

بررسی آزمایشگاهی مقاومت‌های مکانیکی و سازه‌یی مخلوط‌های بتنی حاوی ترکیب پودر لاستیک ضایعاتی و الیاف‌های مصنوعی

مهدی نوروزی (کارشناس ارشد)

محمد کاظم شریبتدار* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شریبتدار (بهار ۱۴۰۱)
دوره ۲ - ۳۸، شماره ۱/۱، ص. ۳۵-۴۶، (پژوهشی)

استفاده از پودر لاستیک ضایعاتی با درصد‌های مختلف به‌عنوان جایگزین سنگ‌دانه در تولید بتن به منظور بررسی آزمایشگاهی خصوصیات مختلف مکانیکی و سازه‌یی در نوشتار حاضر بررسی شده‌اند. علاوه بر بتن معمولی، چند نوع طرح اختلاط حاوی پودر لاستیک ضایعاتی معادل ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد حجم واقعی سنگ‌دانه‌ها و الیاف مصنوعی پلی‌بفیلن سولفید (PPS) با ۷۵/۰ و ۱/۵ درصد حجمی در نظر گرفته و نمونه‌ها ساخته شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با وجود کاهش مقاومت فشاری، ولی مقاومت‌های کششی و خمشی و ضربه‌ی نمونه‌های حاوی پودر لاستیک و الیاف بهبود یافته و مقاومت ضربه‌ی نهایی نمونه با ۱۵٪ لاستیک به میزان ۴۸٪ و نمونه با ۷۵٪ الیاف و ۵٪ لاستیک تا ۲ برابر و نمونه با ۱/۵٪ الیاف و ۵٪ لاستیک تا ۵/۷۲ برابر افزایش داشتند. افزودن پودر لاستیک و الیاف باعث افزایش ۵۰ درصدی ظرفیت خمشی، ۲/۷٪ برابری ضریب اندیس طاقت و افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی دال‌های بتنی روسازی با ابعاد بزرگ بر بسترتراجمی نسبت به دال مشابه با بتن معمولی شدند.

واژگان کلیدی: پودر لاستیک ضایعاتی، دال بتنی روسازی، مقاومت خمشی، اندیس طاقت، الیاف پلی‌بفیلن سولفید (PPS).

mahdinoroozi18@yahoo.com
msharbatdar@semnan.ac.ir

۱. مقدمه

دفع ضایعات لاستیک به یکی از بزرگ‌ترین معضلات محیط‌زیستی در جهان تبدیل شده است.^[۱] ضایعات لاستیک به عنوان سنگ‌دانه در بتن استفاده می‌شوند و خواصی نظیر انعطاف‌پذیری، جذب انرژی را افزایش می‌دهند و تردی، شکست ناگهانی و چقرمگی کم بتن را بهبود می‌بخشند.^[۲] گرچه اسلامپ بتن با افزایش درصد لاستیک کاهش می‌یابد، ولی میزان کاهش اخیر در مخلوط‌های ساخته شده با خرده‌لاستیک ریز کمتر است.^[۳-۴] پژوهشگران بسیاری بر روی اثر لاستیک به صورت درشت‌دانه و ریزدانه و یا به صورت الیاف در کارایی بتن مطالعه کرده و دریافته‌اند که تأثیر منفی پودر و به خصوص الیاف لاستیک در کارایی بتن خیلی کمتر است.^[۵-۹] استفاده از لاستیک به عنوان سنگ‌دانه‌ی درشت و استفاده از خرده‌لاستیک به عنوان ماسه، باعث کاهش مقاومت‌های فشاری و کششی و جرم مخصوص و افزایش مقاومت ضربه می‌شود. گسیختگی ترد در فشار در این موارد اتفاق نمی‌افتد و میزان کاهش مقاومت خمشی در لاستیک ریزدانه کمتر بوده است، ضمن اینکه تغییر چندان در مقاومت فشاری بتن در سنین ۷ و ۲۸ روز مشاهده نشده است.^[۱۰-۱۷]

