

بررسی اثر استفاده از روباره‌ی مس ضایعاتی در خواص مکانیکی جدول‌های پیش ساخته بتنی تولید شده با فناوری پرسی تر

محمد پیروی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین

محمد صالح لیافزاده* (استادیار)

انستیتو آب و انرژی، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۶ (دوره ۲ - شماره ۱/۴، ص. ۱۰۵-۱۱۲، یادداشت شنی)

روباره‌ی مس یکی از پس ماند‌های حاصل از فرایند تولید مس است که با توجه به حجم بالای تولید آن در ایران، به وفور در صنایع ماسه‌پاشی به‌عنوان ماده‌ی ساینده استفاده می‌شود. پس از چندین بار استفاده به دلیل گردگوشه شدن، این ماده خاصیت ساینده‌ی خود را از دست می‌دهد و بلااستفاده در طبیعت رها می‌شود. از سوی دیگر، با توجه به لزوم استفاده از مصالح ریزدانه‌ی ۳-۰ در ساخت جدول‌های بتنی، هزینه‌ی تهیه‌ی آن به دلیل دشواری‌های تولید نسبت به سایر اندازه‌های ماسه بیشتر خواهد بود. در پژوهش حاضر، به منظور ارائه‌ی یک راهکار عملی برای دفع این ماده‌ی ضایعاتی، از آن به‌عنوان جایگزین درصد‌های مختلف ریزدانه در جدول‌های پیش ساخته‌ی بتنی تولید شده با فناوری پرسی تر استفاده شده است. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌های مکانیکی بر روی جدول‌های تولید شده نشان می‌دهد که ضمن بهبود نسبی مشخصات مکانیکی، از نقطه‌نظر فنی و اجرایی، امکان جایگزینی این ماده‌ی ضایعاتی تا ۱۰٪ با ریزدانه‌ی ۳-۰ طبیعی وجود دارد.

واژگان کلیدی: روباره‌ی مس ضایعاتی، ریزدانه‌ی ۳-۰، جدول پیش ساخته‌ی بتنی، فناوری پرسی تر، خواص مکانیکی.

m.peirovi@qiau.ac.ir
Labaf@sharif.edu

۱. مقدمه

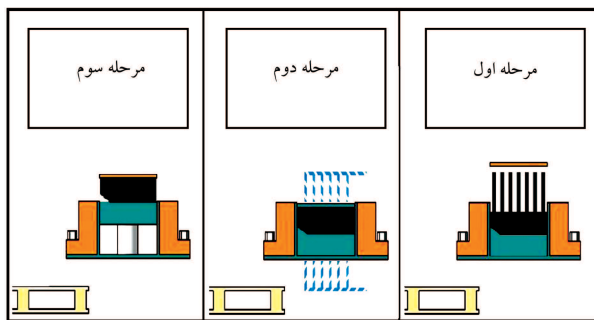
می‌شود.^[۱] تخصیص سهم ۵٪ از تولید گازهای گلخانه‌یی به دلیل تولید سیمان و همچنین برداشت‌های بی‌رویه از سنگدانه‌های طبیعی به منظور استفاده در بتن سبب شده است که صنعت بتن به‌عنوان یکی از عوامل تهدیدکننده‌ی محیط زیست به‌شمار آید.

لذا در دهه‌های اخیر، دست‌اندرکاران و پژوهشگران این صنعت به استفاده‌ی مجدد از ضایعات صنایع مختلف در بتن روی آورده‌اند که یکی از آنها روباره‌ی مس است. روباره‌ی مس، یک پسماند صنعتی با چگالی زیاد است که در فرایند تولید مس ایجاد می‌شود.^[۱] در تولید هر تن مس تقریباً ۲/۲ تا ۳ تن روباره‌ی مس به‌عنوان ماده‌ی ضایعاتی تولید می‌شود.^[۲] این ماده از نظر علم مواد، قابلیت استفاده‌ی مجدد را ندارد و به‌عنوان یک ماده‌ی ضایعاتی از چرخه‌ی تولید خارج می‌شود. در گذشته برای دفع این ماده‌ی ضایعاتی مبادرت به دفن آن می‌کردند که با توجه به ترکیبات شیمیایی موجود در آن برای محیط‌زیست زیان‌بار بوده است، لذا به استفاده از روباره‌ی مس در صنایع دیگر توجه شده است. در ایران با توجه به وجود معادن بسیار زیاد مس و به تبع آن کارخانه‌های فرآوری آن، سالانه ۳۶۰ هزار تن از ماده‌ی ضایعاتی مذکور تولید می‌شود.^[۱] حجم بالای تولید پسماند ذکر شده سبب

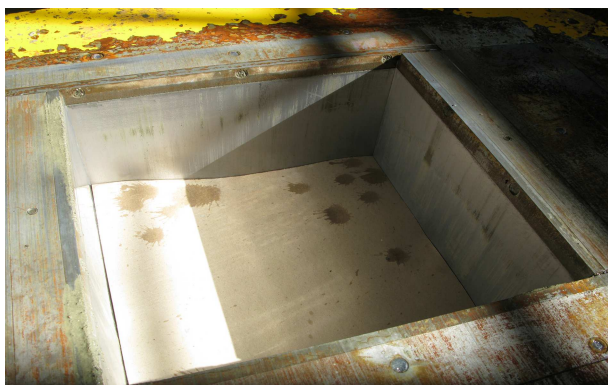
امروزه با توجه به روند رو به رشد صنعتی شدن، با دو معضل جدی، ۱. برداشت بی‌رویه از ذخایر طبیعی محدود زمین، ۲. آلودگی‌ها و پسماند‌های حاصل از فعالیت‌های صنعتی مواجه هستیم؛ که هر کدام در صورت عدم مدیریت صحیح می‌توانند آسیب‌های جدی به محیط زیست وارد کنند. به اصطلاح توسعه‌ی پایدار پس از گزارش منتشر شده‌ی سازمان ملل (۱۹۸۷) توجه شده و پس از بیانیه‌هایی که سازمان مذکور در کنفرانسی در سال ۱۹۹۲ و اجلاس جهانی در سال ۲۰۰۲ در ژوهانسبورگ صادر کرده است، اهمیت مضاعف یافته است. براساس تعریف سازمان ملل، اصطلاح «توسعه‌ی پایدار»، توسعه و پیشرفتی است که بتواند نیازهای زمان حال را به گونه‌ی تأمین کند که توانایی نسل‌های آینده در تأمین نیازهایشان به مخاطره نیافتد.^[۱] بر این اساس، یکی از راهکارهای عملی تحقق توسعه‌ی پایدار، استفاده‌ی مجدد از پسماند صنایع مختلف است. بتن به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مواد در دیاست، به طوری که در سراسر جهان سالانه به ازاء هر نفر، ۳ تن بتن مصرف

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۵/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۴/۱۲/۲۲، پذیرش ۱۳۹۵/۲/۲۷.



