امکان‌سنجی ساخت بتن مگر با استفاده از خرده‌شیشه و سنگدانه‌های بتن بازیافتی

دریافت مقاله: ۱۳۹۶-۱۱-۱۱
پذیرش مقاله: ۱۳۹۷-۴-۲۴

محمد کمالی
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

سیدفتح اله ساجدی*
دانشیار گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران
sajedi@iauahvaz.ac.ir

چکیده:
امروزه استفاده از ضایعات یا خروجی‌های بلااستفاده صنایع در بتن، مورد توجه فعالان صنعت بتن قرار گرفته است. با استفاده از مواد ضایعاتی همچون خرده‌شیشه و سنگدانه‌های بتن بازیافتی در بتن، می‌توان علاوه بر کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در مصرف منابع طبیعی، به خواص مثبت در بتن نیز دست یافت. بر این اساس در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی خواص بتن مگر حاوی خرده‌شیشه و سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از ماسه پرداخته شده است. در مجموع ۱۹۲ نمونه برگرفته از ۱۶ طرح اختلاط مختلف که مواد سیمانی و نسبت آب به مواد سیمانی در تمامی آن‌ها ثابت است، مورد ارزیابی قرار گرفتند. تنها عامل تعیین‌کننده اختلاف آن‌ها، نوع و مقدار مصالح جایگزین شده با ماسه موجود در طرح اختلاط اولیه بتن مگر بود. مقادیر ٪۵، ٪۱۲ و ٪۲۰ خرده‌شیشه و هم‌چنین ٪۲۰ ، ٪۳۰ و ٪۵۰ سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی برای جایگزینی با ماسه طبیعی در نظر گرفته شدند. میزان اسلامپ و وزن مخصوص بتن تازه مورد بررسی قرار گرفت و همین‌طور مقاومت فشاری و میزان عمق نفوذ آب در بتن‌های ساخته شده اندازه‌گیری شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که تقریباً در تمامی این جایگزینی‌ها خواص مکانیکی بتن مگر دچار افت نسبی شدند. با این حال، جایگزینی خرده‌شیشه و سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به ترتیب با درصدهای کمتر از ٪۱۲ و ٪۲۰، علاوه بر دارا بودن توجیه اقتصادی و اثرات مثبت زیست‌محیطی، می‌تواند خواص مکانیکی بتن مگر را تا حدود زیادی بدون تغییر نگه دارد.

کلمات کلیدی: بتن مگر، بتن بازیافتی، سنگدانه، خرده شیشه، ماسه، محیط زیست..

۱.مقدمه

جهان امروز نیازمند انواعی از مصالح ساختمانی است که مساعد و مناسب برای محیط زیست باشند؛ به گونه‌ای که برای تولید آن‌ها انرژی کم‌تری مصرف گردد، به صورت مستقیم و غیر مستقیم سوخت کم‌تری استفاده کنند و آلاینده‌های کم‌تری وارد محیط زیست کنند [۱]. با این حال، عملیات تولید بتن با متغیرها و ابهاماتی همراه است؛ مَگَر این که در مراحل اولیه برنامه‌ریزی، بسیاری از مواردی که منتج به فعالیت‌های بی‌فایده و ضایعاتی می‌شوند، مورد توجه قرار گیرند و اصول ساخت بتن مِگر[1] به شناسایی و مدیریت این ابهامات کمک می‌کند [۲]. بتن مِگر یا بتن تراز کف قالب‌بندی فنداسیون، بتنی سبک است (با سیمان کم، بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ کیلوگرم سیمان در هر متر مکعب بتن) که نام دیگر آن بتن نظافت می‌باشد و در زیر فنداسیون ریخته می‌شود و معمولاً ضخامت آن بین ۱۰ الی ۱۵ سانتی‌متر می‌باشد و از هر طرف ۱۰ الی ۱۵ سانتی‌متر بیش‌تر از ابعاد فنداسیون ریخته می‌شود. این بتن جهت آماده سازی بستر خاکبرداری شده برای آرماتوربندی و صفحه گذاری اجراء می‌گردد [۳].

از طرفی امروزه استفاده از ضایعات یا خروجی‌های بلااستفاده صنایع در بتن، مورد توجه فعالان صنعت بتن قرار گرفته است؛ این امر منجر به برداشت کمتر از مصالح سنگی زمین می‌گردد و در برخی موارد باعث بهبود خواص بتن نیز می‌شود [۴]. اگر بتوان درصدی از بتن را توسط مصالحی از قبیل خرده شیشه جایگزین نمود، علاوه بر کاهش قیمت نهایی، با استفاده از ضایعات شیشه می‌توان در حفظ محیط زیست نیز نقش داشت [۵]. شیشه یکی از پرمصرف‌ترین مواد در صنایع مختلف می‌باشد. تعداد شرکت‌های تولید کننده شیشه در کشور بسیار زیاد بوده و حجم بالای تولید این شرکت‌ها باعث ایجاد ضایعات و پسماند فراوانی می‌شود؛ به گونه‌ای که سالانه هزاران تن از شیشه‌های ضایعاتی بدون هیچ‌گونه بازیافتی در طبیعت رها می‌شود [۱،۴]. بنابراین دلیل استفاده از بتن با سنگدانه‌های شیشه‌ای را می‌توان جلوگیری از تخریب بیش‌تر محیط زیست با استفاده مجدد از شیشه‌های ضایعاتی که غیر قابل بازیافت می‌باشند و هم‌چنین در صورت امکان، بهبود برخی مشخصات بتن دانست [۶].

از سوی دیگر، نیاز به تولید مصالح اولیه برای ساخت بتن به عنوان یکی از پیش شرط‌های ساخت و ساز که پرمصرف‌ترین ماده ساختمانی نیز می‌باشد، باعث برداشت حجم وسیعی از ذخایر سنگدانه‌های طبیعی برای تولید بتن می‌گردد. به همین دلیل از دیرباز محققان در جست و جوی راهی برای کاهش استفاده از مصالح طبیعی زمین بوده‌اند [۱]؛ لذا مسأله بازیافت را مورد توجه قرار دادند. سازه‌های بتن مسلح که در اثر عواملی نظیر زلزله، انفجار، بتن نامرغوب از لحاظ ظاهر، مقاومت فشاری، فرسایش، ناپایداری نابود می‌شوند، بتن بازیافتی را به وجود می‌آورند. بتن ضایعاتی حاصل از تخریب سازه‌ها را می‌توان دوباره خرد کرد و به عنوان سنگدانه در ساخت بتن استفاده نمود. با استفاده از بتن بازیافتی از مشکلات زیست محیطی ناشی از خرده بتن‌های انباشته شده در سطح زمین کاسته می‌گردد و هم‌چنین از استخراج بی‌رویه مصالح سنگی از طبیعت، جلوگیری می‌شود [۷].

در کشورهای پیشرفته از اواخر دهه هفتاد میلادی همگام با صنعت، در زمینه آموزش و پژوهش بتن تحول اساسی صورت پذیرفته و در سال‌های اخیر علیرغم مصرف نسبتاً کنترل شده‌ی بتن در این کشورها، مطالعات زیرساختاری و بهره‌گیری از امکانات و تجهیزات ویژه به منظور پژوهش در حوزه بتن متداول گشته است. این در حالی است که در کشورهای در حال توسعه نظیر کشور ما، با وجود این که میزان مصرف سرانه بتن از متوسط سرانه در جهان بیش‌تر است، توجه کافی به آموزش و پژوهش مبذول نمی‌گردد و اثرات سوء آن در کیفیت نازل بتن‌های مصرفی مشهود است [۱]. با توجه به این که در بیان و معرفی اصول بنیادین شهرهای پایدار، یکی از مسائلی که به آن‌ها اشاره می‌شود، مسأله تقلیل آلودگی‌ها است، در این تحقیق سعی شده است تا نوع خاصی از بتن مِگر را که در تهیه

[1] Lean Concrete

آن از خرده شیشه و سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به عنوان جایگزینی برای سنگدانه استفاده می‌شود، معرفی شود. هم‌چنین به منظور ارائه یک راه‌کار عملی جهت دفع و بهره‌گیری از ضایعات و حفظ محیط زیست، به بررسی امکان استفاده از خرده شیشه و سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه مصرفی بتن مِگر پرداخته شده است. با به‌کارگیری خرده شیشه‌های ضایعاتی در بتن، بتنی ویژه ساخته می‌شود که در کلیه پروژه‌های ساختمانی و عمرانی کاربرد خواهد داشت. به منظور امکان‌سنجی جایگزینی این مصالح، نمونه‌های متعددی از بتن مِگر با جایگزینی سنگدانه با خرده شیشه و سنگدانه ریز بتن بازیافتی یا ترکیبی از سنگدانه ریز بازیافتی و خرده شیشه با درصدهای متفاوت ساخته شده است. به تناسب استفاده از خرده شیشه سنگدانه بازیافتی در بتن، از مقدار سنگدانه معمول بتن کسر می‌گردد که این امر باعث صرفه‌جویی در مصرف منابع و حفظ آن برای آیندگان می‌شود. در این تحقیق، تأثیر جایگزینی این مصالح بر خواص بتن مِگر، مورد بررسی گرفته است.

۲.پیشینه تحقیق

بازیافت برخی مواد ضایعاتی جهت استفاده در بتن راه‌کار مناسبی برای نیل به دو هدف، دفع مواد زاید و دست‌یابی به خواص مثبت در بتن می‌باشد. در این راستا، استفاده از برخی مواد ضایعاتی در بتن علاوه بر حفاظت از محیط زیست، باعث صرفه‌جویی در مصرف مواد اولیه نیز می‌شود. یکی از این مواد زاید، خرده شیشه‌های ضایعاتی است [۸]. یکی دیگر از مواد، سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی است؛ به این صورت که بتن ضایعاتی می‌تواند دوباره خرد شده، به عنوان سنگدانه در ساخت بتن استفاده گردد [۷]. همچنان که اُمران و تاگنیت-هامو[1] (۲۰۱۶) در تحقیق خود نشان دادند که بتن ساخته شده با جایگزینی ۲۰ درصد پودر شیشه، افزایش مقاومت فشاری، مقاوت کششی، مقاومت خمشی و مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید را به همراه دارد [۹]. نتایج به‌دست آمده از تحقیق نیلی، بیگلری‌جو و رزم آرا (۱۳۹۴) حاکی از آن بود که امکان کاربرد بتن‌های تخریبی و شیشه‌های بازیافتی در بتن‌های جدید وجود دارد [۱۰]. جانی و هوگلند[2] (۲۰۱۴) بیان کردند که می‌توان در تهیه سیمان و بتن از شیشه بازیافتی استفاده کرد [۱۱]. امام علی و الترساوی[3] (۲۰۱۴) استفاده از شیشه بازیافتی را به جایگزین بخشی از ریزدانه بتن خودتراکم را کاملاً موفقیت آمیز دانستند [۱۲]. در تحقیق ساربیک و همکاران[4] (۲۰۱۳) مشخص شد که افزایش حضور خرده شیشه بازیافتی در بتن پلیمری باعث بهبود قابل توجه در مقاوت فشاری و مقاوت خمشی می‌شود [۱۳]. نتایج تحقیق فرخزاد و همکاران (۱۳۹۲) بیانگر بهبود نسبی خواص مکانیکی بتن با افزایش میزان جایگزینی بود [۱۴]. رنجبر و همکاران (۱۳۹۲) میزان بهینه استفاده از شیشه در نمونه‌های بتنی ساخته شده را حداکثر ٪۵ اعلام کردند [۱۵]. عباسی دزفولی و همکاران (۱۳۹۱) کاربرد بتن حاوی خرده شیشه در اماکن در معرض خوردگی را توجیه پذیر و اقتصادی اعلام کردند [۱۶]. لی و همکاران[5] (۲۰۱۲) آثار استفاده از سنگدانه شیشه بازیافتی بر خواص بلوک‌های بتنی را مورد بررسی قرار دادند و مشاهده نمودند که افزودن خرده شیشه کاهش مقاومت بتن را به همراه دارد [۱۷]. نتایج بدست آمده از تحقیق کاسترو و بریتو[6] (۲۰۱۲) نشان دهنده تأثیر ابعاد خرده شیشه بازیافتی بر کارایی بتن بود [۱۸]. خالو، خداویردی زنجان و حسینی (۱۳۸۹) به بررسی ساخت بتن خودتراکم با استفاده از درشت دانه‌های بازیافتی پرداختند و مشاهده شد که جایگزینی ٪۲۵ درشت دانه بازیافتی با درشت‌دانه غیربازیافتی منجر به ساخت بتن خودتراکم می‌شود [۱۹]. نتایج تحقیق مقیمی و همکاران (۱۳۸۹) نشان داد که استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده، باعث دست‌یابی به بتن بازیافتی با مقاومت فشاری و کششی بیشتر، نسبت به بتن معمولی می‌گردد [۲۰].