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۱۰/۲۷، اصلاحیه ۱۴۰۰/۰۶/۰۶، پذیرش ۱۴۰۰/۰۹/۰۷

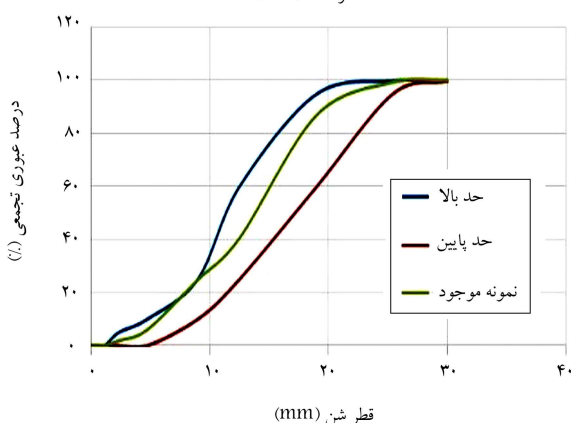
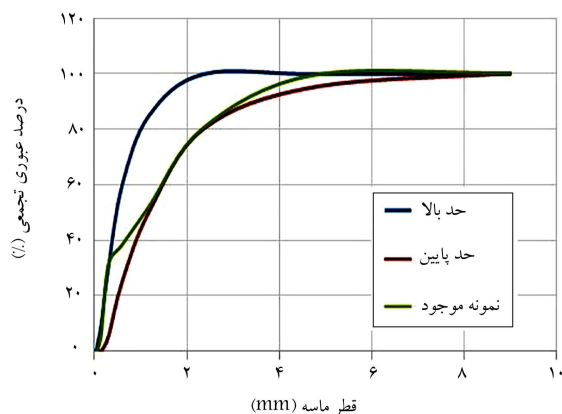
DOI:10.24200/J30.2021.57365.2904

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی.

ردیف	مشخصه فیزیکی	واحد	مقدار میانگین
۱	نرمی (باین)	cm ² /gr	۳۷۸۰
۲	انقباض طولی	درصد	۰/۲
۳	الف زمان گیرش اولیه	دقیقه	۱۰۵
	ب زمان گیرش نهایی	دقیقه	۲۰۰
۴	الف مقاومت فشاری ۷ روزه	kg/cm ²	۴۱۲
	ب مقاومت فشاری ۲۸ روزه	kg/cm ²	۵۱۲

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی.

ردیف	ترکیب‌ها	میانگین (%)	ردیف	ترکیب‌ها	میانگین (%)
۱	SiO ₂	۲۰/۹۰	۵	MgO	۲/۲۴
۲	Al ₂ O ₃	۴/۷۸	۶	SO ₃	۲/۷۴
۳	Fe ₂ O ₃	۳/۷۲	۷	K ₂ O	۰/۵۵
۴	CaO	۶۲/۶	۸	Na ₂ O	۰/۲۶



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی شن و ماسه.

چگالی پودر (نسبت وزن به حجم واقعی) محاسبه و اندازه‌گیری شده است، که برابر ۱/۰۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب بوده است. ظرف فلزی در دو حالت خالی و پر شده با لاستیک وزن شد تا وزن دقیق لاستیک به دست آید. سپس ظرف حاوی لاستیک تا لبه‌ی ظرف با آب پر شد و وزن جدید به دست آمد که در نهایت حجم واقعی لاستیک

در هر صورت افزایش لاستیک به شکل‌های مختلف باعث کاهش مقاومت می‌شود و نتایج متفاوتی دارد و اثر لاستیک به صورت ریزدانه و درشت‌دانه با هم فرق می‌کند. [۲۵-۲۷]

