

## بررسی ویژگی‌های مکانیکی و دوام روسازی بتنی حاوی بتن بازیافتی و خرده پلاستیک (PET)

### مقاله علمی - پژوهشی

محسن عموزاده عمرانی\*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران  
رضوان باباگلی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه علم و فناوری مازندران، بهشهر، ایران  
عبداله داودی‌کیا، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران  
مجتبی صادقی سیاهکلایی، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Mo.Omrani@iaua.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

صفحه ۳۴۲-۳۲۱

### چکیده

در این تحقیق، به بررسی خواص مکانیکی بتن در شرایط استفاده از سنگدانه های طبیعی و مقایسه نتایج آن با جایگزینی سنگدانه بازیافتی با مقادیر ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد پرداخته شده است. در بخش اول تحقیق، نتایج حاکی از کاهش وزن مخصوص بتن در حضور ۴۰٪ ماسه و شن بازیافتی، به ترتیب به مقدار ۱۰، ۲ و ۲،۳۸ درصد بوده است. همچنین در خصوص مقاومت فشاری، کمترین کاهش مقاومت فشاری در ۱۰٪ ماسه و شن بازیافتی و بیشترین کاهش مقاومت فشاری در ۴۰٪ ماسه و شن بازیافتی رخ داده است. در ادامه خواص مکانیکی بتن معمولی با بتن حاوی خرده پلاستیک ضایعاتی (PET) با ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ درصد حجم بتن مقایسه شد. در همین خصوص نتایج تحقیق حاکی از کاهش مقاومت فشاری بتن نسبت به بتن شاهد بوده است. در همین راستا کمترین کاهش مقاومت فشاری به میزان ۲،۰۱٪ و در شرایط حضور ۲٪ خرده پلاستیک ضایعاتی و بیشترین کاهش مقاومت فشاری به میزان ۱۶،۳۹٪ و در شرایط حضور ۱۰٪ خرده پلاستیک ضایعاتی بوده است. در خصوص مقاومت خمشی، نتایج افزایش مقاومت خمشی را نشان داد؛ به نحوی که کمترین افزایش مقاومت خمشی به میزان ۶،۲۷٪ در حضور ۲٪ خرده پلاستیک ضایعاتی و بیشترین افزایش مقاومت خمشی به میزان ۳۹،۴۹٪ و در حضور ۱۰٪ خرده پلاستیک ضایعاتی رخ داده است. در پایان نتایج تحقیق نشان داد که افزایش حضور خرده پلاستیک ضایعاتی منجر به کاهش جذب آب نمونه‌ها شده است. در همین خصوص کمترین کاهش جذب آب به میزان ۵،۲۶٪ و بیشترین کاهش جذب آب به میزان ۲۳،۰۸٪، به ترتیب در حضور ۲ و ۱۰ درصد خرده پلاستیک ضایعاتی رخ داده است.

واژه‌های کلیدی: بتن، بازیافتی، خرده پلاستیک، جذب آب

### ۱-مقدمه

تبدیل شده است. سهم قابل توجهی از این پسماندها ضایعات پلاستیکی هستند که تنها بخش اندکی از آنها بازیافت می‌شوند. یکی از راه حل‌های جایگزین برای بازیافت غیرمستقیم این ضایعات، استفاده از آنها در تولیدات بتنی است؛ از طرفی دیگر

امروزه با توجه به رشد سریع جمعیت، شهرنشینی و صنعتی شدن شهرها روزانه حجم زیادی از ضایعات جامد در کشورهای درحال توسعه تولید می‌شود و مدیریت این پسماندها به دغدغه‌ای اساسی برای فعالان محیط زیست و مسئولان شهری

فراهم می‌سازد. جنبه‌ی دوم استفاده از این خرده پلاستیک‌ها برای اصلاح رفتار بتن است که باعث افزایش شکل پذیری، افزایش جذب انرژی و شکست نرم در بتن می‌شود. به عنوان مثال بدلیل جذب انرژی بالا علاوه بر سطح راه می‌توان در روسازی باند فرودگاه از این روسازی استفاده کرد. در این پژوهش با ساخت نمونه‌های متعدد به درصد مناسب استفاده از خرده پلاستیک ضایعات ظرف آب معدنی و نوشابه در بتن دست خواهیم یافت و همچنین خواهیم دید که مقاومت و دوام بتن با افزودن خرده پلاستیک چگونه تغییر می‌یابد (Lofsjogar, 2004).

یکی از مسائل روز و مهم در ارتقای تکنولوژی بتن، افزایش مقاومت مکانیکی بتن با توجه به سبک سازی بتن و همچنین حفظ محیط زیست می‌باشد. در همین خصوص بررسی خواص مکانیکی بتن در شرایط حضور ضایعات پلاستیکی به منظور حفظ محیط زیست با بکاربردن بخشی از ضایعات در برابر انبوهی از ضایعات پلاستیکی می‌تواند دارای اهمیت ویژه‌ای باشد. مدنی و همکاران نیز در سال ۱۳۹۶ مشخصه‌های دوام و مقاومت روسازی بتن غلتکی را مورد بررسی قرار دادند. پژوهش آن‌ها با هدف بررسی مشخصات دوام و مکانیکی روسازی‌های بتن غلتکی شامل: مقاومت فشاری، مدول گسیختگی، سایش، پوسته‌شدگی سطحی در اثر نمک‌های یخ زدا و نفوذ تحت فشار آب در بخش تکنولوژی بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شد. نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز نشانگر آن هستند که در ۲۸ روز تمام مخلوط‌های مورد بررسی، مقاومت فشاری بالاتر از ۳۵ مگاپاسکال داشته‌اند. نسبت بین مدول گسیختگی و مجذور مقاومت فشاری برابر ۰,۷ به دست آمده است. نتایج نفوذپذیری تحت فشار آب بیانگر آن است که با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰,۳۸ به ۰,۳۳ در زمان ویبی برابر، مقدار نفوذ آب از ۱۴ به ۱۰ میلی‌متر کاهش یافته و مقدار نفوذ بسیار کم ۵ میلی متری مخلوط‌های حاوی دوده سیلیسی و سیمان پوزولانی موید ریزساختار متراکم‌تر مخلوط‌های مذکور است. از نظر پوسته‌شدگی در سیکل‌های یخبندان و مجاورت نمک‌های یخ زدا، بیشتر مخلوط‌ها تورق بسیار شدید داشته‌اند. فقط مخلوط حاوی دوده سیلیسی با ۶۰۰ گرم بر مترمربع پوسته‌شدگی در رده‌ی بتن‌های با پوسته‌شدگی متوسط قرار گرفته است (مدنی و همکاران، ۱۳۹۶).

جعفری و همکاران در سال ۱۳۹۷ به مقایسه روش‌های عددی تفاضل محدود و المان محدود در تحلیل روسازی انعطاف پذیر

نیز برداشت سنگ از معادن به جهت تامین مصالح سنگی نیز آسیب‌های جبران ناپذیری به منابع طبیعی و محیط زیست وارد می‌کند. در همین خصوص و بواسطه‌ی اهمیت حفظ محیط زیست استفاده از بتن‌های بازیافتی برای تولید سنگدانه نیز کمک کننده است. لذا با توجه به آنچه بیان شد در تحقیق حاضر به بررسی ویژگی‌های مکانیکی و دوام روسازی بتنی حاوی بتن بازیافتی و خرده پلاستیک (PET) خواهیم پرداخت (عربانی و همکاران، ۱۳۸۸).

بدلیل وجود منابع نفتی فراوان روسازی اکثر راه‌های ایران از نوع آسفالتی است. اما امروزه با تغییر نگرش نگاه‌ها به سوی اقتصاد غیرنفتی منعطف شده است. این مساله و همچنین اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از استفاده از آسفالت ذهن‌ها را متوجه راه‌های جایگزین نموده است که بهترین آن استفاده از روسازی بتنی به عنوان روسازی راه‌های کشور می‌باشد. تجربه موفقیت آمیز کشورهای مختلف در دنیا و مزایای بسیار روسازی بتنی مانند جنبه‌های فنی، زیست محیطی و اقتصادی که به تفصیل بیان می‌گردد و همچنین ملزومات توسعه پایدار متخصصین را به استفاده از روسازی بتنی ترغیب می‌نماید. با وجود مزایای فراوان مذکور استفاده از روسازی بتنی در سطح راه معایبی نیز دارد که از جمله آنها می‌توان به سطح زبر، ترد و شکننده بتن در سطح راه اشاره کرد که تحت اثر بارهای دینامیکی و ضربه‌ای ناشی از حرکت خودرو و ترمزگیری وسایل نقلیه صدای زیادی تولید می‌کند و رفتار خوبی از خود نشان نمی‌دهد. برخی برای حل این مشکلات استفاده از یک لایه آسفالت روی سطح روسازی بتنی را پیشنهاد می‌کنند که همان مشکلات ذکر شده ناشی از استفاده از آسفالت را منجر می‌شود. اما در این تحقیق استفاده از خرده ضایعات ظرف آب معدنی و نوشابه جهت اصلاح رفتار مکانیکی بتن به عنوان روش مناسب پیشنهاد می‌گردد (مقدس‌نژاد، ۱۳۸۶). مزایای این روش را از دو جنبه می‌توان بررسی نمود: جنبه‌ی اول اینکه در کشور ما تخمین زده می‌شود که سالانه بیش از ۱۱ میلیون خرده ضایعات ظرف آب معدنی و نوشابه از رده خارج می‌شود که اثرات مخرب زیست محیطی فراوانی را به همراه دارد از جمله اینکه پلاستیک بسیار دیر تجزیه می‌شود و همچنین امکان دفع آن وجود ندارد و همچنین انبارکردن آن به دلیل هزینه‌ی سنگین و همچنین خطر آتش سوزی و رهاسازی گازهای سمی در هوا میسر نمی‌باشد. همچنین بعلت عدم تجزیه محیطی مناسب جهت رشد پشه‌ها را

عقیلی لطف و همکاران در سال ۱۳۹۷ به بررسی تأثیر انواع مختلف سنگدانه بازیافتی بتنی بر روی خواص بتن پرداختند. آن‌ها در این مقاله با توجه به اهمیت موضوع، تأثیر بتن اولیه سنگدانه‌های بازیافتی بتنی بر روی خواص مهندسی سنگدانه بازیافتی بتنی و همچنین بتن بازیافتی تحقیق و بررسی نمودند. آن‌ها برای این منظور سه نوع شن بازیافتی بتنی تهیه و تولید و سپس مشخصات عملکردی سنگدانه‌های تولیدی با استفاده از آزمایش‌های جذب آب، چگالی، سایش لوس آنجلس و دوام در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان تعیین نمودند. نتایج پژوهش عقیلی لطف و همکاران نشان داد که با افزایش نسبت جایگزینی، حجم تخریب سطح نمونه‌های بتنی افزایش یافت. با این وجود، کماکان بتن‌های بازیافتی از عملکرد قابل قبولی در برابر پوسته‌شدگی برخوردار بودند (عقیلی لطف و همکاران، ۱۳۹۷).