---

[1] Omrana & Tagnit-Hamoua
[2] Jani & Hogland
[3] Emam Ali & Al-Tersawy
[4] Sariviyik et al.
[5] Lee et al
[6] Castro & Brito

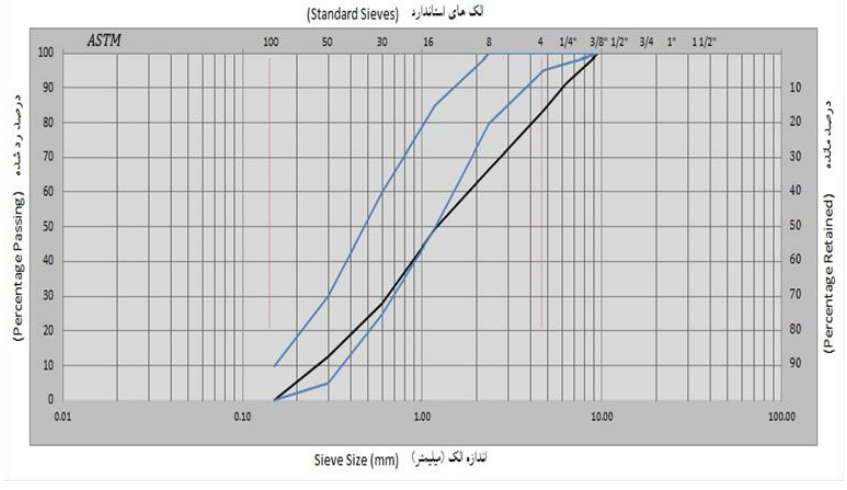
۳. روش تحقیق

با توجه به این که هدف کلی از انجام این تحقیق جایگزینی خرده‌شیشه و سنگدانه ریز بتن بازیافتی در ساخت بتن مگر می‌باشد، روند تحقیق به‌صورت خلاصه این گونه است که پس از تهیه خرده‌شیشه و سنگدانه بتن بازیافتی شروع به ساختن نمونه‌های اولیه این بتن نموده و پس از گذشت زمان گیرش بتن و عمل‌آوری بتن، آزمایش‌های مختلفی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج حاصل به صورت جدول و نمودار ارائه شده است و پس از مقایسه با نتایج حاصل از نمونه ساخته شده فاقد خرده شیشه و سنگدانه ریز بتن بازیافتی، تأثیر این جایگزینی‌ها بر خواص مکانیکی بتن مگر مشخص گردید.

۴. اجزای ساخت بتن مگر

۴-۱- ماسه طبیعی

ماسه طبیعی مورد نیاز در این تحقیق از معادن منطقه رستم‌آباد شهرستان رامهرمز واقع در استان خوزستان تهیه شده است. منحنی دانه‌بندی ماسه طبیعی مصرفی در این تحقیق در شکل ۱ و مقادیر مربوط به وزن مخصوص (ظاهری و حقیقی)، درصد رطوبت، درصد جذب آب، هم ارز ماسه‌ای، افت وزنی در برابر سولفات سدیم/ ساندنس[1] و مدول نرمی در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی ماسه طبیعی استفاده شده در این تحقیق

جدول ۱- نتایج آزمایش‌های وزن مخصوص (ظاهری و حقیقی)، درصد رطوبت، درصد جذب آب، هم‌ارز ماسه‌ای، افت وزنی در برابر سولفات سدیم و مدول نرمی ماسه طبیعی

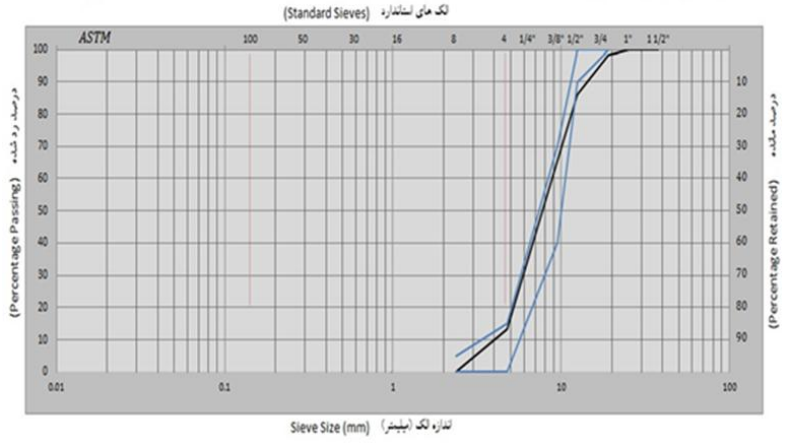
وزن مخصوص g/cm^3		رطوبت	جذب آب	هم‌ارز ماسه‌ای	افت وزنی در برابر سولفات سدیم	مدول نرمی
ظاهری	حقیقی	٪	٪	٪	٪	
۲/۵۲۰	۲/۴۴۷	۰/۳۳	۱/۱	۹۰	۰/۹۳	۳/۶۰

۴-۲- شن به ابعاد ۳/۴ و ۳/۸ اینچ

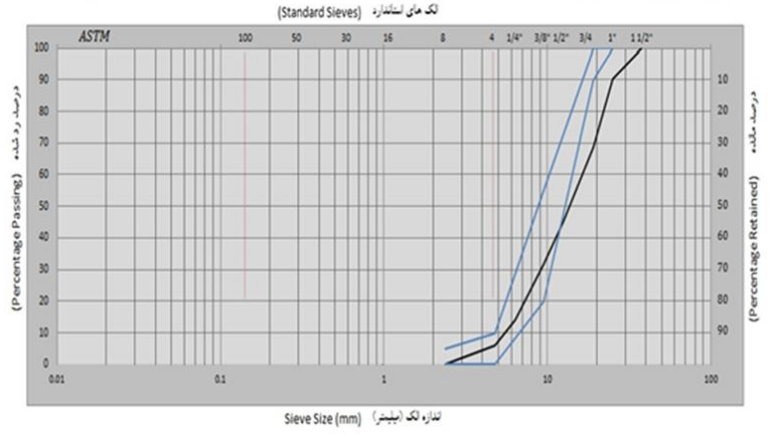
شن مصرفی جهت ساخت تمام طرح‌های اختلاط این تحقیق مانند مصالح ریزدانه از معادن منطقه رستم‌آباد شهرستان رامهرمز واقع در استان خوزستان تهیه شده است. منحنی دانه‌بندی شن ۳/۸ اینچ در شکل ۲ و منحنی دانه بندی شن ۳/۴ اینچ در شکل ۳ آورده شده است. هم‌چنین مقادیر مربوط به وزن مخصوص (ظاهری و حقیقی)،

[1] Sandenss

درصد رطوبت، درصد جذب آب، درصد سنگدانه طویل و درصد سنگدانه متورق، افت وزنی در برابر سولفات سدیم و افت وزنی در برابر سایش در جداول ۲ و ۳ به ترتیب برای شن ۳/۸ و ۳/۴ اینچ ارائه شده است.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی شن ۳/۸ اینچ استفاده شده در این تحقیق



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی شن ۳/۴ اینچ استفاده شده در این تحقیق

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های وزن مخصوص (ظاهری و حقیقی)، درصد رطوبت، درصد جذب آب، درصد سنگدانه طویل و درصد سنگدانه متورق، افت وزنی در برابر سولفات سدیم و افت وزنی در برابر سایش شن ۳/۸ اینچ

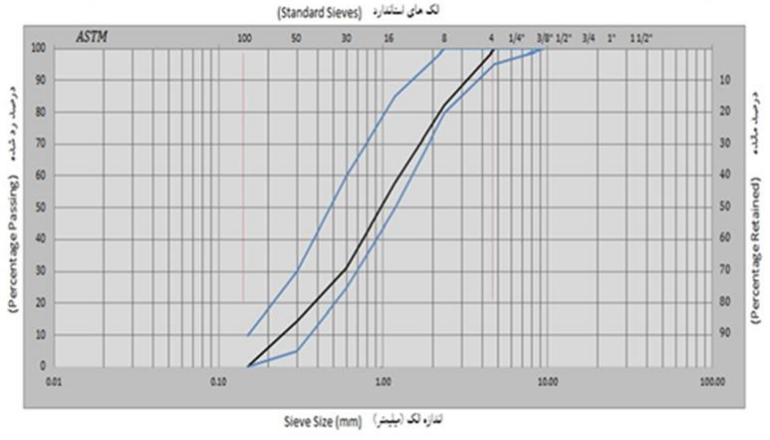
وزن مخصوص (g/cm^3)		رطوبت	جذب آب	سنگدانه طویل	سنگدانه متورق	افت وزنی در برابر سولفات سدیم	افت وزنی در برابر سایش
ظاهری	حقیقی	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
۲/۶۶۶	۲/۶۰۳	۰/۲۸	۱/۰	۸	۷	۰/۳۳	۲۳

جدول ۳- نتایج آزمایش‌های وزن مخصوص (ظاهری و حقیقی)، درصد رطوبت، درصد جذب آب، درصد سنگدانه طویل و درصد سنگدانه متورق، افت وزنی در برابر سولفات سدیم و افت وزنی در برابر سایش شن ۳/۴ اینچ

وزن مخصوص (g/cm^3)		رطوبت	جذب آب	سنگدانه طویل	سنگدانه متورق	افت وزنی در برابر سولفات سدیم	افت وزنی در برابر سایش
ظاهری	حقیقی	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
۲/۶۵۸	۲/۵۹۵	۰/۲۸	۰/۹	۱۱	۱۸	۰/۲	۱۹

۴-۳- خرده شیشه بازیافتی

در این تحقیق خرده شیشه مورد نیاز از ضایعات شیشه‌های ساختمانی تهیه شد و پس از جمع‌آوری ضایعات شیشه جهت خرد کردن آن‌ها از چکش فلزی استفاده شد؛ سپس خرده شیشه به‌دست آمده از الک نمره ۴ عبور داده شد تا ذرات خرده شیشه در محدوده ماسه قرار گیرند. منحنی دانه‌بندی خرده شیشه مصرفی در شکل ۴ و مقادیر مربوط به آزمایش‌های وزن مخصوص (ظاهری و حقیقی)، درصد رطوبت، درصد جذب آب، افت وزنی در برابر سولفات سدیم و مدول نرمی این مصالح در جدول ۴ آورده شده است. هم‌چنین تصویر خرده شیشه مصرفی در این تحقیق در شکل شماره ۵ ارائه شده است.