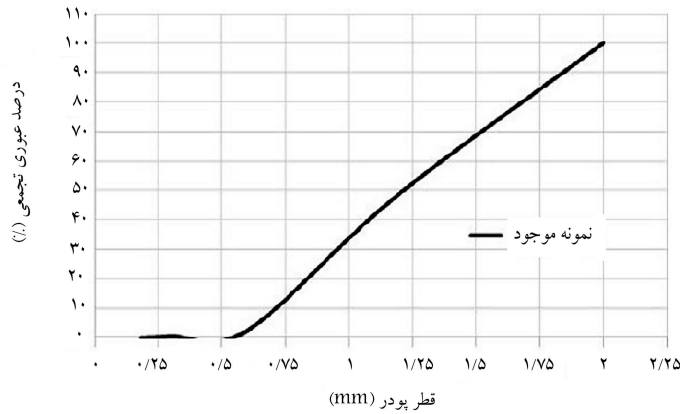
علی‌رغم کاهش مقاومت فشاری با افزایش درصد لاستیک ضایعاتی، مقاومت خمشی یا کاهش جزئی و یا در مواردی هم افزایش داشته است که دلیل آن کشسان بودن ذرات لاستیک بیان شده است. [۲۳، ۲۸] از آنجایی که یکی از ملاک‌های مهم طراحی روسازی بتنی رسیدن به مقاومت خمشی مناسب است، استفاده از ذرات لاستیک در روسازی‌های بتنی می‌تواند مفید باشد و میزان کاهش مقاومت خمشی در مقایسه با کاهش مقاومت فشاری با افزودن تا ۳٪ لاستیک یا حتی خاکستر لاستیک، بسیار کمتر بوده و حتی افزایش یافته است. [۲۶، ۲۹] بتن‌ها بر حسب نیاز در کاربردهای مختلف، مقاومت ضربه‌ی متفاوتی دارند که نتایج برخی مطالعات پیشین مؤید مطلب اخیر است. [۳۰، ۳۱] زمانی که سنگ‌دانه‌های لاستیک در مخلوط بتن ترکیب شوند، مقاومت در مقابل ضربه در بتن افزایش و موجب کاهش ظرفیت انرژی کشسان و افزایش ظرفیت انرژی خمیری بتن و جذب انرژی می‌شود. [۳۲، ۳۳] از بی ۲ و همکاران (۲۰۱۱)، [۳۴] و ابوبکر و همکاران (۲۰۱۳)، [۳۵] گزارش دادند که جایگزینی دانه‌های لاستیک با مصالح درشت‌دانه و ریزدانه موجب افزایش ۲۵ تا ۷۵ درصدی جذب انرژی شده است. الطیب ۳ و همکاران (۲۰۱۷)، تأثیر جایگزینی مقداری ماسه با لاستیک خرد شده تا ۲۰٪ جایگزین ماسه را در رفتار بتن مسلح تحت بار ضربه با سرعت پایین بررسی کردند و دریافتند که لاستیک خرد شده و ریزدانه، باعث افزایش مقاومت ضربه هم در اولین ترک و هم ترک گسیختگی شده‌اند. [۳۶] با توجه به کاهش مقاومت‌های فشاری و خمشی بتن حاوی لاستیک ضایعاتی، در نوشتار حاضر سعی شده است با افزودن الیاف PPS به بتن موردنظر، نقص اخیر کمتر شود، تا علاوه بر بهبود نواقص بتن ساده از فواید لاستیک به عنوان مشخصات مکانیکی و همچنین در ساخت دال‌های بتنی روسازی در مقیاس بزرگ نیز استفاده شود.

