه‌های کمتر از اندازه ۸ میلی‌متر هم به دو دسته تقسیم می‌شوند: سنگدانه‌های بازیافت‌شده ریز ۵ میلی‌متری و ۸-۵ میلی‌متری. هدف دستگاه تغلیظ‌کننده ثقلی این است که بر اساس نیروی ثقل، مواد سنگین‌وزن (سنگدانه‌ها) را در زیر، و مواد سبک‌وزن (مثل ذرات ملات و چوب) را در بالای ذرات سنگین‌تر جمع کند [۱۷].

۵) جـایگزینی سـنگدانه (Aggregate Replacing Method):

زمانی که سنگدانه‌های بتنـی بازیافـت‌شـده، در سـاختمان وغیره بکـار مـی‌رونـد، کیفیـت مـورد نیـاز آن‌هـا معمـولاً بـا سنگدانه‌های طبیعی مانند شن برابر است. با این حال، بمنظـور تولید برخی سنگدانه‌های بازیافت‌شده، هزینـه تولیـد و میـزان انتشار گاز CO_2 ممکن است به شدت افـزایش پیـدا کنـد؛ در نتیجه، وسعت کاربرد این سنگدانه‌های بتنی محدود مـی‌شـود. جهـت ارتقـای کـاربرد سـنگدانه‌هـای بازیافـت‌شـده بتنـی، ضروریست تا تعادل مناسبی را میـان ۱) کیفیـت و امنیـت؛ ۲) مقرون بصرفه بودن؛ و ۳) اثر بر محیط زیست برقرار کـرد. بـه همین جهت، شرکت نیـروی بـرق توکیـو (TEPCO: Tokyo Electric Power Company) روش مـــذکور (جـــایگزینی سنگدانه) را مطرح کرده‌است که در آن، سنگدانه‌های طبیعی با سنگدانه‌های بازیافتی ترکیب شده و بتنی را با قابلیت‌های لازم تولید می‌کند. بعنوان مثال، روش گرمـایش و سـایش (HRM) می‌تواند سنگدانه‌های بازیافتی با کیفیت بالا را تولید کنـد؛ امـا در کنار آن، گرد ریز نیز تولید می‌شود که حاوی مقدار زیـادی از ملات اصلی می‌باشد. اگرچه چندین کاربرد برای ایـن گـرد گزارش شده؛ اما کنترل آن‌ها تحت شرایط حاضر، سخت بنظر می‌رسد چون که مسئله‌هایی در رابطه با کنترل کیفیتشان مطرح است. بنابراین، تکنیک‌ها و تسـهیلات پـردازش پیشـرفته‌تـری برای استفاده دوباره از این گردها نیاز است تـا اثـرات محـیط زیستی مرتبط، کاهش یابد. به همین دلیـل، روش «جـایگزینی سنگدانه‌ها» که ملات اصلی را از سنگدانه جدا نمی‌کند، مـؤثر واقع می‌شود [۱۸].

۶) بازیافت آسان بتن (Easy Concrete Recycling):

تکنیکی که با عنوان «بازیافت آسان بتن» معرفی شده، یـک فرآیند ساده‌ایست کـه «عامـل پیشـرفت سـطح» (مثـل روغـن معدنی و ترکیبات سیلیکونی) را به سنگدانه‌هـای بـتن اعمـال می‌کند. برای ایجاد یک پوشش روی سطح سنگدانه‌ها، «عامـل پیشرفت سطح» با غلظتی مشخص بـا آب مخلـوط شـده و از طریق چرخه اسپری کردن و خشک‌سازی، روی سنگدانه‌هـای بتن قرار می‌گیرد (برای ایجاد یک پوشش پایـدار، تکـرار ایـن چرخه تا ۴ مرتبه مورد نیاز است). این تکنیک، اثر لایه‌برداری سنگدانه‌ها از ماتریس سیمان را (بدون تضـعیف خصوصـیات مکانیکی و کاهش حداکثر جذب آب توسط دانه‌هـا) افـزایش می‌دهد [۱۹].

۷) بازیافت شیمیایی (Chemical Recycling):

تکنیک‌های بازیافتی که شامل واکنش‌های شیمیایی هستند، در سال‌های اخیر توسعه یافتـه و مـی‌تواننـد باعـث پیشـرفت توانایی بازیافت بتن شوند. تئوری این تکنیک‌ها برای بازیافت و استفاده مجـدد از ضـایعات بتنـی بـا اسـتفاده از روش‌هـای شیمیایی، مایل به بهبودی خصوصـیات ضـایعات بتنـی اسـت. بتن، حاوی ۷۰ درصد سنگدانه و ۳۰ درصـد سـیمان هیدراتـه است. سنگدانه‌ها شامل سنگ‌ها و شن‌های کوچکی هستند که تقریبـاً واکـنش‌ناپذیرنـد. بخـش سـیمان هیدارتـه، متشـکل از ترکیبات قلیـایی کلسـیم؛ ماننـد $Ca(OH)_2$، کلسـیم سـیلیکات هیدراته و دیگر مواد است. ترکیبات موجود در بخـش سـیمان هیدراته، می‌تواند توسط واکنش‌های شـیمیایی مفیـدی، مـورد استفاده قرار بگیرد؛ از جمله واکـنش پـوزولانی (Pozzolanic Reaction)، شکل‌گیری کلسیم هیدروکسی‌آپاتیـت (Calcium Hydroxyapatite Formation) و واکـــنش ســـولفورزدایی (Desulfurization Reaction) [۴].