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی خرده شیشه بازیافتی استفاده شده در این تحقیق

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های وزن مخصوص (ظاهری و حقیقی)، درصد رطوبت، درصد جذب آب، افت وزنی در برابر سولفات سدیم و مدول نرمی خرده شیشه بازیافتی

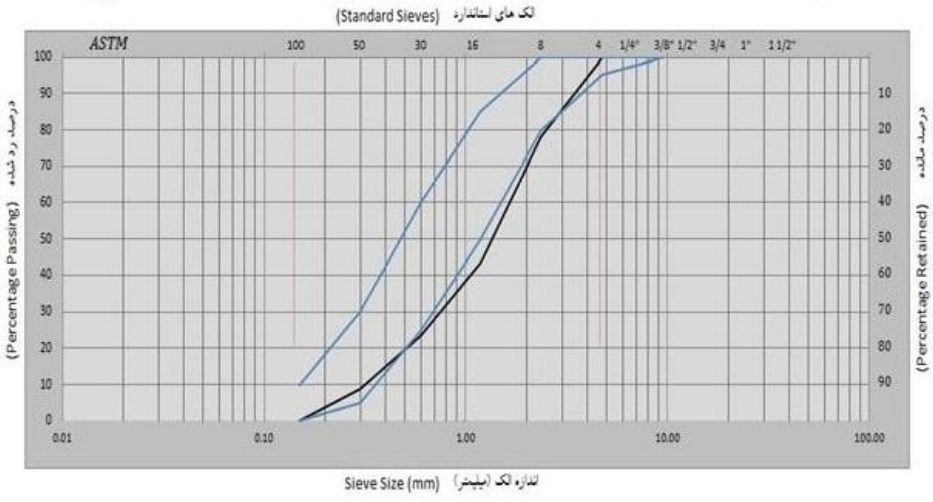
وزن مخصوص (g/cm^3)		رطوبت	جذب آب	هم‌ارز ماسه‌ای	افت وزنی در برابر سولفات سدیم	مدول نرمی
ظاهری	حقیقی	(%)	(%)	(%)	(%)	
۲/۳۹۶	۲/۳۷۸	۰	۰	-	۳/۲۴	۳/۱۵

شکل ۵- خرده شیشه استفاده شده در این تحقیق

۴-۴- سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی

جهت کاربردی بودن هر چه بیش‌تر این تحقیق، سنگدانه ریز بتن بازیافتی از خرد کردن بتن‌هایی با مقاومت فشاری متفاوت تهیه شد. سنگدانه ریز بتن بازیافتی این تحقیق پس از خرد کردن نمونه بتن‌های قدیمی با استفاده از چکش فلزی و عبور دادن مصالح به‌دست آمده از الک نمره ۴ مورد استفاده قرار گرفت. منحنی دانه‌بندی در شکل ۶

و مقـادیر مربـوط بـه درصـد جـذب آب، درصـد رطوبـت، وزن مخصـوص در جـدول شـماره ۵ آورده شـده اسـت. هـمچنـین تصویر سنگدانه ریز بتن بازیافتی مصرفی در این تحقیق در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۶: منحنی دانه‌بندی سنگدانه ریز بتن بازیافتی استفاده شده در این تحقیق

جدول ۵: نتایج آزمایش‌های وزن مخصوص (ظاهری و حقیقی)، درصد رطوبت، درصد جذب آب، افت وزنی در برابر سولفات سدیم و مدول نرمی سنگدانه ریز بتن بازیافتی

وزن مخصوص (g/cm^3)		رطوبت	جذب آب	هم‌ارز ماسه‌ای	افت وزنی در برابر سولفات سدیم	مدول نرمی
ظاهری	حقیقی	(%)	(%)	(%)	(%)	
۲/۳۰۳	۲/۲۳۸	۴/۵۱	۱۱/۳۸	-	۸/۰۷	۳/۱۵

شکل ۷: سنگدانه ریز بتن بازیافتی استفاده شده در این تحقیق

۴-۵- آب اختلاط

آب لازم در ایـن تحقیـق جهـت سـاخت تمـام نمونـه‌هـای بتنـی از آب لولـه‌کشـی شهرسـتان رامهرمـز در اسـتان خوزسـتان تأمین شده است و خواص شیمیایی آن در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶- نتایج آزمایش‌های شیمیایی آب مصرفی در این تحقیق

ردیف	نوع ماده زیان‌آور	استاندارد آزمایش	مقادیر محاسبه شده (ppm)	نوع بتن و شرایط محیطی	حداکثر غلظت مجاز (ppm)
۱	باقیمانده تبخیر (mg/l)	ASTM D1881	۲۱۵۰	بتن آرمه در شرایط محیطی ملایم	۲۰۰۰
				بتن بدون آرماتور	۳۵۰۰۰
۲	سولفات‌ها (mg/l)	ASTM D514	۹۷۰	بتن آرمه و بتن پیش‌تنیده	۱۰۰۰
				بتن بدون آرماتور	۳۰۰۰
۳	کلرورها (mg/l)	ASTM D512	۳۷۶	بتن آرمه در شرایط محیطی شدید	۵۰۰
				بتن بدون آرماتور	۱۰۰۰۰
۴	ذرات جامد معلق (mg/l)	ASTM D1881	۱۰۰	بتن آرمه در شرایط محیطی شدید و بتن پیش‌تنیده	۱۰۰۰
				بتن آرمه در شرایط محیطی ملایم و بتن بدون آرماتور	۲۰۰۰
۵	قلیائیت معادل $Na_2o+0.658K_2o$	ASTM D1067	۲۱۰	انواع بتن	۶۰۰
۶	pH		۸/۶۵	انواع بتن	۵ تا ۸/۵

۴-۶- سیمان

سیمان مصرفی در این تحقیق سیمان پرتلند نوع ۲ کارخانه سیمان بهبهان می باشد. این نوع از سیمان بر اساس استاندارد ملی ایران[1] تولید شده است و نتایج تجزیه شیمیایی انجام شده بر روی آن در جدول ۷ آورده شده است.

جدول ۷- اجزای شیمیایی سیمان مصرفی در تحقیق

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱
اکسید	سیسلیسیم	آلومینیم	آهن	کلسیم	منیزیم	سدیم	پتاسیم	گوگرد	افت جرم حرارتی	باقی‌مانده نامحلول	قلیائیت کل بر حسب Na_2O
درصد	**۲۱/۳۶**	**۵/۳۰**	**۴/۷۰**	**۶۲/۳۰**	**۱/۷۵**	**۰/۲۷**	**۰/۶۱**	**۲/۱۲**	**۱/۱۸**	**۰/۶۵**	**۰/۶۷**

فازهای چهارگانه سیمان مصرفی

فاز	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
درصد	۴۲/۹	۲۸/۹	۶/۰۹	۱۴/۳

۵- آماده سازی مصالح و برنامه آزمایشگاهی

۵-۱- طرح های اختلاط تحقیق

طرح اختلاط اولیه همه نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد و سعی گردید تا عوامل تأثیرگذار بر شرایط آزمایش از جمله درجه حرارت محیط، رطوبت، درجه آب عمل‌آوری و دیگر عوامل تأثیرگذار ثابت نگه داشته شوند و تنها تفاوت نمونه‌های ساخته شده در مقدار جایگزینی خرده شیشه و سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی باشد. مقادیر ٪۵، ٪۱۲ و ٪۲۰ برای جایگزینی خرده شیشه با ماسه طبیعی و هم‌چنین مقادیر ٪۲۰ ، ٪۳۰ و ٪۵۰ برای جایگزینی سنگدانه ریز بتن بازیافتی با ماسه طبیعی در نظر گرفته شد. علاوه بر طرح‌های اختلاط فوق، تعداد ۹ طرح اختلاط دیگر جهت بررسی ترکیب همزمان جایگزینی خرده شیشه و سنگدانه ریز بتن بازیافتی با ماسه طبیعی نیز ساخته شد. در آخر جهت بررسی آثار این مصالح جایگزین، تمام طرح‌های اختلاط ساخته شده با یک طرح اختلاط شاهد و بدون جایگزینی مقایسه گردید. مقادیر مصالح به کار رفته برای هر طرح اختلاط در جدول ۸ ارائه شده است.

[1] Institute of Standard & Industrial Research of Iran (ISIRI)

جدول ۸- جزئیات طرح‌های اختلاط بتن‌های ساخته شده در تحقیق

ردیف	علامت اختصاری	درصد جایگزینی خرده شیشه	درصد جایگزینی بتن بازیافتی	درشت دانه طبیعی (Kg/m^3)	ریزدانه طبیعی (Kg/m^3)	خرده شیشه جایگزین شده (Kg/m^3)	بتن بازیافتی جایگزین شده (Kg/m^3)	آب (Kg/m^3)	عیار سیمان (Kg/m^3)	اسلامپ (mm)	وزن مخصوص (g/cm^3)
۱	Ref	۰	۰	۹۷۰	۱۱۵۰	۰	۰	۱۲۸	۱۵۰	۵۰	۲/۱۸۵
۲	S01,05,00	۵	۰	۹۷۰	۱۰۹۲/۵	۵۷/۵	۰	۱۲۸	۱۵۰	۵۰	۲/۱۷۹
۳	S02,12,00	۱۲	۰	۹۷۰	۱۰۱۲	۱۳۸	۰	۱۲۸	۱۵۰	۵۰	۲/۱۶۳
۴	S03,20,00	۲۰	۰	۹۷۰	۹۲۰	۲۳۰	۰	۱۲۸	۱۵۰	۵۰	۲/۱۵۳
۵	S04,00,20	۰	۲۰	۹۷۰	۹۲۰	۰	۲۳۰	۱۲۸	۱۵۰	۵۰	۲/۱۵۵
۶	S05,00,30	۰	۳۰	۹۷۰	۸۰۵	۰	۳۴۵	۱۲۸	۱۵۰	۴۵	۲/۱۳۸
۷	S06,00,50	۰	۵۰	۹۷۰	۵۷۵	۰	۵۷۵	۱۲۸	۱۵۰	۴۵	۲/۱۱۱
۸	S07,05,20	۵	۲۰	۹۷۰	۸۶۲/۵	۵۷/۵	۲۳۰	۱۲۸	۱۵۰	۵۰	۲/۱۵۰
۹	S08,12,20	۱۲	۲۰	۹۷۰	۷۸۲	۱۳۸	۲۳۰	۱۲۸	۱۵۰	۵۰	۲/۱۳۱
۱۰	S09,20,20	۲۰	۲۰	۹۷۰	۶۹۰	۲۳۰	۲۳۰	۱۲۸	۱۵۰	۵۵	۲/۱۰۱
۱۱	S10,05,30	۵	۳۰	۹۷۰	۷۴۷/۵	۵۷/۵	۳۴۵	۱۲۸	۱۵۰	۴۵	۲/۱۲۹
۱۲	S11,12,30	۱۲	۳۰	۹۷۰	۶۶۷	۱۳۸	۳۴۵	۱۲۸	۱۵۰	۴۵	۲/۱۱۳
۱۳	S12,20,30	۲۰	۳۰	۹۷۰	۵۷۵	۲۳۰	۳۴۵	۱۲۸	۱۵۰	۴۵	۲/۰۸۹
۱۴	S13,05,50	۵	۵۰	۹۷۰	۵۱۷/۵	۵۷/۵	۵۷۵	۱۲۸	۱۵۰	۴۵	۲/۱۱۷
۱۵	S14,12,50	۱۲	۵۰	۹۷۰	۴۳۷	۱۳۸	۵۷۵	۱۲۸	۱۵۰	۴۰	۲/۰۸۸
۱۶	S15,20,50	۲۰	۵۰	۹۷۰	۳۴۵	۲۳۰	۵۷۵	۱۲۸	۱۵۰	۴۰	۲/۰۶۹

Si,a,b یعنی طرح اختلاط شماره iام که در آن درصدهای مصرفی خرده‌شیشه و سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به ترتیب a و b می‌باشند.