۲. نمونه‌های آزمایشگاهی

۲.۱. مشخصات مصالح و نمونه‌ها

سیمان استفاده شده در پژوهش حاضر، سیمان پرتلند تیپ I بوده است، که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است. مصالح سنگی به‌کار رفته در پژوهش حاضر شامل مصالح سنگی درشت‌دانه (شن) و مصالح سنگی ریزدانه (ماسه) بوده است. شن به‌عنوان درشت‌دانه نقش بسیار مهمی در تحمل بارهای وارده بر بتن داشته و ماسه هم به‌عنوان ریزدانه با چگالی ۲/۷ جهت پر کردن فضای خالی بین درشت‌دانه‌ها استفاده شده است. درصد جذب آب شن و ماسه به ترتیب ۰/۹ و ۲/۵ درصد بوده است. آزمایش دانه‌بندی جهت تعیین نحوه‌ی توزیع اندازه‌ی دانه‌های سنگی براساس دستورالعمل ACI 211R و استاندارد ASTM C 33 صورت گرفته و منحنی‌های مرتبط در شکل ۱ نشان داده شده است.

لاستیک باز یافتی مورد نیاز از یک شرکت تولیدکننده‌ی لاستیک‌های استفاده شده در درب ماشین فراهم شده است. پس از آسیاب به صورت پودر لاستیک باز یافتی مانند شکل ۲ الف با مشخصات دانه‌بندی در جدول ۳ به بتن‌ها اضافه شده است. ضمناً منحنی دانه‌بندی پودر مذکور در شکل ۲ ب مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه پودر لاستیک آب را جذب نمی‌کند، با روش ساده‌ی در آزمایشگاه



ب) منحنی دانه بندی پودر لاستیک.



الف) پودر لاستیک؛

شکل ۲. پودر لاستیک استفاده شده و منحنی دانه بندی.

جدول ۳. دانه بندی لاستیک پودر شده.

شماره الک	قطر الک (mm)	لاستیک پودر (g)	جمع کل (g)
۱۰	۱۶	۱۰۴/۸۶	۸۰
۳۰	۹۰/۲۳	۴۰	۵۰
۵۰	۱۰/۸	۲۰۰۰	۲۰۰۰

جدول ۴. مشخصات فنی و مکانیکی الیاف PPS.

مدول کشسانی (MPa)	چگالی (kg/cm^3)	طول (mm)	قطر (mm)
۳۵۰۰	۰/۹	۷۰-۴۰	۰/۸ تا ۰/۷

به دست آمده است. همچنین از الیاف PPS با مشخصات ارائه شده در جدول ۴ استفاده شده است.

۲.۲. طرح اختلاط بتن

طرح اختلاط بتن معمولی با نسبت آب به سیمان ۰/۵ براساس استاندارد ACI-۲۱۱-۸۹ در نظر گرفته شده و با توجه به استفاده سنگ دانه های خشک، مقدار آب مصرفی نهایی افزایش یافته است. با توجه به متغیرهای موجود در پژوهش حاضر که شامل درصد لاستیک ضایعاتی و درصد الیاف اضافه شده به بتن معمولی بوده است، در مجموع ۱۰ طرح اختلاط مختلف مطابق جدول ۵ ارائه شده اند.

همچنین به دلیل قرار نگرگرفتن نمودار دانه بندی ماسه در بین حد پایین و بالای دانه بندی آیین نامه، مقداری ماسه ی بادی نرم تر از ۱ میلی متر به منظور اصلاح دانه بندی استفاده شده است. پودر لاستیک به صورت حجمی جایگزین ماسه ی معمولی شده است. لذا در ابتدا حجم واقعی ماسه ی مصرفی در ۱ متر مکعب بتن براساس چگالی ماسه ی مشخص و برابر ۰/۳ متر مکعب تعیین شده و سپس براساس درصدهای ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد، حجم واقعی لاستیک جایگزین مشخص شده و با داشتن چگالی لاستیک (برابر ۱/۰۵ گرم بر سانتی متر مکعب) وزن پودر لاستیک بر حسب گرم به دست آمده است. مطالعات انجام شده توسط نماز زاده (۱۳۹۷)، نشان داد که افزودن الیاف PP از ۰/۵ تا ۱/۵ درصد به طور متوسط باعث کاهش حدود ۱۰٪ مقاومت فشاری شده است.^[۳۷] لذا با توجه به لزوم بررسی تأثیر ترکیب درصدهای مختلف الیاف با پودر لاستیک در طرح های اختلاط، به هر یک از سه طرح اختلاط با پودر لاستیک، دو میزان درصد متفاوت الیاف به صورت ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد اضافه شد. در ساخت طرح های اختلاط پس از مخلوط کردن کلیه ی مؤلفه ها، در

