

بررسی اثر افزودن ضایعات خرد شده پلی اتیلن ترفتالات جایگزین شده سیمان در بتن خودتراکم حاوی متاکائولن و میکروسیلیس

ناصر ابوطالب^{۱*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد، قومن، ایران

چکیده

می توان یکی از بزرگترین مشکلات و معضلات زیست محیطی در جهان را بازیافت و استفاده مجدد از پلاستیکهای فرسوده دانست که به دلیل غیرقابل تجزیه بودنشان، در محیط زیست باقی مانده و تلاشی شدن آنها ممکن است بیش از یک صد سال به طول بیانجامد. یکی از پرکاربردترین و سختترین تولیدات پلاستیکی، PET یا همان پلی اتیلن ترفتالات است که بکارگیری دوباره این ضایعات در بتن می تواند یکی از راه های مفید جهت بازیافت این محصول باشد. در زمینه استفاده از ضایعات پلیمری به ویژه PET در بتن های خودتراکم، تحقیقات در مراحل ابتدایی خود قرار دارند. بتن خودتراکم با قابلیت جریان پذیری بالا می تواند راه حل مناسبی برای ساخت سازه های با شکل های پیچیده و پر میلگرد بدون نیاز به ویبره می باشد. لذا در این مقاله مطالعات آزمایشگاهی بر روی بتن خودتراکم حاوی درصد های مختلف ذرات خرد شده ضایعاتی PET به عنوان جایگزین بخشی از ماسه با دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ و ۰/۴۰ انجام گرفت. همچنین از افزودنی های متاکائولن و میکروسیلیس به عنوان جایگزین بخشی از سیمان جهت بهبود کارایی ترکیب استفاده شد و سپس آزمایش های جریان اسلامپ، قیف V، جعبه L، مقاومت فشاری، مقاومت کششی (برزیلی) و مدول الاستیسیته انجام گرفته شد. با افزایش نسبت آب به سیمان در طرح اختلاط بتن خودتراکم خواص خودتراکمی کاهش یافته و همچنین کاهش در مقاومت های فشاری و کششی دیده می شود با افزودن پوزولان ها به بتن تا حدودی جبران می شوند. نتایج نشان می دهند که افزودن ذرات خرد شده PET به ترکیب بتن، سبب کاهش خواص خودتراکمی شده، اما جایگزینی ماسه با ذرات خرد شده PET می تواند ترکیب بتن تازه را در حد قابل قبولی خودتراکم نماید. با بررسی نتایج آزمایش های مکانیکی بتن سخت شده می توان دریافت که افزایش میزان ذرات PET در بتن منجر به کاهش ... مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته شده هر چند این افت خواص با جایگزینی بخشی از سیمان با متاکائولن و میکروسیلیس به صورت تکی و همزمان تا حدی قابل جبران می باشد. چقدر؟

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، ضایعات خرد شده PET، متاکائولن، میکروسیلیس، خواص مکانیکی.

*نویسنده مسئول: امین قربانی

پست الکترونیکی: aghorbani@pnu.ac.ir



۱- مقدمه

بتن را می‌توان یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مصالح در صنعت ساختمان محسوب شده. ضرورت توسعه آن نیز روزبه‌روز افزایش می‌یابد. همچنین امروزه در پی گسترش صنعت ساخت‌وساز در کشور و نیاز به ایجاد سازه‌های حیاتی، افزایش دقت و ایمنی در تولید و اجرای سازه‌های مهندسی امری ضروری می‌باشد. ازجمله راهکارهای مناسب می‌توان به دستیابی به تکنیک‌ها و ترکیبات جدیدی از مصالح ساختمانی جهت تسهیل پروژه‌های پیچیده به‌منظور افزایش ضریب اطمینان و ایمنی ساخت آن‌ها از طریق مکانیزه کردن امور و کاهش دخالت نیروی انسانی اشاره نمود که مورد مذکور در تقلیل هزینه‌های مالی ساخت و نگهداری طرح‌های پرخرج، نقش بسزایی خواهد داشت. با گسترش استفاده از بتن، ویژگی‌های همچون دوام، کیفیت، تراکم و بهینه‌سازی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌شوند. بتن خودتراکم (SCC) بتنی سیال و روان مخلوطی همگن است که بسیاری از مشکلات بتن معمولی نظیر جداسازی، آب انداختن، جذب آب، نفوذپذیری و ... را مرتفع نموده و علاوه بر آن بدون نیاز به هیچ لرزاننده‌ای (ویبره)، تحت اثر وزن خود متراکم می‌شود. لذا مطالعه و تحقیق پیرامون بتن خودتراکم به جهت رفع نواقص و مشکلات تولید و کاربرد آن و پیشبرد نقاط قوت و توانایی‌های نه‌چندان دور ضرورتی آشکار است.

یکی از عواملی که باعث شناخته شدن بتن به‌عنوان مصالحی مناسب شده است، امکان ساخت و تهیه بتن از مصالح متفاوت، ازجمله ضایعات و مواد بازیافتی می‌باشد. استفاده از مواد بازیافتی متفاوتی در بتن، علاوه بر تأثیرات مختلفی که بسته به خواص ماده می‌تواند داشته باشد، به پاک‌سازی و کاهش آلودگی محیط‌زیست نیز کمک شایانی می‌نماید. با توجه به این‌که پلاستیک‌های ضایعاتی و مواد متشکل از پلاستیک همواره در محیط‌زیست باقی می‌ماند، لذا همواره یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در اطراف کلان‌شهرها در هر کشوری بازیافت و استفاده مجدد از این ضایعات انبوه می‌باشد. با توجه انواع مختلف پلاستیک‌ها، یکی از آن‌ها PET یعنی پلی‌اتیلن ترفتالات می‌باشد که به شکل‌های مختلفی ازجمله بطری در سراسر جهان تولیدشده و مورداستفاده انبوه قرا می‌گیرد. به دلیل عدم تجزیه ضایعات PET در گورستان زباله‌ها و تمام شدن مکان‌های مناسب برای دفن زباله، این روش دیگر راه‌حل مناسبی برای این معضل نیست، بنابراین راهکاری مناسب جهت بهره‌برداری از آن ضروری به نظر می‌رسد.

در چند دهه اخیر پژوهش برای استفاده مجدد از پلاستیک‌های فرسوده انجام گرفته است. خصوصیات منحصربفرد و جالب پلاستیک‌های ضایعاتی (چگالی کم، خاصیت الاستیک بالا، سختی کم) باعث شده است که از آن استفاده‌های مفیدی در عرصه مهندسی عمران به عمل آید. یکی راهکارهای پیشنهادی برای بازیافت و استفاده مجدد از این پلاستیک‌های ضایعاتی در عرصه مهندسی عمران، می‌تواند بهره‌برداری در تولید آسفالت و بتن باشد. لذا بررسی ضایعات PET بر خواص انواع بتن ازجمله بتن خودتراکم جالب‌توجه بوده و از این حیث مسیر پژوهش برای علاقه‌مندان باز می‌باشد. اگرچه بتن یک ماده مطرح و پراستفاده در مصالح ساختمانی است، اما دارای نقاط ضعفی می‌باشد که عبارت‌اند از: ۱- مقاومت کششی پایین ۲- جذب انرژی کم ۳- شکل‌پذیری پایین ۴- انقباض و جمع‌شدگی در بتن و در پی آن ترک‌خوردگی ناشی از این پدیده‌های وابسته به زمان ۵- ترک‌های ناشی از عمل‌آوری نامناسب و سخت‌شدی بتن.

با توجه به ماهیت PET، انتظار می‌رود با جایگزین کردن ضایعات خردشده بطری‌های PET به‌جای بخشی از ماسه رودخانه‌ای برخی از این نواقص بتن تا حدی مرتفع شود. البته با مشاهده کارهای انجام‌شده توسط محققین پیشین در زمینه کاربرد پلاستیک‌های دیگر در بتن، می‌توان دریافت که اضافه کردن پلاستیک به بتن باعث کاهش چشمگیری در مقاومت‌های فشاری و کششی خواهد شد، ولی میزان کاهش که در مقاومت‌های فشاری و کششی رخ می‌دهد در تحقیقات مختلف متفاوت بوده و معطوف به درصد خاصی نمی‌شود. همچنین این کاهش شامل مدول الاستیسیته هم می‌شود ولی مقدار آن از کاهش که در مقاومت‌های فشاری و کششی رخ می‌دهد کمتر خواهد بود.

مخلوط بتن با الیاف PET، به منظور استفاده در روش بتن پاششی در معدن Hishikari ژاپن اجرا شد [۶۹]. مشاهده سطح بتن پاشی شده نشان داد که الیاف PET در مخلوط بتن به طور مناسبی توزیع شده و بالآمدگی و انحرافی نداشته و سطح بتن پاشی شده نسبتاً صاف است. پس از یک سال نیز هیچ ترکی وجود داشته و توانایی نگهداری بسیار بالایی وجود دارد. یکی از ویژگی بارزش الیاف PET این است که مقدار آن را می توان آزادانه در محل و بدون شکل گیری گلوله های الیافی و گرفتگی لوله تغییر داد. بتن مسلح با الیاف PET در یک جاده جنگلی ما بین هایاتوگاوا و کانازاوا در ژاپن به کار گرفته شد. قسمتی از جاده به طول ۲۰ متر، عرض ۳/۶~۴/۹ متر و به ضخامت ۱۳ سانتی متر با بتن الیافی آسفالت شد و به منظور مقایسه آن، یک ترکیب متداول با استفاده از شبه مش جوشی به عنوان مسلح کننده بتن به ضخامت ۱۵ سانتی متر نیز بکار گرفته شد. مشاهده شد که به کارگیری بتن مسلح با الیاف PET مؤثر بوده و باعث صرفه جویی در میزان کار می شود. همچنین نقایصی نظیر ترک خوردگی و ورقه شدن در هیچ کدام از کف سازی های صورت گرفته با دو روش مشاهده گردید [۶۹]. هرچند استفاده از بتن خودتراکم در سال های اخیر افزایش یافته است، با این وجود برای ساخت بتن خودتراکم حاوی ضایعات بطری های PET که بتواند مشکلات مشخص شده برای خصوصیات بتن های خودتراکم تازه را تأمین و تهیه کند، نیاز به تحقیقات آزمایشگاهی می باشد. لذا به نظر می رسد استفاده از این الیاف سبب کاهش خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده می باشد. در این رابطه مطالعات محدودی در خصوص بهبود این نقایص با استفاده از افزودنی های شیمیایی نسل جدید می باشد.