۵-۲- شرایط ساخت نمونه

قبل از شروع به ساخت، درصد رطوبت و جذب آب سنگدانه‌ها تعیین گردید و مقدار آب مصرفی در طرح مخلوط با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده تصحیح شد. پس از آماده شدن مقادیر لازم برای یک طرح اختلاط خاص، مصالح به‌طور دقیق توزین گشت و قبل از ریختن مصالح درون مخلوط‌کن، ابتدا داخل آن یک ملات ساده ساخته می‌شد تا هنگام ساخت مخلوط اصلی، مصالح به جداره دیگ مخلوط‌کن نچسبد. با توجه به تعداد طرح‌های اختلاط و به

منظـور جلـوگیری از هـدر رفـت مصـالح مصـرفی، جهـت انجـام آزمـایش‌هـا بـه میـزان حجـم ۲۰ نمونـه مکعبـی ۱۵۰*۱۵۰*۱۵۰ میلـی‌متـری بـرای هـر طـرح اخـتلاط بـتن بـا رعایـت نسـبت مقـادیر طبـق جـدول شـماره ۷، بـتن تـازه ساخته شد. هم‌چنین از یک مخلوط‌کن برقی با جام متحرک و چرخشی جهت ساخت بتن در تحقیق استفاده شد.

اختلاط اجزاء بتن در مخلوط‌کن جهت ساخت تمام طرح‌ها به ترتیب زیر در سه مرحله به شرح زیر صورت گرفت:

الف: کل شن و نصف آب محاسبه شده به مدت یک دقیقه

ب: کل ماسه (و مصالح جایگزین) و یک چهارم از آب محاسبه شده به مدت یک دقیقه

ج: کل سیمان و یک چهارم از آب محاسبه شده به مدت دو دقیقه

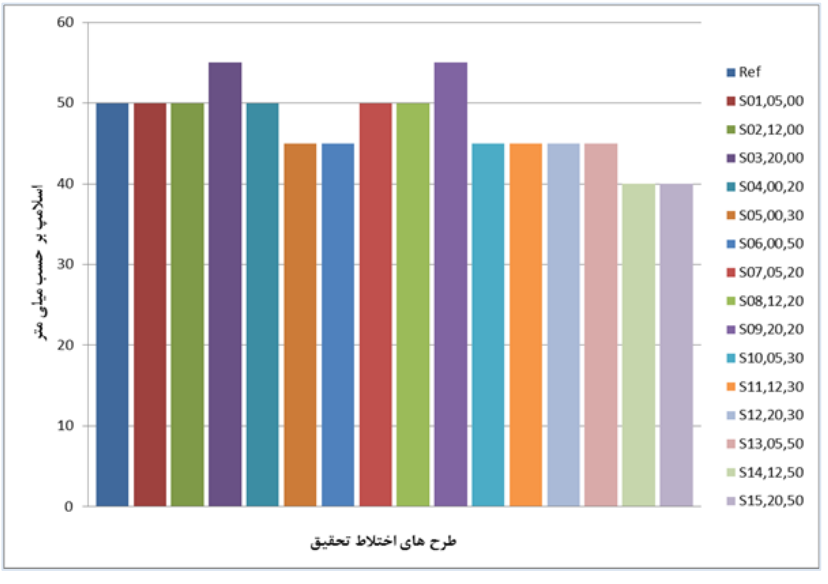
۵-۳- واکنش قلیایی- سیلیسی[1] در حضور خرده‌شیشه بازیافتی

در اثر هیدراسیون سیمان، واکنشی بـین سـنگدانه‌هـای سـیلیکاتی و برخـی محلـول‌هـای بـا خاصـیت قلیـایی ایجـاد مـی‌شـود کـه از آن بـه عنـوان واکـنش قلیـایی- سیلیسـی یـاد مـی‌شـود. در نتیجـه واکـنش قلیـایی- سیلیسـیt ژل بـا انبسـاط زیـادی تولید خواهد شد که منجـر بـه تـرک و خرابـی در بـتن مـی‌شـود. بـه‌طـور کلـی ایـن واکـنش در بـتن بـه سـه عامـل بسـتگی دارد: آب، قلیـای آزاد شـده از سـیمان در زمـان هیدراسـیون و نـوع سـنگدانه [۲۱،۲۲]. امـا عوامـل مختلفـی مثـل تخلخـل بتن، نفوذپذیری بتن، رطوبـت محـل بـتن‌ریـزی و حجـم سـنگدانه‌هـای فعـال در مصـالح در میـزان انبسـاط ناشـی از واکـنش قلیـایی- سیلیسـی دخالـت دارنـد [۲۴، ۲۳]. حضـور خـرده‌شیشـه بازیـافتی در بـتن باعـث مسـاعد شـدن شـرایط واکـنش قلیـایی- سیلیسـی مـی‌شـود. بنـابراین قبـل از مصـرف خـرده‌شیشـه بازیـافتی بـه عنـوان جـایگزین بخشـی از ماسـه در بـتن مگر، لازم است تحقیـق تکمیلـی جهـت بررسـی دقیـق و آزمایشـگاهی میـزان تـأثیر ایـن نـوع از مصـالح بازیـافتی بـر واکـنش قلیایی- سیلیسی در بتن مگر انجام گردد.

۶. تحلیل نتایج

۶-۱- تحلیل نتایج آزمایش میزان روانی (اسلامپ) بتن تازه

نتایج آزمـایش انـدازه‌گیـری کـارایی مخلـوط‌هـای بتنـی بـا اسـتفاده از اسـتاندارد ASTM C143 تعیـین شـده اسـت؛ هـدف از انجام این آزمایش بررسی تـأثیر جـایگزینی مصـالح بازیـافتی بـر میـزان روانـی بـتن مـی‌باشـد. نتـایج بـه دسـت آمـده از ایـن آزمایش در نمودار ۱ ارائه شده است.

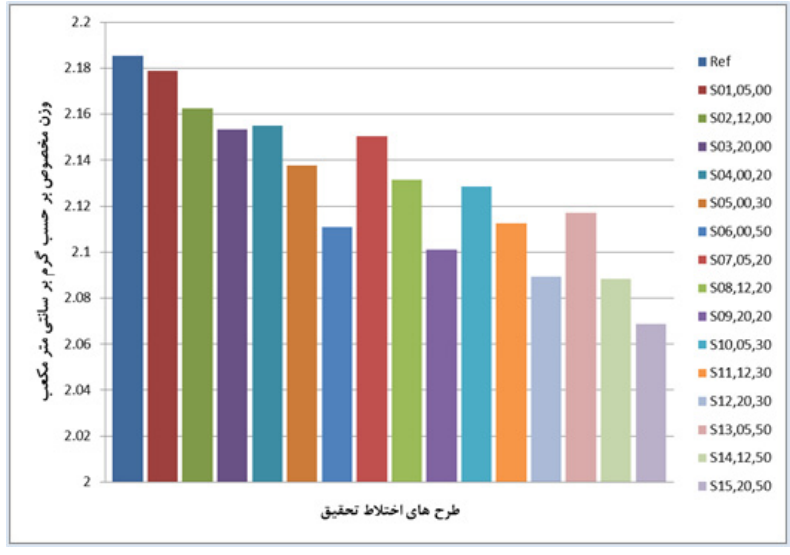


نمودار ۱- تغییرات در اسلامپ مرتبط با طرح‌های اختلاط تحقیق

[1] Alkali-Silica Reaction (ASR)

۶-۲- تحلیل نتایج آزمایش وزن مخصوص بتن تازه

پس از ساخت طرح‌های اختلاط، به منظور کنترل یکنواختی مخلوط‌های ساخته شده با حضور مصالح بازیافتی در طول دوره انجام آزمایش‌ها، وزن مخصوص بتن تازه بتن مگر مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج به‌دست آمده در نمودار۲ بر حسب گرم بر سانتی‌متر مکعب آورده شده است.



نمودار ۲- تغییرات در وزن مخصوص مرتبط با طرح‌های اختلاط تحقیق

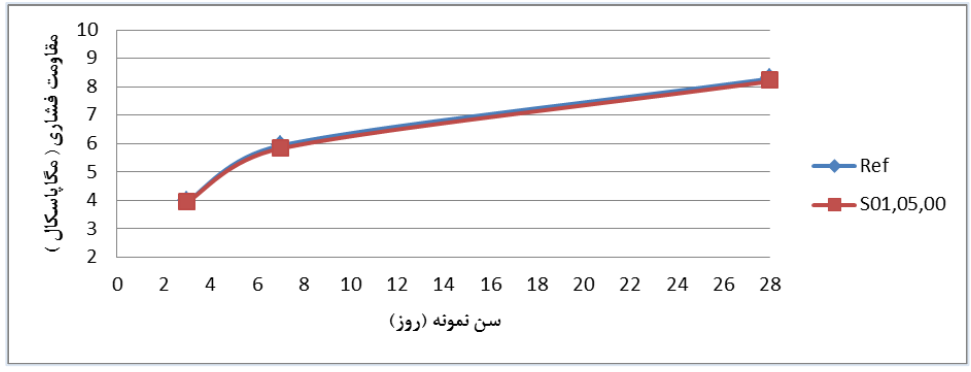
با دقت در نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده روی سنگدانه‌های بازیافتی و با در نظر گرفتن این موضوع که وزن مخصوص نمونه‌های بتنی کاملاً تحت تأثیر وزن مخصوص مصالح مصرفی در آن‌ها می‌باشند، کاهش وزن مخصوص در نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق قابل توجیه می‌باشد. در جدول ۴-۲ کاملاً مشهود است که وزن مخصوص نمونه‌های بتنی و درصد جایگزینی مصالح بازیافتی با ماسه، رابطه مستقیم دارد.

۶-۳- تحلیل نتایج مقاومت فشاری

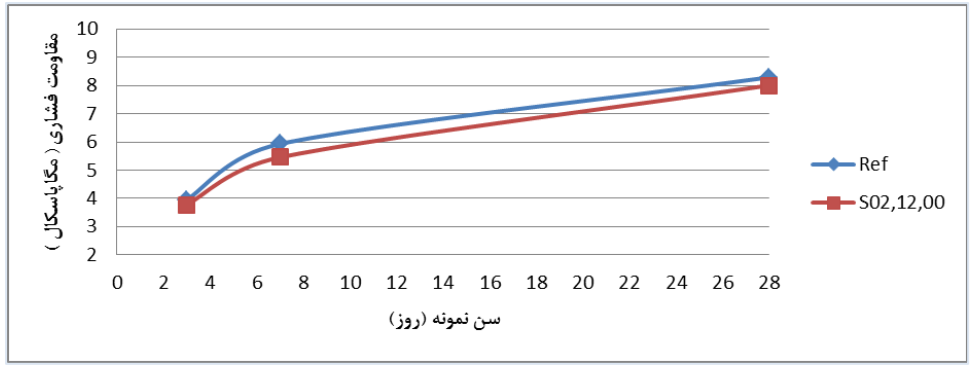
آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد BS1881-Part116 بر روی نمونه‌های عمل‌آوری شده به صورت مرطوب در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها در سنین مختلف و با در نظر گرفتن نوع مصالح جایگزین شده به طور جداگانه ارائه شده است.