شکل ۱. مراحل اصلی ساخت جدول پیش ساخته‌ی بتنی به روش پرسی تر، مرحله‌ی اول: ریختن بتن درون قالب (مخلوط بتنی آبکی)؛ مرحله‌ی دوم: متراکم کردن بتن و خروج آب اضافی بتن؛ مرحله‌ی سوم: خارج کردن بتن از قالب و تولید جدول متراکم. [۶]



شکل ۲. قرارگیری فیلتر در قسمت پایینی قالب.



شکل ۳. ریختن بتن با اسلامپ بالا در قالب.

و استفاده از درصد‌های بالاتر منجر به افزایش قابل توجه کارایی بتن شده است. همچنین مقاومت فشاری نمونه‌ها تا جایگزینی ۵۰٪ روباره‌ی مس با مصالح ریزدانه، کاهش نداشته و پس از آن، از مقاومت فشاری کاسته شده است. کمترین میزان جذب آب سطحی در نمونه‌ی بی با جایگزینی ۴۰٪ روباره‌ی مس اتفاق افتاده و در درصد‌های بالاتر به شدت افزایش یافته است. لذا براساس نتایج آزمایش‌های مختلف، درصد بهینه‌ی جایگزینی روباره‌ی مس با ریزدانه، ۴۰٪ پیشنهاد شده است. [۳] در پژوهشی دیگر در همان سال مشاهده شده است که استفاده از روباره‌ی مس به‌عنوان درشت‌دانه در بتن با مقاومت بالا، خواص مکانیکی بهبود یافته است. [۱۰] در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۹) با بررسی عملکرد بتن با مقاومت بالا و حاوی روباره‌ی

شده است که به استفاده از روباره‌ی مس در سایر صنایع از جمله صنعت رنگ به صورت ماسه‌پاشی به منظور رنگ‌زدایی سطوح و آماده‌سازی آن‌ها برای رنگ‌ریزی مجدد توجه شود. در فرایند ماسه‌پاشی در محیط بسته، پس از چند بار استفاده از ماده‌ی ساییده، ماده‌ی مذکور به علت گردگوشه شدن، خاصیت سایندگی خود را از دست می‌دهد و نمی‌تواند مجدداً استفاده شود و معمولاً بدون هیچ اقدام پیش‌گیرانه‌ی در محیط زیست رها می‌شود. با توجه به استفاده‌ی گسترده از روباره‌ی مس در صنایع ماسه‌پاشی، از آنجایی که روباره‌ی مس یک ماده‌ی ضایعاتی است، پس از فرایند ماسه‌پاشی ضایعات ایجاد شده دوباره به ماده‌ی ضایعاتی دیگری تبدیل می‌شوند که به علت ریزدانه بودن و چگالی زیاد و گاه وجود عناصر سنگین در آن، تاکنون روشی برای استفاده از آن در صنایع دیگر پیدا نشده است.

براین اساس پیدا کردن یک راه حل عملی به منظور رفع مشکل محیط زیستی می‌تواند راهگشای این معضل باشد. از جمله مواردی که به نظر می‌رسد می‌توان ماده‌ی ضایعاتی مذکور را به کار برد، استفاده از آن در قطعات پیش‌ساخته‌ی بتنی است. یکی از پرکاربردترین قطعات پیش‌ساخته‌ی بتنی، جدول‌های بتنی هستند که از مهم‌ترین نقاط ضعف آنها، دوام پایین در برابر عوامل جوی است. جدول‌های بتنی پیش‌ساخته با روش‌های مختلفی از جمله روش سنتی قالب باز، روش پرسی تر و روش خشک ساخته می‌شوند. در میان روش‌های ذکر شده، روش پرسی تر به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین روش‌های تولید جدول‌های بتنی پیش‌ساخته در جهان شناخته شده است. [۵] مراحل اصلی تولید یک جدول بتنی پیش‌ساخته به روش پرسی تر در شکل ۱ نشان داده شده است. [۶] در شکل‌های ۲ و ۳، تصاویری از دستگاه تولیدکننده‌ی جدول در مراحل مختلف تولید مشاهده می‌شود.

در این میان، مطالعات بسیاری بر روی جدول‌های بتنی و استفاده از مواد ضایعاتی مختلف در این قطعات انجام شده است. نتایج بررسی تأثیر نوع دانه‌بندی و بیشینه‌ی بعد سنگدانه بر نسبت آب به سیمان جدول‌های بتنی پرسی تر در سال ۲۰۱۲ نشان می‌دهد که با افزایش بیشینه‌ی اندازه‌ی سنگدانه و درشت‌تر شدن بافت دانه‌بندی مخلوط، روند خروج آب توسط دستگاه در هنگام اعمال فشار و مکش تسریع شده و در نتیجه نسبت آب به سیمان نهایی کاهش و عیار سیمان ثانویه در جدول‌ها افزایش یافته است که این مهم را می‌توان به سهولت عبور آب و کوتاه شدن مسیر عبور آب اضافی در بتن جهت خروج از بین سنگدانه‌های مرتبط دانست. [۷] در مطالعه‌ی دیگری در همان سال، تأثیر نسبت آب به سیمان اولیه و عیار سیمان در مقاومت فشاری و جذب آب کل در جدول‌های بتنی پرسی تر بررسی شده و نتایج حاکی از آن بوده است که در یک نسبت اولیه‌ی آب به سیمان ثابت، افزایش عیار سیمان ابتدا منجر به افزایش جذب آب کل شده و سپس در حدی متوقف باقی مانده است. این در حالی است که افزایش عیار سیمان اولیه در برخی از نسبت‌های آب به سیمان، منجر به افزایش مقاومت فشاری و در برخی سبب کاهش مقاومت فشاری می‌شود. [۸] در سال ۲۰۰۹، به منظور بررسی اثر استفاده از ضایعات در جدول‌های بتنی پرسی خشک و بلوک‌های سقفی، از ضایعات ساختمانی شامل ضایعات بتن و ضایعات مصالح بنایی تولید شده در کارخانه‌ی آجرهای رسی در ساخت جدول‌های مذکور استفاده و نشان داده شده است که با افزایش درصد جایگزینی، میزان جذب آب کل نیز افزایش یافته و در درصد‌های بالای ۵۰٪ بسیار مشهود و برای هر دو نوع ماده‌ی ضایعاتی نزدیک به هم بوده است. [۹]