طاهر خانی و همکاران در سال ۱۳۹۸ به بررسی خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی روسازی حاوی سنگدانه‌های بتن بازیافتی پرداختند. در این تحقیق برخی از خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی حاوی سنگدانه‌های به دست آمده از بتن ضایعاتی مورد مطالعه قرار گرفته است. ترکیبات مختلفی از بتن غلتکی که در آنها بخش ریزدانه، درشت دانه یا تمام سنگدانه‌های ریز و درشت طبیعی بتن غلتکی با سنگدانه‌های به دست آمده از بتن ضایعاتی جایگزین گردید، ساخته شده و مقاومت فشاری و خمشی، مدول الاستیسیته و قابلیت جذب انرژی آنها ارزیابی شده است. مقاومت فشاری و خمشی ترکیبات در عمرهای مختلف ۷، ۲۸ و ۹۱ روز و مدول الاستیسیته و جذب انرژی در عمر ۲۸ روز اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان می‌دهد که بتن غلتکی حاوی مصالح بازیافتی دارای مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن حاوی سنگدانه‌های طبیعی بوده ولی این تفاوت قابل توجه نیست. مخلوطی حاوی بخش درشت دانه بازیافتی و ریز دانه طبیعی بیشترین مقاومت فشاری را در بین مخلوط‌های حاوی مصالح بازیافتی دارد (طاهرخانی و همکاران، ۱۳۹۸).

ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۷ تنش‌های ایجاد شده توسط دما بر روسازی بتنی با سیمان پرتلند<sup>۲</sup> (CPCP) را مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها در پژوهش خود یک مدل اجزا محدود را به صورت سه بعدی طراحی و مورد بررسی قرار داده و برای بررسی زمینه‌های دما و استرس‌های روسازی بتنی با سیمان پرتلند تجزیه

پرداختند. در این مقاله با استفاده از روش عددی تفاضل محدود به بررسی تحلیل روسازی‌های انعطاف پذیر تحت سیستم‌های بارگذاری تک، دو و سه محوره پرداخته شد، سپس نتایج حاصل از روش اجزا محدود مقایسه گردید. اعتبار نتایج حاصل از تحلیل‌های تفاضل محدود از مقایسه با نتایج آزمایشگاهی بارگذاری روسازی انعطاف پذیر باند فرودگاه و همچنین نتایج تحلیل‌های اجزای محدود مورد سنجش قرار گرفت. با توجه به پاسخ نتایج این روش در تحلیل روسازی انعطاف‌پذیری می‌تواند به عنوان روشی قابل قبول در طراحی‌ها استفاده نمود. در تحلیل روسازی تحت بارگذاری تک محوره دوگانه، مشاهده شد که به علت کمتر بودن سختی برشی لایه اساس نسبت به آسفالت، کرنش برشی حداکثر در بالای اساس رخ می‌دهد. بیشترین کرنش ناشی از بار وارده به سطح روسازی تحت سیستم دو محوره دوگانه، در بالای سابگرید اتفاق می‌افتد و اندرکنش دو چرخ مجاور وسیله نقلیه به وضوح قابل رویت است. همچنین تأثیر افزایش تعداد چرخ‌ها و محورها در سیستم‌های مختلف بارگذاری بر میزان تغییرشکل‌ها و تنش‌های جسم روسازی مورد مقایسه و بررسی قرار گرفت (جعفری و همکاران، ۱۳۹۷).

منصوریان و رضائی در سال ۱۳۹۷ تحلیل عددی تنش حرارتی در روسازی بتنی ساده در زردار را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش به منظور ارزیابی اثر تغییرات دو عامل گفته شده روی مقدار تنش اصطکاکی و تنش کششی ایجاد شده در دال روسازی بتنی ساده در زردار، تحلیل‌های المان محدود روی دال بتنی در زردار در دو حالت دارای میلگرد انتقال بار و بدون میلگرد انتقال بار و با فرض افت دماهای گوناگون و همچنین ضریب اصطکاک‌های متغیر بین دال بتنی و لایه زیر آن انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان می‌دهد افت دمای زیاد به همراه ضریب اصطکاک قابل ملاحظه، می‌تواند در ۷ تا ۸ ساعت اولیه اجرای روسازی بتنی، تنش حرارتی معادل ۱۲۴۰۰۰ پاسکال ایجاد نماید که این مقدار تنش بیش از مقاومت کششی بتن در ساعات اولیه است. بنابراین، در ساعات اولیه و تحت شرایط گفته شده، بروز ترک در رویه بتنی محتمل خواهد بود. همچنین نتایج این تحقیق نشان می‌دهد وجود انحراف از حالت افقی در میلگرد انتقال بار می‌تواند موجب افزایش بیش از ۵۰ برابری مقدار تنش در محدوده قرارگیری میلگردهای انتقال بار شود (منصوریان و همکاران، ۱۳۹۷).

بررسی تاثیر همزمان ذرات پلی اتیلن ترفتالات و دوده سیلیسی بر خواص ریولوژی و مکانیکی روسازی‌های بتنی پرداخته شده است و به دنبال ارایه یک طرح مخلوط جدید جهت تولید بتن سبز (بتن دوست دار محیط زیست) با استفاده از مواد ضایعاتی PET و دوده سیلیسی می‌باشد. از یک سو با توجه به مشکلات روسازی آسفالتی از قبیل به مخاطره انداختن محیط زیست، گرانی قیر و از سوی دیگر با توجه به اینکه کشور ایران در حال حاضر سومین تولید کننده بزرگ سیمان در سطح جهان می‌باشد از مواردی می‌باشد که این تحقیق را حایز اهمیت می‌سازد (Akhondi et al, 2021). امروزه روسازی‌های بتنی مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته و همچنین افزایش مصرف بطری‌های نگهدارنده مواد غذایی پت و به تبع آن افزایش تولید زباله و ازدیاد محل دفع این ضایعات، بر اهمیت استفاده مجدد از این ضایعات می‌افزاید. یکی از موارد مصرف این ضایعات بدون داشتن اثرات مخرب زیست محیطی، استفاده مجدد آنها به صورت محبوس کردن آنها در روسازی‌های صلب بتنی است. تحقیقات نشان می‌دهد که یکی دیگر از محصولات ضایعاتی جانبی تولید صنایع شیشه که به عنوان ذرات میکروسیلیس یا دوده سیلیسی شناخته می‌شود که می‌تواند در بتن روسازی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از ذرات پت در روسازی بتنی تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری نداشته اما در مقابل موجب افزایش مقاومت کششی و خمشی می‌گردد. در مقابل استفاده از میکروسلیس موجب افزایش مقاومت فشاری، کاهش جذب آب و کاهش نفوذپذیری در روسازی‌های بتنی شده است.

## ۲- مواد و مصالح

### ۲-۱- سیمان

سیمان مصرفی در این تحقیق جهت ساخت تمامی طرح‌های اختلاط، از نوع سیمان پرتلند تیپ ۲ شرکت سیمان خزر می‌باشد. مشخصات شیمیایی این سیمان در جدول او مشخصات فیزیکی آن در جدول ۲ آمده است.

و تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی را بررسی و نتایج با اندازه گیری‌های را مقایسه نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که در شرایط تابستانی غیر معمول، دمای CPCP با زمان و عمق غیرخطی متفاوت بود (Zhang et al, 2017).

جی و همکاران در سال ۲۰۱۹ خصوصیات آزمایشگاهی ترک‌های انعکاس ناشی از دما را مورد بررسی قرار دادند. هدف آن‌ها هدف بررسی تاثیرات خنک کننده بر انتشار ترک‌های انعکاسی برای فرودگاه‌ها بود. در این مقاله، تجزیه و تحلیل عناصر محدود در تست کامل شامل تست‌های اولیه، ابزار دقیق، طراحی آزمایش و نتایج آزمون، مورد بحث قرار گرفت. نتایج نشان داد آن‌ها که فشارهای ناشی از شکست برای گجت‌های کوچکتر بیشتر است (Ji et al, 2019).

احمدنیا و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی تاثیر افزودن خرده پلاستیک ضایعاتی بر روی مشخصات مکانیکی و دوام کف پوش‌های بتنی ترافیکی پرداختند. در این مقاله به تاثیر جایگزینی سنگ‌دانه با ۳٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ خرده پلاستیک ضایعاتی بر روی مشخصات مکانیکی و دوامی کف پوش‌های بتنی ترافیکی و کنترل این مشخصات با ضوابط موجود در آیین‌نامه‌های معتبر پرداخته شده است. آزمایش‌های انجام شده شامل آزمایش‌های وی بی، مقاومت‌های فشاری، کششی، خمشی، امواج اولتراسونیک، مقاومت ذوب و یخبندان و همچنین مقاومت سایشی بوده است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با جایگزینی پلاستیک به جای سنگ دانه تا حدود ۳٪، بعضی از خواص نظیر مقاومت کششی و خمشی بهبود یافته است، اما پس از ۵٪ کاهش یافته است. استفاده از پلاستیک در درصد‌های پایین، تاثیر چندانی بر روی درصد سایش و مقاومت در برابر چرخه‌ی ذوب و یخبندان نداشته است. همچنین نتایج آزمایش‌های مکانیکی و دوام کف پوش‌های بتنی با ۳٪ پلاستیک جایگزینی سنگ دانه توانسته‌اند کلیه الزامات کف پوش‌های ترافیکی موجود در آیین نامه را برآورده سازند (Ahmadnia et al, 2021).