۶-۳-۱- طرح‌های اختلاط ساخته شده با خرده شیشه بازیافتی

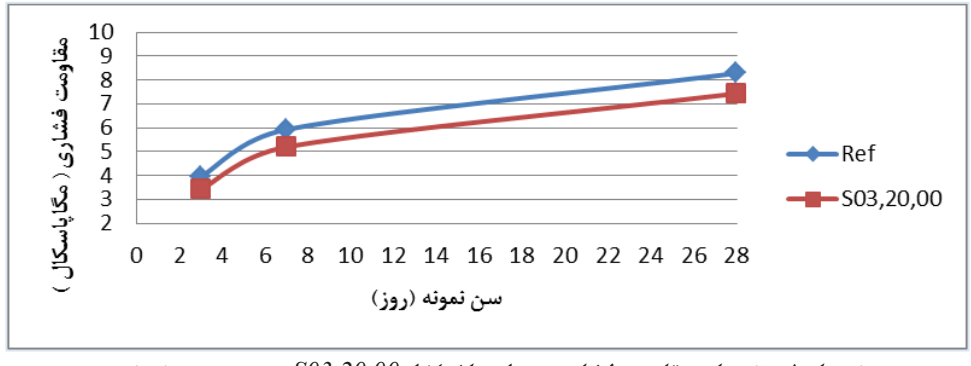
برای بررسی آثار استفاده از خرده شیشه بازیافتی در بتن مگر، این مصالح بازیافتی به ترتیب با ٪۵، ٪۱۲و ٪۲۰ وزن ماسه جایگزین شد و نتایج این جایگزینی در نمودارهای شماره ۳ الی ۶ آمده است.



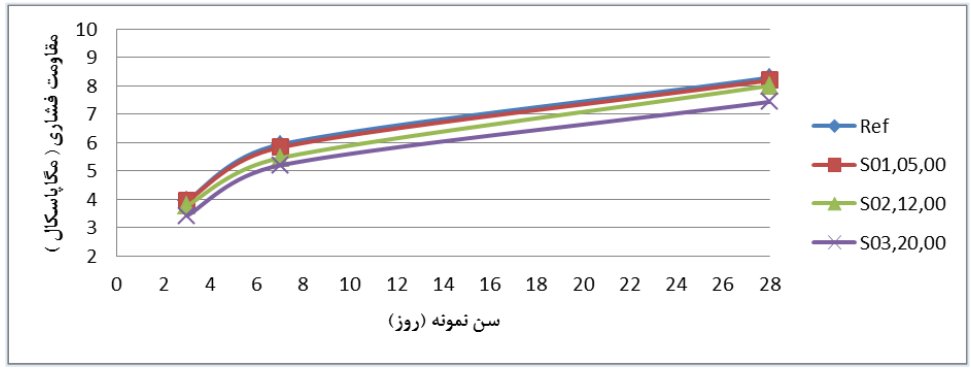
نمودار ۳- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط S01,05,00 بر حسب سن نمونه



نمودار ۴- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط S02,12,00 بر حسب سن نمونه



نمودار ۵- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط S03,20,00 بر حسب سن نمونه

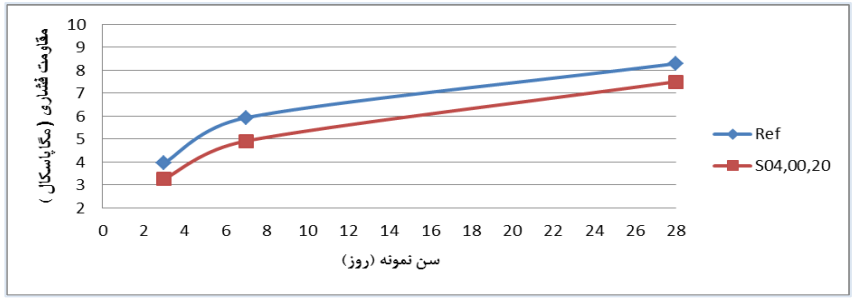


نمودار ۶- تغییرات مقاومت فشاری در تمام طرح‌های اختلاط ساخته شده با خرده شیشه بازیافتی بر حسب سن نمونه

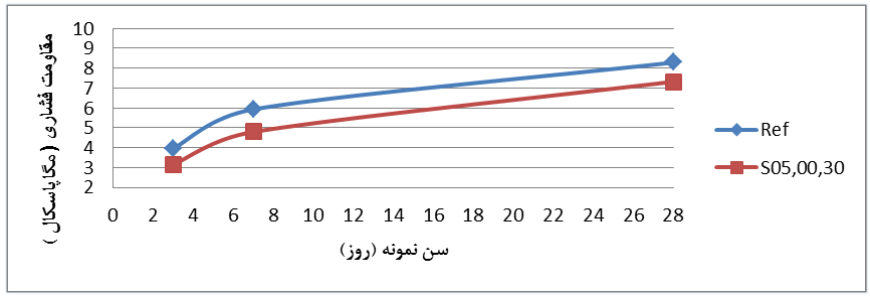
بر اساس نتایج بدست آمده مشخص شد که تأثیر جایگزینی خرده شیشه بازیافتی با مقادیر کمتر از ٪۱۲ وزنی ماسه بر مقاومت فشاری بتن مگر بسیار ناچیز است (کمتر از ٪۳/۵)؛ اما آثار این جایگزینی با درصدهای بالاتر کاملا محسوس است به نحوی که با جایگزینی این مصالح بازیافتی با ٪۲۰ وزن ماسه موجود در طرح اختلاط اولیه، کاهش مقاومت فشاری به بیش از ٪۱۱ خواهد رسید. دلیل این کاهش مقاومت را باید در خصوصیات فیزیکی خرده شیشه بازیافتی جستجو کرد. با توجه به سطح صیقلی این مصالح بازیافتی، مشخص است که هیچ‌گونه چسبندگی بین دیگر مصالح و خرده شیشه‌های بازیافتی به واسطه حضور سیمان به‌وجود نخواهد آمد و همین امر باعث افزایش تخلخل و در نتیجه کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود.

۶-۳-۲- طرح‌های اختلاط ساخته شده با سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی

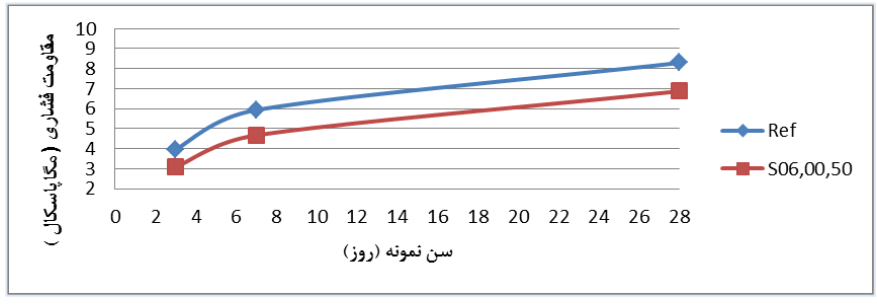
در این تحقیق، سنگدانه ریز بتن بازیافتی به ترتیب با ٪۲۰، ٪۳۰ و ٪۵۰ وزن کل ماسه موجود در طرح اختلاط اولیه جایگزین شد. نتایج این جایگزینی در نمودارهای ۷ الی ۱۰ ارائه شده است.



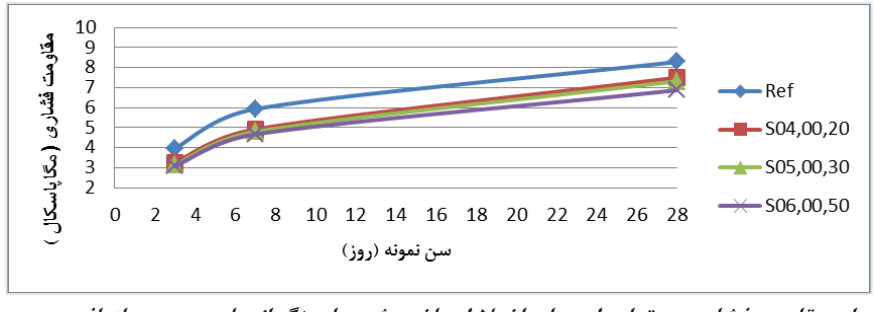
نمودار ۷- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط S04,00,20 بر حسب سن نمونه



نمودار ۸- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط S05,00,30 بر حسب سن نمونه



نمودار ۹- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط S06,00,50 بر حسب سن نمونه



نمودار ۱۰- تغییرات مقاومت فشاری در تمام طرح‌های اختلاط ساخته شده با سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی بر حسب سن نمونه

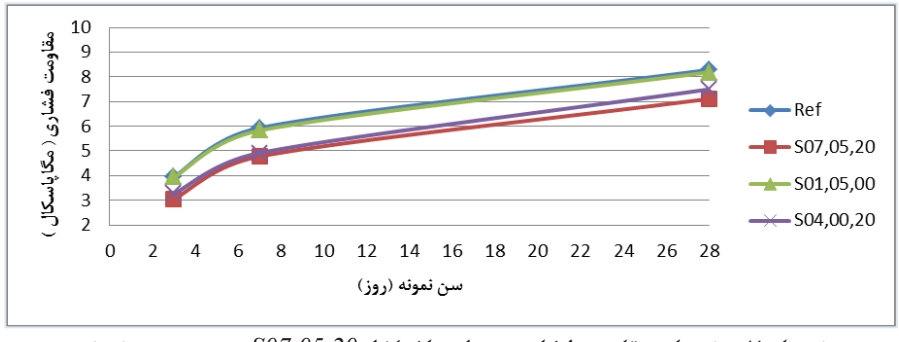
هم‌چنان که از نتایج مشخص است کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با مقدار جایگزینی خرده بتن بازیافتی نسبت مستقیم دارد به نحوی که کاهش مقاومت فشاری برای نمونه‌های با سن ۲۸ روزه و با جایگزینی ٪۲۰، ٪۳۰ و ٪۵۰ به ترتیب برابر ٪۹/۴، ٪۱۱/۶ و ٪۱۷/۱ ثبت شد.