افزودن روباره‌ی مس به‌عنوان جایگزین مصالح بتن توسط پژوهشگران مختلفی بررسی شده است. در همین راستا در سال ۲۰۱۳، استفاده از روباره‌ی مس به‌عنوان ریزدانه در بتن با عملکرد بالا بررسی شده و نتایج به‌دست آمده نشان داده است که استفاده از ماده‌ی مذکور، تأثیر چندانی در چگالی بتن با عملکرد بالا نداشته

برطرف می‌کند، یک راه حل کاملاً کاربردی و عملی برای حل مشکل دفع ماده‌ی ضایعاتی مذکور است و با توجه به اینکه خود یک ماده‌ی مضاعف ضایعاتی است، هزینه‌ی تولید ندارد و سبب کاهش قیمت تمام شده‌ی جدول‌ها نیز می‌شود. با وجود این، هدف از انجام پژوهش حاضر، پاسخ به این پرسش است که چگونه استفاده از روبراه‌ی مس ضایعاتی به‌عنوان ماده‌ی جایگزین ماسه‌ی ۰-۳، در خواص مکانیکی جدول‌های پیش ساخته‌ی بتنی تولیدشده با فناوری پرسی تر تأثیر می‌گذارد و آیا می‌توان از این طریق علاوه بر کاهش قیمت تمام شده، از یک معضل زیست‌محیطی جلوگیری کرد.

۲. برنامه‌ی آزمایشگاهی

۱.۲. مصالح مصرفی

سیمان مورد استفاده از نوع ۴۲۵-۱ و محصول کارخانه‌ی سیمان سپاهان بوده است. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۱ و آنالیز فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۲ ارائه شده است. سنگدانه‌های مصرفی (ریزدانه و درشت‌دانه) همگی از معادن هشتگرد تهیه و براساس استاندارد ملی ایران ۱۱۲۶۷-ISIRI، [۱۶] نمونه‌برداری شده‌اند. مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی در جدول ۳ در دسترس است.

شکل ۴، نمودار دانه‌بندی مخلوط شن و ماسه را در جدول‌های بتنی نشان می‌دهد. دانه‌بندی موردنظر با استفاده از توصیه‌های طرح ملی مخلوط و تجربیات گذشته و قابلیت‌های موجود دستگاه براساس منحنی فولر - تامسون اصلاح و با در نظر گرفتن توان ۰/۳۵ استفاده شده است. روبراه‌ی مس استفاده شده در پژوهش حاضر از یکی از کارخانه‌های ماسه‌پاشی واقع در شهرک صنعتی اشتهارد تهیه شده است. با توجه به اینکه در پژوهش حاضر از روبراه‌ی مس ضایعاتی پس از فرایند ماسه‌پاشی استفاده شده است، لازم بوده است که برخی از ویژگی‌های روبراه‌ی مس قبل و بعد از فرایند ماسه‌پاشی مقایسه شوند. با توجه به مشخصات فنی ارائه شده توسط شرکت تولیدکننده‌ی روبراه‌ی مس، میزان سختی ذرات، هفت موس و چگالی انبوهی آن ۱۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. این در حالی است که چگالی انبوهی پس از ماسه‌پاشی به دلیل ریزتر شدن ناشی از برخورد، ۲۲۰۰ کیلوگرم بر

مس به‌عنوان ریزدانه نشان داده شده است که عدم استفاده از فوق روان‌کننده به دلیل خشکی مخلوط و جداسدگی دانه‌بندی در آنها، منجر به کاهش شدید مقاومت و افزایش جذب آب می‌شود. با این حال در یک کارایی مشخص، استفاده از روبراه‌ی مس، خواص مکانیکی و دوام بتن با مقاومت بالا را بهبود بخشیده است. [۱۱]

همچنین به منظور دست‌یابی به میزان بهینه‌ی روبراه‌ی مس به‌عنوان ریزدانه در بتن مقاومت بالا در مطالعه‌ی در سال ۲۰۱۰ نشان داده شده است که سطح صاف و شیشه‌ی روبراه‌ی مس، کارایی بتن، تراکم‌پذیری و رفتار دینامیکی بتن را بهبود بخشیده و میزان جذب آب بتن را کاهش داده است. با این حال، آب اضافی، ریز بودن و وجود ترکیبات اکسید آهن سبب کاهش مقاومت شبه استاتیکی، مقاومت خمشی و مقاومت کششی دو نیم‌شدگی شده است. نتایج حاکی از آن بوده است که جایگزینی ۴۰٪ از ریزدانه‌ی معمولی با روبراه‌ی مس، سبب ثابت ماندن مشخصات بتن خواهد شد. [۱۲] در پژوهش دیگری در همان سال نشان داده شده است که استفاده از ۲۰٪ روبراه‌ی مس به دلیل خواص مکانیکی و فیزیکی روبراه‌ی مس، سبب افزایش مقاومت فشاری بتن شده است. با افزایش درصد جایگزینی روبراه‌ی مس تا ۴۰٪، مقاومت فشاری و دینامیکی نمونه‌ها بسیار نزدیک با مقاومت نمونه‌ی شاهد بوده و پس از آن روند کاهش داشته است. [۱۳] بررسی خواص دوام بتن‌هایی که در آنها روبراه‌ی مس کاملاً با مصالح ریزدانه جایگزین شده بود، نشان داده است که در بتن حاوی روبراه‌ی مس، برای رسیدن به درصد هوای مشخص (۴/۵٪) در مقایسه با نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی به میزان کمتری از ماده‌ی افزودنی حباب‌زا نیاز است. علاوه بر این، زمان گیرش بتن حاوی روبراه‌ی مس بیشتر از بتن شاهد و مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی روبراه‌ی مس در سنین بالاتر، برابر با بتن شاهد و در مواردی نیز بیشتر از آن بوده است. همچنین در برابر سیکل‌های ذوب و یخبندان، بتن‌های حاوی روبراه‌ی مس مقاومت بسیار بیشتری از خود نشان داده‌اند. [۱۴]