۸) تولید ژئوپلیمر (Geo-polymer Production):

ژئوپلیمر، یک ماده سیمانی جدید معدنی و غیرفلزی است که در سال‌های اخیر توسعه یافته است. این ماده، شـامل یـک شبکه سه‌وجهی از پلیمرهای سیلیکا تتراهِـدرون و آلومینیـوم اکسید تتراهِدرون است و از مواد معـدنی طبیعـی، مـواد زائـد جامد و یا ترکیبات سیلیکون–آلومینیوم ساخته می‌شود وتوسط

فعال‌سازهای قلیایی، فعال می‌شود.

این ماده، عمدتاً در صنایع برای مواد زائد سمی و ضایعات هسته‌ای استفاده می‌شود. ماده اولیه برای ساخت این ژئوپلیمر، معمولاً متاکائولین است که این ماده با محلول‌های فعال‌ساز قلیایی (مانند مخلوط سود با پتاس، و یا سدیم سیلیکات با پتاسیم سیلیکات) مخلوط شده تا به شکل یک ماده آبکی در آید. سپس قالب‌ریزی و حفاظت می‌شود تا سختی لازم را کسب کند. معمولاً ماده آلومینوسیلیکات طبیعی و مصنوعی نیز می تواند تحت واکنش با قلیاهای قوی، هیدرولیز شده و تشکیل هیدرات های پایدار بدهد. این ماده نیز می تواند بعنوان ماده اولیه برای تولید ژئوپلیمر استفاده شوند. بنابراین، بسیاری از مواد زائد جامد؛ مانند خاکستر فرار، تفاله، پسماند زغالسنگ و ضایعات بتنی (در قالب پودر یا سنگدانه‌های ریز) نیز می‌توانند بعنوان مواد اولیه برای تولید این ژئوپلیمر به کار روند [۲۰].

۹) گرمایش توسط امواج ماکروویو (Microwave Heating Method):

بازیافت بتن بوسیله گرمایش با امواج مایکروویو، یک تکنولوژی کاملاً جدید است. ترکیبات مخلوط (مانند مواد پوزولانی)، باعث تقویت پیوند شیمیایی و اصطکاک مکانیکی در بین سطح سنگدانه‌های موجود شده و بنابراین، چون که عملکرد مکانیکی بتن تقویت می‌شود؛ سنگدانه‌های بازیافت‌شده درشت می‌توانند برای بتن‌های سازه‌ای بازیافت شوند. این تکنیک، شامل پوشش دهی (Coating) سنگدانه‌های درشت با اکسید فریک (Fe_2O_3) که ثابت دی‌الکتریک بالایی دارد) بعنوان ترکیب محصورکننده و سپس، گرمایش و تضعیف سطح مشترک سنگدانه‌ها توسط امواج مایکروویو برای تولید سنگدانه‌های بازیافت‌شده درشت است. این تکنیک، امکان بازیافت کامل سنگدانه‌ها را بوسیله بازیافت سنگدانه‌های بازیافت‌شده درشت باکیفیت، آن هم با مصرف کم انرژی فراهم می‌آورد [۲۱].

۱۰) پروژه «بتن به سیمان و سنگدانه» (C2CA: Concrete to Cement and Aggregate):

در C2CA، بعد از خردکردن ضایعات بتنی، عمل سایشِ خودبخودی (توسط سنگدانه‌ها) به کار می‌رود تا ملات از سطح سنگدانه‌ها جدا شود (حذف این ملات از سطح سنگدانه‌ها، یکی از مراحل کلیدی برای پیشرفت مقاومت مکانیکی سنگدانه‌هاست). بعد از این مرحله، یک تکنولوژی کم‌هزینه بر پایه طبقه‌بندی کردن، به نام Advanced Dry Recovery (ADR) به کار می‌رود تا آلاینده‌ها و ذرات ریز و سبک معدنی ۴ تا ۱ میلی متری را حذف کند (این مرحله، یک تکنولوژی کلیدی در C2CA است که در ادامه، به آن پرداخته شده‌است). ADR بوسیله انرژی جنبشی، پیوندهایی را که توسط رطوبت و ذرات ریز ایجاد شده را می‌شکند و مواد را تقریباً مستقل از میزان رطوبتشان طبقه‌بندی می‌کند و در پایان کار، ذرات ریز را از درشت جدا می‌کند [۲].

٤- بحث

٤-١ نکات روش‌ها و دستگاه‌های بازیافت ضایعات بتنی

۱) دستگاه متحرک (Mobile plant):

مزایای دستگاه متحرک: روشی مناسب برای محل‌های تخریب با مقادیر بالای ضایعات ساختمانی؛ روشی به صرفه برای مقادیر بین ۵۰۰۰ تا ۶۰۰۰ تن ضایعات به ازای هر محل تخریب؛ هزینه‌های دفن، به دلیل کمتر شدن تلنبار این ضایعات، کاهش می‌یابد؛ دستگاه متحرک، نسبتاً به آسانی می‌تواند به محل دیگر منتقل شود. معایب دستگاه متحرک: تسهیلات لایروبی محدودی در کاربرد این نوع از دستگاه‌ها وجود دارد، بنابراین محصولات بازیافت‌شده معمولاً دارای کیفیت پایینی هستند؛ این دستگاه، باعث ایجاد سطح بالایی از گردوخاک و سروصدا شده که این امر، برای محل‌های نزدیک

به مناطق مسکونی، غیرقابل پذیرش است. این دستگاه فقط زمانی می‌تواند استفاده شود که برای توجیه هزینه بکارگیری آن، مقدار کافی خرده‌سنگ در محل وجود داشته باشد.