کاهش مقاومت فشاری در این نمونه‌ها با عوامل مختلفی مرتبط است که مهم‌ترین این عوامل را می‌توان استحکام پایین سنگدانه‌های به‌دست آمده از بتن بازیافتی دانست. دلیل استحکام پایین این سنگدانه‌ها، سیمانی است که از طرح اختلاط قبلی بر روی این نوع از مصالح بازیافتی به جای مانده است. در حین اختلاط قسمت‌های ضعیف بتن

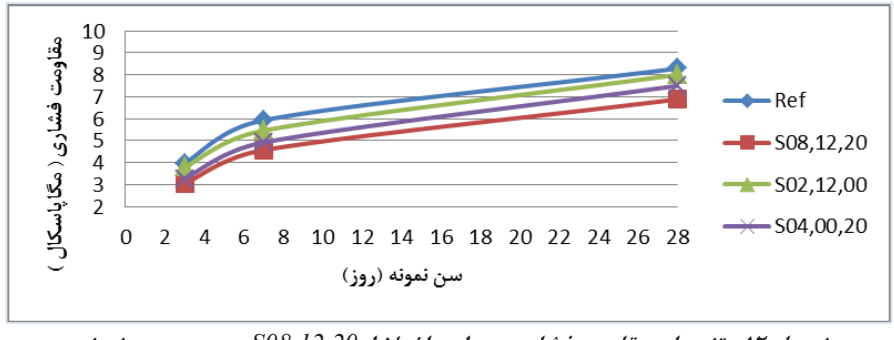
خرد شده،که معمولاً ملات سیمان سخت شده بر روی آن‌ها می باشد به قطعات ریزتر خرد می‌شوند؛ این مسأله باعث افزایش حضور ریزدانه‌ها در مخلوط بتن می‌شود که خود باعث افت مقاومت بتن می‌گردد. هم‌چنین به دلیل اینکه بتن خرد شده همراه با ملات سیمان سخت شده بر روی آن‌ها، ضعیف‌تر از سنگ شکسته طبیعی می‌باشد، مقاومت بافت کریستالی بین دو قطعه ملات سخت شده و یا یک قطعه ملات سخت شده و سنگ شکسته کمتر از مقاومت بافت کریستالی بین دو قطعه سنگ شکسته طبیعی می‌باشد که خود باعث کاهش مقاومت بتن بازیافتی می‌شود .دلیل دیگر برای توضیح این کاهش مقاومت فشاری جذب آب بالای این نوع مصالح بازیافتی می باشد؛ جذب آب بالای سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به طور غیر مستقیم باعث افزایش تخلخل بتن می‌شود و در نتیجه این تغییر در ساختار درونی بتن، مقاومت فشاری تنزل خواهد کرد [۲۵].

۶-۳-۳-طرح‌های اختلاط ساخته شده از خرده شیشه بازیافتی و سنگدانه ریز بتن بازیافتی به صورت همزمان

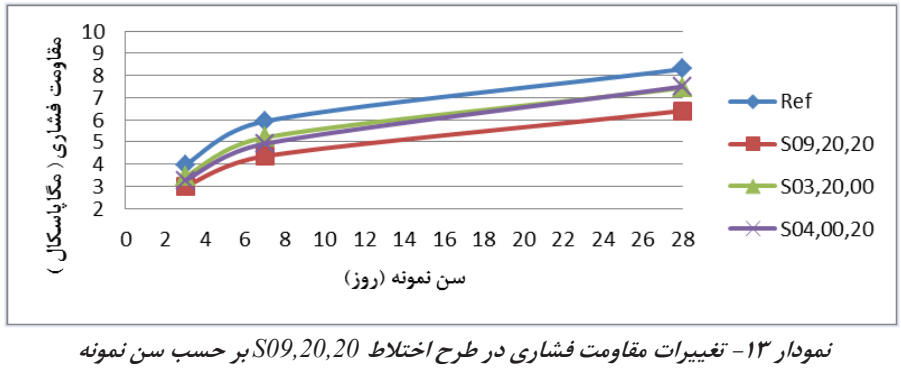
در این بخش به بررسی جایگزینی همزمان ترکیب خرده شیشه بازیافتی و سنگدانه ریز بتن بازیافتی در بتن مگر پرداخته خواهد شد. تمام مقادیر در نظر گرفته شده برای هر کدام از مصالح بازیافتی به نوبت و یک به یک با هم ترکیب شدند و نتایج آن در نمودارهای ۱۱ الی ۱۹ ارائه شده است.



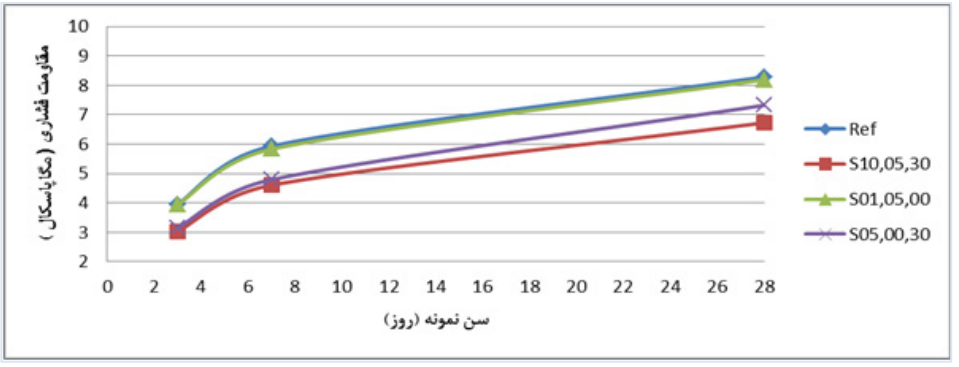
نمودار ۱۱- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط S07,05,20 بر حسب سن نمونه



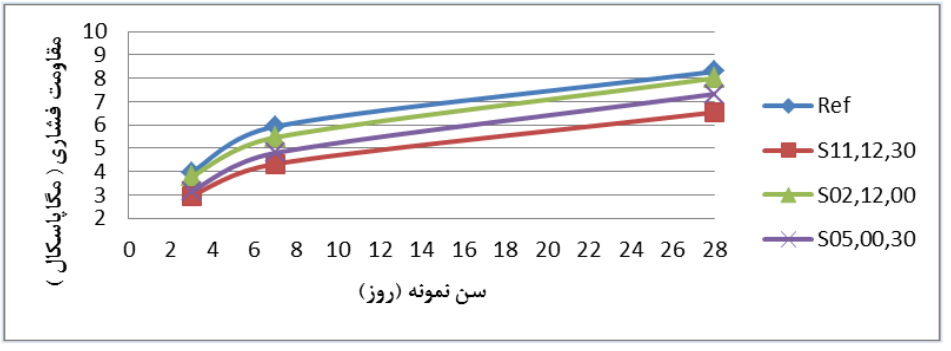
نمودار ۱۲- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط S08,12,20 بر حسب سن نمونه



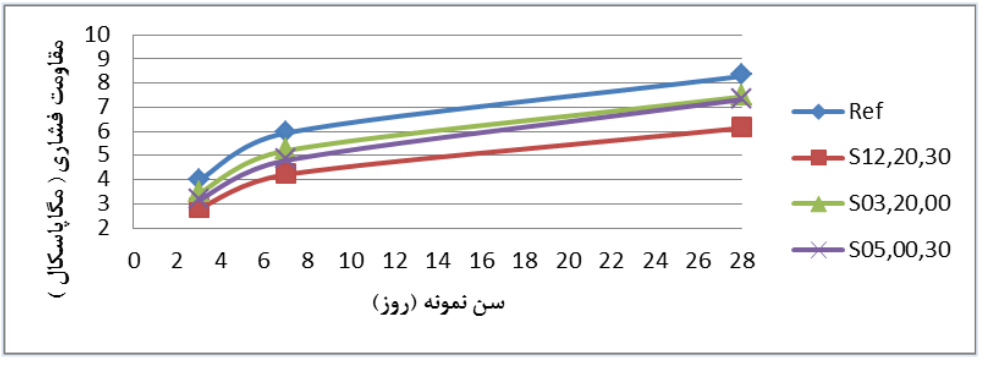
نمودار ۱۳- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط S09,20,20 بر حسب سن نمونه



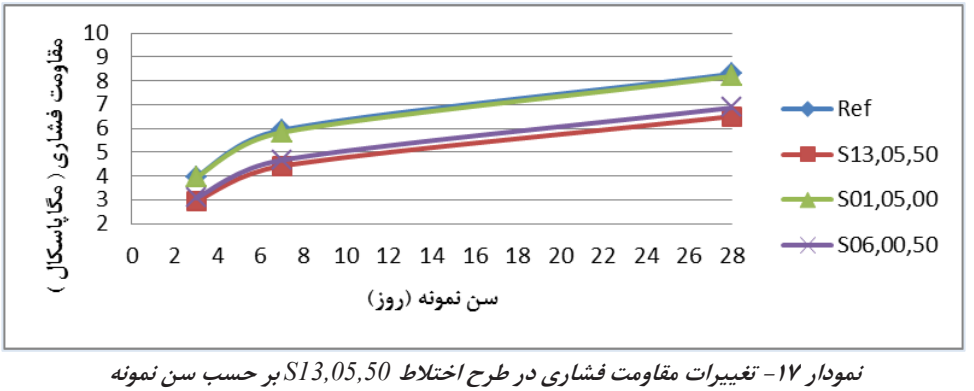
نمودار ۱۴- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط $S10,05,30$ بر حسب سن نمونه



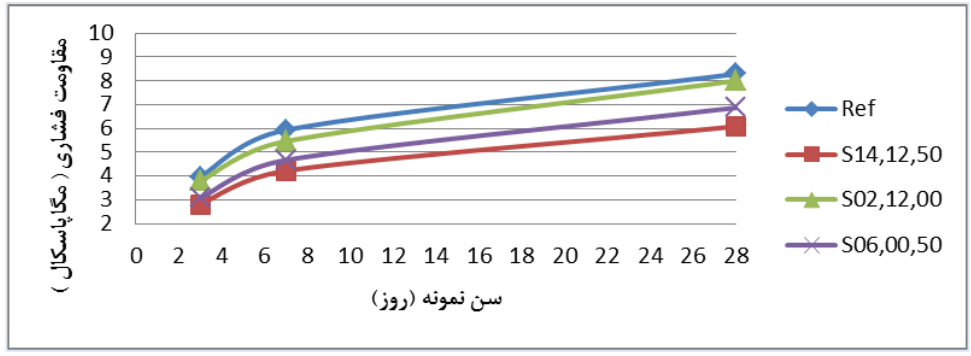
نمودار ۱۵- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط $S11,12,30$ بر حسب سن نمونه



نمودار ۱۶- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط $S12,20,30$ بر حسب سن نمونه



نمودار ۱۷- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط $S13,05,50$ بر حسب سن نمونه



نمودار ۱۸- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط S14,12,50 بر حسب سن نمونه

نمودار ۱۹- تغییرات مقاومت فشاری در طرح اختلاط S15,20,50 بر حسب سن نمونه

در بررسی اولیه نتایج به دست آمده به وضوح مشخص است که کاربرد ترکیب خرده شیشه بازیافتی و سنگدانه ریز بتن بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از ماسه، باعث افت بیش‌تر مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی می‌شود. دلیل این کاهش مقاومت فشاری، تأثیر همزمان حضور این مصالح بازیافتی بر ساختار درونی بتن می‌باشد که با افزایش تخلخل و کاهش پیوستگی بین دانه‌ها، شرایط را برای تنزل مقاومت فشاری مهیا می‌کنند. تغییرات ثبت شده در مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با جایگزینی همزمان خرده شیشه بازیافتی و سنگدانه ریز بتن بازیافتی با ماسه، در جدول ۹ آمده است.