مطالعات انجام‌شده‌ی در سال ۲۰۰۰ نشان داده است که روند کسب مقاومت در بتن‌های حاوی روبراه‌ی مس همانند بتن معمولی بوده و مقاومت فشاری نهایی در درصد‌های جایگزینی زیر ۸۰٪، تفاوت چندانی با نمونه‌ی شاهد نداشته است. [۱۵] علاوه بر موارد ذکر شده، برخی از پژوهشگران از روبراه‌ی مس به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی استفاده و اثر آن را در مشخصات بتن بررسی کرده‌اند. آنچه در پژوهش حاضر بررسی شده است، بررسی اثر استفاده از روبراه‌ی مس ضایعاتی صنعت ماسه‌پاشی به جای ذرات ریزدانه‌ی ماسه‌ی ۰-۳ (ماسه با ذرات کمتر از ۳ میلی‌متر) در طرح مخلوط جدول‌های پیش ساخته‌ی بتنی است. یکی از مشکلاتی که کارخانه‌های تولیدکننده‌ی جدول‌های بتنی با آن روبه‌رو هستند، تأمین دامنه‌ی ذکر شده‌ی ذرات ماسه است. ریز بودن این سنگدانه‌ها، فرایند تولید آن را متفاوت و سخت‌تر از ماسه‌ی معمولی ۰-۳ می‌کند. از آنجایی که ماسه‌ی ۰-۳ غالباً برای تولید قطعات بتنی به‌کار می‌رود، نسبت به ماسه‌ی ۰-۳، تقاضای کمتری دارد و این امر موجب شده است تا تمایل صاحبان معادن سنگدانه‌ها نسبت به تولید آن کمتر شود و در نتیجه قیمت تمام شده‌ی آن نیز افزایش یابد. از سوی دیگر، این سنگدانه مستقیماً از طبیعت برداشت می‌شوند و در بلندمدت می‌تواند منجر به آسیب رساندن به محیط زیست شود و با اصول توسعه‌ی پایدار مغایرت خواهد داشت. با توجه به اینکه روبراه‌ی مس، یک ماده‌ی ضایعاتی است که پس از فرایند ماسه‌پاشی، قابلیت استفاده‌ی مجدد در صنعت را ندارد و هیچ اقدام عملی تاکنون برای دفع آن صورت نگرفته است و همچنین اندازه‌ی آن در محدوده‌ی ماسه‌ی ۰-۳ است، می‌تواند به‌عنوان جایگزین مناسبی برای این ماسه‌ی ۰-۳ مطرح شود. استفاده از روبراه‌ی مس ضایعاتی علاوه بر اینکه مشکل تهیه‌ی ماسه‌ی ۰-۳ را برای تولید جدول‌های بتنی

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان.

ماده	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
درصد	۳/۱۴	۶۲/۱۶	۳/۹۶	۴/۸۹	۲۰/۵۶
ماده	IR	LOI	K ₂ O	N ₂ O	SO ₃
درصد	۰/۴۲	۱/۸۲	۰/۷۷	۰/۳۶	۱/۷۹
مجموع			۹۹/۱۳٪		

جدول ۲. آنالیز فیزیکی و مکانیکی سیمان.

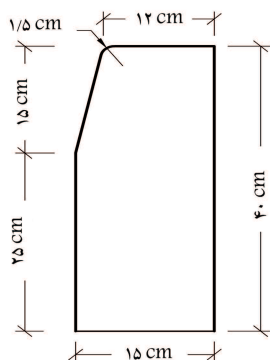
۳۲۸۶ cm ² /gr	بلین
۱۵۴ دقیقه	گیرش اولیه
۲۲۱ دقیقه	گیرش نهایی
۲۱۴ kq/cm ²	مقاومت فشاری سه روزه
۳۵۷ kq/cm ²	مقاومت فشاری هفت روزه
۵۱۷ kq/cm ²	مقاومت فشاری ۲۸ روزه
۰/۱۴	انبساط اتوکلاو (٪)

جدول ۳. مشخصات فیزیکی سنگدانه.

نوع سنگدانه	مدول نرمی [۱۷]	چگالی دانه‌های جامد [۱۹،۱۸] (gr/cm ³)	درصد جذب آب [۱۹،۱۸]	درصد خاک [۲۰]
ریزدانه (۰-۳)	۲٫۵۷	۲٫۵۵	۳٫۷	۶٫۱
ریزدانه (۰-۶)	۳٫۳	۲٫۵۹	۳٫۳	۲٫۷
درشت دانه (۴-۸)	-	۲٫۵۹	۲٫۷	۰٫۶
درشت دانه (۴-۱۲)	-	۲٫۶۰	۲٫۱	۰٫۲

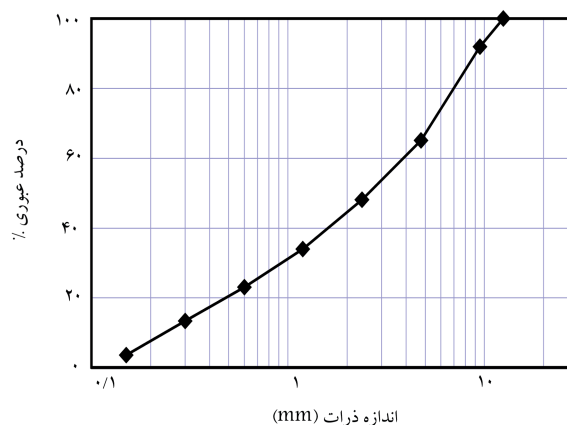
جدول ۴. ترکیبات شیمیایی روبرای مس قبل و بعد از ماسه‌پاشی.

قبل از ماسه‌پاشی		بعد از ماسه‌پاشی	
نام ماده	درصد ترکیبات	نام ماده	درصد ترکیبات
Fe ₂ O ₃	۵۴٫۵۰	Fe ₂ O ₃	۵۴٫۲۰
SiO ₂	۳۳٫۰۰	SiO ₂	۳۳٫۵۰
Al ₂ O ₃	۲٫۴۹	Al ₂ O ₃	۲٫۵۹
S	۱٫۸۱	S	۱٫۷۱
K ₂ O	۱٫۴۲	K ₂ O	۱٫۴۱
MgO	۱٫۳۷	MgO	۱٫۲۸
ZnO	۱٫۰۷	ZnO	۱٫۰۷
CaO	۰٫۹۴	CaO	۱٫۰۶
Na ₂ O	۰٫۸۲	Na ₂ O	۰٫۸۲
CuO	۰٫۷۵	CuO	۰٫۷۶
MoO ₃	۰٫۴۹	MoO ₃	۰٫۵۱
Sb ₂ O ₃	۰٫۴۲	Sb ₂ O ₃	۰٫۲۱
P ₂ O ₅	۰٫۲۱	P ₂ O ₅	۰٫۱۱
TiO ₂	۰٫۱۶	LOI	-۶٫۵۵
BaO	۰٫۱۰		
LOI	-۶٫۶۰		

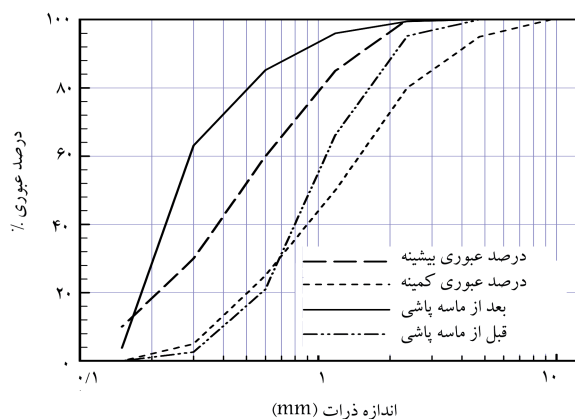


شکل ۶. سطح مقطع جدول تولید شده.