در این مطالعه، طی یک بررسی آزمایشگاهی حداکثر بهینه در صد جایگزینی ذرات PET با ماسه، با حفظ خواص خودتراکمی بتن بوده که با افزودنی های شیمیایی بهبود داده شده است. در مرحله بعد بررسی نحوه و میزان تغییرات در خواص مکانیکی بتن خودتراکم، به ازای درصدهای مختلف این ضایعات خرد شده که جایگزین بخشی از حجم یا وزن؟ ماسه می شود مدنظر می باشد. درصدهای ۰.۴ و ۰.۴۵ با انجام تستهای قیف و فلان نیز بررسی شدند. جهت بهبود ویژگی های مکانیکی مخلوط های حاوی PET جایگزینی سیمان با افزودنی های متاکائولن و میکروسیلیس در عین حفظ خصوصیات بتن خودتراکم حاوی ذرات PET بررسی شده است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

در این فصل، ضمن معرفی مشخصات مصالح مصرفی در ساخت بتن خودتراکم، ۱۸ طرح اختلاط مورد بررسی قرار می گیرد که هدف از ارائه آن ها دستیابی به طرح اختلاط های تأمین کننده محدودیت های آزمایشگاهی بتن تازه می باشد. همچنین در این فصل به تشریح مصالح به کاررفته و انجام آزمایش مربوط به بتن تازه و سخت شده بتن خودتراکم حاوی ذرات PET پرداخته شده است. جهت بررسی خصوصیات مکانیکی بتن سخت شده با و بدون PET و همچنین خصوصیات بتن تازه، دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ با عیار سیمان به ترتیب ۴۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۱۰ درصد میکروسیلیس و متاکائولن که در تمامی طرح اختلاط ها تکی و ترکیبی جایگزین می باشند، در نظر گرفته شده است. در طرح اختلاط های فوق مقدار ذرات PET مصرفی به میزان صفر، ۵، ۱۰ درصد حجمی که جایگزین بخشی از حجم ماسه می شود متغیر می باشد. لازم به ذکر است که در کلیه طرح اختلاط ها از سیمان پرتلند نوع (II) استفاده شده است. ضایعات بطری های PET مصرفی نیز توسط دستگاه خردکن موجود در آزمایشگاه بتن خرد شده است. آب مورد استفاده نیز، آب شرب شهر رشت می باشد. در کلیه طرح اختلاط های مربوط به بتن خودتراکم با و بدون PET از میکروسیلیس و متاکائولن نیز به عنوان یک ترکیب به همراه سیمان استفاده شده است. فوق روان کننده مصرفی نیز ژلینیوم ۵۱ بوده که از نسل سوم فوق روان کننده ها می باشد. سنگدانه مصرفی از نوع شکسته شده، تهیه شده از کارخانه لوله سازی شمال می باشد.

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

۲-۱-۱- درشت دانه

با توجه به آیین نامه EFNARC، حداکثر مجاز اندازه شن مصرفی ۲۰ mm است. درشت دانه های مورد استفاده از نوع شکسته شده می باشند. این نوع دانه بندی شن مصرفی با استفاده از الک های استاندارد، درصد وزنی ماده روی هر الک را محاسبه و با محاسبه درصد

تجمعی عبور کرده دانه بندی شن مصرفی به دست آمد. حداکثر اندازه اسمی مصالح مصرفی ۱۲mm می باشد. منحنی دانه بندی شن مصرفی در شکل ۱ مشخص شده است. محدوده درصد عبوری شن مصرفی (۶-۱۲mm) با محدوده عبوری استاندارد BS ۸۸۲:۸۳ مطابقت دارد. لذا با توجه به محدودیت های در نظر گرفته شده برای حداکثر اندازه مصرفی درشت دانه برای ساخت بتن خودتراکم مناسب می باشد.

۲-۱-۲- ریز دانه

با علم به اینکه تمامی انواع ریزدانه ها جهت استفاده در بتن خودتراکم مجاز می باشند، در این تحقیق از ماسه تهیه شده از شرکت لوله سازی شمال با دو اندازه اسمی (۰-۳mm) و (۳-۶mm) استفاده شد. برای دستیابی به دانه بندی پیشنهادی استاندارد BS ۸۸۲:۸۳ برای مصالح ریزدانه، از ترکیب دو ماسه (۰-۳mm) و (۳-۶mm) استفاده شد. ترکیب نهایی ماسه ۸۰٪ وزنی ماسه با اندازه اسمی (۰-۳mm) و ۲۰٪ وزنی ماسه با اندازه اسمی (۳-۶mm) استفاده شد. منحنی دانه بندی ماسه مصرفی با ترکیب ۸۰٪ ماسه با اندازه اسمی (۰-۳mm) و ۲۰٪ ماسه با اندازه اسمی (۳-۶mm) در شکل ۲ رسم شده است.

۲-۱-۳- ذرات PET خرد شده

در این پژوهش برای جایگزینی ماسه با PET به ذرات PET خرد شده با ابعادی مشابه ماسه مصرفی نیاز بود که برای انجام این کار، از یک دستگاه خردکن برقی درمقیاس آزمایشگاهی که قبلاً جهت خرد کردن لاستیک ساخته شده بود استفاده گردید. دانه بندی ذرات PET به کاررفته در طرح اختلاط ها پس از الک کردن و اصلاحات لازم، همراه با مشخصات فیزیکی این ذرات در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: دانه بندی و مشخصات فیزیکی ذرات PET.

درصد عبوری (%)	اندازه الک (mm)
۱۰۰	۹/۵
۹۴	۴/۷۵
۴	۲/۳۶
۳	۱/۱۸
مشخصات فیزیکی	
چگالی نسبی ظاهری	۱/۳۷
چگالی نسبی توده ای	۰/۵۴۸

۲-۱-۴- وزن مخصوص و درصد جذب آب سنگ دانه ها

مشخصات مکانیکی مصالح شامل وزن مخصوص و درصد جذب آب سنگ دانه ها برای شن و ماسه مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. اندازه گیری میزان جذب آب سنگ دانه ها برای تعیین میزان دقیق آب مصرفی در ساخت بتن مورد استفاده قرار می گیرد.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی مصالح

درصد جذب آب %	وزن مخصوص ton/m^3	نوع مصالح
۱/۰۱	۲/۵۵	شن
۱/۴۵	۲/۵۹	ماسه
۰/۱۶۸	۱/۳۷	PET ذرات

۲-۱-۵- سیمان

در این مطالعه از سیمان هگمتانه همدان نوع ۲ با چگالی $3/15 \text{ gr/cm}^3$ استفاده شده است. در جدول ۳ مشخصات سیمان مصرفی آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات سیمان همدان نوع ۲.

زمان گیرش نهایی دقیقه	زمان گیرش اولیه دقیقه	نرمی با روش پلین cm^2/gr	مقدار ماده پوزولانی	افت حرارتی درصد	اکسید گوگرد SO_2 درصد	اکسید منیزیم MgO درصد
۲۲۸	۱۶۸	۲۹۶۰	-	۲/۰۴	۲/۴۳	۱/۵۵

۲-۱-۶- میکروسیلیس

میکروسیلیس مصرفی به عنوان پرکننده، از کارخانه فروسیلیس سمنان تهیه شد. مشخصات شیمیایی میکروسیلیس مصرفی در جدول ۴ آورده شده است.

۲-۱-۷- متاکائولن

برای به تعادل رساندن لزجت از متاکائولن استفاده شده است. متاکائولن مصرفی تولید کارخانه کاویان صنعت ایران است. که دارای وزن مخصوص 2600 kg/m^3 می باشد. این افزودنی بدون حل کردن در آب به حالت خشک و به صورت درصدی از وزن سیمان به مخلوط بتن اضافه شده است. مشخصات شیمیایی متاکائولن مصرفی در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مشخصات شیمیایی میکروسیلیس و متاکائولن مصرفی.

مشخصات شیمیایی	میکروسیلیس	متاکائولن
SiO_2	۸۵-۹۵	۵۲/۱
Mgo	۰/۸-۰/۹	۰/۲۱
Al_2O_3	۰/۵-۱/۷	۴۲/۸
Fe_2O_3	۰/۴-۲	۱/۶
سایر اکسیدها	۰/۶-۱/۵	۳/۲۹

۲-۱-۸- فوق روان کننده

در این مطالعه از فوق روان کننده ژلینیوم ۵۱ با پایه کربوکسیلیک اصلاح شده استفاده گردید. مشخصات فوق روان کننده مصرفی در جدول ۶ مشخص شده است. برای استفاده از فوق روان کننده، باید میزان مورد نظر از فوق روان کننده با میزان آبی تا ۲ برابر حجم فوق روان کننده مخلوط گردد و پس از مخلوط شدن مواد خشک، در حین افزودن آب مصرفی به مواد در مخلوط کن اضافه شود.

جدول ۶: مشخصات فوق روان کننده مصرفی.

مشخصات	ساختار
قهوه‌ای کمرنگ	رنگ
$1/0.8 \pm 0/0.1$	چگالی
بزرگتر از ۶	PH
۰/۵ تا ۱/۶ kg به ازای ۱۰۰ kg سیمان	میزان مصرف
کمتر از ۲٪	یون کلر

۲-۲- طرح اختلاط

تهیه طرح اختلاط بتن خودتراکم جهت برآوردن معیارهای کارایی بتن برای خواص بتن تازه و سخت شده انجام شده است [۲۰]. مؤلفه‌های اساسی برای نسبت‌های اختلاط بتن خودتراکم مشابه تراکم مشابه بتن نرمال است، اما برای دستیابی به خواص بتن خودتراکم تازه، میزان بالای ریزدانه و همچنین احتیاج به مواد افزودنی شیمیایی مانند فوق روان کننده‌ها می‌باشد. معمولاً مواد پرکننده مورد استفاده در بتن خودتراکم، پودر سنگ آهک، پودر کوارتز، خاکستر بادی، سرباره کوره آهن‌گدازی و میکروسیلیس است. بتن خودتراکم تازه سه اصل را باید تأمین کند: ۱- قابلیت عبوری، ۲- قابلیت پرکنندگی، ۳- مقاومت در برابر جداسازی. در این مطالعه برای طراحی اختلاط بتن خودتراکم حاوی ۰ تا ۱۰ درصد جایگزینی PET، با توجه به معیارهای آیین‌نامه EFNARC در طرح اختلاط که در جدول ۷ مشخص شده است، ۱۸ طرح اختلاط اولیه در نظر گرفته شد. در ابتدا از تمامی طرح اختلاط‌ها، آزمایش جریان اسلامپ ۵۰ سانتی‌متر به عمل آمد. همچنین آزمایش‌های قیف ۷ و جعبه L نیز انجام شد. نسبت‌های ۱۸ طرح اختلاط اولیه در جدول ۷ گردآوری و ارائه شده است. در نهایت از بین ۱۸ طرح اختلاط بتن خودتراکم حاوی PET و طرح اختلاط‌هایی که نتایج آزمایش‌های بتن تازه آن‌ها در محدوده‌های مورد نظر بود به عنوان مخلوط نهایی بتن خودتراکم حاوی ذرات PET در نظر گرفته شد و فقط بر روی این طرح‌ها آزمایش‌های بتن سخت شد انجام گرفت.