آخوندی و همکاران در سال ۲۰۲۱ به موضوع ارائه یک روش جدید برای تولید بتن دوست دار محیط زیست با استفاده از خرده پلاستیک ضایعاتی و دوده سیلیسی و بررسی مشخصات مکانیکی و دوام آن در روسازی بتنی غلتکی پرداختند. در این مقاله به

جدول ۱. آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی

ترکیب شیمیایی	درصدهای تشکیل دهنده
SiO <sub>2</sub>	۲۱,۶۸
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵,۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۳,۲
CaO	۶۳,۲
MgO	۱,۸
SO <sub>3</sub>	۱,۷
Na <sub>2</sub> O	۰,۲
K <sub>2</sub> O	۰,۷
Free-CaO (CaO.f)	۰,۳۸
Cl	-
I.R	۰,۳۷
LOI	۱,۱۷
	%۱۰۰
C <sub>3</sub> S	۴۶,۱۷
C <sub>2</sub> S	۱۶,۲۵
C <sub>3</sub> A	۵,۹۸
C <sub>4</sub> AF	۱۲,۹۵

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی

مشخصات	مقدار
وزن مخصوص ۳ کیلوگرم بر متر	۳۱۵۲
بلین (سانتی متر بر گرم)	۳۲۶۱
میکرون (%/۱۲) باقیمانده روی الک	۵,۷۷
انسباط طولی (%/)	۲,۲
درصد آب	۲۳
زمان گیرش اولیه (دقیقه)	۱۵۴
زمان گیرش ثانویه (دقیقه)	۲۱۲
مقاومت فشاری ۲ روزه ۲(Kgf/cm)	۱۶۲
مقاومت فشاری ۳ روزه ۲(Kgf/cm)	۲۲۶
مقاومت فشاری ۷ روزه ۲(Kgf/cm)	۳۴۲
مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲(Kgf/cm)	۵۲۱

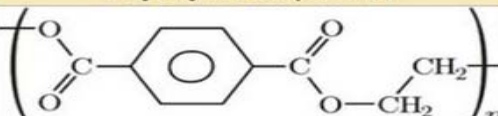
## ۲-۲- ضایعات پلاستیکی (PET)

قرار گیرد ساختار بلوری پیدا می‌کند. در شکل مشخصات شیمیایی PET ذکر شده است. برای تهیه PET در این تحقیق از خرد کردن بطری‌های آب معدنی و نوشیدنی کمک گرفته شده است که به وسیله دستگاه آسیاب پلاستیک بطری‌ها به صورت ذرات با ابعاد بین ۱ الی ۵ میلی‌متر خرد گردیده است. لازم به توضیح است که جذب آب ذرات PET کمتر از ۰٫۱ درصد وزنی آن می‌باشد. در شکل ۲، نمونه‌ی PET بکار رفته در نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق نشان داده شده است.

PET کلمه‌ای است که از حروف اول کلمات PolyEthylene Terephthalate ترکیب شده است و جزء پلیمرهای با زنجیره طولانی وابسته به خانواده پلی استرها می‌باشد. مواد تولید PET عبارتند از: ترفتالیک اسید خالص و اتیلن گلایکول، که هر دوی آنها از مواد خام نفتی مشتق می‌شوند. فرایندهای پلی استری با مواد واسطه دیگری نیز وجود دارند که از واکنش‌های پلیمری شدن یک اسید و یک باز تهیه می‌شوند. PET در حالت خاص یک ماده آمورف شیشه‌ای شکل است و چنانچه تحت تاثیر مستقیم مواد افزودنی و اصلاح کننده

PET	
Molecular formula	$(C_{10}H_8O_4)_n$
Density amorphous	1.370 g/cm <sup>3</sup>
Density crystalline	1.455 g/cm <sup>3</sup>
Young's modulus (E)	2800–3100 MPa
Tensile strength( $\sigma$ )	55–75 MPa
Elastic limit	50–150%
notch test	3.6 kJ/m <sup>2</sup>
Glass temperature	75 °C
melting point	260 °C
Vicat B	170 °C
Thermal conductivity	0.24 W/(m·K)
linear expansion coefficient ( $\alpha$ )	$7 \times 10^{-5}/K$
Specific heat (c)	1.0 kJ/(kg·K)
Water absorption (ASTM)	0.16
Refractive Index	1.5750
Price	0.5–1.25 €/kg

source: A.K. van der Vegt & L.E. Govaert, Polymeren, van keten tot kunstof, ISBN 90-407-2388-5

Polyethylene terephthalate	
	
IUPAC name <span style="float: right;">[hide]</span> poly(ethylene terephthalate)	
Identifiers	
CAS number	25038-59-9
Properties	
Density	1.3 g·cm <sup>-3</sup> (20 °C) [2]
Melting point	> 250 °C [2]
Solubility in water	pratically insolvable [2]
Thermal conductivity	0.15 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> [1]
Refractive index ( $n_D$ )	$n_{20} = 1.57 - 1.58$ [1]
Related compounds	
Related Monomers	Terephthalic acid Ethylene glycol

Except where noted otherwise, data are given for materials in their standard state (at 25 °C, 100 kPa)

شکل ۱. مشخصات PET



شکل ۲. تصویر PET مصرفی در نمونه‌ها

## ۲-۳-آب

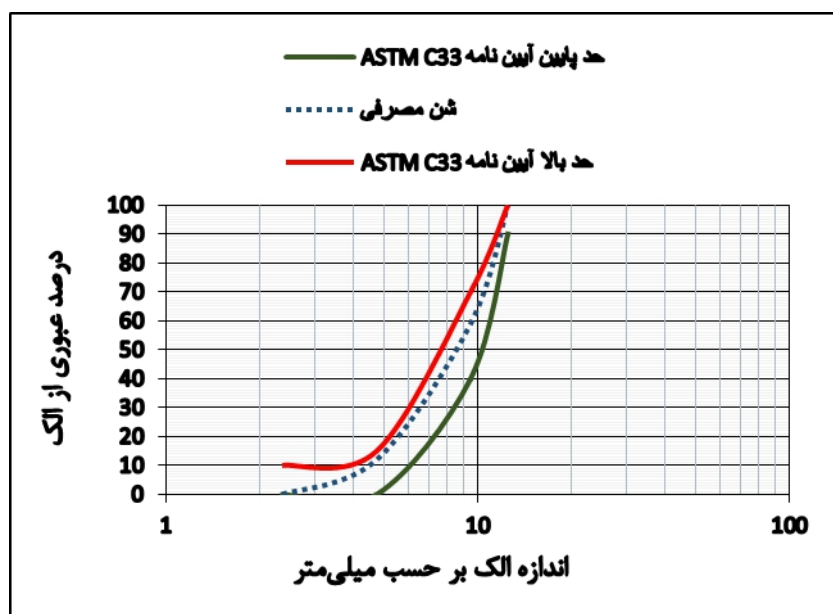
مطابق با بند ۹-۳-۱-۴-۳-۹، آب مصرفی در بتن باید آب آشامیدنی باشد. آبی که قابل آشامیدن است مزه یا بوی مشخصی ندارد و تمیز و صاف است و می‌توان آن را در بتن به کار برد به همین دلیل در طرح‌های اختلاط از آب آشامیدنی در طرح‌های اختلاط استفاده شد.

## ۲-۴-شن

شن مصرفی از کارخانه لوله سازی شمال تهیه شده که از نوع شن شکسته می‌باشد. وزن مخصوص آن ۲۷۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب، میزان جذب آب آن ۵٫۱ درصد و حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۵٫۱۲ میلی‌متر می‌باشد. کیفیت دانه‌بندی شن مصرفی در جدول ۳ و نمودار دانه بندی آن در شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. دانه‌بندی شن مصرفی

اندازه الک (میلی‌متر)	درصد عبوری (درصد)	ASTM C33
12.5	122	12-122
1.5	51	42-72
4.75	2.12	2-15



شکل ۳. نمودار دانه بندی شن مورد استفاده بر اساس آیین‌نامه ASTM C33

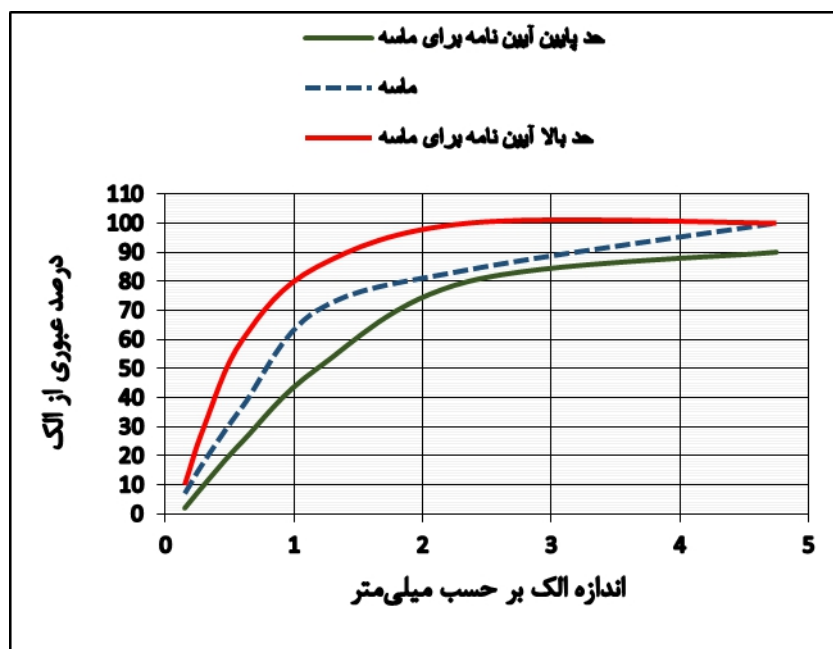
## ۲-۵-ماسه

ماسه مصرفی از نوع رودخانه‌ای و با اندازه ۰-۵ میلی‌متر می‌باشد. وزن مخصوص ماسه ۲۶۵۱ کیلوگرم بر مترمکعب و جذب آب آن ۵٫۲ درصد اندازه‌گیری شد. کیفیت دانه‌بندی ماسه