۲) دستگاه ثابت (Stationary plant):

مزایای دستگاه ثابت: برای بازیافت در مناطق پرتراکم، مناسب است؛ هزینه‌های دفن، به دلیل کاهش تلنبار ضایعات، کاهش می‌یابد؛ این دستگاه قادر است تا محصولی با کیفیت بالا را تولید کند؛ کارایی این دستگاه نسبت به نوع متحرک آن، به دلیل وجود طیف دسته‌بندی‌شده محصولات بازیافت‌شده تولیدی، بهتر است.

معایب دستگاه ثابت: هزینه سرمایه‌گذاری چنین دستگاه‌هایی، بالاست؛ هزینه حمل‌ونقل ضایعات (به دلیل وجود فاصله بین محل تولید و دستگاه) ممکن است قابل توجه باشد؛ این دستگاه می‌تواند سطح بالایی از سروصدا را بهمراه داشته باشد؛ کارایی این دستگاه، بستگی به میزان خرده‌سنگ‌هایی که در محل تخریب موجود است، دارد [۹].

۳) خردسازی مکانیکی (Mechanical Grinding Method):

تحقیق بر روی ضایعات بتنی، ابتدا در روسیه اتفاق افتاد. از سال ۱۹۸۰ میلادی، ۴۰ میلیون تن از ضایعات بتنی در روسیه بازیافت شد. دو خردساز چرخشی در فرآیند خردسازی‌شان وجود داشت که می‌توانست بلوک‌های بتنی را به سه نوع سنگدانه با اندازه ذرات متفاوت خرد کند. بعلاوه، دستگاه جداساز مغناطیسی نیز در این فرآیند نصب شده بود که می‌توانست بطور مؤثری، آهن را از سنگدانه‌ها جدا کند. با این حال، این فرآیند، نیازمند تجهیزات مکانیکی متنوعی است که باعث افزایش هزینه سرمایه‌گذاری نهایی می‌شود. کشور آلمان، تجهیزات تولید موجود را ارتقاء داد و همچنین فرآیند تولید بتن با کیفیت بالا را نیز به کار بست. این فرآیند خردسازی، مشابه همان فرآیند در روسیه است و دو خردکن فکی و چهار غربالگر در آن استفاده شده تا بتن را به چهار درجه سنگدانه با اندازه ذرات متفاوت جدا کند [۱۳].

هنگامی که کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی تولیدشده توسط چنین تجهیزاتی، با افزایش تعداد پروسه‌های تصفیه‌ای، افزایش می‌یابد؛ درصد بازیافت سنگدانه‌های بازیافتی، بدلیل افزایش میزان تولید محصولات جانبی (مثل گردهای ریز (Fine Powders)) ناشی از خردشدن سنگدانه‌ها توسط خودشان، کاهش می‌یابد. برای تولید مناسب سنگدانه‌های بازیافت‌شده باکیفیت، دستگاه‌های مخصوصی مورد نیاز است. تجهیزات مناسب برای تولید این سنگدانه‌های باکیفیت، در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند و کاردبرد عملی دارند [۱۴]. فناوری موجود برای تولید سنگدانه‌های بازیافتی از ضایعات ساختمانی بوسیله خردکردن مکانیکی، روشی نسبتاً ارزان و در دسترس است؛ بنابراین، فرآیند تبدیل ضایعات ساختمانی به سنگدانه‌های بازیافت‌شده می‌تواند هم در کشورهای توسعه‌یافته و هم در کشورهای درحال‌توسعه انجام شود [۱۱].

٤) سایش مکانیکی (Mechanical Scrubbing Method):

درصد کیفیت و بازیافت این سنگدانه‌ها، غالباً بستگی به نوع سنگدانه اصلی دارد؛ اما اجرای آزمایشی این دستگاه، نشان داده‌است که سنگدانه‌های بازیافت‌شده، استانداردهای لازم برای داشتن کیفیت بالا را تأیید کرده‌اند. بنابراین، استفاده از سنگدانه‌های حاصل از این دستگاه، محدود به کاربردهای جزئی نمی‌شود؛ چون کیفیت این سنگدانه‌ها برای استفاده در بتن‌های ساخت‌وساز، تضمین شده‌است [۱۴].

۵) گرمایش و سایش (Heating and Rubbing Method (HRM)):

این روش، یک فناوری جدید برای تولید سنگدانه با کیفیت بالا از بتن تخریب‌شده است. با استفاده از این فناوری، سنگدانه‌های بتن می‌توانند بعنوان مواد خام برای بتن آماده،

استفاده شوند؛ در حالی که سنگدانه‌های ریزتر آن‌ها می‌توانند بعنوان مواد خام برای سیمان و یا تثبیت‌کننده خاک استفاده شوند. این روش برای استفاده در سیستم بازیافت بتن پیشنهاد شده‌است. در حالی که تولید سنگدانه‌های بتن بازیافت‌شده با روش HRM، سوخت بیشتری را جهت گرمایش و برق برای مرحله سایش مصرف می‌کند؛ تجزیه و تحلیل‌ها نشان داده‌است که استفاده از این روش می‌تواند انتشار گاز کربن دی‌اکسید (CO_2) را کاهش دهد.