جدول ۷: نسبت‌های طرح اختلاط‌های این مطالعه.

Mix Code	Gravel (Kg /m ³)	Sand (Kg /m ³)	Cement (Kg /m ³)	SF (Kg /m ³)	W/B	Water (Kg /m ³)	Mta (Kg /m ³)	PET (%)	PET (Kg /m ³)	HRWR (Kg /m ³)	VMA (Kg /m ³)
Ctrl ۴۰	۷۰۰	۹۷۲	۴۸۰	۰	۰.۴	۲۱۶	۰	۰	۰	۴.۲۱	۰/۷۵
۰ Pet ۴۰	۷۰۰	۹۲۷	۴۸۰	۰	۰.۴	۲۱۶	۰	۵٪	۱۵	۴.۴۱	۰/۷۵
۱۰ Pet ۴۰	۷۰۰	۸۸۲	۴۸۰	۰	۰.۴	۲۱۶	۰	۱۰٪	۳۰	۴.۶۵	۰/۷۵
۰ Pet ۴۰ SF	۷۰۰	۹۲۷	۴۳۲	۴۸	۰.۴	۲۱۶	۰	۵٪	۱۵	۴.۴۱	۰/۳
۱۰ Pet ۴۰ SF	۷۰۰	۸۸۲	۴۳۲	۴۸	۰.۴	۲۱۶	۰	۱۰٪	۳۰	۴.۶۵	۰/۳
۰ Pet ۴۰ M	۷۰۰	۹۲۷	۴۳۲	۰	۰.۴	۲۱۶	۴۸	۵٪	۱۵	۴.۴۱	۰/۳
۱۰ Pet ۴۰ M	۷۰۰	۸۸۲	۴۳۲	۰	۰.۴	۲۱۶	۴۸	۱۰٪	۳۰	۴.۶۵	۰/۳
۰ Pet ۴۰ mix	۷۰۰	۹۲۷	۴۳۲	۲۴	۰.۴	۲۱۶	۲۴	۵٪	۱۵	۴.۴۱	۰/۳
۱۰ Pet ۴۰ mix	۷۰۰	۸۸۲	۴۳۲	۲۴	۰.۴	۲۱۶	۲۴	۱۰٪	۳۰	۴.۶۵	۰/۳
Ctrl ۵۰	۷۰۰	۹۷۲	۴۸۰	۰	۰.۴۵	۱۹۲	۰	۰	۰	۴.۱۸	۰/۷۵
۰ Pet ۵۰	۷۰۰	۹۲۷	۴۸۰	۰	۰.۴۵	۱۹۲	۰	۵٪	۱۵	۴.۳۴	۰/۷۵
۱۰ Pet ۵۰	۷۰۰	۸۸۲	۴۸۰	۰	۰.۴۵	۱۹۲	۰	۱۰٪	۳۰	۴.۴۹	۰/۷۵
۰ Pet ۵۰ sf	۷۰۰	۹۲۷	۴۳۲	۴۸	۰.۴۵	۱۹۲	۰	۵٪	۱۵	۴.۴۵	۰/۳
۱۰ Pet ۵۰ sf	۷۰۰	۸۸۲	۴۳۲	۴۸	۰.۴۵	۱۹۲	۰	۱۰٪	۳۰	۴.۵۱	۰/۳
۰ Pet ۵۰ M	۷۰۰	۹۲۷	۴۳۲	۰	۰.۴۵	۱۹۲	۴۸	۵٪	۱۵	۴.۳۶	۰/۳
۱۰ Pet ۵۰ M	۷۰۰	۸۸۲	۴۳۲	۰	۰.۴۵	۱۹۲	۴۸	۱۰٪	۳۰	۴.۵۳	۰/۳
۰ Pet ۵۰ mix	۷۰۰	۹۲۷	۴۳۲	۲۴	۰.۴۵	۱۹۲	۲۴	۵٪	۱۵	۴.۳۹	۰/۳
۱۰ Pet ۵۰ mix	۷۰۰	۸۸۲	۴۳۲	۲۴	۰.۴۵	۱۹۲	۲۴	۱۰٪	۳۰	۴.۵	۰/۳

۲-۳- ساخت، عمل‌آوری و آزمایش

برای ساخت و تهیه بتن خودتراکم، ابتدا نسبت‌های مختلف از مواد طرح اختلاط، برای میزان معینی از بتن تعیین شد. براساس تجربه در کار آزمایشگاه، قبل از مخلوط کردن مواد در مخلوط‌کن، ابتدا به میکسر آب اضافه کرده و اجازه داده شد تا میکسر چند ثانیه‌ای همراه با آب بچرخد تا علاوه بر کاهش اصطکاک مواد با بدنه میکسر از جذب آب مواد سیمانی در حال اختلاط جلوگیری شود. در ابتدا شن، ماسه، سیمان، میکروسیلیس و درنهایت ترکیب آب و فوق روان کننده به مخلوط‌کن اضافه می‌شود. اضافه کردن آب و فوق روان کننده به آرامی و در چندین مرحله انجام می‌شود. مدت‌زمان اختلاط مواد خشک ۳ دقیقه و زمان اختلاط آب و مواد خشک ۱ دقیقه می‌باشد. پس از اختلاط مصالح با یکدیگر، بتن را به داخل قالب‌هایی که از قبل آماده و روغن‌کاری شده‌اند، ریخته و برای عمل‌آوری بهترین نمونه‌ها توسط گونی مرطوب پوشانده شدند. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت جهت سخت شدن در محیط آزمایشگاه قرار گرفتند. پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج گردیده و در حوضچه آب نگهداری شدند. چند روز؟

بررسی و شناخت ویژگی‌های رئولوژی بتن تازه و انجام آزمایش‌های مناسب روی آن به منظور مدل‌سازی کنترل کارایی بتن تازه، می‌تواند در بهبود خصوصیات بتن اجراشده مؤثر باشد. آزمایش‌هایی که در این تحقیق برای کنترل کارایی بتن خودتراکم استفاده شد، شامل آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان جریان اسلامپ ۵۰ سانتیمتر، آزمایش قیف V و آزمایش جعبه L می‌باشد. روند انجام این آزمایش‌ها مطابق با توضیحات داده‌شده در فصل دوم «بتن خودتراکم» می‌باشد.

نمونه‌های بتنی مورد آزمایش جهت تعیین رفتار مهندسی بتن خودتراکم معمولی و بتن خودتراکم حاوی ذرات PET نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی به روش‌های دو نیم شدن استوانه و مدول الاستیسیته فشاری بر اساس استاندارد ASTM انجام شده‌اند. نتیجه هر آزمایش متوسط جواب حداقل سه نمونه است. آزمایش‌های مقاومت فشاری در سنین ۳،۷، ۱۴ و ۲۸ روز، آزمایشات مقاومت کششی و مدول الاستیسیته در سنین ۲۸ روز انجام شده است.

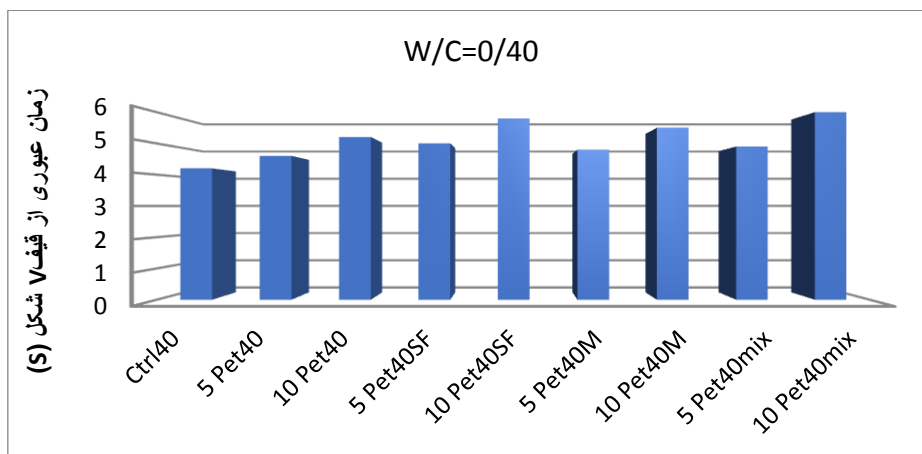
۳- نتایج و بحث

در این فصل نتایج و توضیحات انجام آزمایش‌های مربوط به بتن تازه شامل جریان اسلامپ، جریان اسلامپ ۵۰ سانتی‌متر (T_{50})، قیف V شکل، جعبه L شکل و آزمایش‌های بتن سخت شده نظیر مقاومت فشاری، مقاومت کششی (دو نیم شدن استوانه)، مدول الاستیسیته و بررسی چگالی نمونه‌ها انجام شده است.

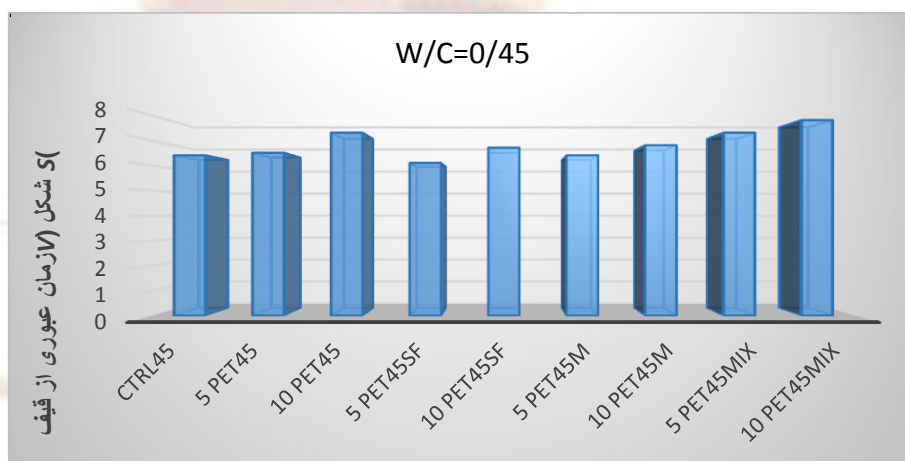
۳-۱- قیف V شکل

همان‌طور که از شکل‌های ۳ و ۴ برمی‌آید برای هر دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ با افزایش مقدار PET، مدت‌زمان خروج بتن از قیف V شکل افزایش می‌یابد. در این آزمایش نیز مثل آزمایش جریان اسلامپ ۵۰ سانتی‌متر افزایش برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ مشهود می‌باشد. با توجه به دستورالعمل EFNARC که تأکید بر این که هرچه میزان روانی بتن افزایش یابد، مقدار زمان خروج بتن از قیف V شکل کاهش می‌یابد، می‌توان کاهش روانی بتن در این آزمایش را همچون آزمایش‌های قبل با افزایش PET مجدداً مشاهده نمود. دلیل این کاهش روانی بتن و افزایش زمان خروج از قیف را اینگونه بیان کرد کرد، که چون ذرات PET ممکن است که در هنگام خرد کردن بطری‌ها به درستی بریده نشده باشند لذا این عوامل باعث شده که درصد‌های بالای جایگزینی PET، بتن هنگام خارج شدن از دریچه قیف، دچار مشکل شده و نیاز به زمان بیشتری برای خارج شدن پیدا کن. همچنین این امر می‌تواند به علت وقوع پدیده جداشدگی و در نتیجه وقوع انسداد جزئی سنگ‌دانه‌ها در محل خروج بتن از قیف V شکل باشد که بر اثر افزایش مقدار آب آزاد بتن و حرکت آن به سمت بالا و

نیز صعود ذرات سبک PET و تجمع درشت‌دانه در نواحی پایین قیف رخ می‌دهد. دلیل دیگر برای افزایش زمان خروج بتن از قیف V شکل را نیز می‌توان به شکل غیرمعمول ذرات PET و اندازه درشت‌دانه‌های آن در برابر ماسه مرتبط دانست.