گرفته شده با الهام گرفتن از طرح‌های اختلاط رایج جدول‌های بتنی در کارخانه‌یی که در آن نمونه‌ها تولید و با آزمون و خطای آزمایشگاهی و تجربیات گذشته تهیه شده و در جدول ۵ در دسترس قرار گرفته‌اند. در پژوهش حاضر، روبرای مس ضایعاتی با درصد‌های ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ جایگزین ریزدانه‌ی (۰-۳) شده است. در ضمن از هیچ ماده‌ی افزودنی (شیمیایی و پودری معدنی) استفاده نشده است. نسبت آب به سیمان اولیه، ۰٫۶ انتخاب شده است. از آنجایی که پس از



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی مخلوط شن و ماسه در جدول‌های تولید شده.



شکل ۵. دانه‌بندی روبرای مس قبل و بعد از ماسه‌پاشی.

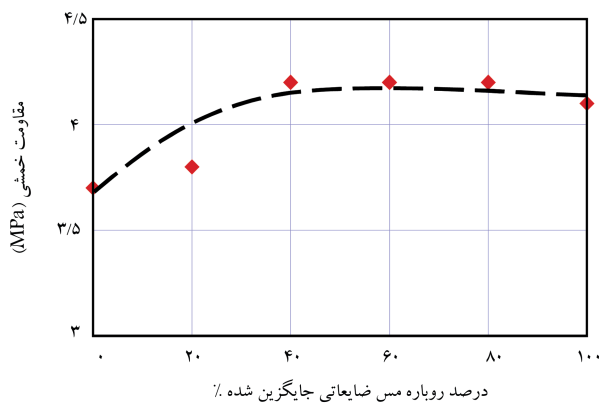
مترمکعب است. براساس نتایج به‌دست آمده از آزمایش XRF^۱، ترکیبات شیمیایی روبرای مس قبل و بعد از فرایند ماسه‌پاشی تغییر چندانی نکرده است (جدول ۴). در شکل ۵، دانه‌بندی روبرای مس قبل و بعد از فرایند ماسه‌پاشی نشان داده شده است. مطابق شکل مذکور و مطابق انتظار، دانه‌بندی روبرای مس پس از فرایند ماسه‌پاشی بسیار ریزتر شده است.

۲.۲. ساخت و عمل‌آوری

کلیدیه نمونه‌ها در یکی از کارخانه‌های تولید بتن و قطعات بتنی استان البرز با دستگاه تمام اتوماتیک ساخت جدول‌های بتنی با فناوری پرسی تهیه شده‌اند. تعداد نمونه‌ها برای هر آزمایش مطابق با استاندارد انتخاب شده است. به دلیل کاربرد فراوان از نمونه‌های جدولی با ابعاد متعارف ۱۵ × ۴۰ × ۵۰ سانتی‌متر استفاده شده است. شکل ۶، نمونه‌ی از جدول‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. طرح اختلاط در نظر



شکل ۷. نمونه‌ی جدول تحت آزمایش مقاومت خمشی.



شکل ۸. میانگین نتایج مقاومت خمشی جدول‌های بتنی.

در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مذکور مشخص است، با افزایش درصد جایگزینی روبره‌ی مس ضایعاتی تا ۴۰٪، مقاومت خمشی با شیب ملایمی افزایش می‌یابد و بعد از آن تقریباً ثابت می‌ماند. علت این افزایش را می‌توان به ریزدانه بودن روبره‌ی مس ضایعاتی که همانند یک پرکننده منافذ را اشغال کرده است، نسبت داد. روند ذکر شده در پژوهش‌های پیشین نیز مشاهده شده است. [۱۳،۳] براساس استاندارد ISIRI-۱۲۷۲۸، رده‌ی مقاومتی جدول‌ها، رده‌ی یک است. لذا تمامی نمونه‌ها، دست‌کم مقاومت خمشی رده‌ی یک را ارضا می‌کنند.

۲.۳. مقاومت فشاری

برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، پس از اتمام عمل‌آوری و با در نظر گرفتن اینکه طول هر جدول حدود ۵۰ سانتی‌متر و ضخامت آن ۱۵ سانتی‌متر است، با استفاده از دستگاه برش قسمت پخ بالایی جدول‌ها بریده شده و سپس از مکعب باقی‌مانده، سه عدد نمونه‌ی ۱۵ سانتی‌متری (از هر طرح مخلوط) تهیه شده است. لازم به ذکر است که قبل از انجام آزمایش، سطح نمونه‌ها با دستگاه ساب کاملاً صاف و تراز شده است. پس از آن نمونه‌ها با سرعت 0.4 MPa/s توسط جک مقاومت فشاری تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در شکل ۹ ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که مقاومت فشاری نمونه‌هایی که ۴۰٪ ریزدانه‌ی آن با روبره‌ی مس ضایعاتی جایگزین شده است، در حدود ۳۰٪ نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش یافته و پس از آن از مقاومت فشاری جدول‌ها کاسته شده و با افزایش میزان روبره‌ی مس ضایعاتی، در حدود ۳۹ مگاپاسکال ثابت مانده است.

جدول ۵. طرح مخلوط جدول‌های تولید شده (کیلوگرم بر مترمکعب).

مصالح	درصد جایگزینی روبره‌ی مس با ریزدانه‌ی ۰-۳				
	۱۰۰	۸۰	۶۰	۴۰	۲۰
سیمان	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰
آب	۲۲۲	۲۲۲	۲۲۲	۲۲۲	۲۲۲
روباره‌ی مس	۰	۳۴	۶۸	۱۰۲	۱۳۶
درشت دانه (۴-۸)	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰
درشت دانه (۴-۱۲)	۴۰۵	۴۰۵	۴۰۵	۴۰۵	۴۰۵
ریزدانه (۰-۶)	۹۳۰	۹۳۰	۹۳۰	۹۳۰	۹۳۰
ریزدانه (۰-۳)	۰	۳۴	۶۸	۱۰۲	۱۳۶

ریخته شدن بتن در قالب، عمل فشرده‌سازی با فشار ۱۲۲ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع صورت می‌پذیرد، بدیهی است که نسبت آب به سیمان نهایی نیز کاهش می‌یابد که با استفاده از روش وزنی، [۶] نسبت آب به سیمان نهایی برای نمونه‌ی شاهد ۰/۳ و عیار سیمان جدول پس از تراکم، ۴۲۴ کیلوگرم بر مترمکعب برآورد شده است. پس از ساخت نمونه‌ها و بعد از گذشت یک روز از زمان تولید، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز در داخل آب با دمای $22 \pm 2^\circ \text{C}$ قرار گرفته‌اند.