جدول ۹- مقایسه مقاومت فشاری طرح‌های مختلف ترکیبی نسبت به طرح اختلاط مرجع در سن ۲۸ روزه

ردیف	کد طرح اختلاط	متوسط مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه (MPa)	تغییرات مقاومت فشاری طرح‌های ترکیبی نسبت به طرح مرجع (%)
۱	Ref	۸/۳	۰
۲	S07,05,20	۷/۱	-۱۴/۴
۳	S10,05,30	۶/۷	-۱۹/۳
۴	S13,05,50	۶/۵	-۲۱/۷
۵	S08,12,20	۶/۹	-۱۶/۹
۶	S11,12,30	۶/۵	-۲۱/۷
۷	S14,12,50	۶/۱	-۲۶/۵
۸	S09,20,20	۶/۴	-۲۲/۹
۹	S12,20,30	۶/۱	-۲۶/۵
۱۰	S15,20,50	۵/۸	-۳۰/۱

علامت منفی در ستون سمت چپ به این معنی است که مقاومت‌های فشاری در تمام طرح‌های اختلاط ترکیبی نسبت به طرح اختلاط مرجع کاهش داشته‌اند.

۶-۳-۴- تعیین درصد بهینه مصالح جایگزین

برای انتخاب نمونه‌های منتخب جهت انجام آزمایش میزان عمق نفوذ آب و هم‌چنین تعیین درصدهای جایگزینی بهینه برای مصالح بازیافتی، می‌بایست نتایج آزمایش‌های میزان روانی (اسلامپ)، وزن مخصوص و مقاومت فشاری برای تمام طرح‌های اختلاط مورد مقایسه قرار گیرند. از بررسی میزان روانی بتن می‌توان نتیجه گرفت که با جایگزینی هر کدام از مصالح بازیافتی در روانی بتن که مشخصه مهمی برای اجراء انواع بتن می‌باشد، چه تغییری حاصل می‌شود. هم‌چنین با مقایسه مقاومت فشاری و وزن مخصوص طرح‌های اختلاط آثار این جایگزینی‌ها بر باربری، تخلخل و دوام بتن مشخص خواهد شد. در این تحقیق معیار انتخاب مقادیر جایگزینی بهینه کمترین تغییر در خصوصیات بتن مگر ساخته شده با مصالح بازیافتی در مقایسه با نمونه بتن مگر شاهد می‌باشد. به همین منظور در جداول ۱۰ الی ۱۲ مشخصات نمونه‌های بتنی که تغییرات به وجود آمده در آن‌ها به واسطه حضور مصالح بازیافتی حداقل بوده است، ارائه شده است.

جدول ۱۰- مقایسه نتایج آزمایش روانی بتن برای طرح‌های منتخب

ردیف	کد طرح اختلاط	متوسط روانی (mm)	تغییرات روانی طرح نسبت به طرح مرجع (%)
۱	Ref	۵۰	۰
۲	S01,05,00	۵۰	۰
۳	S04,00,20	۵۰	۰
۴	S07,05,20	۵۰	۰

جدول ۱۱- مقایسه نتایج وزن مخصوص بتن برای طرح‌های منتخب

ردیف	کد طرح اختلاط	متوسط وزن مخصوص (g/cm^3)	تغییرات وزن مخصوص طرح نسبت به طرح مرجع (%)
۱	Ref	۲/۱۸۵	۰
۲	S01,05,00	۲/۱۷۹	-۰/۳۰
۳	S04,00,20	۲/۱۵۵	-۱/۴۰
۴	S07,05,20	۲/۱۵۰	-۱/۶۰
علامت منفی در ستون سمت چپ به این معنی است که وزن مخصوص در تمام طرح‌های اختلاط منتخب نسبت به طرح اختلاط مرجع کاهش داشته است.			

جدول ۱۲- مقایسه نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه برای طرح‌های منتخب

ردیف	کد طرح اختلاط	متوسط مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	تغییرات مقاومت فشاری طرح نسبت به طرح مرجع (%)
۱	Ref	۸/۳	۰
۲	S01,05,00	۸/۲	-۱/۲
۳	S04,00,20	۷/۵	-۹/۶
۴	S07,05,20	۷/۱	-۱۴/۵
علامت منفی در ستون سمت چپ به این معنی است که مقاومت‌های فشاری در تمام طرح‌های اختلاط منتخب نسبت به طرح اختلاط مرجع کاهش داشته‌اند.			

در نمونه‌های با جایگزینی ٪۵ خرده شیشه بازیافتی و ٪۲۰ سنگدانه ریز بتن بازیافتی، تغییرات بسیار اندکی در خصوصیات بتن مگر به وجود خواهد آمدو هم‌چنین با ترکیب همین مقادیر (٪۵ خرده شیشه بازیافتی و ٪۲۰

سنگدانه ریز بتن بازیافتی)، روانی بتن بدون تغییر خواهد ماند؛ میزان تغییرات در وزن مخصوص و مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ترتیب کمتر از ٪۲ و ٪۱۴ می‌باشد. با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی و محیط زیستی، جایگزینی بهینه ترکیب همزمان ٪۵ خرده شیشه بازیافتی و ٪۲۰ سنگدانه ریز بتن بازیافتی به جای ماسه می‌باشد. با جایگزینی این مقادیر با ماسه، ضمن کاهش مصرف ٪۲۵ مصالح طبیعی برای ساخت یک متر مکعب بتن مگر، خصوصیات بتن مگر ساخته شده به طور قابل قبولی ثابت خواهند ماند.

۶-۴- تحلیل نتایج آزمایش عمق نفوذ آب

تعیین نفوذپذیری نمونه‌های بتنی در این تحقیق بر اساس استاندارد EN-12390 مشخص شده است. هدف از انجام این آزمایش بر روی نمونه‌های بتنی مشخص کردن تخلخل نسبی نمونه‌ها و هم‌چنین سنجش دوام بتن در حضور مصالح بازیافتی به کار رفته می‌باشد. نتایج به دست آمده از این آزمایش بر روی نمونه‌های منتخب در جدول ۱۱ ارائه شده است.

جدول ۱۳- نتایج آزمایش میزان عمق نفوذ آب در بتن (cm)

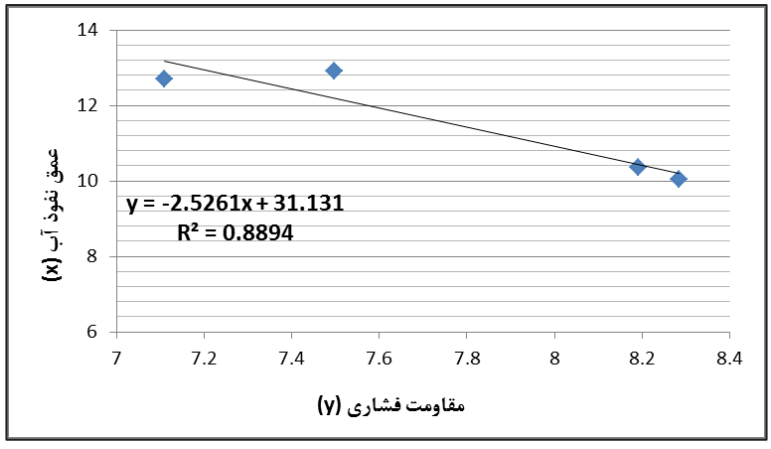
کد طرح اختلاط	عمق نفوذ آب (cm)		
	نمونه اول	نمونه دوم	میانگین
Ref	۹/۸	۱۰/۳	۱۰/۰۵
S01,05,00	۱۰/۶	۱۰/۱	۱۰/۳۵
S04,00,20	۱۳/۰	۱۲/۸	۱۲/۹۰
S07,05,20	۱۲/۵	۱۲/۹	۱۲/۷۰

با دقت در جدول ۱۲ تأثیر جایگزینی خرده شیشه و سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی با ماسه بر میزان عمق نفوذ آب در بتن مشخص خواهد شد، به نحوی که در همه نمونه‌های منتخب برای این آزمایش، میزان عمق نفوذ آب به طور محسوسی افزایش یافته است. تأثیر جایگزینی این مصالح بازیافتی بر میزان عمق نفوذ آب به نحوی است که با جایگزینی ٪۲۰ سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی با ماسه، میزان عمق نفوذ ٪۲۸ افزایش را نشان داده است. علت اصلی در افزایش عمق نفوذ آب در بتن را باید با تخلخل بتن مرتبط دانست. استفاده از خرده شیشه و سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی در بتن، به دلایلی که کاهش چسبندگی بین سنگدانه‌ها به واسطه حضور سیمان را به دنبال دارند، باعث افزایش تخلخل در ساختار درونی بتن می‌شوند.

۶-۵- تعیین رابطه بین عمق نفوذ آب و مقاومت فشاری بتن

همخوانی بین آزمایش‌های مقاومت فشاری و میزان عمق نفوذ آب در بتن در بررسی نتایج مشهود است، به نحوی که با افزایش میزان جایگزینی مصالح بازیافتی با ماسه، علاوه بر کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی، در عمق نفوذ آب در بتن نیز افزایش به وجود آمده است. ضریب همبستگی[1] بین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه و میزان عمق نفوذ آب در بتن برای نمونه‌های منتخب که در نمودار ۲۰ نشان داده شده است، برابر با ۰/۸۸۹۴ می‌باشد که همبستگی قوی میان این دو متغیر را نشان می‌دهد.

[1] Correlation Coefficient (R^2)



نمودار ۲۰- تغییرات عمق نفوذ آب بر حسب مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ روزه

با توجه به رابطه معکوس این دو متغیر (عمق نفوذ آب در بتن و مقاومت فشاری)، استفاده از درصدهای جایگزینی بهینه مصالح بازیافتی در بتن جهت ساخت بتنی اقتصادی – کاربردی بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

۷. نتیجه گیری

نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

۷-۱- اثر جایگزینی‌ها بر روانی بتن تازه

- جایگزینی خرده شیشه بازیافتی در بتن مگر با مقادیر کمتر از ٪۱۲ وزن ماسه، تأثیر چندانی بر میزان روانی بتن ندارد، در صورتی که با جایگزینی ٪۲۰، میزان روانی بتن تا ٪۱۰ افزایش یافت.
- میزان روانی بتن با استفاده از سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از ماسه تا حداکثر ٪۲۰ تغییری نخواهد داشت، اما جایگزینی ماسه با درصدهای ۳۰ و ۵۰ باعث افت ٪۱۰ روانی بتن مگر گردید.
- استفاده همزمان از خرده شیشه و سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به عنوان مصالح جایگزین ماسه در بتن مگر با شرایطی که میزان حضور سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی در بتن مگر کم‌تر از ٪۲۰ وزن کل ماسه باشد، تأثیری بر میزان روانی بتن نخواهد داشت. در همین حالت اگر حضور سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی از ٪۲۰ بیش‌تر شود، میزان روانی بتن به شدت کاهش خواهد یافت، به نحوی که با جایگزینی ماسه به صورت همزمان با ٪۲۰ خرده شیشه بازیافتی و ٪۵۰ سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی، میزان روانی بتن مگر تا ٪۲۰ کاهش می‌یابد.