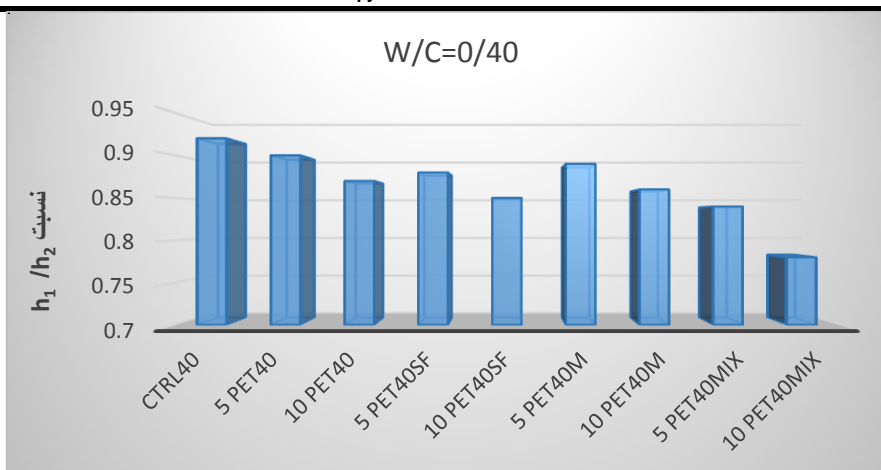
شکل ۳: آزمایش قیف V شکل به ازای درصدهای مختلف PET برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۰.



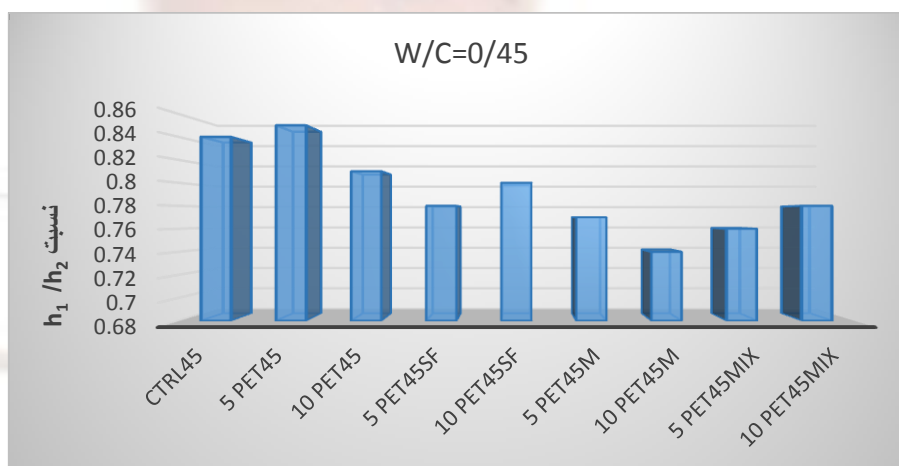
شکل ۴: آزمایش قیف V شکل به ازای درصدهای مختلف PET برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵.

۳-۲- جعبه L شکل

نتایج مربوط به جعبه L شکل به ازای درصدهای مختلف PET برای دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ در شکل‌های ۵ و ۶ آورده شده‌اند. از شکل فوق مشاهده می‌شود که با افزایش درصد PET در هر دو گروه مخلوط‌ها، نسبت h_2/h_1 کاهش یافته است، به‌طوری‌که با درصدهای جایگزینی متاکائولن و میکروسیلیس این کاهش شدیدتر بوده است. لیکن تقریباً در مخلوط‌های حاوی صفر، ۵-۱۰٪ PET در هر دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ مقدار h_2/h_1 حدافل پیشنهادشده توسط آیین‌نامه EFNARC را فراهم می‌نماید ($h_2/h_1 = \min(0.8)$).



شکل ۵: نسبت h_1/h_2 به ازای درصدهای مختلف PET برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۰.

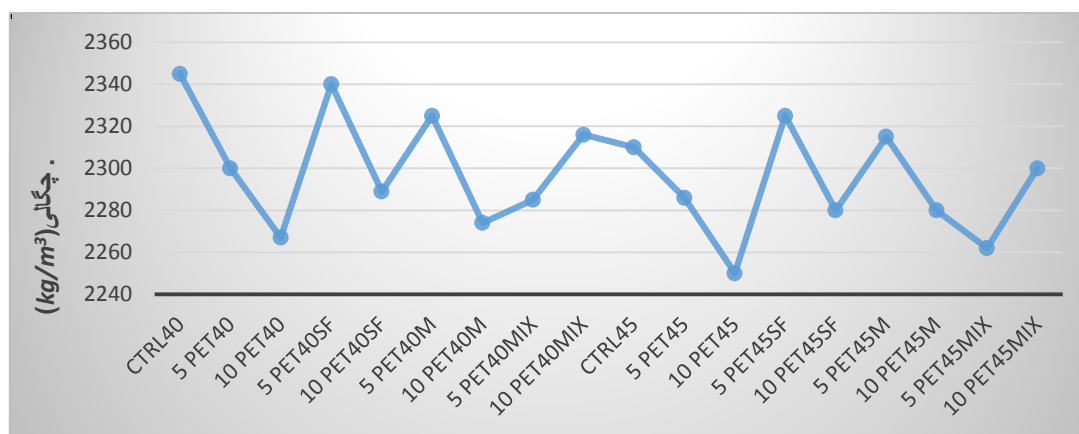


شکل ۶: نسبت h_1/h_2 به ازای درصدهای مختلف PET برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵.

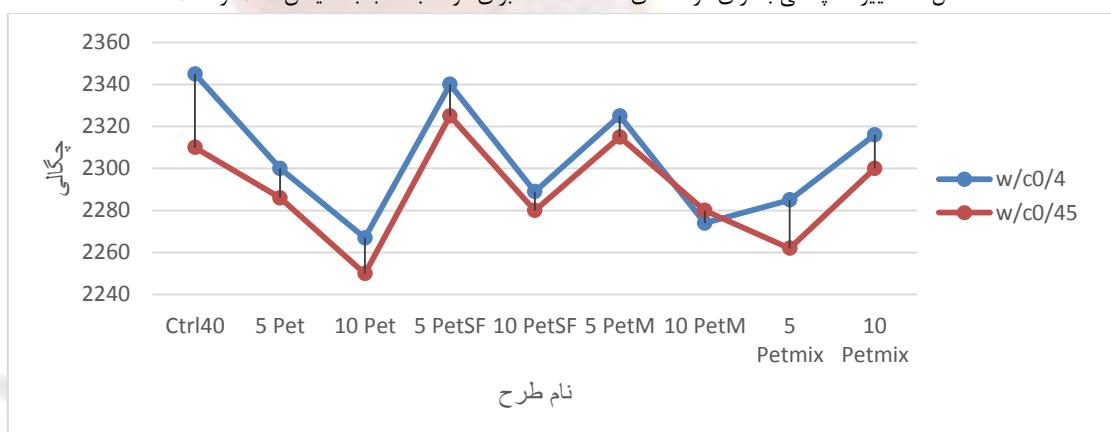
۳-۳- چگالی

تغییرات چگالی بتن سخت شده ۲۸ روزه به ازای درصدهای مختلف PET برای دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ در شکل ۷ نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می شود آزمایش تعیین چگالی بتن سخت شده ۲۸ روزه و سایر آزمایش های بتن سخت شده تا جایگزینی ۱۰ درصد انجام شده است. همان طور که از شکل های ۷ و ۸ برمی آید با افزایش درصد PET، چگالی بتن حاوی PET کاهش می یابد. به طوری که به ازای جایگزینی ۱۰ درصد PET به جای ماسه در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ حدود ۳.۳ درصد و در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ حدود ۲.۶ درصد، چگالی کاهش خواهد یافت. علت کاهش چگالی بتن با افزایش درصد PET، چگالی کمتر ذرات PET نسبت به ماسه رودخانه ای بوده، لذا هنگامی که PET جایگزین بخشی از ماسه می شود وزن مخصوص بتن به تبع آن کاهش می یابد. همچنین به نظر می رسد یکی دیگر از دلایل کاهش چگالی می تواند تأثیر نامطلوب PET بر

خواص خودتراکمی بتن باشد که منجر به حضور حباب‌های ریز هوا در اطراف ذرات PET شده و درصد هوای محبوس بتن را افزایش می‌دهد و با افزایش درصد هوا در بتن (با افزایش درصد PET) چگالی آن کاهش می‌یابد.



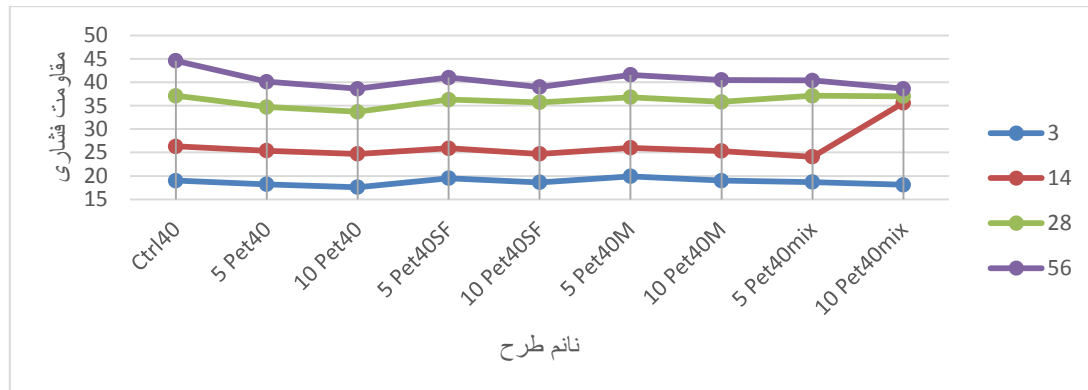
شکل ۷: تغییرات چگالی به ازای درصدهای مختلف PET برای دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵.