میانگین سهم بازیافت سنگدانه‌های بتنی و تولید گردهای ریز نسبت به بتن اصلی بر اساس وزن، به ترتیب شامل ۳۵ درصد برای سنگدانه‌های درشت، ۳۰ درصد برای سنگدانه‌های ریز و ۳۵ درصد برای گردهای ریز است. ارزیابی کیفیت سنگدانه‌های بازیافت‌شده توسط روش HRM، بر اساس استاندارد JTS A 5308 می‌باشد و عملکرد آن نیز با بتن معمول قابل مقایسه است. در مورد استفاده از گردهای تولید شده توسط روش HRM، محققین مدعی شدند از آنجایی که قابلیت جذب آب توسط این گردها قابل توجه است، می‌تواند بعنوان تثبیت‌کننده خاک استفاده شود. این روش، در کاهش انتشار گاز CO_2 بسیار مؤثر بوده و مطابق با پروتکل کیوتو می‌باشد [۱۶].

۶) جایگزینی سنگدانه (Aggregate Replacing Method):

مزایای این روش این است که روش تولید، آسان است و سنگدانه‌های بازیافت‌شده می‌توانند برای اهداف مختلفی تولید شوند. با استفاده از این روش، ۷۳-۵۵ درصد از کل ضایعات بتنی به سنگدانه‌های درشت تبدیل شده و می‌توان از آن‌ها بعنوان بتن ساخت‌وساز استفاده کرد. ۴۵-۲۷ درصد باقیمانده نیز میتواند بعنوان سنگدانه‌های ریز بازیافت‌شده، برای تولید محصولات بتنی پیش‌ساخته استفاده شود. بعلاوه، از آنجایی که سنگدانه‌های ریز بازیافت‌شده دارای مقادیر زیادی از ملات اصلی است و این امر باعث افت قابل توجه کیفیت بتن می‌شود، یک فرآیند تصفیه با خردکن مرطوب به چرخه اضافه می‌شود تا کیفیت سنگدانه‌ها را افزایش دهد. در ضمن، انتشار گاز CO_2 این روش نیز نسبت به دفن ضایعات در لندفیل، ۲۸-۲۳ درصد است [۱۸].

۷) بازیافت آسان بتن (Easy Concrete Recycling):

سیستم‌های بازیافت بتن، در حال حاضر تحت آگاهی‌های بالای زیست محیطی و فشار تقاضا برای بازیافت ضایعات، بطور قابل توجهی پیشرفت کرده‌اند. در جهت پایه‌ریزی کردن یک اجتماع «مایل به بازیافت»، فرآیندهایی که به تکنیک‌های پیشرفته‌ای؛ مانند تصفیه گرمایی و روش سایش نیاز دارند، هنوز با موانعی روبرو هستند؛ مانند صرفه‌جویی در انرژی و سرمایه، و تصفیه محصولات جانبی فرآیند (مانند گردهای ریز تولیدشده). روش بازیافت آسان بتن، با استفاده از «عامل پیشرفت سطح»، مصرف انرژی را نسبت به روش‌های بازیافت معمول کاهش داده و محصولات جانبی نیز تولید نخواهد کرد [۱۹].

۸) بازیافت شیمیایی (Chemical Recycling):

مواد ساخته‌شده از ضایعات بتنی می‌توانند برای اصلاح محیط زیست (تصفیه آب، تصفیه گازهای مختلف، کاهش انتشار گاز CO_2 در اتمسفر وغیره) و بعنوان مصالح ساختمانی استفاده شوند. روش‌هایی که در بازیافت شیمیایی به کار می‌رود باید خلاصه شوند تا مکانیسم واکنش‌ها، شفاف‌تر و باعث ابتکار در این رشته شود و همچنین به توسعه بازیافت شیمیایی ضایعات بتنی کمک کند (جزئیات روش‌های بازیافت شیمیایی ضایعات بتنی را می‌توانید در منبع بیابید) [۴].

۹) گرمایش توسط امواج ماکروویو (Microwave Heating Method):

مدیریت ضایعات بتنی، یک مسئله اساسی برای اجتماعاتی-

ست که با مفهوم «3Rs» (کاهش در مبدأ (Reduce)، استفاده مجدد (Reuse) و بازیافت (Recycle)) موافق‌اند. به دلیل کاهش یافتن منابع طبیعی و فقدان فضای کافی برای دفع ضایعات، تجمع و ذخیره بتن بصورت توده‌های عظیم نمی‌تواند راه‌حلی طولانی‌مدت باشد. بدین جهت، تحقیقات بر روی سنگدانه‌های بازیافت‌شده، از زوایای مختلفی در سراسر جهان در حال انجام است. با این حال، هنوز مسائلی پیرامون تولید سنگدانه‌های بازیافت‌شده باکیفیت؛ مثل مصرف زیاد انرژی و تولید مقادیر بالای گردهای ریز حین فرآیند خردسازی، وجود دارد. از طرفی دیگر، استفاده از سنگدانه‌های کم‌کیفیت، می‌تواند عملکرد بتن را کاهش دهد که این امر، مانع استفاده از سنگدانه‌های بازیافت‌شده بصورت گسترده می‌شود. از آنجایی که منابع طبیعی سنگدانه‌ها محدود است، یک مکانیسم کارآمد و مطمئن برای بازیافت بتن با مصرف کم انرژی ضروریست که این روش، تا حد بسیاری توانسته به این مهم دست یابد [۲۱].

۱۰) پروژه «بتن به سیمان و سنگدانه» (C2CA: Concrete to Cement and Aggregate)؛

پروژه C2CA، در واقع یک پروژه اروپایی است که روی توسعه تکنولوژی‌های پیشرفته برای تبدیل بتن تخریب‌شده به سنگدانه‌ها و سیمان تمیز، متمرکز شده. هدف اصلی، توسعه یک تکنولوژی پردازش است که در کنار تولید بتن باکیفیت و دوستدار محیط زیست، از لحاظ اقتصادی به صرفه بوده و اثر نامطلوبی بر روی محیط زیست هم نداشته باشد [۵].