انتهای الیاف PPS در چند مرحله و به تدریج به مخلوط اضافه شدند، تا از انباشت و توده شدن الیاف در بتن جلوگیری شود.

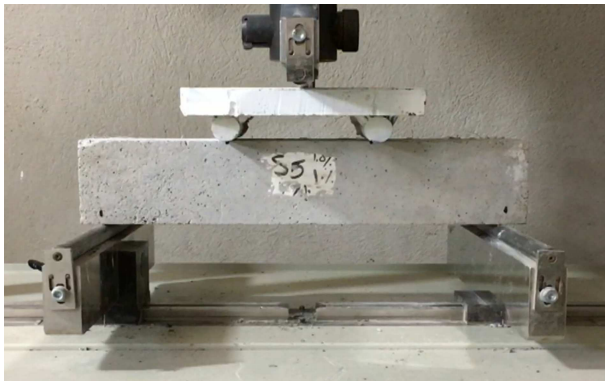
۳.۲. مشخصات نمونه ها و نحوه ی عمل آوری

• **مشخصات مکانیکی:** جهت انجام آزمایش های مشخصات مکانیکی در بخش اول پژوهش حاضر از قالب های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی متر برای آزمایش های مقاومت فشاری، قالب های استوانه یی 10×20 سانتی متر جهت انجام آزمایش های مقاومت کششی برزیلی، تیر مکعب مستطیل $10 \times 10 \times 50$ سانتی متر برای مقاومت خمشی و قالب های استوانه یی به قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتی متر که هر استوانه به صورت ۴ قرص $15 \times 6/4$ سانتی متر بریده شدند، برای انجام آزمایش ضربه استفاده شده اند. ۶ نمونه ی مکعبی، ۵ نمونه ی تیر، ۵ نمونه ی استوانه یی و ۳ نمونه ی استوانه یی (۱۲ قرص) برای انجام آزمایش ضربه برای هر طرح اختلاط ساخته شدند که براساس آن در مجموع ۲۸ نمونه شامل: ۶۰ نمونه ی مکعبی، ۵۰ نمونه ی استوانه یی و ۱۲۰ نمونه ی قرصی و ۵۰ عدد نمونه ی تیر مکعب مستطیل ساخته شدند. تمامی نمونه ها در شرایط محیطی آزمایشگاه و داخل وان آب به مدت ۲۸ روز عمل آوری شدند.

• **دال بتنی:** جهت بررسی تأثیر استفاده از لاستیک ضایعاتی در مقاومت خمشی روسازی صلب بتنی، در پژوهش حاضر، مجموعاً ۶ نمونه ی دال با سه نوع طرح اختلاط ساخته شدند که از هر اختلاط دو نمونه مشابه بودند. علاوه بر بتن معمولی به عنوان نمونه شاهد، بتن حاوی فقط لاستیک ضایعاتی و همچنین بتن دارای ترکیب لاستیک و الیاف در نظر گرفته شدند. ابعاد دال های بتنی به طول و عرض 1×1 متر و ضخامت 10 سانتی متر بودند. قالب چوبی برای ریختن بتن هر نمونه فراهم شد و بتن ساخته شده درون قالب ریخته و ۲۸ روز عمل آوری شد. برای تعیین مقاومت خمشی روسازی صلب بتنی، نیاز به فراهم کردن بستر ارتجاعی بود؛ لذا به کمک ۴ قوطی و ورق به ضخامت ۶ میلی متر و جوش دادن آن ها به یکدیگر، چیدمان (Set up) مجموعی آزمایش تهیه شد. سپس قالب فلزی به ابعاد مربعی $1/25$ متر ساخته و سپس خاک تا ارتفاع ۱۵ سانتی متر درون قالب ریخته شد. سه سانتی متر از کل خاک بستر به صورت مخلوط نخودی و بادامی بود و به وسیله ی ورق ژئوتکستایل با لایه ی زیرین تفکیک شد و ۱۲ سانتی متر ماسه ی