مصرفی در جدول ۴ و نمودار دانه‌بندی در شکل ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. دانه‌بندی ماسه مصرفی

اندازه الک (میلی‌متر)	درصد عبوری (درصد)	ASTM C33
۴.۷۵	۱۲۲	۱۲-۱۲۲
۲.۳۶	۸۴	۸۲-۱۲۲
۱.۱۸	۷۲	۵۲-۸۵
۲.۶	۳۷	۲۵-۶۲
۲.۳	۱۸	۱۲-۳۲
۲.۱۵	۷	۲-۱۲



شکل ۴. نمودار دانه‌بندی ماسه مورد استفاده بر اساس آیین‌نامه ASTM C33

## ۲-۶- سنگدانه‌های بازیافتی

قطعات بتنی مذکور وارد دستگاه جک شدند و پس از تبدیل شدن به تکه‌های کوچکتر، توسط تسمه نقاله به سمت دستگاه‌های قله‌شکن و سنگ شکن هدایت گردیدند. پس از پایان فرآیند خردایش، مصالح به صورت کیسه‌های ۵۰ کیلویی به محل آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی منتقل شد. سپس با عبور دادن سنگدانه‌های بازیافتی از الک‌های مربوطه طبق آیین‌نامه ASTM C33، به دو دیوی شن و ماسه تقسیم شد. در شکل ۵ تصویری از سنگدانه‌های بازیافتی مصرف شده در نمونه‌های بتنی نشان داده شده است.

برای انجام این تحقیق نیاز به سنگدانه‌های ضایعاتی بتنی در ابعاد ریزدانه و درشت دانه بود تا بتوانیم این مصالح را با نسبت‌های مختلف جانشینی با سنگدانه‌های طبیعی جایگزین کنیم تا در نهایت خواص مکانیکی بتن حاوی سنگدانه‌های ضایعاتی بتنی را مورد بررسی قرار دهیم و با خواص مهندسی بتن معمولی مقایسه نماییم. برای این منظور بتنی تخریبی از بتن با عیار ۳۷۵ کیلوگرم سیمان در هر متر مکعب و با مقاومت مشخصه ۴۰ مگاپاسکال تهیه گردید. سپس قطعات بتنی به معدن انتقال یافت. قبل از عملیات خردایش قطعات بتنی، دستگاه جک و تسمه نقاله به طور کامل از مصالح قبلی پاکسازی شد، سپس



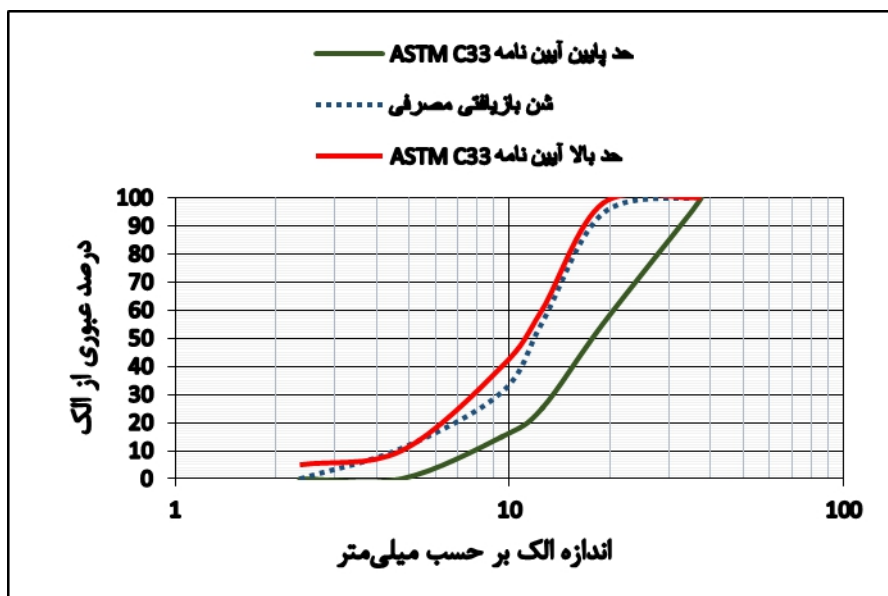


شکل ۵. تصویری از سنگدانه‌های بازیافتی مصرف شده در نمونه‌های بتنی

### ۲-۶-۱- شن بازیافتی

و جذب آب ۵,۵ درصد می‌باشد. کیفیت دانه‌بندی شن بازیافتی در جدول ۵ و شکل ۶ آورده شده است.

شن مورد استفاده دارای دانه‌بندی یکنواخت و ماکزیمم اندازه دانه‌های ۱۹ میلی‌متر، وزن مخصوص ۲۶۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب

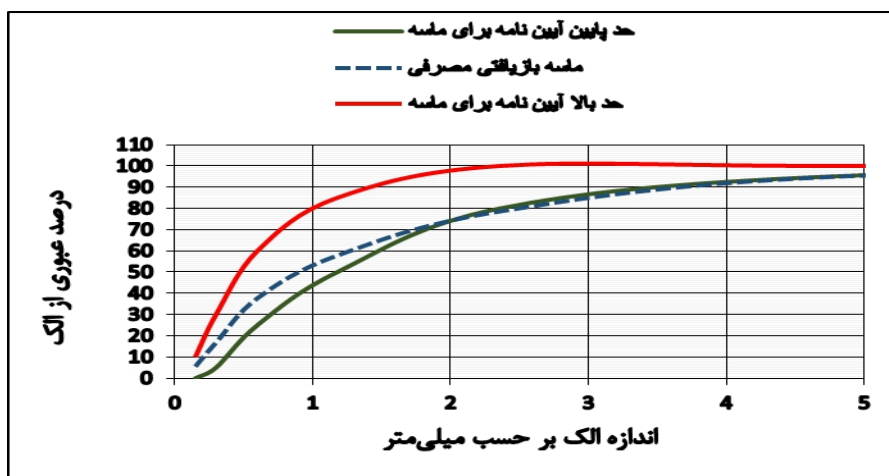


شکل ۶. نمودار دانه بندی شن بازیافتی مورد استفاده بر اساس آیین‌نامه ASTM C33

### ۲-۶-۲- ماسه بازیافتی

و دانه‌بندی یکنواخت می‌باشد. کیفیت دانه بندی ماسه بازیافتی در جدول ۵ و شکل ۷ آمده است.

ماسه بازیافتی بتنی در اندازه ۰-۶ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. ماسه بازیافتی مورد استفاده دارای وزن مخصوص ۲۳۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب، جذب آب ۵,۷ درصد، مدول نرمی ۰,۳



شکل ۷. نمودار دانه بندی ماسه بازیافتی مورد استفاده براساس آیین‌نامه ASTM C33

جدول ۵. دانه بندی شن و ماسه بتنی بازیافتی مصرفی

میلی‌متر ۲-۶ دانه بندی ماسه بازیافتی		میلی‌متر ۶-۱۵ دانه بندی شن بازیافتی		اندازه الک بر حسب	
ASTM C33	درصد عبوری	ASTM C33	درصد عبوری	اینچ	میلی‌متر
-	-	۱۲۲	۱۲۲	۱ ۱/۲	۳۷.۵
-	-	۱۵-۱۲۲	۱۲۲	۱	۳۵
-	-	-	۱۴.۴۱	۳/۴	۱۱
-	-	۲۵-۶۲	۵۵.۴۱	۱/۲	۱۲.۵
۱۲۲	۱۲۲	-	۳۲.۸۱	۳/۸	۱.۵
۱۵-۱۲۲	۱۴.۸	۲-۱۲	۱۲.۸۳	۴	۴.۷۵
۸۲-۱۲۲	۷۸.۶	۲-۵	۲	۸	۲.۳۶
۵۲-۸۵	۵۷.۸	-	-	۱۶	۱.۱۸
۲۵-۶۲	۳۷.۷	-	-	۳۲	۲.۶
۵-۳۲	۱۶.۸	-	-	۵۲	۲.۳
۲-۱۲	۵.۵	-	-	۱۲۲	۲.۱۵
۲	۲	-	-	۲۲۲	۲.۲۷۵

داده شد تا میکسر چند ثانیه همراه با آب بچرخد و در نهایت آب کاملاً تخلیه شد. سپس ابتدا شن و ماسه به صورت خشک در داخل میکسر ریخته شده و به مدت ۱ دقیقه مخلوط شدند. سپس جهت پیش مرطوب کردن سنگ‌دانه‌ها نیز نصف آب اختلاط به مخلوط شن، ماسه و خرده پلاستیک‌ها (PET)، درون میکسر ریخته شده به مدت ۵ دقیقه مخلوط شدند. سپس سیمان به همراه

## ۲-۷-روش ساخت نمونه‌های بتنی

ساخت بتن در میکسر با ظرفیت ۵۰ لیتر انجام شد و ترتیب اختلاط مصالح برای ساخت بتن این‌گونه بوده که ابتدا قبل از مخلوط کردن مواد در میکسر برای جلوگیری از جذب آب اختلاط توسط بدنه میکسر، به درون آن آب اضافه کرده و اجازه

می‌آید که فرمول آن در رابطه ۱ نشان داده شده است. در رابطه زیر  $F_{cu}$  تنش فشاری،  $P$  بار شکست،  $A$  سطح مقطع نمونه می‌باشد.

$$F_{cu} = \frac{P}{A} \quad (1)$$

بین نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای با ابعاد استاندارد، اختلافی ناشی از اثر تنش ایجاد شده بین سطح تماس نمونه و صفحه دستگاه آزمایش فشاری دیده می‌شود. در این حالت اثر برش انتهایی را می‌توان به راحتی در یک استوانه استاندارد که تحت آزمایش فشاری یا گسیختگی قرار گرفته مشاهده کرد. در