بمنظور کاهش هزینه و امکان ارسال فوری سنگدانه‌های بازیافتی تولیدشده به شرکت‌های تولید بتن، پروژه C2CA دو نوع سنسور را برای کنترل آنلاین کیفیت و تضمین کیفیت توسعه داده است. دو هدف اصلی روش C2CA، شامل پردازش درمحل و استفاده مجدد محلی از سنگدانه‌ها و کمک به کاهش انتشار CO_2 در تولید سیمان است که با تغلیظ بخش سیمانی ضایعات بتنی و جداسازی آن، می‌توان از آن بعنوان ماده اولیه جایگزین سنگ آهک استفاده کرد. محصولات حاصل از بازیافت را می‌توان بدون هیچ محدودیتی، در تولید بتن‌های بازیافتی با کیفیت بالا به کار برد [۲].

برای بازیافت بتن‌های مستعمل به بهترین صورت، انجام دسته‌بندی دقیق ذرات بر اساس اندازه‌شان ضروریست. با این حال، دسته‌بندی ذرات ریز (۰-۱۲ میلی‌متر) به دلیل رطوبتی که در این ضایعات بطور معمول وجود دارد، چالش‌برانگیز است. برای کاهش رطوبت موجود در مواد، انرژی زیادی مصرف می‌شود و همچنین روش‌هایی که با رطوبت کار می‌کنند، در آخر با حجم زیادی از لجن مواجه هستند. همچنین تکنولوژی‌هایی که با حرارت و رطوبت سروکار دارند، تجهیزات پردازش نسبتاً پیچیده‌ای را دارا هستند که این امر باعث می‌شود تا راه‌اندازی این روش‌ها بصورت درمحل، مشکل شود؛ بنابراین، روشی که بتواند دسته‌بندی مستقیم را بصورت خشک انجام دهد، مورد نیاز است. معمولاً بیشتر رطوبت، در ذرات ریز ضایعات بتنی (۰-۱ میلی‌متر)، وجود دارد. این ترکیب، بیشترین رطوبت موجود در ضایعات بتنی را داراست و باعث چسبناکی کل ترکیبات می‌شود؛ بنابراین، برای ممکن کردن عمل صاف‌سازی ترکیبات دیگر، نیاز است تا ترکیبات ابتدایی (مخلوط رطوبت با ذرات ۰-۱ میلی‌متری) حذف شوند. علاوه بر این، با حذف ترکیبات مضر و آلاینده‌ها، سنگدانه‌های تمیزتر و باکیفیت‌تری تولید می‌شود. به این منظور، تکنولوژی ADR توسعه یافته‌است. این روش، اجازه می‌دهد تا عمل دسته‌بندی ذرات تا ۱ میلی‌متر، بدون افزودن آب انجام بگیرد و بنابراین از مصرف مقدار زیادی از آب، جلوگیری می‌شود. آزمایشات ADR در مقیاس پایلوت با بازدهی ۱۲۰-۴۰ تن بر ساعت، نشان داد که با این روش می‌توان ۸۰ درصد از بتن‌های مستعمل را به سنگدانه‌های باکیفیت بازیافت کرد [۵].

۲-٤ خصوصیات و کاربرد محصولات حاصل از بازیافت ضایعات بتنی

بطور معمول، محصولات حاصل از ضایعات بتنی؛ شامل «سنگدانه‌های درشت (RCA)، سنگدانه‌های ریز (RFA) و گردهای ریز (FP)» هستند.

۱) سنگدانه‌های بازیافت‌شده درشت (RCA: Recycled Coarse Aggregate)؛ سنگدانه‌های بزرگتر از ۴/۷۵ میلی‌متر که برای آماده‌سازی بتن استفاده می‌شوند، سنگدانه‌های بازیافت‌شده درشت خوانده می‌شوند. کاربرد این نوع از سنگدانه‌ها (علاوه بر موارد ذکرشده)، غالباً برای آماده‌سازی دانه‌های بتن سنگ‌فرش و پیاده‌روها و یا بعنوان مواد خام با مقاومت پایین برای آجر و بلوک است. بمنظور ارتقای میزان مصرف سنگدانه‌های بازیافت‌شده، ضروریست تا خصوصیات این مواد تقویت یابد. روش‌های اصلاح‌سازی موجود برای سنگدانه‌های بازیافت‌شده درشت؛ شامل مقاوم‌سازی شیمیایی، نانویی و بیولوژیکی، شکل‌دهی ذرات وغیره است.

۲) سنگدانه‌های بازیافت‌شده ریز (RFA: Recycled Fine Aggregate)؛ بعد از خردسازی، سنگدانه‌هایی که اندازه ذرات کوچک‌تر از ۴/۷۵ میلی‌متر دارند را جزو سنگدانه‌های بازیافت‌شده ریز قرار می‌دهند. این نوع از سنگدانه‌ها، اغلب بعنوان محصولات جانبی فرآیند اصلاح‌سازی مکانیکی سنگدانه‌های نوع اول هستند؛ بعنوان مثال، حین فرآیند شکل‌دهی سنگدانه‌های بازیافت‌شده درشت، خروجی (مقدار) سنگدانه‌های بازیافت‌شده ریز حتی بیشتر از نوع درشت است. این نوع از سنگدانه‌ها، اساساً محصولات خردشده‌ای از ملات سیمان در ضایعات بتنی هستند و معمولاً در آماده‌سازی ملات بازیافت‌شده استفاده می‌شوند. بمنظور ارتقای عملکرد این سنگدانه‌ها، یک روش خردسازی ضایعات بتنی بازیافت‌شده به سنگدانه‌های بازیافت‌شده ریز پیشنهاد می‌شود.