۳. آزمایش‌ها و نتایج

برای بررسی خواص مکانیکی جدول‌های بتنی تولید شده با درصد‌های مختلف جایگزینی روبره‌ی مس ضایعاتی لازم است که مطابق با استاندارد ملی ایران ISIRI-۱۲۷۲۸ [۱۳] آزمایش‌هایی انجام شود. از این رو آزمایش‌های مقاومت خمشی، مقاومت فشاری، سرعت امواج صوت و مقاومت سایشی نمونه‌ها در نظر گرفته شده است. در هیچ‌یک از نمونه‌ها عوارض ترک، لایه‌لایه شدن و پوسیدگی مشاهده نشده و از نظر شکل ظاهری و ابعاد هندسی، تمامی الزامات استاندارد ملی ایران تأمین شده است.

۳.۱. آزمایش مقاومت خمشی

از آنجا که انجام آزمایش کشش مستقیم دشوار است، آزمایش مقاومت خمشی می‌تواند تا حدودی جایگزین مناسبی برای آن باشد و به طور غیرمستقیم برآورد مناسبی از مقاومت کششی نمونه‌ها ارائه دهد. جهت انجام آزمایش مقاومت خمشی به ازاء هر طرح مخلوط، ۸ عدد جدول تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. در استاندارد مذکور تأکید شده است که مقاومت خمشی هیچ‌یک از نمونه‌ها نباید کمتر از ۲/۸ مگاپاسکال باشد. برای انجام مقاومت خمشی، پس از خشک شدن سطوح ظاهری، جدول‌ها مطابق شکل ۷ توسط جک تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. پس از انجام آزمایش، مقاومت خمشی جدول‌ها با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه شده است:

$$T = \frac{PLY}{4I} \quad (1)$$

که در آن: T مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال؛ P نیروی گسیختگی بر حسب نیوتن؛ Y فاصله‌ی مرکز سطح تا آخرین تارکششی بر حسب میلی‌متر؛ L فاصله‌ی دهانه بر حسب میلی‌متر؛ I گشتاور دوم مقطع در صفحه‌ی شکست است. با توجه به اینکه نتایج به‌دست آمده انحراف معیار کمی داشته است، از روش میانگین‌گیری استفاده شده است. میانگین مقاومت خمشی به‌دست آمده از نمونه‌ها

جدول ۶. میانگین میزان سایش جدول‌های بتنی.

میانگین سایش (میلی متر)	درصد جایگزینی روبرای مس ضایعاتی (%)
۱۱٫۲	۰
۱۱٫۲	۲۰
۱۲٫۰	۴۰
۱۲٫۰	۶۰
۱۲٫۳	۸۰
۱۲٫۵	۱۰۰

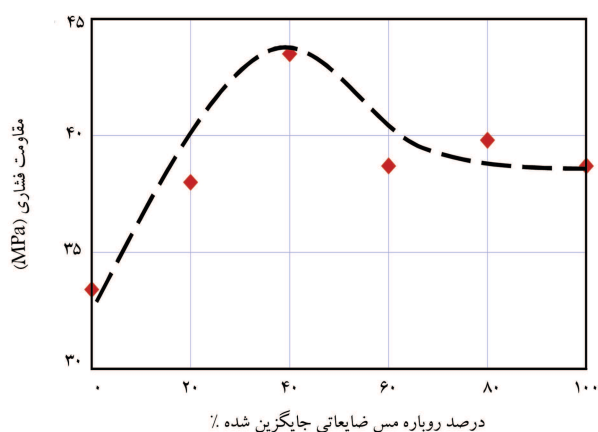
۴.۳. آزمایش مقاومت سایشی

به منظور انجام این آزمایش براساس استاندارد ملی از روش چرخ پهن استفاده شده است، که مطابق آن میزان سایش نمونه نباید از ۲۵ میلی‌متر بیشتر باشد. همان‌گونه که در بخش پیش بیان شده است، با استفاده از دستگاه برش از هر جدول (برای هر طرح مخلوط) سه عدد نمونه‌ی ۱۵ سانتی‌متری تهیه شده است. نتایج آزمایش در جدول ۶ ارائه شده است که مطابق آن با جایگزین کردن روبرای مس ضایعاتی با ریزدانه، مقاومت سایشی نمونه‌ها به میزان بسیار ناچیزی کاهش یافته است. با این حال در همه‌ی درصد‌های جایگزینی، میزان سایش در محدوده‌ی موردنظر استاندارد قرار دارد.