هر دو انتهای نمونه یک مخروط تقریباً سالم با ارتفاع  $\sqrt{\frac{3}{2}}$  برابر قطر استوانه به وجود می‌آید که بین مخروط‌ها کرنش جانبی می‌تواند به آزادی توسعه پیدا کند و دلیل آن متورم شدن و باد کردن نمونه در این قسمت می‌باشد. اما در یک نمونه مکعبی دو هرم سالم ایجاد می‌شود که نوک‌های آن‌ها داخل هم می‌باشند یعنی ناحیه‌ای که در مقابل متورم شدن مقید نباشد، وجود ندارد. نتیجتاً در یک مکعب فشار محوری خالص بدون برش نمی‌تواند وجود داشته باشد. به دو دلیل فوق مقاومت نمونه مکعبی معمولاً بالاتر از مقاومت نمونه استوانه‌ای است که از همان مخلوط ساخته شده باشد، به طوری که مقاومت نمونه استوانه‌ای حدود ۸۰ درصد نمونه مکعبی تخمین زده می‌شود. رابطه‌ی بین مقاومت فشاری نمونه مکعبی و استوانه‌ای در رابطه ۲ نشان داده شده است. یک نمونه دستگاه آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۸ قابل مشاهده است.

$$F_c = 0.8F_{cu} \quad (2)$$

نصف دیگر باقیمانده آب به مخلوط اضافه شد در نهایت ۵ دقیقه دیگر کل مخلوط توسط میکسر مخلوط شد. پس از آن بتن به داخل قالب‌های روغن‌کاری شده مکعبی، استوانه‌ای و منشوری ریخته شدند و به مدت ۲۴ ساعت جهت سخت شدن در شرایط محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. پس از آن نمونه‌ها را از قالب خارج کرده و در حوضچه آب قرار گرفته در محیط آزمایشگاه و در دمای بین ۲۲-۲۵ درجه سانتی‌گراد برای عمل‌آوری و انجام آزمایش در سنین مورد نظر نگهداری شد.

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

#### ۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

پس از انجام عملیات ساخت بتن، مقداری از آن در قالب‌های مکعبی با ابعاد ۱۰ سانتی‌متر مورد نظر ریخته شد و انجام آزمایش بر اساس آیین‌نامه BS ۱۸۸۱-۱۱۶:۱۹۸۳ انجام شد. پس از قالب‌گیری بتن، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه قرار داده می‌شوند سپس نمونه‌ها از قالب درآمده و در حوضچه‌ی آب، به مدت ۲۸ روز برای عمل‌آوری نگهداری می‌شوند. پس از آن نمونه‌ها در بین جک‌های مخصوص و طوری قرار می‌گیرند که دو سطح مقابلی که در موقع بتن‌ریزی مجاور قالب بودند، در تماس با رکاب‌های فوقانی و تحتانی دستگاه باشند. پس از بارگذاری با افزایش نیرو بر روی نمونه، شکست رخ داده و عدد نهایی گیج ثبت می‌شود. در نهایت مقاومت فشاری از تقسیم نیرویی که سبب شکست شده بر سطح مقطع نمونه به دست



شکل ۸ دستگاه اندازه‌گیری مقاومت فشاری

### ۳-۲- آزمایش مقاومت کششی در خمش (مدول گسیختگی)

بارگذاری دو نقطه‌ای تحت تنش بحرانی وجود داشته باشد، خیلی بیشتر از حالت بارگذاری یک نقطه‌ای می‌باشد. در آزمایش خمشی طبق آیین‌نامه ASTM C293 از روش بار متمرکز یا همان سه نقطه‌ای استفاده شده است. نمونه منشوری دارای ابعاد  $7 \times 7 \times 28$  میلی‌متری با سرعت بین  $21,1-86,0$  مگاپاسکال در دقیقه بارگذاری می‌شود و مقدار عددی مقاومت خمشی بار تک نقطه‌ای از رابطه‌ی ۳ به دست می‌آید برای بار دو نقطه‌ای نیز می‌توان طبق آیین‌نامه (ASTM C 78-94) از رابطه ۳ استفاده نمود که در آن‌ها  $R$  مقاومت خمشی،  $P$  حداکثر بار در هنگام گسیختگی،  $L$  طول دهانه،  $B$  عرض نمونه و  $D$  ارتفاع مقطع نمونه می‌باشد.

$$R = \frac{3PL}{2BD^2}$$

بزرگ‌تر از ۲,۰٪ نباشد. آنگاه این عدد به عنوان وزن نمونه‌ی خشک ( $W_d$ ) ثبت می‌گردد. حال نمونه را به مدت ۳۰ دقیقه در آب قرار داده و پس از بیرون آوردن به مدت ۱ دقیقه آنرا روی یک الک سیمی قرار داده سپس توسط پارچه آب روی سطح نمونه را خشک کرده و آن را وزن می‌کنیم و این عدد به عنوان وزن اشباع با سطح خشک نمونه ( $W_s$ ) ثبت می‌شود. همین عمل را پس از ۲۴ ساعت که در آب قرار داده شده وزن کرده و پس از آن  $W_s$  را محاسبه می‌کنیم. این عمل باید آنقدر تکرار شود تا اختلاف بین دو قرائت ناچیز باشد. طبق تجربه محقق زمان مورد نیاز برای آنکه اختلاف بین دو قرائت ناچیز باشد، ۳ روز پس از رسیدن سن مورد نظر (۲۸ روزگی) می‌باشد.

$$(\%) \text{ آب جذب} = \frac{(W_s - W_d)}{W_d} \times 100$$

برای آزمایش مقاومت کششی در خمش (مدول گسیختگی یا مقاومت خمشی) از دو نوع آزمایش استفاده می‌شود:

- ۱ - یک بار متمرکز در وسط تیر، که یک نمودار خمشی مثلثی می‌دهد و حداکثر تنش تنها در یک مقطع تیر اتفاق می‌افتد.
- ۲ - بارگذاری دو نقطه‌ای متقارن، که یک لنگر خمشی یکنواخت بین دو نقطه ایجاد می‌کند.

در روش بار متمرکز شکست معمولاً وقتی اتفاق می‌افتد که تاری که زیر نیرو قرار می‌گیرد مقاومت خود را از دست بدهد این عبارت همیشه درست نیست زیرا ممکن است تاری ضعیف‌تر در تیر وجود داشته باشد که تنش کمتری از تنش حداکثر وارد بر تیر بشکند. به هر حال احتمال اینکه عنصری ضعیف‌تر در

(۳)

### ۳-۳- آزمایش جذب آب

جذب آب نمونه‌های مورد آزمایش بر طبق استاندارد ASTM C64 انجام گرفت. در حالی که تا رسیدن به سن مورد نظر برای گرفتن آزمایش جذب آب، نمونه‌ها داخل حوضچه آب در دمای اتاق قرار داشتند. بدین ترتیب در هر بار آزمایش جذب آب، میانگین سه نمونه مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متری به عنوان جذب آب آن طرح معرفی گردید. در سن ۲۸ روزگی نمونه‌ها را از آب خارج کرده و به مدت ۱ دقیقه آنرا روی یک الک سیمی قرار داده سپس توسط پارچه آب روی سطح نمونه را خشک می‌کنیم. پس سپس نمونه را به مدت ۲۴ ساعت در گرم‌کن قرار می‌دهیم. پس از گذشت ۲۴ ساعت و درآوردن نمونه از گرم‌کن به توزین آن می‌پردازیم. تا زمانی که اختلاف بین دو قرائت که ناشی از افت وزن به دلیل قرارگیری در حرارت  $105$  درجه سانتی‌گراد است،

(۴)

## ۴- نتایج و بحث

### ۴-۱- مقایسه وزن مخصوص بتن تازه و اسلامپ در بتن با مصالح بازیافتی و بتن با سنگدانه طبیعی

شده است تا تاثیر سنگدانه قابل مقایسه باشد. در این جدول، به عنوان مثال منظور از بتن RS-10، بتن با ۱۰ درصد جایگزینی ماسه می‌باشد.

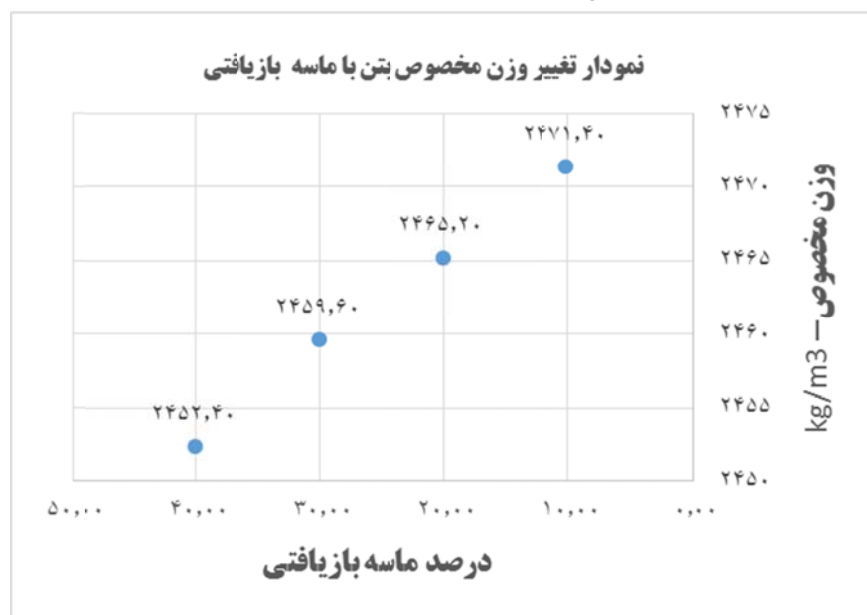
در جدول ۶، CC بتن با سنگدانه طبیعی (بتن شاهد) و RS<sup>۳</sup> بتن با جایگزینی ماسه بازیافتی و RG<sup>۴</sup> بتن با جایگزینی شن بازیافتی می‌باشد. جایگزینی در محدوده‌ی شن و ماسه به طور مجزا انجام

جدول ۶. مقایسه وزن مخصوص بتن تازه و اسلامپ در بتن با مصالح بازیافتی و بتن با سنگدانه طبیعی