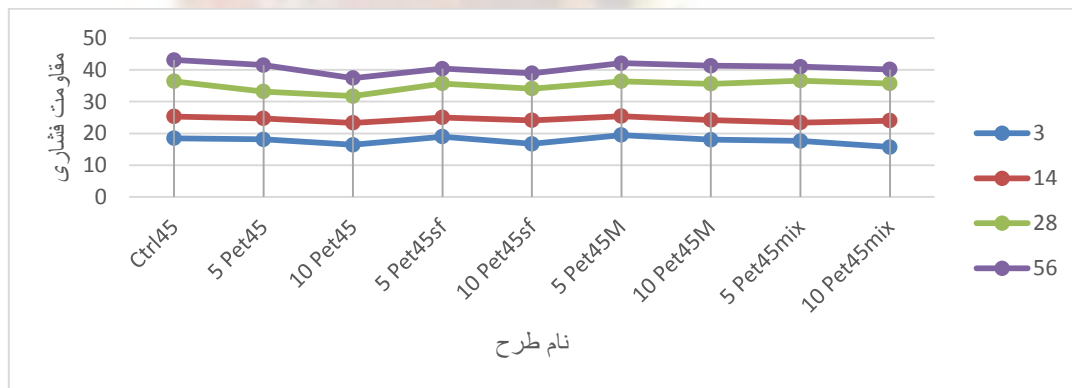
شکل ۸: تغییرات چگالی به ازای درصدهای مختلف PET برای دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵.

۳-۴- مقاومت فشاری

تغییرات فشاری به ازای درصدهای مختلف PET در سنین ۳، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روز برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که از شکل‌های ۹ و ۱۰ بر می‌آید با افزایش درصد PET مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.



شکل ۹: تغییرات فشاری باگذشت زمان برای بتن با (W/C=۰/۴۰) و درصدهای مختلف PET.



شکل ۱۰: تغییرات فشاری باگذشت زمان برای بتن با (W/C=۰/۴۵) و درصدهای مختلف PET.

کاهش مقاومت فشاری بتن حاوی PET را می‌توان در ارتباط با موارد زیر دانست:

- مدول الاستیسیته PET از خمیر سیمان سخت شده احاطه‌کننده آن کمتر است. این امر باعث می‌شود هنگامی که مقدار بیشتری از سنگ‌دانه‌ها حذف و PET به آن وارد ماتریس بتن می‌شود، تمرکز تنش در نمونه‌های بتنی زیاد شده و هنگامی که اعمال بار به بتن، ترک‌های زیادی به سرعت پیرامون ذرات PET مشاهده می‌شود.
- فقدان چسبندگی بین خمیر سیمان و ذرات PET در مقایسه با چسبندگی بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه‌ها، باعث شده که این ماتریس به‌طور پیوسته و منسجم در برابر اعمال بار عمل‌نکرده و تنش‌های واردشده، به‌طور یکسان در خمیر سیمان توزیع نگردد.
- ضعف اصلی PET در مقاومت فشاری
- افزایش درصد جایگزینی PET در بتن موجب تغییر در شکل هندسی مصالح تشکیل‌دهنده بتن شده و حجم ذرات نیز گوشه و پولکی موجود در بتن را افزایش می‌دهد که این امر نیز می‌تواند از دلایل کاهش مقاومت با افزایش درصد PET باشد.
- با افزایش درصد جایگزینی PET همان‌طور که در بخش آزمایش‌های بتن تازه مشاهده شد خواص خودتراکمی بتن کاهش می‌یابد. عدم تراکم مناسب مخلوط منجر به حضور هوای بیشتری در بتن خواهد شد که کاهش سطح مقطع مؤثر و به‌تبع آن کاهش مقاومت نیز انتظار می‌رود.

در شکل درصد کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ازای درصدهای مختلف PET برای دو نسبت آب به سیمان نشان داده شده است. این شکل، سیر صعودی کاهش مقاومت فشاری را با افزایش درصد PET نشان می‌دهد. به طوری که در جایگزینی ۱۰ درصد PET، ۸/۸ درصد کاهش مقاومت برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۱۲/۹ درصد برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ وجود خواهد داشت.

۳-۵- مقاومت کششی (دو نیم شدن استوانه)

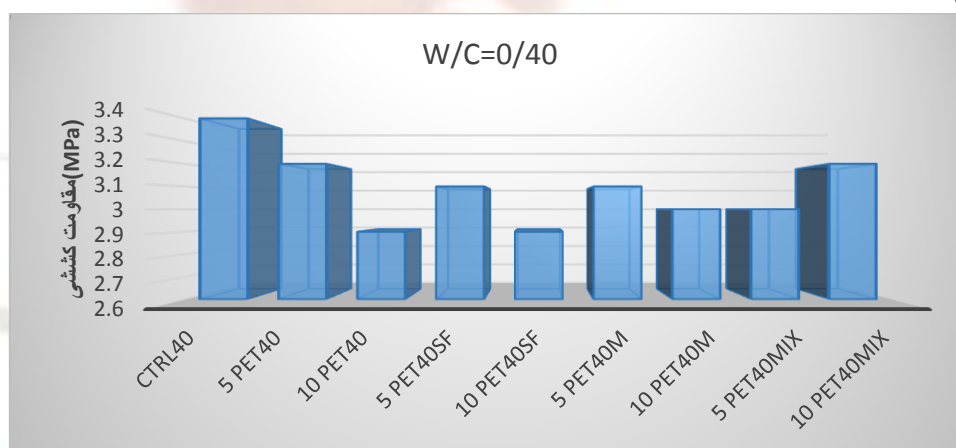
تغییرات مقاومت کششی به ازای درصدهای مختلف PET برای بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ با گذشت زمان تا سن ۲۸ روز به ترتیب در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود در هر دو نسبت آب به سیمان در تمامی سنین با افزایش میزان PET از مقاومت کششی بتن کاسته می‌شود. کاهش مقاومت کششی می‌تواند با مکانیزمی مشابه روند کاهش مقاومت فشاری توضیح داده می‌شود:

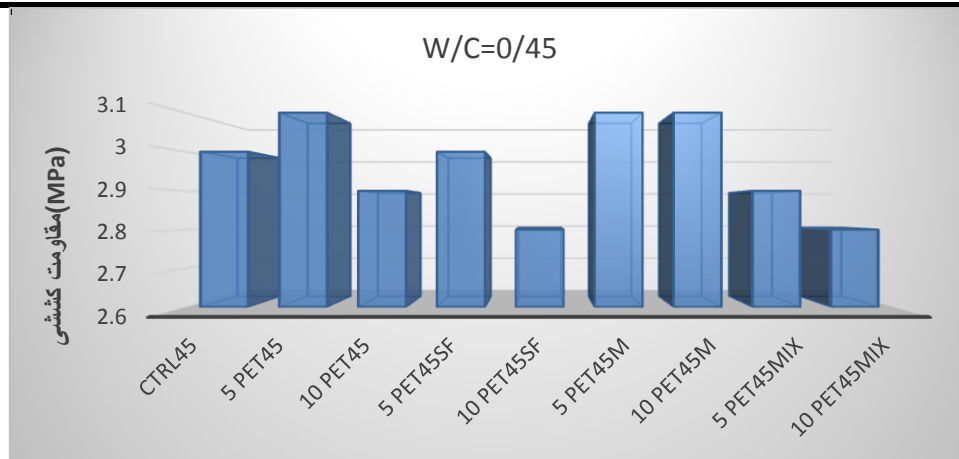
- عدم چسبندگی بین ذرات PET و خمیر سیمان، به طوری که محل اتصال این دو را می‌توان به عنوان ترک موئی در نظر گرفت که سبب تسریع شکست بتن می‌گردد.

- سطح صاف ذرات PET و آب آزاد انباشته شده در سطح ذرات PET باعث چسبندگی کم بین ذرات PET و خمیر سیمان می‌شود.

برای اینکه PET در افزایش مقاومت نقش مثبتی داشته باشد، باید نیروی چسبندگی بین PET و خمیر سیمان به اندازه کافی بزرگ باشد (یا به بیان دیگر باید نیروی چسبندگی PET و خمیر سیمان بیشتر از نیروی لازم جهت پارگی PET باشد) که در حقیقت این گونه نیست. مشاهدات آزمایشگاهی مبنی بر سالم ماندن ذرات PET در محل شکست نمونه‌های گسیخته شده (در آزمایش مقاومت کششی) نیز مؤید این نکته است.



شکل ۱۱: تغییرات مقاومت کششی با گذشت زمان برای بتن با نسبت $(W/C=0.4)$ و درصدهای مختلف PET.



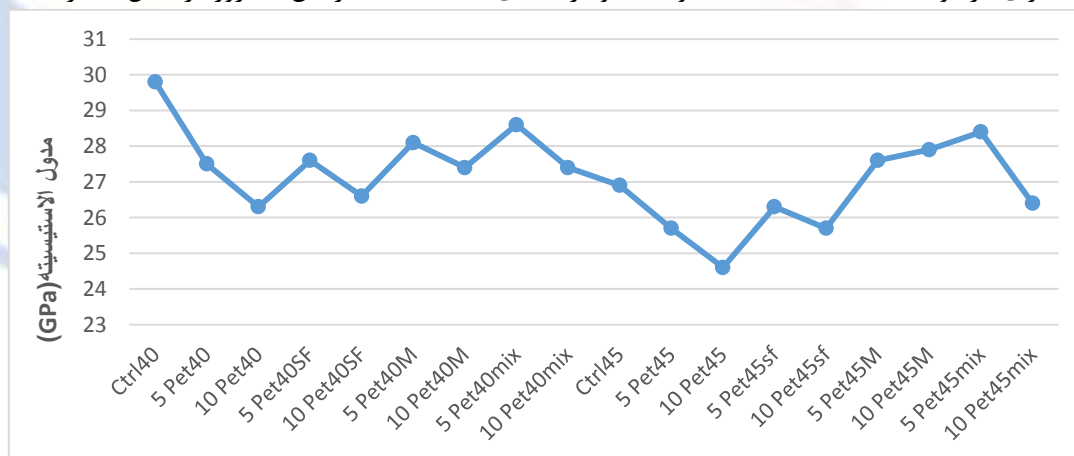
شکل ۱۲: تغییرات مقاومت کششی با گذشت زمان برای بتن با نسبت (W/C=۰.۵۳) و درصدهای مختلف PET.