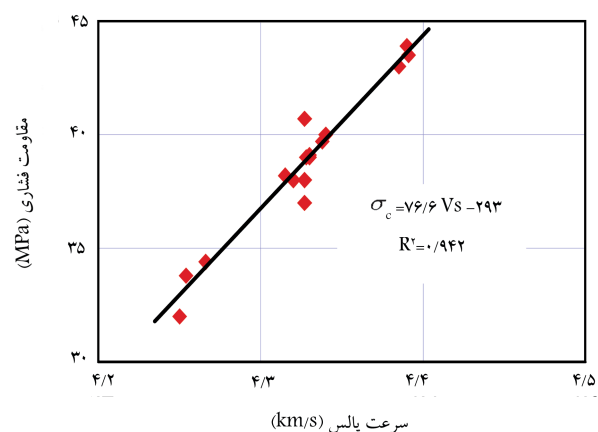
۵.۳. تحلیل نتایج آزمایشگاهی

با مروری بر پژوهش‌های پیشین مشاهده می‌شود که رابطه‌ی مستقیم میان حباب هوای ایجاد شده در بتن و درصد روبرای مس استفاده شده در بتن وجود دارد. [۱۳-۱۴] بنا بر این می‌توان بیان کرد که پس از استفاده از روبرای مس، ابتدا در بتن تازه حباب‌های بزرگ هوا تشکیل شده و پس از فشار پرس بسیار زیاد، مقداری از آنها از بتن خارج و حباب‌های باقی‌مانده به حباب‌های ریز و با فاصله‌ی کم تبدیل شده‌اند. با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی و مقاومت فشاری، با افزایش درصد جایگزینی روبرای مس تا حدی مقاومت افزایش یافته و پس از آن تقریباً ثابت و با اندکی کاهش یافته است. از آنجایی که در طرح مخلوط مورد استفاده، ریزدانه‌ی ۳-۵، حدود ۱۰٪ وزنی بتن را شامل بوده است، با جایگزینی روبرای مس تا ۴۰٪، میزان حباب هوای باقی‌مانده پس از پرس ناچیز بوده است و با توجه به ریزدانه‌تر بودن ماده‌ی ضایعاتی مذکور نسبت به ریزدانه‌ی ۳-۵، به دلیل خاصیت پرکنندگی و خواص فیزیکی همچون چگال‌تر بودن، تا حدی می‌تواند سبب افزایش مقاومت خمشی و فشاری شود. احتمال می‌رود که اگر در طرح مخلوط، میزان بیشتری ریزدانه‌ی ۳-۵ استفاده شود، میزان کاهش مقاومت خمشی و فشاری در درصد‌های بالاتر چشمگیرتر شود. این امر در برخی پژوهش‌های پیشین، [۱۳، ۱۴] نیز تأیید شده است. همچنین احتمال می‌رود به دلیل وجود آهن زیاد با اضافه کردن روبرای مس، حرارت هیدراسیون که یکی از عوامل نشان دهنده‌ی شکل‌گیری فرایند هیدراته شدن سیمان است، نسبت به نمونه‌ی شاهد کاهش یابد، که این مورد در نوشتاری در سال ۲۰۰۸، نیز به تأیید رسیده است. [۱۲]

تغییرات ناچیز در نتایج آزمایش مقاومت سایشی نشان می‌دهد که به دلیل حباب‌های هوای باقی‌مانده در بتن و وجود اندک حفره‌ها، مقاومت در برابر سایش اندکی کاهش یافته است. با توجه به درصد کم حباب هوای ایجاد شده، میزان کاهش قابل توجه نبوده است. البته نباید از کمتر بودن سختی روبرای مس نسبت به



شکل ۹. میانگین نتایج مقاومت فشاری جدول‌های بتنی.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج آزمایش غیرمخرب سرعت امواج مافوق صوت و آزمایش مخرب مقاومت فشاری.

۳.۳. آزمایش سرعت امواج مافوق صوت

از آنجا که مقاومت فشاری، یکی از پارامترهای مهم ارزیابی جدول‌هاست، با توجه به مخرب بودن آزمایش مذکور و همچنین تعداد زیاد جدول‌های تولیدی در کارخانه‌ها، در صورتی که بتوان این مشخصه را با تقریب مناسب و در کمترین زمان ممکن برآورد کرد، فرایند کنترل کیفیت سریع‌تر انجام خواهد شد. بدین منظور استفاده از روش‌های غیرمخرب توصیه می‌شود که یکی از آنها، آزمایش سرعت امواج مافوق صوت است. برای انجام آزمایش مطابق آنچه در بخش پیش ذکر شده است، سه عدد نمونه‌ی ۱۵ سانتی‌متری (از هر طرح مخلوط) تهیه و آزمایش مذکور، با استفاده از دستگاهی با بسامد ۴۵ کیلوهرتز انجام شده است. رابطه‌ی بین سرعت امواج مافوق صوت و مقاومت فشاری این نوع از جدول‌های بتنی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بین سرعت امواج مافوق صوت و مقاومت فشاری، رابطه‌ی خطی مناسبی با ضریب همبستگی بسیار بالا وجود دارد. با توجه به غیرمخرب بودن آزمایش سرعت امواج مافوق صوت و همچنین ساده‌تر بودن آن نسبت به آزمایش مقاومت فشاری، انتظار می‌رود با انجام آزمایش‌های بیشتر و در نظر گرفتن شرایط مختلف، رابطه‌ی که از آزمایش سرعت امواج مافوق صوت به دست می‌آید، جایگزین آزمایش مقاومت فشاری شود.

است:

- نتایج آزمایش مقاومت خمشی جدول‌ها نشان می‌دهد که با جایگزینی روباره‌ی مس در طرح اختلاط بتن، مقاومت خمشی آن نسبت به نمونه‌ی شاهد اندکی افزایش یافته است. بنابراین روباره‌ی مس ضایعاتی می‌تواند بدون داشتن تأثیر منفی در مقاومت خمشی، تا ۱۰٪ جایگزین ماسه‌ی ۳-۰ شود.
- جایگزینی روباره‌ی مس ضایعاتی با ماسه‌ی ۳-۰، نه فقط تأثیر منفی در مقاومت فشاری نداشته است، بلکه تا حدودی مقاومت فشاری را نیز افزایش داده است. بیشترین افزایش در جایگزینی ۴۰٪ حاصل می‌شود که نسبت به نمونه‌ی شاهد افزایش ۳۰ درصدی را نشان می‌دهد.
- یک رابطه‌ی خطی با ضریب همبستگی مناسب میان نتایج آزمایش مقاومت فشاری و آزمایش سرعت امواج مافوق صوت مشاهده می‌شود.
- مقاومت سایشی نمونه‌ها با افزایش درصد جایگزینی روباره‌ی مس، با اندکی کاهش مواجه است. البته این کاهش قابل ملاحظه نیست و میزان سایش از نظر استاندارد ISIRI-۱۲۷۲۸ مورد قبول است.
- در مجموع با توجه به نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی، مقاومت فشاری و مقاومت سایشی می‌توان نتیجه گرفت که براساس مصالح و طرح اختلاط استفاده شده در پژوهش حاضر، بهینه‌ترین درصد جایگزینی از نظر مشخصات مکانیکی ۴۰٪ است که در برخی از پژوهش‌ها نیز به همین مقدار دست یافته‌اند. با این حال، نتایج به دست آمده حاکی از آن است که امکان جایگزین کردن ۱۰٪ ماسه‌ی ۳-۰ با روباره‌ی مس ضایعاتی حاصل از فرایند ماسه‌پاشی در جدول‌های پیش ساخته‌ی بتنی تولید شده با فناوری پرسی تر، بدون ایجاد تأثیرات منفی در خواص مکانیکی وجود دارد.
- در پژوهش حاضر، ضمن ارائه‌ی راهکار عملی برای دفع ماده‌ی روباره‌ی مس ضایعاتی که مخرب محیط زیست است، امکان حذف ماسه‌ی ۳-۰ فراهم شده است و در نتیجه هزینه‌ی تولید جدول‌های بتنی پیش ساخته کاهش خواهد یافت.