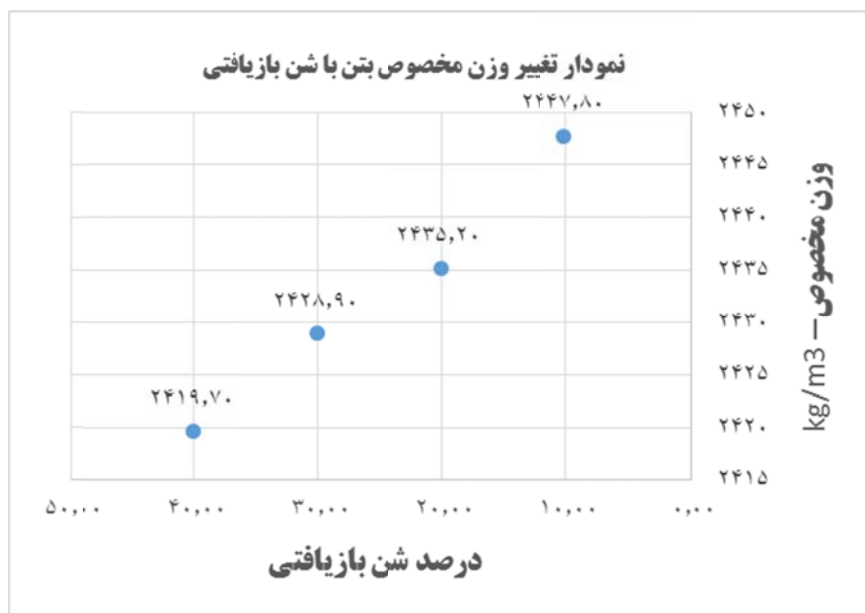
اسلامپ	تغییر وزن مخصوص نسبت به بتن شاهد	وزن مخصوص بتن تازه (کیلوگرم بر مترمکعب)	نوع بتن
۸	۰	۲۴۷۷,۳	CC
۷,۹	-۰,۲۴	۲۴۷۱,۴	10-RS
۷,۹	-۰,۴۹	۲۴۶۵,۲	20-RS
۷,۸	-۰,۷۲	۲۴۵۹,۶	30-RS
۸	-۱,۰۲	۲۴۵۲,۴	40-RS
۷,۷	-۱,۲۱	۲۴۴۷,۸	10-RG
۷,۸	-۱,۷۳	۲۴۳۵,۲	20-RG
۷,۸	-۱,۹۹	۲۴۲۸,۹	30-RG
۷,۹	-۲,۳۸	۲۴۱۹,۷	40-RG

کاهش وزن مخصوص در نمونه‌ی با شن بازیافتی بیشتر از نمونه‌ی با ماسه بازیافتی می‌باشد.

در شکل ۹ و ۱۰، کاهش وزن مخصوص بتن با افزایش سنگدانه بازیافتی شاید به دلیل چگالی پایین‌تر سنگدانه بازیافتی در مقابل سنگدانه طبیعی باشد. همانطور که از جدول ۷ مشخص است،



شکل ۹. نمودار تغییر وزن مخصوص بتن با ماسه بازیافتی



شکل ۱۰. نمودار تغییر وزن مخصوص بتن با شن بازیافتی

#### ۴-۲- مقایسه مقاومت فشاری بتن با سنگدانه بازیافتی و بتن با سنگدانه طبیعی

در جدول ۷، مقادیر مربوط به مقایسه مقاومت فشاری بتن با سنگدانه بازیافتی و بتن با سنگدانه طبیعی نشان داده شده است.

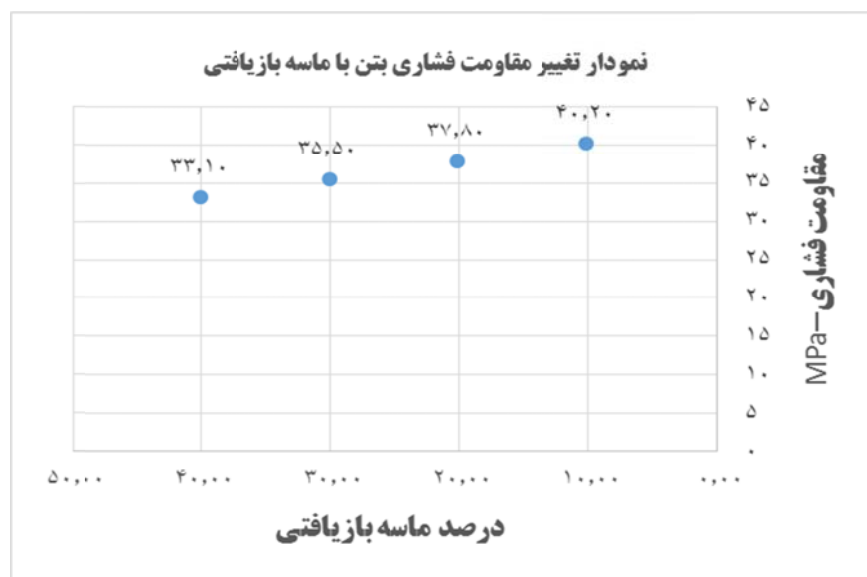
جدول ۷. مقادیر مربوط به مقایسه مقاومت فشاری بتن با سنگدانه بازیافتی و بتن با سنگدانه طبیعی

نوع بتن	مقاومت فشاری بتن (مکاپاسکال)	تغییر مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد
CC	۴۱,۱۱	۰
10-RS	۴۰,۲	-۲,۲۶
20-RS	۳۷,۸	-۸,۷۶
30-RS	۳۵,۵	-۱۵,۸
40-RS	۳۳,۱	-۲۴,۲
10-RG	۳۶,۲	-۱۳,۵۶
20-RG	۳۳,۹	-۲۱,۲۷
30-RG	۳۱,۸	-۲۹,۲۸
40-RG	۲۹,۱	-۴۱,۲۷

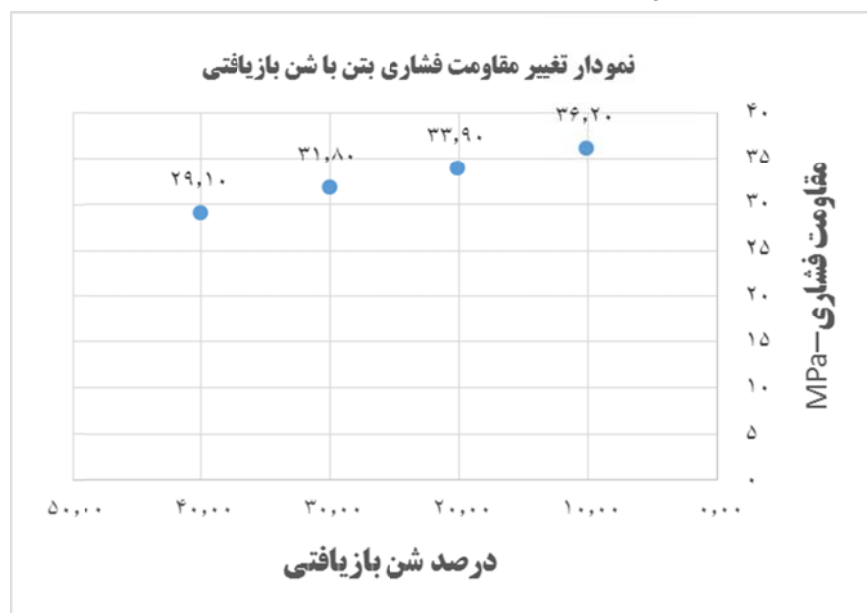
است. با توجه به محدوده اعداد به دست آمده، بیشترین کاهش مقاومت، با جایگزینی شن بازیافتی رخ داده است. لذا افزودن ماسه بازیافتی نسبت به شن بازیافتی، اثر مطلوب‌تری بر مقاومت فشاری دارد. هرچند کمترین کاهش مقاومت فشاری در مقدار ۱۰

با توجه به شکل ۱۱ و ۱۲، مشاهده می‌شود که افزایش سنگدانه بازیافتی باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. این موضوع به دلیل ساختار ناهمگن سنگدانه‌های بازیافتی و ضعف سنگدانه‌های بازیافتی در سطوح اتصال اجزای مختلف آن به هم

درصد رخ داده است، اما هدف بدست آوردن مقدار بهینه است تا بتوان از مصالح جایگزین بیشتری استفاده نمود. لذا مقدار ۳۰ درصد ماسه بازیافتی (RS-۳۰) به عنوان طرح اختلاط بهینه برای مرحله بعدی تحقیق انتخاب می‌شود.



شکل ۱۱. نمودار تغییر مقاومت فشاری بتن با ماسه بازیافتی



شکل ۱۲. نمودار تغییر مقاومت فشاری بتن با شن بازیافتی

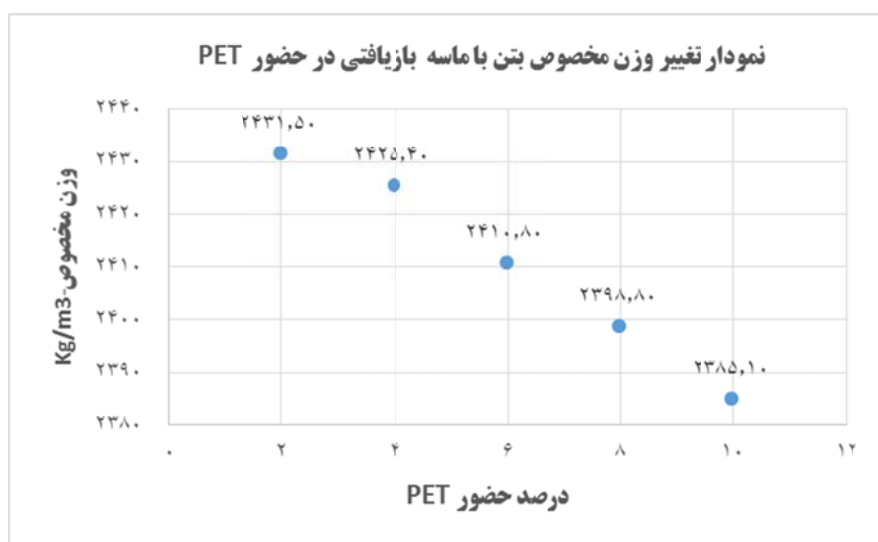
۳-۴- مقایسه وزن مخصوص و اسلامپ بتن شاهد با بتن حاوی سنگدانه بازیافتی شامل خرده پلاستیک (PET) در این مرحله از تحقیق به بررسی اسلامپ و وزن مخصوص بتن شاهد با بتن حاوی سنگدانه بازیافتی شامل خرده پلاستیک (PET) خواهیم پرداخت. در جدول ۸ به طور مثال منظور از نماد ۲-P-۳۰-RS به ترتیب، بتن با ۳۰ درصد ماسه بازیافتی و حاوی ۲ درصد خرده پلاستیک (PET) می‌باشد.