درصد کاهش مقاومت کششی ۲۸ روزه بتن به ازای درصدهای مختلف PET برای دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ نشان داده شده است. این شکل، سیر صعودی کاهش مقاومت کششی را با افزایش درصد PET نشان می‌دهد به طوری که در ۱۰ درصد جایگزینی PET، ۱۴/۷ درصد کاهش مقاومت برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۶/۶ درصد کاهش مقاومت برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ حاصل گردید.

با مقایسه شکل (درصد کاهش مقاومت فشاری به ازای درصدهای مختلف PET) و نتایج مقاومت کششی می‌توان به این نتیجه رسید که کاهش مقاومت ناشی از افزایش درصد PET، در مقاومت فشاری بیشتر از مقاومت کششی بوده، به طوری که در بتن‌های حاوی ۱۰ درصد PET، به ترتیب ۹/۷ و ۱۲/۹ درصد کاهش در مقاومت فشاری بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ وجود خواهد داشت که این اعداد در مورد مقاومت کششی به ۱۴/۷ و ۶/۶ درصد می‌رسد. به نظر می‌رسد ضعف فشاری ذرات PET و حالت پولکی بودن آن‌ها از دلایل این تغییر در کاهش مقاومت فشاری و کششی باشد.

۳-۶- مدول الاستیسیته

همان‌طور که در فصل‌های قبل اشاره شد، مراحل تعیین مدول الاستیسیته بر اساس ASTM C۴۹۶-۷۱ شامل اندازه‌گیری کرنش به ازای بارهای مختلف می‌باشد که در نهایت مدول الاستیسیته از کرنش مربوط به ۰/۴۰٪ مقاومت نهایی محاسبه می‌گردد. آزمایش مدول الاستیسیته بر روی نمونه‌های استوانه به ابعاد (ارتفاع)×۳×۳ (قطر) ۱۵ سانتی‌متر انجام شد. نتایج آزمایش مدول الاستیسیته بر روی نمونه‌های استوانه برای هر دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ و درصدهای مختلف PET در سن ۲۸ روز در شکل ۱۳ ارائه شده است.



شکل ۱۳: مدول الاستیسیته ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی PET برای نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵.

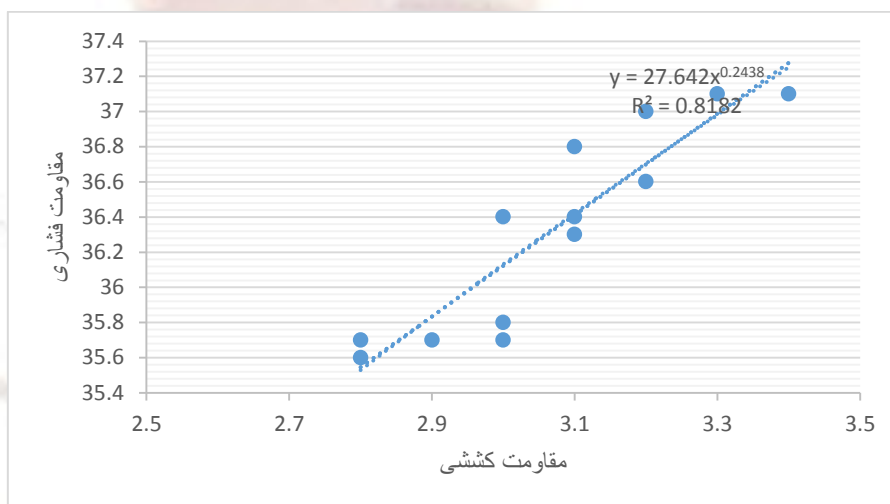
همان طور که از شکل ۱۳ برمی آید با افزایش درصد PET مدول الاستیسیته بتن کاهش می یابد به طوری که مدول الاستیسیته بتن های کنترل با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ به ترتیب ۲۹/۸ و ۲۶/۹ گیگاپاسکال و به ازای ۱۰ درصد جایگزینی PET این مقادیر به ترتیب به ۲۶/۳ و ۲۴/۶ گیگاپاسکال کاهش می یابد.

درصد کاهشی که در مدول الاستیسیته با افزایش درصد PET رخ می دهد از مقدار کاهشی که در مقاومت های فشاری و کششی با افزایش درصد PET پدیدار می شود، کمتر می باشد به طوری که با ۱۰ درصد PET جایگزین شده، ۱۵/۸ درصد در مقاومت فشاری، ۱۱/۸ درصد در مقاومت کششی و ۹/۵ درصد در مدول الاستیسیته (برای بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵) کاهش رخ خواهد داد (شکل).

خصوصیات سنگدانه ها، مدول الاستیسیته بتن را تحت تأثیر قرار می دهد [۷۱]. از این رو می توان کاهش در میزان مدول الاستیسیته بتن خودتراکم با افزایش ذرات PET را ناشی از مدول الاستیسیته کمتر این ذرات و همچنین پولکی بودن آن ها نسبت به خمیر سیمان و سنگدانه ها دانست.

۴- تغییرات مقاومت فشاری با چگالی بتن و حجم PET مصرفی

رابطه بین مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن های ساخته شده با درصد های متفاوت PET و نسبت آب به سیمان مختلف با چگالی بتن سخت شده ۲۸ روزه در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

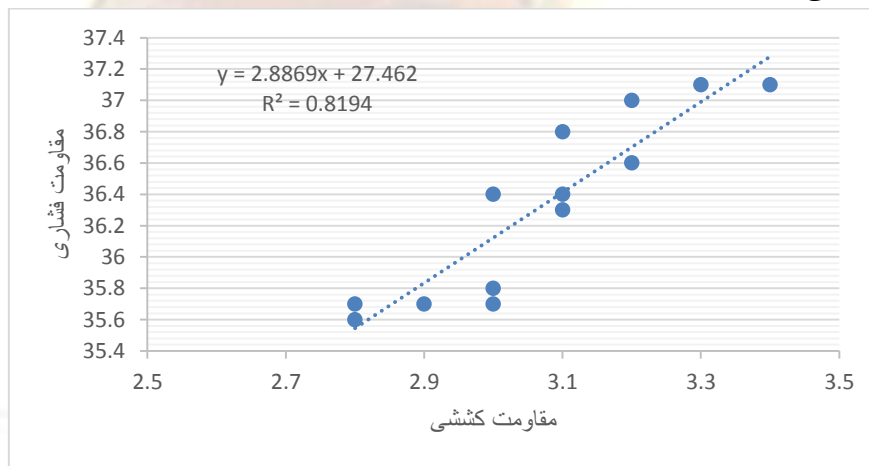


شکل ۱۴: تغییرات مقاومت فشاری با چگالی بتن ۲۸ روزه در بتن های حاوی PET با دو نوع نسبت آب به سیمان.

همان طور که انتظار می رود با افزایش در میزان PET مصرفی، چگالی بتن حاصل کاهش می یابد که این کاهش در چگالی با کاهش در مقاومت فشاری نیز همراه است. با توجه به نتایج به دست آمده، مشاهده می شود که رابطه بین مقاومت فشاری و چگالی بتن های حاوی PET را می توان با استفاده از برآزش با ضریب همبستگی ($R^2 = 0.8194$) به صورت $\rho \times f_c = 2 \times 10^{-13} \times 4.235$ معرفی نمود که در آن f_c مقاومت فشاری ۲۸ روزه برحسب Mpa و ρ چگالی بتن ۲۸ روزه برحسب Kg/m^3 می باشد رابطه بین مقاومت فشاری و درصد حجمی PET مصرفی نیز در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در این رابطه، استفاده از منحنی نمایی جواب های نزدیک تری به مقادیر حاصل از آزمایش می دهد.

۵- تغییرات نسبت مقاومت فشاری به مقاومت کششی بتن‌های حاوی PET

با توجه به تغییرات مقاومت کششی به دست آمده از آزمایش دو نیم شدن استوانه با مقاومت فشاری بتن‌های حاوی درصدی مختلف PET (۰ تا ۱۰ درصد حجمی) در نسبت آب به سیمان متفاوت در شکل ۱۵ ارائه گردیده است. جهت مقایسه نتایج این مطالعه با محدوده‌های پیشنهادی کمیته CBE، به کمک ضرایب موجود در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی به استوانه‌ای تبدیل گردید. مشاهده می‌شود با افزایش درصد PET، مقاومت فشاری و مقاومت کششی کاهش می‌یابند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقاومت کششی نمونه‌ها با افزایش در مقاومت فشاری آن‌ها، افزایش می‌یابد. این امر بیانگر این است که با افزایش در میزان PET مصرفی، مقاومت کششی نمونه‌ها نیز همچون مقاومت فشاری آن‌ها تحت تأثیر قرار گرفته و کاهش می‌یابد. رابطه بین مقاومت کششی و فشاری بتن‌های حاوی PET را می‌توان با استفاده از برازش منحنی با ضریب همبستگی $(R^2 = 0.8194)$ به صورت $f_t = 1.439 \times 10^{-19} f_c^{0.19}$ به ترتیب مقاومت کششی نمونه‌های استوانه‌ای و مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در سن ۲۸ روزه برحسب Mpa می‌باشند.



شکل ۱۵: تغییرات مقاومت کششی با مقاومت فشاری در بتن‌های حاوی درصدی متفاوت PET.

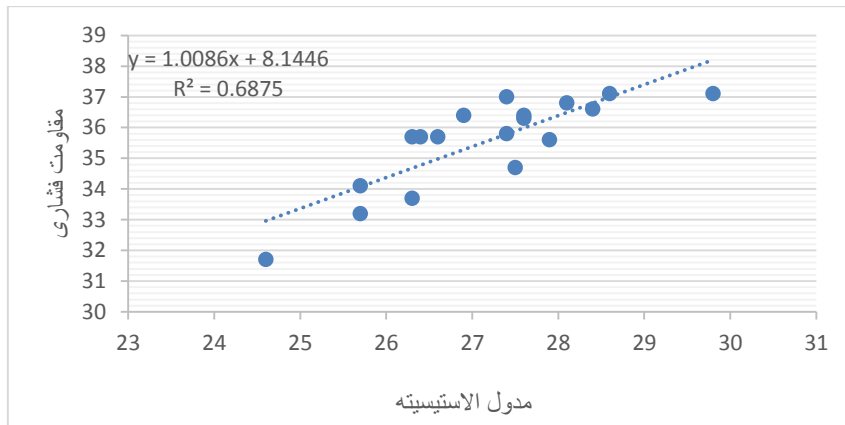
در شکل ۱۶ محدوده مجاز پیشنهاد شده توسط کمیته CEB برای رابطه مقاومت فشاری و کششی بتن‌های نرمال و رابطه بین مقاومت فشاری و کششی این مطالعه بر روی بتن خودتراکم معمولی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود نتایج این مطالعه به حد پایینی CEB نزدیک‌تر است که می‌تواند به دلیل وارد شدن ذرات PET به ماتریس بتن باشد.