پانویس

1. x-ray fluorescence

منابع (References)

1. Brito, J. and Saikia, N. "Recycled aggregate in concrete use of industrial", Construction and Demolition Waste, Springer, London (2013).
2. Murari, K., Siddique, R. and Jain, K.K. "Use of waste copper slag, a sustainable material", *J. Mater. Cycles. Waste Manag.*, **17**(1), pp. 13-26 (2014).
3. Al-Jabri, S., Hisada, K., Makoto K., Al-Oraimi, alem, H. and Al-Saidy, A. "Copper slag as sand replacement for high performance concrete", *Cement & Concrete Composites*, **31**(7), pp. 483-488 (2009).

ریزدانه‌ی ۳-۰ که از نوع سیلیسی است، چشم‌پوشی کرد. بنابراین می‌توان پیش‌بینی کرد که با افزایش میزان استفاده از روباره‌ی مس در طرح اختلاط، مقاومت سایشی نمونه‌ها نیز کاهش یابد. پر واضح است که توصیف دقیق‌تر این نتایج نیازمند انجام آزمایش‌های دیگری مانند SEM و XRD است، که در حال انجام بوده و در بخش دیگری نتایج آن بحث شده است.

لازم به ذکر است که با توجه به نتایج آزمایش‌های سنجش مشخصات مکانیکی جدول‌ها مطابق با استاندارد ملی ایران و همچنین سایر پژوهش‌های انجام شده‌ی پیشین، تا حد قابل قبولی می‌توان دوام مناسب قطعات ذکر شده را در مقابل عوامل محیطی پیش‌بینی کرد. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهند که اضافه کردن روباره‌ی مس ضایعاتی، نه فقط مشکل تأمین ماسه‌ی ۳-۰ را در تولید جدول‌ها حل می‌کند و از هزینه‌های زیاد تولید آن می‌کاهد و معضل آلودگی محیط زیستی آن را مرتفع می‌سازد، بلکه می‌تواند مشخصات مکانیکی آن را در حد مطلوبی حفظ کند.

۴. نتیجه‌گیری

روباره‌ی مس یکی از پس مانده‌های حاصل از فرایند تولید مس است که با توجه به حجم زیاد تولید آن در ایران، عمدتاً در صنایع ماسه‌پاشی استفاده می‌شود. از آنجا که پس از چند بار استفاده در فرایند ماسه‌پاشی، خاصیت ساینده‌ی خود را از دست می‌دهد، در طبیعت بلااستفاده رها می‌شوند و سبب ایجاد مشکلات زیست محیطی خواهد شد. با توجه به اینکه اندازه‌ی ذرات روباره‌ی مس پس از فرایند ماسه‌پاشی در محدوده‌ی اندازه‌ی ریزدانه‌ی ۳-۰ است، می‌تواند به‌عنوان جایگزین مصالح مذکور استفاده شود. ماسه‌ی ریزدانه‌ی ۳-۰ به دلیل پیچیدگی فرایند تولید آن نسبت به ماسه‌ی معمولی، به راحتی در دسترس نیست و در نتیجه هزینه‌ی تولید آن بیشتر است. در پژوهش حاضر، تأثیر جایگزین کردن مواد ضایعاتی ذکر شده در رفتار مکانیکی جدول‌ها بررسی شده است. یافته‌های مطالعه‌ی حاضر به این شرح

4. Najimi, M., Sobhani, J. and Pourkhorshidi, A.R. "Durability of copper slag contained concrete exposed to sulfate attack", *Construction and Building Materials*, **25**(4), pp. 1895-1905 (2011).
5. Lilley, A. "Precast concrete paving, history, design, applications and problems", *The Journal of the Institution of Highways and Transportation*, **35**(7), pp. 18-25 (1989).
6. Aghdam, S.R.H., Tadayon, M., Rezaei, F. and Nofallah, M. "The effect of limestone powder on final water to cement ratio, compressive strength and total water absorption in wet pressed concrete kerb", *5th National Conference on Concrete*, Tehran (2013).
7. Tadayon, M., Rezaei, F., Aghdam, S.R.H. and Kalkhoran J.M. "The effect of initial water to cement ratio and primary cement content on compressive strength and total water absorption in wet pressed concrete kerb", *National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development*, Mashhad (2012).

8. Kalkhoran J.M., Tadayon, M., Rezaei, F. and Hosseini, R. "The effect of grading and maximum aggregate size on water to cement ratio and cement amount in wet pressed concrete kerb", *National Conference on Civil Engineering and Sustainable Development*, Mashhad (2012).
9. Lopez Gaurre, F., Lopez-colina, C., Serrano, M.A. and Lopez-Martinez, A. "Manufacture of concrete kerbs and floor blocks with recycled aggregate from C&DW", *Construction and Building Materials*, **40**, pp. 1193-1199 (2013).
10. Khanzadi, M. and Behnood, A. "Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate", *Construction and Building Materials*, **23**(6), pp. 2183-2188 (2009).
11. Al-Jabri, S., Hisada, K., Makoto, H., Al-Saidy, A. and Al-Oraimi, S.K. "Performance of high strength concrete made with copper slag as a fine aggregate", *Construction and Building Materials*, **23**(6), pp. 2132-2140 (2009).
12. Wu, W., Zhang, W. and Guowei, M. "Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete", *Materials and Design*, **31**(6), pp. 2878-2883 (2010).
13. Wu, W., Zhang, W. and Guowei, M. "Mechanical properties of copper slag reinforced concrete under dynamic compression", *Construction and Building Materials*, **24**(6), pp. 910-917 (2010).
14. Ayano, T. and Sakata, K. "Durability of concrete with copper slag fine aggregate", *Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete* (2000).
15. Hwang, C.L. and Laiw, J.C. "Properties of concrete using copper slag as a substitute for fine aggregate", *The 3rd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete* (1989).
16. Institute of standards and industrial research of Iran, "Aggregate -sampling aggregates-code of practice", ISIRI No. 11267, 1st. Edition (2015).
17. Institute of standards and industrial research of Iran, "Standard method for sieve analysis of fine and coarse aggregates", ISIRI No. 4977 (2014).
18. Institute of standards and industrial research of Iran, "Standard test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate", ISIRI No. 4982 (2011).
19. Institute of standards and industrial research of Iran, "Standard test method for specific gravity and absorption of fine aggregate", ISIRI No. 4980 (2011).
20. Institute of Standards and Industrial Research of Iran, "Standard test method for material finer than 75 μ sieve in mineral aggregate", ISIRI No. 446, 1st revision (2014).
21. Institute of standards and industrial research of Iran, "Concrete kerb units-specifications and test methods", ISIRI No. 12728, 1st Edition (2013).
22. Rojas, M., Rivera, J., Rivera, M. and Marin, F. "Use of recycled copper slag for blended cements", *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **83**(3), pp. 209-217 (2008).