جدول ۸ مقادیر مربوط به مقایسه وزن مخصوص و اسلامپ بتن شاهد با بتن حاوی سنگدانه بازیافتی شامل خرده پلاستیک (PET)

اسلامپ	تغییر وزن مخصوص نسبت به بتن شاهد	وزن مخصوص بتن تازه (کیلوگرم بر مترمکعب)	نوع بتن
۷,۸	۰	۲۴۵۹,۶	30-RS
۷,۸	-۱,۱۶	۲۴۳۱,۵	RS-30-P-2
۷,۹	-۱,۴۱	۲۴۲۵,۴	RS-30-P-4
۸	-۲,۰۲	۲۴۱۰,۸	RS-30-P-6
۸	-۲,۵۴	۲۳۹۸,۷	RS-30-P-8
۷,۹	-۳,۱۲	۲۳۸۵,۱	RS-30-P-10

به دلیل جذب آب کمتر و در نتیجه اضافه شدن سهم آب سنگدانه‌ها تا حدودی موجب افزایش عدد اسلامپ شده است.

همانطور که در شکل ۱۳، مشاهده می‌شود، وجود خرده پلاستیک به دلیل وزن مخصوص کم، موجب کاهش وزن مخصوص بتن شده است. همچنین وجود خرده پلاستیک



شکل ۱۳. نمودار مقادیر وزن مخصوص بتن با ماسه بازیافتی حاوی خرده پلاستیک (PET)

۴-۴-مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها با سنگدانه طبیعی و بتن با سنگدانه بازیافتی با حضور خرده پلاستیک (PET) در این مرحله از تحقیق به مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها با سنگدانه طبیعی و بتن با سنگدانه بازیافتی با حضور خرده پلاستیک پرداخته شده است که مقادیر مربوط به آن در جدول ۹، آورده شده است.

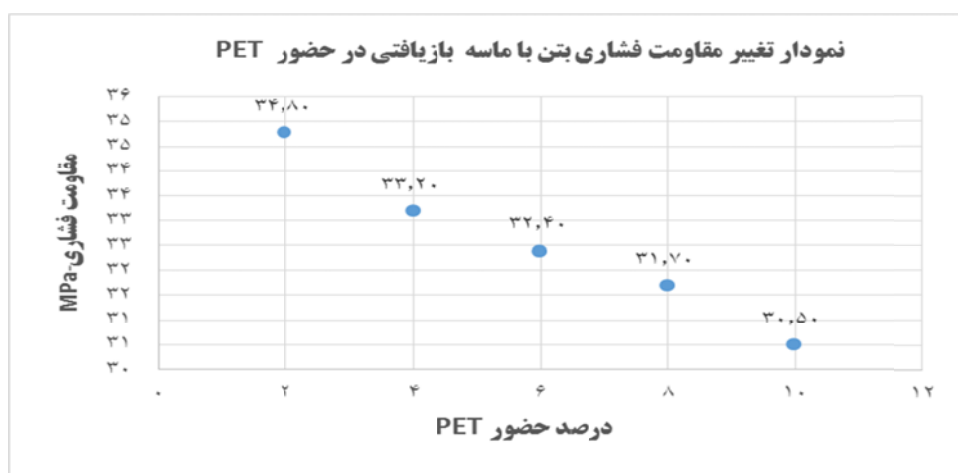


جدول ۹. مقادیر مربوط به مقایسه مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها با سنگدانه طبیعی و بتن با سنگدانه بازیافتی با خرده پلاستیک (PET)

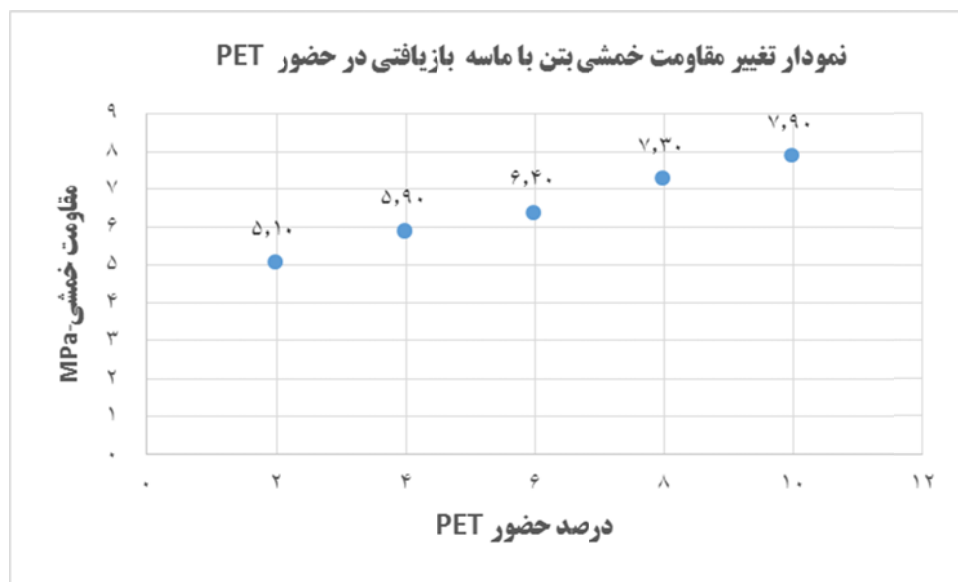
نوع بتن	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	تغییر مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد	مقاومت خمشی (مگاپاسکال)	تغییر مقاومت خمشی نسبت به بتن شاهد
CC	۴۱,۱۱	۰	۵,۱۳	۰
30-RS	۳۵,۵	-۱۵,۸۰	۴,۷۸	-۷,۳۲
RS-30-P-2	۳۴,۸	-۲,۰۱	۵,۱	۶,۲۷
RS-30-P-4	۳۳,۲	-۶,۹۳	۵,۹	۱۸,۹۸
RS-30-P-6	۳۲,۴	-۹,۵۷	۶,۴	۲۵,۳۱
RS-30-P-8	۳۱,۷	-۱۱,۹۹	۷,۳	۳۴,۵۲
RS-30-P-10	۳۰,۵	-۱۶,۳۹	۷,۹	۳۹,۴۹

آب این ذرات کمتر از ۰,۱ درصد است. لذا مانع از عبور آب از روی این ذرات و نفوذ به ساختار بتن جهت انجام فرایند هیدراتاسیون می‌شوند. ولی بعد از شکست نمونه‌ها در آزمایشگاه مشاهده گردید در همه نمونه‌های حاوی PET بازیافتی در حین بارگذاری فشاری از شکست ترد ناگهانی به شکست نرم و تدریجی تغییر ماهیت پیدا کرده است که این امر بیانگر افزایش خاصیت ارتجاعی روسازی بتنی خواهد گردید و در نتیجه افزایش آسایش رانندگی را برای رانندگان به همراه دارد. همچنین در خصوص آزمایش مقاومت خمشی لازم به ذکر است، نمونه‌ها تا روز آزمایش تحت عمل آوری بوده و در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفتند.

با توجه به جدول ۹ و شکل های ۱۴ و ۱۵، مقاومت فشاری و خمشی بتن بهینه بازیافتی بدون خرده پلاستیک از بتن با سنگدانه طبیعی کمتر است، اما با حضور خرده پلاستیک در بتن با ماسه بازیافتی، کاهش مقاومت فشاری و افزایش مقاومت خمشی مشهود است. لذا می‌توان گفت افزایش درصد خرده پلاستیک در بتن با ماسه بازیافتی، موجب کاهش مقاومت فشاری و افزایش مقاومت خمشی بتن خواهد شد. دلیل کاهش مقاومت فشاری، کاهش تراکم پذیری بتن حاوی خرده پلاستیک می‌باشد؛ چراکه وجود PET باعث ایجاد تخلخل موضعی ناشی از حضور حباب هوا شده و نقطه ضعف در بافت بتن را رقم می‌زند. از طرفی دیگر از آنجایی که ذرات PET خاصیت آبریزی دارند، جذب



شکل ۱۴. نمودار تغییر مقاومت فشاری بتن با حضور خرده پلاستیک (PET)



شکل ۱۵. نمودار تغییر مقاومت خمشی با حضور خرده پلاستیک (PET)

#### ۴-۵- مقایسه جذب آب بتن شاهد با بتن حاوی خرده پلاستیک (PET)

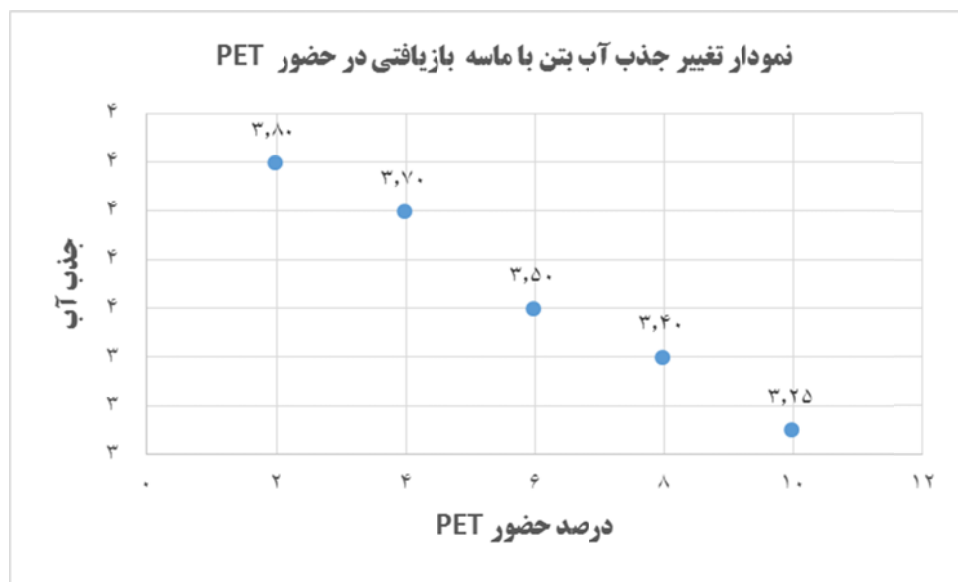
در این مرحله از تحقیق به بررسی جذب آب بتن شاهد با بتن حاوی سنگدانه بازیافتی شامل خرده پلاستیک (PET) خواهیم پرداخت. در جدول ۱۰، نتایج بررسی بیان شده است.