شکل ۱۶: محدوده مجاز کمیته CEB برای رابطه مقاومت فشاری و کششی همراه با نتایج این مطالعه.

۶- رابطه بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی PET

تغییرات مدول الاستیسیته در برابر مقاومت فشاری بتن‌های حاوی درصدی مختلف PET (۰ تا ۱۰ درصد حجمی) حاوی پوزولان‌های مختلف در شکل ۱۷ ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدول الاستیسیته با افزایش مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. با توجه به این ویژگی می‌توان نتیجه گرفت که هراندازه مقاومت فشاری بتن حاوی PET افزایش یابد (کاهش در میزان PET مصرفی)، شکست آن طی کرنش کمتری اتفاق می‌افتد. لذا بدین وسیله تغییر شکل‌پذیری بیشتر بتن‌های حاوی درصدی بالای PET و ماهیت شکست نرم آن‌ها قابل توجیه خواهد بود. ارتباط بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی ذرات PET با برازش

منحنی با ضریب همبستگی ($R^2=0.6817$) به صورت $E=15.45 \times f_c^{0.17}$ معرفی می‌شود که در آن E مدول الاستیسیته بر حسب Gpa و f_c مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در سن ۲۸ روز بر حسب Mpa می‌باشد. رابطه بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی PET همراه با حدود پیشنهادی ACI ۳۱۸-۰۵ در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۷: رابطه بین مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی حاوی PET.

شکل ۱۸: محدوده مجاز CI ۳۱۸-۰۵ برای رابطه مدول الاستیسیته و مقاومت فشاری همراه با نتایج این مطالعه.

۷- نتیجه‌گیری

- ۱- نتایج مربوط به آزمایش جریان اسلامپ ۵۰ سانتی‌متر، برای کلیه درصدهای جایگزینی PET در هر دو نسبت آب به سیمان، مطابق با آیین‌نامه EFNARC بوده (کمتر از ۷ ثانیه و بیشتر از ۳ ثانیه) و این مدت‌زمان برای بتن‌ها با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ بیشتر می‌باشد.
- ۲- با افزایش نسبت آب به سیمان جریان اسلامپ کاهش می‌یابد. در نسبت آب به سیمان ۰/۴۰، با وجود استفاده از اصلاح‌کننده لزجت بیشتر، بتن تازه حالت لزجی بیشتری دارد و همچنین میزان جریان اسلامپ در این گروه بیشتر می‌باشد.
- ۳- با افزایش درصد ذرات PET، زمان خروج بتن از قیف V شکل افزایش می‌یابد. که می‌توان دلیل آنرا شکل نا متعارف این ذرات دانست. به‌طوری‌که در جایگزینی ۱۰ درصد PET، زمان خروج بتن از قیف، برای نسب‌های آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ به ترتیب ۵/۲ و ۷/۳ ثانیه ثبت گردیده است. با افزایش نسبت آب به سیمان شاهد افزایش زمان خروج بتن از قیف V هستیم.
- ۴- با افزایش درصد ذرات PET مقدار روانی بتن کاهش می‌یابد.
- ۵- افزایش درصد ذرات PET در هر دو نسبت آب به سیمان باعث کاهش نسبت h_2 به h_1 در آزمایش جعبه L شکل گردیده که این امر نشان‌دهنده کاهش قابلیت عبور بتن خودتراکم حاوی ذرات PET می‌باشد. با توجه به افزودن متاکائولن و میکروسیلیس کاهش نسبت h_2 به h_1 به صورت واضحی مشاهده می‌شود.



۶- با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات جریان اسلامپ، جریان اسلامپ ۵۰ سانتی متر، جعبه L شکل و آزمایش قیف V شکل می توان نتیجه گرفت که وارد کردن ذرات PET به ماتریس بتن، تأثیر نامطلوب چندانی بر خواص بتن تازه ندارد. با توجه به افزودن متاکائولن و میکروسیلیس این خصوصیات بتن تازه کاهش می یابد.

۷- با افزایش درصد ذرات PET، وزن مخصوص بتن نیز تا حدودی کاهش می یابد به طوری که با جایگزینی ۱۰ درصد ذرات PET حدود ۶ درصد کاهش چگالی بتن های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۷ درصد کاهش در چگالی بتن های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ وجود خواهد داشت.

۸- با افزایش درصد ذرات PET مقاومت فشاری بتن خودتراکم حاوی ذرات PET کاهش می یابد. به طوری که با ۱۰ درصد ذرات PET جایگزین شده به ترتیب ۹/۷ و ۱۲/۹ درصد کاهش مقاومت در بتن های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ وجود خواهد داشت.

۹- با افزایش درصد ذرات PET در بتن خودتراکم حاوی مقاومت کششی نیز کاهش می یابد به طوری که با ۱۰ درصد ذرات PET جایگزین شده به ترتیب ۱۴/۷ و ۳/۳ درصد کاهش مقاومت کششی در بتن های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ ایجاد خواهد شد. بیشترین کاهش مربوط به طرح اختلاط ۱۰ Pet ۴۰ SF می باشد.

۱۰- با افزایش درصد ذرات PET مدول الاستیسیته بتن خودتراکم حاوی ذرات PET کاهش می یابد بدین ترتیب که با ۱۰ درصد ذرات PET جایگزین شده، به ترتیب ۹/۴ و ۱۲/۷ درصد کاهش در مدول الاستیسیته بتن های با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و ۰/۴۵ به وجود خواهد آمد.

چه صحبتی از متاکائولین و سیلیس شده است.

مراجع

- [۱]-Nan Su, Kung-Chung Hsu, His-Wen Chai, A simple mix design method for self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, Volume ۳۱, Issue ۱۲, December ۲۰۰۱, pp. ۱۷۹۹-۱۸۰۷.
- [۲]-H.J.H. Brouwers, H.J. Radix, self-compacting concrete: Theoretical and experimental study, Cement and concrete Research, Volume ۳۰, Issue ۱۱, November ۲۰۰۰, pp. ۲۱۱۶-۲۱۳۶.
- [۳]-Violeta Bokan Bosiljkov, SCC mixes with poorly graded aggregate and high of limestone filler, Cement and Concrete Research, Volume ۳۳, Issue ۹, September ۲۰۰۳, pp. ۱۲۷۹-۱۲۸۶.
- [۴]-M. Ouchi, self-compacting concrete development, Applivation and Investigations, Proceedings of the ۱۷th Nordic concrete Research Symposium, December ۱۹۹۹, pp. ۲۹-۳۴.
- [۵]- H. Okamura, M. Ouchi, self-compacting concrete, journal of Advanced Concrete Technology, Volume ۱, Issue ۱, April ۲۰۰۳, pp. ۵-۱۵.
- [۶]- EFNARC, Specifacation and Guidelines for self-compacting concrete, February ۲۰۰۲.
- [۷]-S. Girish, R.V. Ranganath, Influence of powder and paste on flow properties of SCC, CONSTRUCTION and Building Materials, Volume ۲۴, Issue ۱۲, December ۲۰۱۰.
- [۸]-W. Zhu, J.C. Gibbs, Use of defferent limestone and chalkk powders in, self-compacting concrete, Cement and Concrete Research, Volume ۳۰, Issue ۱۱, February ۲۰۰۰, pp. ۱۴۵۷-۱۴۶۲.
- [۹]-J.E. Wallevik, R heological properties of cement paste: Thixotropic behavior and strutural breakdown, Cement and Concrete Research, Volume ۳۹, Issue ۱۳, March ۲۰۰۹, pp ۱۴-۲۹.
- [۱۰]-L.D'Aloia Schwartzentruber, R. Le Roy, Rheological behavior of fresh cement pastes formulated from a self-compacting concrete (SCC), Cement and Concrete Research, Volume ۳۶, Issue ۷, July ۲۰۰۶, pp. ۱۲۰۳-۱۲۱۳.
- [۱۱]-Sands Nunes, Paula Milheiro Oliveira, oana Sousa Coutinho,, Rheological characterization of SCC mortars and pastes with changes induced by cecement delivery, Cement and Concrete Composites,, Volume ۳۳, Issue ۱, January ۲۰۱۱, pp. ۱۰۳-۱۱۵.
- [۱۲]-T. Naguchi, H. Mori, State-of- the- art Report, Evaluation of fresh properties of self-compacting concrete, Kochi University of Technology, Concrete Engineering Series, No. ۳۰, ۲۳-۲۶ August ۱۹۹۸, pp. ۹۷-۱۱۰.
- [۱۳]-D. Feys, R. Werhoeven, G. D. Shutter, Fundamental study of the rheology of self-compacting concrete, Composed with Belgain Materials, The ۷th national congress on theorical and applied Mechanics, NCTAM, ۲۰۰۶.
- [۱۴]- فاطمه جهانی لطف آبادی، بررسی رفتار مهندسی بتن های خودتراکم تقویت شده با الیاف نایلون، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان، شهریور ۱۳۸۹.
- [۱۵]-Adam. M. Neville, Properties of concrete, Fourth and Final Edition, Longman, (۲۰۰۰).