۳) گردهای ریز (FP: Fine Powders)؛ این گردها، طی چندین مرحله خرد کردن و غربال‌گری ضایعات بتنی بدست می‌آیند و اندازه ذراتشان هم کوچک‌تر از ۰/۱۶ میلی‌متر است. همچنین در فرآیند آماده‌سازی سنگدانه‌های بازیافت‌شده، ضربات مکانیکی ناشی از خردسازی، غربال‌گری، مقاوم‌سازی و دیگر فرآیندها باعث تولید این گردها می‌شوند. این گردها، معمولاً بعنوان ترکیبات معدنی استفاده می‌شوند. خصوصیات مکانیکی و طول عمر بتن می‌تواند با جایگزینی بعضی از مخلوط‌های معدنی (مثل خاکستر فرار یا پودرهای معدنی) با این گردها، ارتقاء یابد [۱۳].

استفاده از ضایعات بتنی در قالب سنگدانه‌های بازیافت‌شده، معمولاً محدود به کاربردهایی است که در آن‌ها از سنگدانه‌های کم‌کیفیت استفاده می‌شود (مانند سنگ‌فرش‌ها، جداول وغیره)؛ بعنوان مثال، در ایالات متحده، ضایعات بتنی (عمدتاً حاصل از تخریب ساختمان‌های قدیمی) بطور عمده به سنگدانه‌های بتنی، بازیافت و بصورت گسترده در خاکریزی‌های مجدد و پایه‌ریزی جاده‌ها بکار گرفته می‌شوند و استفاده از سنگدانه‌های بتنی بازیافت‌شده درشت (RCA) در تولید بتن جدید، هنوز محدود است؛ اما تکنولوژی‌های مورد بحث در این مطالعه، می‌توانند باعث افزایش کیفیت سنگدانه‌های بازیافت‌شده شوند و بنابراین می‌توان از این سنگدانه‌ها، در مصارف بهتر و بیشتری استفاده کرد؛ حتی در کاربردهایی که نیاز به سنگدانه‌هایی با کیفیت بالا دارند [۱۰].

این نکته نیز حائز اهمیت است که بکارگیری یک تکنولوژی برای بازیافت که مقدار قابل ملاحظه‌ای انرژی مصرف می‌کند، خودش اثر محیطی دیگری را ایجاد می‌کند (مانند انتشار گاز CO_2). بازیافت صحیح، باید چنین سناریوهایی را برطرف کند. بمنظور بازیافت بتن در یک سیستم بسته، ضروریست تا اعتبار روش موجود تولید سنگدانه‌های بازیافت‌شده، مورد بررسی مجدد قرار گیرد و مسائلی که از بازیافت کامل مواد در یک سیستم بسته

جلوگیری می‌کنند، برطرف شوند. برای حل چنین مسئله‌ای، مهم است که یک تکنولوژی جهت افزایش قابلیت حفاظت از منابع بتن و اجزای تشکیل‌دهنده‌اش در مرحله طراحی محصولات و سازه‌ها اتخاذ شود [۱۴].

۵- نتیجه‌گیری

با وجود اینکه مسئله حفاظت از محیط زیست در سرتاسر جهان تأکید شده‌است، به نظر می‌رسد که کنترل آلودگی تولیدشده از فعالیت‌های ساخت‌وساز مشکل باشد؛ چون تولید ضایعات، عنصر اصلی تولید آلودگی است. برای کنترل تولید ضایعات، سه راهکار کاهش در مبدأ، استفاده مجدد و بازیافت مواد ساختمانی توصیه شده‌است. با این حال، روش‌های بازیافت ضایعات با محدودیت‌هایی که پیش رو دارند آنچنان که باید و شاید، مورد استقبال قرار نگرفته‌اند [۲۲].

در مطالعه حاضر، با توجه به افزایش روزافزون حجم تولیدی ضایعات بتنی، اثرات محیطی ناشی از دفع نامناسب این ضایعات و اهمیت بازیافت آن‌ها، روش‌هایی برای بازیافت این مواد مطرح شده که کاربردشان با توجه به نوع کاربرد مورد انتظار برای محصولات، تعیین خواهد شد. با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد بکاررفته در روش‌های مذکور بازیافت ضایعات بتنی (جدول ۱)، مواد حاصل از تمامی این روش‌ها از کیفیت بالایی برخوردار بوده؛ اما در کاربردهایی که بتن نقش حیاتی را ایفا می‌کند (مانند ساختمان‌سازی)، انتخاب روش بازیافت باید با دقت بیشتری انجام شود.