جدول ۱۰. مقادیر مربوط به مقایسه جذب آب بتن شاهد با بتن حاوی خرده پلاستیک (PET)

نوع بتن	جذب آب.٪	تغییر مقدار جذب آب نسبت به بتن شاهد
30-RS	۴	۰
RS-30-P-2	۳,۸	-۵,۲۶
RS-30-P-4	۳,۷	-۸,۱۱
RS-30-P-6	۳,۵	-۱۴,۲۹
RS-30-P-8	۳,۴	-۱۷,۶۵
RS-30-P-10	۳,۲۵	-۲۳,۰۸

جذب آب در محیط و در نتیجه کاهش اثرات منفی در شرایط یخبندان، شرایط حضور کلر و سولفات در آب محیط و ... موجب افزایش دوام بتن خواهد شد.

همانطور که در شکل ۱۶، مشاهده می‌شود، وجود خرده پلاستیک به دلیل جذب آب پایین، در مجموع موجب کاهش جذب آب بتن حاوی خرده پلاستیک شده است که این امر به دلیل کاهش



شکل ۱۶. نمودار مقادیر جذب آب بتن با سنگدانه بازیافتی حاوی خرده پلاستیک (PET)

#### ۵- نتیجه‌گیری

کاهش مقاومت فشاری به مقدار ۲٫۲۶٪ و بیشترین کاهش مقاومت فشاری به میزان ۲۴٫۲٪، به ترتیب در RS-۱۰ و RS-۴۰ رخ داده است.

در خصوص افزودن شن بازیافتی، کمترین کاهش مقاومت فشاری به مقدار ۱۳٫۵۶٪ و بیشترین کاهش مقاومت فشاری به میزان ۴۱٫۲۷٪، به ترتیب در RG-۱۰ و RG-۴۰ رخ داده است.

با توجه به نتایج بدست آمده، کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی مشهود است و این روند کاهش با افزایش حضور سنگدانه‌ها بیشتر شده است.

مقایسه جذب آب بتن در نمونه‌های حاوی خرده پلاستیک (PET)، کاهش جذب آب نمونه‌ی بتن تا ۲۳٫۰۸٪ در حضور ۱۰٪ خرده پلاستیک مشهود است.

با انجام آزمایش مقاومت فشاری و خمشی، اسلامپ، وزن مخصوص و جذب آب روی نمونه‌های بتنی در حضور خرده پلاستیک (PET)، نتایج زیر کسب شده است:

با افزایش میزان حضور ماسه و شن بازیافتی در نمونه‌ها، تغییر چشم‌گیری در میزان اسلامپ مشاهده نشد.

با افزایش میزان حضور ماسه و شن بازیافتی در نمونه‌ها، کاهش وزن مخصوص نمونه به دلیل پایین تر بودن وزن مخصوص سنگدانه‌های بازیافتی مشهود است. لازم به ذکر است بیشترین کاهش در RG-۴۰ و کمترین کاهش در RS-۱۰ رخ داده است. افزودن خرده پلاستیک (PET) به نمونه‌ها، منجر به کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها تا ۱۶٫۳۹٪ شده است.

افزودن خرده پلاستیک (PET) به نمونه‌ها، منجر به افزایش مقاومت خمشی نمونه‌ها تا ۳۹٫۴۹٪ شده است.

مقاومت فشاری بتن شاهد (CC)، ۴۱٫۱۱ MPa بدست آمده است. همچنین در خصوص افزودن ماسه بازیافتی، کمترین

#### ۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Polyethylene Terephthalate
- 2- Cement Portland Pavement Concrete
- 3- Recycled Sand
- 4- Recycled Geavel

## ۷-مراجع

- Ahmadnia, A. M. Ramezaniapour, M. Dolatshahi Pir, (2021). Investigating the Effect of Adding Pet Scum On The Mechanical Properties And Durability Of Concrete Block Pavement, Sharif Journal Civil Engineering, 36(4), 25-33.
- Akhondi, M., Ramesht, M. H., Pourrostan, T., & Golsoorat Pahlaviani, A. (2021). Presentation of a New Method for Production of Environment-Friendly Concrete using PET Waste/Silica Fume and Its Mechanical/Durability Properties Investigation in Concrete Pavement. Amirkabir Journal of Civil Engineering, 53(3), 20-20.
- Ji, R. Y., Mandal, T., & Yin, H. (2019). Laboratory characterization of temperature induced reflection cracks. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition).
- Lofsjogar, M. (2004). A Laboratory Investigation on Bonding Properties of Dowels in Concrete Roads, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Sweden.
- Zhang, M., Guo, C., Yu, B., Yang, Y., & Lu, Z. (2017). CTCP temperature fields and stresses. International Journal of Pavement Research and Technology, 10(6), 553-562.
- جعفری، محمد، نوید گنجیان و حسن ذوقی، (۱۳۹۷)، مقایسه روش‌های عددی تفاضل محدود و المان محدود در تحلیل روسازی انعطاف پذیر، کنفرانس عمران، معماری و شهرسازی کشورهای جهان اسلام، تبریز، دانشگاه تبریز، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، دانشگاه علمی کاربردی شهرداری تبریز.
- طاهرخانی، حسن، سازگار، حیدر (۱۳۹۸). بررسی خصوصیات مکانیکی بتن غلتکی روسازی حاوی سنگدانه‌های بتن بازیافتی. فصلنامه مهندسی حمل و نقل، ۱۰(۴)، ۸۰۶-۷۸۷.
- عربانی، مهیار میر عبدالعظیمی، سید محمد (۱۳۸۸). ارزیابی تأثیر کاربری خرده‌شیشه ضایعاتی در افزایش عمر مفید مخلوط‌های آسفالتی گرم. مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، اردیبهشت.
- عقیلی لطف، میلاد، رضانیانپور، امیر محمد و پلاسی، مسعود (۱۳۹۷). بررسی تأثیر انواع مختلف سنگدانه بازیافتی بتنی بر روی خواص بتن. نشریه مهندسی سازه و ساخت.
- مقدس نژاد، فریدون (۱۳۸۶)، کاربرد ژئوسنتتیک‌ها در روکش‌های آسفالتی جهت کنترل ترک‌های انعکاسی، وزارت راه و ترابری، پژوهشکده حمل‌ونقل.
- مدنی، سید حسام، پورخورشیدی، علیرضا، پرهیزکار، طیبه، سبحانی، جعفر (۱۳۹۶). بررسی مشخصه‌های دوام و مقاومت روسازی بتن غلتکی. مهندسی عمران، ۳۳، ۲(۳،۱)، ۴۵-۳۹.
- منصوریان احمد، رضائی مسعود. (۱۳۹۷). تحلیل عددی تنش حرارتی در روسازی بتنی ساده درزدار. مهندسی عمران مدرس. ۱۸(۱)، ۲۳۰-۲۱۹.

# Assessment of Mechanical Properties and Durability of Concrete Pavement Made with Recycled Concrete Aggregate and Recycled Waste PET

*Mohsen Amouzadeh Omrani, Assistant professor, Department of Civil Engineering, Savadkooch Branch, Islamic Azad university, Savadkooch, Iran.*

*Rezvan Babagoli, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Science and Technology of Mazandaran, Behshahr, Iran.*

*Abdollah Davoodikia, Assistant professor, Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad university, Amol, Iran.*

*Mojtaba Sadeghi Siyahkalayi, Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad university, Amol, Iran.*

*E-mail: Mo.Omrani@iau.ac.ir*

Received: June 2023- Accepted: November 2023

## ABSTRACT

In this research, the mechanical properties of concrete in the conditions of using natural aggregates and comparing the results with the replacement of recycled aggregates with values of 10, 20, 30 and 40% have been investigated. In the first part of the study, the results showed that the specific gravity of concrete in the presence of 40% of recycled sand and gravel was 1.02% and 2.38%, respectively. Also, in terms of compressive strength, the lowest decrease in compressive strength occurred in 10% of recycled sand and the highest decrease in compressive strength occurred in 40% of recycled sand. Then, the mechanical properties of ordinary concrete with concrete containing waste plastic (PET) were compared with 2, 4, 6, 8 and 10% of concrete volume. In this regard, the results of the study indicate a decrease in compressive strength of concrete compared to control concrete. In this regard, the lowest reduction in compressive strength was 2.01% in the presence of 2% waste plastic (PET) and the highest reduction in compressive strength was 16.39% in the presence of 10% waste plastic (PET). Regarding flexural strength, the results showed an increase in flexural strength; So that the lowest increase in flexural strength of 6.27% occurred in the presence of 2% waste plastic (PET) and the highest increase in flexural strength of 39.49% occurred in the presence of 10% waste plastic (PET). In the end, the results showed that increasing the presence of waste plastic (PET) has led to a decrease in water absorption of samples. In this regard, the lowest decrease in water absorption by 5.26% and the highest decrease in water absorption by 23.08% occurred in the presence of 2 and 10% waste plastic (PET), respectively.

**Keywords:** Filler, Rice Husk Ash, Fly Ash, Marshall Mix Design, Tensile Strength Ratio, Optical Microscopy