- [۱۶]-H.Okamura, K.Ozawa, self-compacting High Performance Concrete, Structural Engineering International, No.۴, ۱۹۹۶, pp.۲۶۹-۲۷۰.
- [۱۷]-H.Okamura, K. Ozawa, Mix-design for self-compacting concrete, Concrete Library of JSCE, No.۲۵, ۱۹۹۵, pp.۱۰۷-۱۲۰.
- [۱۸]-A.Skarendhal, O.Petersson, Self-compacting concrete, state of the Art Report of RILEM Technical committee ۱۷۴, RILEM Report No.۲۳, ۲۰۰۰.
- [۱۹]-P.L.Domone, self-compacting concrete: An analysis of ۱۱ years of case studies, Cement and Concrete Composites, Volum ۲۸, ۲۰۰۶, pp.۱۹۷-۲۰۸.
- [۲۰]- EFNARC, The European Guidelines for self-compacting concrete specification, production and use, EFNARC, UK, ۲۰۰۵.
- [۲۱]-P.L.Domone, A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete, Cement and Concrete Composites, Volum ۲۹.No.۱, ۲۰۰۷, pp.۱-۱۲.
- [۲۲]-P.Kumar, self-compacting concrete: Method for testing and design, ۲۰۰۶
- [۲۳]-K.Westphal, Comparison of guidelines for SCC, Nordic Scc-Net Workshop, Iceland, ۲۰۰۶.
- [۲۴]- محمد شکرچی زاده، نیکلاس علی لیبر، مهرداد ماهوتیان، علیرضا محبی، سجاد بهرادی یکتا، آزمایش‌های بتن خودتراکم و تفسیر نتایج به‌دست‌آمده در - برآورد بتن تازه، مجموعه مقالات اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، دانشگاه تهران، ۱۳۸۵، ۱۰۱-۱۲۱.
- [۲۵]-P.Aggarwal,R.Siddique, Y.Aggarwal,S.Mgupa, self-compacting concrete- Orocedure for mix design, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, No.۱۲, ۲۰۰۸, pp.۱۵-۲۴.
- [۲۶]-O.Petersson, P.Billberg, B.K.Van, A method for self-compacting concrete.Production methods and workability of concrete, Edited by P.J.M.Bartos, D.L.Marrs,D.J.Cleland, ISBN ۰۴۱۹ ۲۲۰۷۰ ۴, ۱۹۹۶, PP.۴۸۳-۴۹۲.
- [۲۷]- سعید ابوالقاسمی، بررسی خواص مهندسی بتن خودتراکم حاوی ضایعات لاستیک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان، تیر ۱۳۸۸.
- [۲۸]-مصطفی خانزادی، گرشاسب خزانن، علی بهنود بررسی خواص رئولوژی بتن خودتراکم، مجموعه مقالات اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، دانشگاه تهران، ۷۳- ۵۴، ۱۳۸۵.
- [۲۹]- ACI ۳۱۸-۰۵, Building Code Requirement for reinforced concrete and commentary, American Concrete Institute, ۲۰۰۵.
- [۳۰]- ACI ۳۱۸-۰۵, Building code requirement for reinforce concrete and commentary, American Concrete Institute, ۲۰۰۵.
- [۳۱]-CEB-FIP, Model code ۱۹۹۰, London, ۱۹۹۳.
- [۳۲]-Siddique, R, Khatib, J., Kaur, I., ۲۰۰۸. Use of recycle plastic in concrete: a review. Waste management ۲۸, ۱۸۳۵-۱۸۵۲.
- [۳۳]-Sam, T.D., Tam, M.N., ۲۰۰۲. Polymer concrete using on saturated resin based on recycled polyethylene terephthalate (PET). NOCMAT/۳.In: Vietnam international conference on Non-Conventional Material and technologies, pp. ۲۲۶-۲۲۸.
- [۳۴]-Rebeiz, K.S., ۱۹۹۶. Precast use of polymer concrete using unsaturated resin based on recycle PET waste. Construction and Building Materials ۱۰, ۲۱۵-۲۲۰.
- [۳۵]- Hinişlioglu, S., Agar, E., ۲۰۰۴. Use of waste density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. Materials Letter ۵۸ (۳-۴), ۲۶۷-۲۷۱.
- [۳۶]-Ochi, T., Okubo, S., Fukui, K., ۲۰۰۷. Development of recycle of PET fiber and its application ۳۵ concrete-reinforcing fiber. Cement and concrete Composites ۲۹, ۴۴۸-۴۴۵.
- [۳۷]-Silva, A.D., Betioli, A.M., Gteize, P.J.P. Roman, H.R., Gomez, L.A., Ribeiro, LLD., ۲۰۰۵. Degradation of recycled PET fibers in Portland Cement-based materials. Cement and Concrete Research ۳۵, ۱۷۴۱-۱۷۴۶.
- [۳۸]-Balaguru, P.N., Shah, S.P., ۱۹۹۲. Fiber reinforced cement composites. McGraw-Hill International Editions.
- [۳۹]-Bentur, A., Mindess, S., ۱۹۹۰. Fiber Reinforced cementitious Composites. Elsevier Applied Science, London, pp. ۱-۱۱.
- [۴۰]-won, J.P., Park, C.G., ۱۹۹۹. Shrinkage cracking and durability characteristics of polypropylene fiber reinforced concrete. Journal KSCE ۱۵ (۵), ۷۸۳-۷۹۰.
- [۴۱]-wang, K., Shah, S.P., Pariya, P., ۲۰۰۱, Plastic shrinkage cracking in concrete materials: influence of fly ash and fibers. ACL Materials Journal ۹۶ (۶), ۴۵۸-۴۶۴.
- [۴۲]-Naaman, A.E., Xia, Z., Hikasa, J.I., Saito, t., ۱۹۹۹. Control of plastic shrinkage cracking of concrete with PVA fibers. In: proceedings of international symposium on infrastructure Regeneration and Rehabilitation, June ۲۸- July ۲, university of Sheffield, UK, pp. ۳۷۱-۳۸۵.
- [۴۳]-Sehaj, S., Arun, S., Richard, B., ۲۰۰۴. Pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix. Cement and concrete Research ۳۴ (۱۰), pp. ۱۹۱۹-۱۹۲۵.
- [۴۴]-Li, V.C., Chan, Y.W., Wu, H.C., ۱۹۹۴. Interface strengthening mechanisms in polymeric fiber reinforced cementitious composites. In: proceeding of International symposium of brittle matrix composites, Warsaw, September ۱۳-۱۵. IKE and Woodhead publish, Warsaw, pp. ۷-۱۶
- [۴۵]-Akcaozoglu, S., Atis, C.D., Akcaozoglu, k., ۲۰۱۰. An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. Waste Management ۳۰ (۲), PP. ۲۸۵-۲۹۰.



- [۴۱]- Koide, H., Tomon, Sasaki, T., ۲۰۰۲. Investigation of the use of waste plastic as an Aggregate for Lightweight Concrete. Sustainable Concrete construction, London. pp. ۱۷۷-۱۸۶.
- [۴۷]-Kilic, A., Atis, C.D., Yasar, E., Ozcan, F., ۲۰۰۳. High strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. Cement and Concrete Research ۳۳ (۱۰), pp. ۱۵۹۵-۱۵۹۹.
- [۴۸]-Kohno, K., Okamoto, T., Isikawa, Y., Sibata, T., Mori, H., ۱۹۹۹. Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete. Cement and Concrete research ۲۹, pp. ۶۱۱-۶۱۴.
- [۴۹]-Y. -W. Choi, moon, J-S. Chung, S.-K. Cho, ۲۰۰۵. Effects of waste PET bottles Aggregate on the proportions of concrete. Cement and Concrete Research ۳۵ (۴), pp. ۷۷۶-۷۸۱.
- [۵۰]-Albano, c., Camacho, n., Hernandez, M., Matheus, A., Gutierrez, A., ۲۰۰۹. Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different W/C ratios. Waste Management ۲۹, pp. ۲۷۰۷-۲۷۱۶.
- [۵۱]-Pezzi, L., De Luca, P., Vouno, D., Chiappeta, F., Nasto, A., ۲۰۰۶. Concrete products with waste's plastic material (bottle, glass, plate). Materials Science from ۵۱۴-۵۱۶, pp. ۱۷۵۳-۱۷۶۰.
- [۵۲]-Yesilata, B., Isiker, y., turgut, P., ۲۰۰۹. Thermal insulation enhancement in concrete by adding waste PET and rubber pieces. Construction and Building Materials ۲۳ (۵), pp. ۱۸۷۸- ۱۸۸۲.
- [۵۳]- Choi, Y. -W., Moon, D.J., Kim, Y.-J., Lahemi, M., ۲۰۰۹. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. Construction and Building Materials ۲۳, pp. ۲۸۲۹-۲۸۳۵.
- [۵۴]- Marzouk, O.K., Dheolly, R.M., Queneudec, M., ۲۰۰۷. Valorization of postconsumer wasted plastic in cementitious concrete composites. Waste management. ۲۷, pp. ۳۱۰-۳۱۸.
- [۵۵]-Naik, T.R., Singh, S., Huber, C.O., Brodersen, B.S., ۱۹۹۶. Use of post-consumer Waste plastic in cement-based composites. Cement and concrete research ۲۶ (۱۰), pp. ۱۴۸۹-۱۴۹۲.
- [۵۶]-Ismail, Z.Z., AL-Hashemi, E. A., ۲۰۰۸. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement. Waste management ۲۸, pp. ۲۰۴۱-۲۰۴۷.
- [۵۷]- Y. -W. Choi, A study on the application of high performance concrete utilizing ground granulated blast-furnace slag, Hanyang. University, Thesis for a Doctorate, ۱۹۹۶.
- [۵۸]-S.MINDESS, J.F., Young, D. Darwin, concrete, second edition, Pearson Education, Upper Saddle River, NJ, ۲۰۰۳, PP. ۹۴-۱۰۴.
- [۵۹]-Albano, c., Camacho, N., Hernandez, M., Reyes, J., Feliu, J.L., ۲۰۰۵. Influence of scrap rubber addition to Portland I cement composites: destructive and non- destructive testing. Composites structures ۷۱, pp. ۴۳۹-۴۴۶.
- [۶۰]-Guneyisi, E., Gesoglu, M., Ozturan, T., ۲۰۰۴. Properties of rubberized concretes containing silica fume. Cement concrete research ۳۴, pp. ۲۳۰۶-۲۳۱۷.
- [۶۱]-Guneyisi, E., Gesoglu, M., Ozturan, T., ۲۰۰۴. Properties of rubberized concretes containing Silika fume. Cement concretes research ۳۴, pp. ۲۳۰۹- ۲۳۱۷.
- [۶۲]-Neville, A.M., ۱۹۸۱. Properties of Concrete. Pitman Publishing Ltd. London.
- [۶۳]-Jones, R., Facarou, I., ۱۹۷۱. Incerearea Nedistructiva a Betonului. Editura Technica, Bucuresti.
- [۶۴]-Frigione, M., ۲۰۱۰. Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. Waste Management ۳۰, pp. ۱۰۱۱-۱۰۱۶.
- [۶۵]-Brandt, A.M., ۱۹۹۵. Cement- based composites. Materials, Mechanical Properties and performance. E&FN Spon, London, ۳۶-۳۷.
- [۶۶]-Okubo S, FUKUI K, Yang Q, Nishimatsu y, Shimomura H. Modulus of rupture of sprayed steel-fiber reinforced mortar. J MMIJ ۱۹۹۸; ۱۱۴: ۸۷-۹۲
- [۶۷]-Jeng F, Lin ML, Yuan SC. Performance of toughness indices for steel-fiber reinforced shotcrete. Tunnel Underground Space Technol ۲۰۰۲; ۱۷:۶۹-۵۴.
- [۶۸]-Gopalaratnam VS, Gettu R. On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concrete s. Cem concr comp ۱۹۹۵; ۱۷: ۲۳۹-۵۴.
- [۶۹]-Sasaki, M, Statistical features of vein systems in the Hishikari Epithermal Gold Deposit, Japan. Resour Geol ۲۰۰۶; ۵۶: ۲۷-۳۶.
- [۷۰]- محمد رضا رئیس محمدیان، مهرداد ماهوتیان، «تولید قطعات پیش ساخته جهت عبور دستگاه‌های حفاری متروی شیراز با استفاده از بتن خودتراکم»، اولی کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، ۱۳۸۵.
- [۷۱]-Lee, H.S., Lee H., Moon, J.S., Jung, H.W., Development of tire added latex concrete, ACI Materials Journal, Volume ۹۵, Issue ۴, pp. ۳۵۶-۳۶۴.