۷-۲- اثر جایگزینی‌ها بر وزن مخصوص بتن تازه

- در تمام طرح‌های اختلاط با جایگزینی خرده شیشه و سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی با ماسه، وزن مخصوص بتن مگر کاهش یافت.
- وزن مخصوص بتن مگر ساخته شده با خرده شیشه بازیافتی تا حدود زیادی ثابت ماند، به طوری که با جایگزینی ٪۲۰ ماسه با این مصالح، وزن مخصوص بتن مگر حدود ٪۳ کاهش یافت.
- وزن مخصوص بتن مگر با استفاده از سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از ماسه تا سقف ٪۲۰ تغییر چندانی نداشت؛ به نحوی که میزان این تغییرات با جایگزینی ٪۲۰ کل ماسه، حدود ٪۳ بوده است.
- میزان تغییرات در وزن مخصوص با جایگزینی مقادیر بیش‌تری از ماسه با سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی رشد زیادتری را نشان داد، به طوری که این میزان با جایگزینی ٪۵۰، حدود ٪۴/۵ می‌باشد.
- استفاده همزمان خرده شیشه و سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از ماسه در بتن مگر، باعث تشدید افت وزن مخصوص گردید. حداکثر افت وزن مخصوص در طرح اختلاط با کد S15,20,50 به میزان ٪۵/۳ حاصل شد.

۷-۳- اثر جایگزینی‌ها بر مقاومت فشاری

- تأثیر جایگزینی خرده شیشه بازیافتی تا سقف ٪۱۲ وزن ماسه بر مقاومت فشاری بتن مگر بسیار کم بود، در صورتی که با جایگزینی ٪۲۰، مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ روزه حدود ٪۱۱ کاهش یافت.

- میزان افت مقاومت فشاری با استفاده از سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از ماسه در بتن مگر کاملاً مشهود بود؛ میزان افت مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه برای جایگزینی‌های ٪۲۰، ٪۳۰ و ٪۵۰ ماسه به ترتیب برابر با ٪۱۰، ٪۱۲ و ٪۱۸ بوده است.

- استفاده همزمان از خرده شیشه و سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از ماسه باعث افت بیش‌تر مقاومت فشاری بتن مگر گردید. تأثیر سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی در کاهش مقاومت فشاری در تمام نمونه‌های ساخته شده با استفاده همزمان این دو نوع مصالح بازیافتی مشهود بود. بیش‌ترین افت مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه در طرح اختلاط با کد S15,20,50 و به میزان ٪۳۰ اتفاق افتاد.

۷-۴- اثر جایگزینی‌ها بر میزان عمق نفوذ آب در بتن

- جایگزینی ماسه با هر یک از مصالح بازیافتی استفاده شده در تحقیق باعث افزایش عمق نفوذ آب در بتن مگر شد.

- جایگزینی خرده شیشه بازیافتی در بتن مگر تا سقف ٪۵ وزنی ماسه، عمق نفوذ آب در بتن را تا ٪۳ افزایش داد.

- تأثیر کاربرد سنگدانه‌های ریز بتن بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از ماسه بر عمق نفوذ آب در بتن مگر بسیار شدید بود، به‌گونه‌ای که افزایش ٪۲۸ عمق نفوذ در نتیجه جایگزینی ٪۲۰ از وزن ماسه با مصالح بازیافتی، ثبت شد.

تقدیر

آزمایش‌های مربوط به تحقیق در آزمایشگاه بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد رامهرمز انجام شدند، لذا نویسندگان مراتب تقدیر خود را در خصوص همکاری مدیریت معزز دانشگاه و همین‌طور کمک کارشناسان محترم آزمایشگاه اعلام می‌دارند.

مراجع

[۱] شکرچی زاده، محمد، و میرزایی، زانیار، "آینده آموزش مهندسی بتن و سیمان با نگرش به محیط زیست"، کنفرانس آموزش مهندسی در ۱۴۰۴، ۱۳۸۸.

[1]. [2] Dunlop, P. Smith, S.D. "Planning, Estimation and Productivity in the Lean Concrete Pour Engineering", Construction and Architectural Management, Vol. 11, ISS. 1., PP. 55-64, 2004.

[۳] هاشمی، فرشید، بتن مگر یا بتن رگلاژ کف: تعریف و نکات کلیدی استفاده، سامانه ملی تدارکات الکترونیک صنعت ساختمان کشور، کمیته تدوین ضوابط و معیارهای فنی، ۱۳۹۲.

[۴] فرخ زاد، رضا، کریمی نیا، میثم، پیروی، محمد، و امینیان، نیما، "بررسی خواص مکانیکی و دوامی بتن معمولی حاوی درصدهای متفاوت محصول فرعی تولید شیشه (GBP) کد (G)"، پنجمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، ۱۳۹۲.

[۵] شابختی، ناصر، و کاظمی بندپی، شاهین، "بررسی خواص مکانیکی بتن خودتراکم (SCC) حاوی خرده‌شیشه و پودر شیشه"، نخستین کنفرانس بین المللی تکنولوژی بتن، ۱۳۸۸.

[۶] حسن زاده، محسن، حسن زاده، فهیمه، طغیانی، حمیدرضا، و صادقی، محمد، "بررسی آزمایشگاهی برخی از خصوصیات مکانیکی بتن حاوی خرده شیشه‌های ضایعاتی"، دومین کنفرانس ملی بتن ایران، ۱۳۸۹.

[7] Malhotra, V.M. Neville, A. "Symposium on concrete technology in the use of demolition waste in concrete", BYWAIN Wright, PJ26 (179-197), 1995.

[۸] یاوری نسب، کاظم.، زینلی زاده، میلاد.، حیدری جامع بزرگی، مهران. "بررسی اثر درصد خرده‌شیشه بر مشخصات مکانیکی بتن، دومین همایش ملی مصالح ساختمان و فن‌آوری های نوین در صنعت ساختمان، ۱۳۹۳.

[9] Omran, A. Tagnit Hamou, A. "Performance of Glass-Powder Concrete in Field Applications," Construction and Building Materials, Vol. 109 (84-95), 2016.

[۱۰] نیلی، محمود.، بیگلری جو، نادر.، رزم آرا، مهرداد. "تأثیر سنگدانه‌های حاصل از بتن های بازیافتی، شیشه و پلاستیک‌های زائد در خواص بتن"، مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۳۱، شماره ۱، ۱۳۹۴، ۱۱۱-۱۱۹.
[11] Jani, Y. Hogland, W. "Waste Glass in the Production of Cement and Concrete-a Review," Journal of Environmental Chemical Engineering, DOI: 10.1016; 03.016, 2014.
[12] EmamAli, E. Al-Tersawy, S. "Recycled Glass as a partial Replacement for Fine Aggregate in Self Compacting Concrete," Construction and Building Materials, 35: 758-791, 2012.
[13] Saribiyik, M. Piskin, A. Saribiyik, A. "The effects of waste glass powder usage on polymer concrete properties," Construction and Building Materials, Vol. 47 (840-844), 2013.
[۱۴] فرخزاد، رضا، کریمی نیا، میثم، پیروی، محمد، و امینیان، نیما، "بررسی خواص مکانیکی و دوامی بتن معمولی حاوی درصدهای متفاوت محصول فرعی تولید شیشه (GBP) کد (G)"، پنجمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، ۱۳۹۲.
[۱۵]. رنجبر، ملک محمد.، نامنویس، مریم.، موسوی، سیدیاسین.، حسینی، سیمین السادات. "بررسی تأثیر افزودن پودر شیشه ضایعاتی بر خواص مکانیکی ملات خودتراکم حاوی پرکننده‌های مختلف"، پنجمین کنفرانس ملی بتن خودتراکم ایران، ۱۳۹۲.
[۱۶] عباسی دزفولی، عبدالکریم، اولی‌پور، مسعود، برنا، مسعود، و پورزنگنه، بهرام، "مدیریت ساخت و توسعه استفاده از خرده شیشه‌های ضایعاتی در بتن از طریق تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن"، اولین همایش بین-المللی بحران‌های زیست محیطی ایران و راهکارهای بهبود آن. ۱۳۹۱.
[17] Lee, G. Poon, S.C. Wong, Y.L. Ling, T.C. "Effect of recycled fine glass aggregates on the properties of dry-mixed concrete blocks", Construction and Building Materials, Vol. 38, pp. 638-643, 2013.
[18] De Castro, S. De Brito, J. "Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregate", Journal of Cleaner Production, Vol. 41, 7-14, 2013.
[۱۹] خالو، علیرضا.، خداویردی زنجان، محمد مهدی.، حسینی، پیام. "بررسی ساخت بتن خودتراکم با استفاده از درشت‌دانه‌های بازیافتی"، مجله تحقیقات بتن، سال سوم، شماره ۱، ۱۳۸۹.
[۲۰] مقیمی، محمود، شفیق، پیام، برنجیان، جواد، و نعمتی، کامران، "بررسی تجربی تاثیر استفاده از میکرو سیلیس و فوق‌روان کننده بر بعضی خواص مکانیکی بتن بازیافتی ساخته شده از خرده بتن"، نشریه مهندسی عمران، سال بیست و یکم، شماره ۲، ۱۳۸۹.
[21] Capra, B.; Bournazel, J. P., Modeling of Induced Mechanical Effects of Alkali-Aggregate Reactions, Cem. Concr. Res., Vol. 28, No. 2, pp. 251 -260, 1998.
[22] Pigeon, M., Plante, P., Pleau, R., Banthia, N., Influence of Soluble Alkalis on the Production and Stability of the Air-void System in Super-plasticized and Non-super-plasticized Concrete, ACI Mater. J., Vol. 89, No. 1, pp. 24 -31, 1992.
[23] Ferraris, C., Garboczi, E., Davis, F., Clifton, J., Stress Due to Alkali-silica Reaction in Mortars, Proceedings of the 4th Materials Engineering Conference, ASCE, Washington, DC, pp. 1379 -1388, 1996.
[24] Prezzi, M., Monteiro, P. J., Sposito, G., The Alkali-Silica Reaction: Part I. Use of Double-layer Theory to Explain the Behavior of Reaction-product Gels, ACI Mater. J., Vol. 94, No. 1, pp. 10 -17, 1997.
[۲۵] معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، آیین نامه بتن ایران (آبا)، نشر: سازمان مدیریت و برنامه-ریزی کشور، مرکز مدارک علمی و انتشارات، چاپ اول، ۱۳۷۹.

Feasibility of Production of Lean Concrete using Crushed Glass and Recycled Concrete Aggregates

Mohamad Kamali
M.Sc. student, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, IAU, Ahvaz, Iran

*Seysed Fathollah Sajedi**
Associate professor, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, IAU, Ahvaz, Iran
sajedi@iauahvaz.ac.ir

Abstract
Nowadays, the use of waste products in concrete has attracted the attention of concrete industry activists. In addition to reducing environmental pollution and saving natural resources, waste materials such as crushed glass and recycled concrete aggregates (RCA) can also improve properties of concrete. Accordingly, in this research, the properties of the lean concrete of the crushed glass and fine recycled aggregates of concrete as a part of the sand are investigated. A total of 192 speciemens were made of 16 different mix design; in which cement materials and the ratio of water-cement in all of them were constant. The determinants of their differences were the type and amount of materials replaced with the sand which used in the lean concrete reference mix design. The values of 5%, 12%, and 20% were used to replace natural sandstone glasses, as well as values of 20%, 30% and 50% for replacing fine recycled concrete aggregates with natural sand. The amount of slump and specific gravity of fresh concretes determined, and the compressive strength and depth of water penetration in the hadened concretes were also measured. The results of the experiments showed that, in almost all of the substitutions, the mechanical properties of the lean concrete slightly decreased. However, the replacement of crushed glass and fine RCA with values of less than 12% and 20%, respectively, in addition to having economic justification and positive environmental effects, can maintain the mechanical properties of the lean concrete to a great extent.
KEYWORDS: *Feasibility Study, Lean Concrete, Crushed glass, Recycled Concrete Aggregates (RCA), Sand, Environment..*