جدول (۱): پارامترهای مهم روش‌های بازیافت ضایعات بتنی

ردیف	نام روش	ویژگی‌ها
۱	خردسازی مکانیکی	بکارگیری همزمان تیغه و گلوله‌های آهنی جهت خردسازی بهتر بتن.
۲	سایش مکانیکی	استفاده از نیروی گریز از مرکز جهت حذف خمیر سیمان از سطح سنگدانه توسط خودِ ذرات.
۳	گرمایش و سایش	جداسازی ملات سیمان از سنگدانه‌ها توسط تصفیه گرمایی؛ کاهش میزان انتشار CO_2 به اتمسفر نسبت به روش‌های مشابه.
۴	تغلیظ ثقلی	استفاده از دستگاه تفکیک‌کنندهٔ نهایی بعد از واحدهای خردکننده، جهت افزایش درصد خلوص سنگدانه‌های تولیدی درشت و ریز.
۵	جایگزینی سنگدانه	افزایش کیفیت سنگدانه‌های ریز توسط واحد تصفیهٔ مرطوب؛ ترکیب بتن بازیافت‌شده با بتن اصلی جهت کاهش مصرف مواد خام.
۶	بازیافت آسان بتن	افزودن ترکیبات روغنیِ معدنی و سیلیکونی به سطح سنگدانه‌ها جهت جداسازی ملات سیمان، بدون تضعیف مقاومت سنگدانه.
۷	بازیافت شیمیایی	استفاده از واکنش‌های شیمیایی جهت تغییر در ترکیب ملات سیمان و در نتیجه، جداسازی ملات از سطح سنگدانه.
۸	تولید ژئوپلیمر	خردسازی بتن، جداسازی ملات سیمان از سطح سنگدانه و در نهایت، استفاده از آن به عنوان ماده اولیه جهت تولید ژئوپلیمر.
۹	گرمایش توسط امواج ماکروویو	بازیافت سنگدانه‌های با کیفیت بالا و افزایش خاصیت چسبندگی‌شان از طریق پوشش‌دهی سنگدانه توسط اکسید فریک و سپس گرمایش آن توسط امواج ماکروویو؛ مصرف انرژی بسیار کمتر از سایر روش‌ها.
۱۰	پروژهٔ «بتن به سیمان و سنگدانه»	دسته‌بندی دقیق سنگدانه‌ها جهت بازیافت جداگانه؛ استفاده از سنسورهای کنترل کیفیت بتن؛ صرفه‌جویی در مصرف آب و در نتیجه، کاهش تولید لجن و فاضلاب؛ کاربرد بتن بازیافت‌شده، بدون هیچ محدودیتی.

در کنار این مسئله، یک برنامه موفق مدیریت ضایعات ساختمانی نیز باید طرح شود بطوریکه تمام افراد اصلی یک پروژه را شامل شود؛ از جمله مالک، معمار، مهندس، پیمانکار وغیره. با شرکت دادن به موقع هر کدام از این افراد در پروسه طراحی، امر دستیابی به اهداف تعیین‌شده، آسان‌تر خواهد بود؛ بعنوان مثال، برنامه مدیریت ضایعات ساختمانی، باید از پیمانکار درخواست کند که در مقدار ضایعات تولیدی، کمینه‌سازی صورت گیرد و راه‌هایی را جهت استفاده دوباره از مصالح موجود توسعه دهد، و معمار هم باید با زیربنای مدیریت محلی ضایعات آشنا بوده و یک هدف مدیریت ضایعات را برای پیمانکار، بنا نهد. سیستم‌های سنجش طراحی دوست‌دار محیط زیست و مقرراتی معقول باید برای ارتقای بازیافت بتن، بنا شود. بازیافت بتن، یکی از مهم‌ترین عناصر برای پایداری ساخت‌وساز خواهد شد [۹].

در خصوص تضمین کیفیت مواد بازیافت‌شده در مناطق دارای شرایط نیز، شرکت‌های ساخت‌وساز باید تشویق شوند تا در فرآیند تولیدشان، محصولات بازیافت‌شده را جایگزین مواد خام کنند. همچنین نیاز است تا قوانین و آیین‌نامه‌هایی مرتبط با بازیافت ضایعات ساخت‌وساز تصویب شود و توسط دولت، ارتقا یابد. تکنولوژی دسته‌بندی ضایعات ساخت‌وساز و مدیریت آن‌ها نیاز است که ارتقاء یابد تا کیفیت مواد قابل بازیافت را افزایش دهد و توسعه صنایع مرتبط را تضمین کند [۱۳].

با نگاه به تغییراتی که در کلان‌شهرهای ایران و اطراف آن‌ها در دهه‌های اخیر ایجاد شده، مشخص می‌شود که صدمات وارده به محیط زیست از طرف صنایع ساخت‌وساز، در حال گسترش است که اگر تحقیقات و برنامه‌ریزی‌های لازم به تعویق افتد، ممکن است جبران این خسارات ناممکن شود. بنابراین، این امر کاملاً ضروریست که باید رَویه موجود را تغییر داد تا حفاظت از محیط زیست و محقق شدن توسعه پایدار، تضمین شود. پیشنهادهای اصلی برای پیشرفت بازیافت و استفاده مجدد از ضایعات ساختمانی؛ شامل تخریب ساختمان‌ها بصورت مناسب‌تر و صحیح‌تر، بازنگری در روش‌های ساخت‌وساز موجود با توجه به روش‌های جایگزین ساده که قابل انطباق با قابلیت‌های صنایع کشور هستند، و تشویق به طراحی برای بازسازی با در نظر گرفتن پتانسیل‌های معماری بومی است. ابزارهای اصلی برای رسیدن به این اهداف؛ شامل حمایت دولت، افزایش آگاهی عمومی، تأسیس سیستم اداری ملی برای مواد بازیافت‌شده، تصویب قوانین مربوطه (مثل افزایش هزینه دفن و یا ممنوعیت آن) و تشویق به تحقیق جهت ابداع روش‌های ساخت‌وساز در قالب بازسازی‌های آینده در جهت قابلیت‌های محلی و معماری بومی است [۱۲].

References

1. Bu C, Liu L, Lu X, et al. The Durability of Recycled Fine Aggregate Concrete: A Review. Mater 2022; 15(3).
2. Lotfi S, Eggimann M, Wagner E, et al. Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology. Constr Build Mater 2015;95: 243-56.
3. Xing W, Tam VWY, Le KN, et al. Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review. Constr Build Mater 2022;317: 125950.
4. Ho H-J, Iizuka A, Shibata E. Chemical recycling and use of various types of concrete waste: A review. J Clean Prod 2021;284: 124785.
5. DiMaio F, Rem P, Lofti S, et al. Cement and Clean Aggregates from CDW: The C2CA Project. 27th International Conference on Solid Waste Technology and Management2012 .p. March 11-4, 2012.
6. Badraddin AK, Radzi AR, Almutairi S, Rahman RA. Critical Success Factors for Concrete Recycling in Construction Projects. Sustain 2022; 14(5).
7. de Andrade Salgado F, de Andrade Silva F. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. J Build Eng 2022;52: 104452.
8. Kelayeh IM, Mounesan AA, Siamardi K, Khodavirdi Zanjani MM. Waste Cement and Concrete Management as Cost-effective and Environment Friendly: Principles and Perpectives. The 3rd international conference on concrete and development; Tehran: undefined; 2009.
9. Kumbhar S, Gupta A, Desai D. Recycling and reuse of construction and demolition waste for sustainable development. Int J Sustain Dev 2013; 6(7): 83-92.
10. Jin R, Chen Q. Investigation of Concrete Recycling in the U.S. Construction Industry. Procedia Eng 2015;118: 894-901.
11. Tam VWY, Soomro M, Evangelista ACJ. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). Constr Build Mater 2018;172: 272-92.
12. Saghafi M, H. Teshnizi ZS. Building Deconstruction and Material Recovery in Iran: An Analysis of Major Determinants. Procedia Eng 2011;21: 853-63.
13. Ai W, Liu H, Zhang J, et al. Research on crushing and recycling of waste concrete. IOP Conf Ser Earth Environ Sci 2020;446: 32-69.
14. 1Noguchi T, Kitagaki R, Tsujino M. Minimizing environmental impact and maximizing performance in concrete recycling. Struct Concr 2011;12.
15. Kalinowska-Wichrowska K, Pawluczuk E, Bołtryk M. Waste-free technology for recycling concrete rubble. Constr Build Mater 2020;234: 117407.
16. Shima H, Tateyashiki H, Matsuhashi R, Yoshida Y. An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis. J Adv Concr Technol 2005;3: 53-67.
17. Tam VWY. Chapter 24 - Recovery of Construction and Demolition Wastes. In: Worrell E, Reuter MA, editors. Handbook of Recycling. Boston: Elsevier; 2014. p. 385-96.
18. Dosho Y. Development of a Sustainable Concrete Waste Recycling System

    -Application of Recycled Aggregate Concrete Produced by Aggregate Replacing Method. J Adv Concr Technol 2007;5(1): 27-42.
19. Tsujino M, Noguchi T, Tamura M, et al. Application of Conventionally Recycled Coarse Aggregate to Concrete Structure by Surface Modification Treatment. J Adv Concr Technol 2007;5: 13-25.
20. 2Zhu Z, Gu S, Tang Z, Song L. Experimental Study on Recycling of Waste Concrete Based on Geopolymer Technology: Towards a Sustainable Geoenvironment. Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics. 12019. p. 336-43.
21. Heesup C, Lim M, Choi H, et al. Using Microwave Heating to Completely Recycle Concrete. J Environ Prot (Irvine, Calif) 2014;05: 583-96.
22. Tam VWY, Tam CM. Evaluations of existing waste recycling methods: A Hong Kong study. Build Environ 2006;41(12): 1649-60.

Journal of Environmental Health Engineering, January 2023; Vol.10, No. 2: 130 - 145

Investigation of Concrete Waste Recycling Methods (Review)

Majid Hashemi[1, 2], Mahdi Rezaei[1, 2*]

[1]- Environmental Health Engineering Research Center, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran
[2]- Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Public Health, Kerman University of Medical Sciences, Kerman, Iran

**** Email: mahdirezaei1274@gmail.com,***

Received: 24 February 2023, Accepted: 2 May 2023

ABSTRACT

Background: Construction and demolition wastes (CDW) are among the bulkiest municipal wastes which are often made of concrete. According to the high volume of these wastes, it is essential to use the recycling strategy to manage C&D wastes. Recycling has three major advantages to make CDW management more efficient, including; reducing the demand for natural resources, reducing the cost of energy production, and increasing the capacity of the landfills. According to this, the aim of current study is to review concrete waste recycling methods.

Methods: In the initial search of articles, a total of 74 articles from 2005 to 2022 were found which was reduced to 50 after removing duplicates. Then, in the screening stage, the title and abstract of the articles were reviewed and at the end, 28 articles remained. Then, to obtain related articles, the full text of the screened articles was studied and finally, 22 articles remained which were used in the present study..

Results: Recycled aggregates usually have limited use in the construction industry; but the technologies discussed in this study can increase the quality of recycled aggregates and therefore these aggregates can be used in better and more applications.

Conclusion: There are advantageous suggestions for the improvement of construction waste recycling including; the proper destruction of buildings, revision of construction methods, and encouragement to design structures based on native architectural potentials. The main ways to achieve these goals include; government support, raising public awareness, establishing an administrative system for recycled materials, approving relevant laws, and devising construction methods based on local capabilities.

Keywords: Concrete waste recycling, Construction waste, Environmental effects.