جدول ۵. وزن مؤلفه‌های مختلف در هر طرح اختلاط.

ردیف	نام طرح اختلاط	آب		سیمان شن		ماسه		کل ریزدانه		لاستیک		وزن الیاف (kg)	
		اولیه (kg)	نهایی (kg)	(kg)	(kg)	(kg)	معمولی (kg)	بادی (kg)	(kg)	درصد (%)	وزن (kg)	٪۰/۷۵	٪۱/۵
۱	CS	۱۸۰	۲۰۰	۳۶۰	۱۰۴۰	۸۰۹/۱۳	۸۰/۹	۸۹۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	RC۵S۰/۷۵	۱۸۰	۱۹۷/۱	۳۶۰	۱۰۴۰	۷۶۹/۲۷	۷۶/۲۹	۸۶۷/۰۳	۵	۱۵/۲۲	۶/۷۵	۰	
۳	RC۱۰S۰/۷۵	۱۸۰	۱۹۶/۳	۳۶۰	۱۰۴۰	۷۲۹/۴۱	۷۲/۹۴	۸۳۹/۵۴	۱۰	۳۰/۴۴	۶/۷۵	۰	
۴	RC۱۵S۰/۷۵	۱۸۰	۱۹۵/۶	۳۶۰	۱۰۴۰	۶۸۹/۵	۶۸/۹۵	۸۱۰/۸۶	۱۵	۴۵/۶۶	۶/۷۵	۰	
۵	RC۵S۱/۵	۱۸۰	۱۹۷/۱	۳۶۰	۱۰۴۰	۷۶۹/۲۷	۷۶/۲۹	۸۷۳/۷۸	۵	۱۵/۲۲	۱۳/۵	۰	
۶	RC۱۰S۱/۵	۱۸۰	۱۹۶/۳	۳۶۰	۱۰۴۰	۷۲۹/۴۱	۷۲/۹۴	۸۴۶/۲۹	۱۰	۳۰/۴۴	۱۳/۵	۰	
۷	RC۱۵S۱/۵	۱۸۰	۱۹۵/۶	۳۶۰	۱۰۴۰	۶۸۹/۵	۶۸/۹۵	۸۱۷/۶۱	۱۵	۴۵/۶۶	۱۳/۵	۰	
۸	RC۵	۱۸۰	۱۹۷/۱	۳۶۰	۱۰۴۰	۷۶۹/۲۷	۷۶/۲۹	۸۶۰/۷۶	۵	۱۵/۲۲	۰	۰	
۹	RC۱۰	۱۸۰	۱۹۶/۳	۳۶۰	۱۰۴۰	۷۲۹/۴۱	۷۲/۹۴	۸۳۲/۷۹	۱۰	۳۰/۴۴	۰	۰	
۱۰	RC۱۵	۱۸۰	۱۹۵/۶	۳۶۰	۱۰۴۰	۶۸۹/۵	۶۸/۹۵	۸۰۴/۱۱	۱۵	۴۵/۶۶	۰	۰	



شکل ۴. آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه‌یی.



شکل ۳. بستر خاکی متراکم شده به وسیله کمیکتور.

به‌دست آمد که P بیشینه‌ی بار قرانت شده از روی دستگاه بر حسب نیوتن و L و b و d به ترتیب طول، عرض و ارتفاع نمونه‌ها بر حسب میلی‌متر هستند.

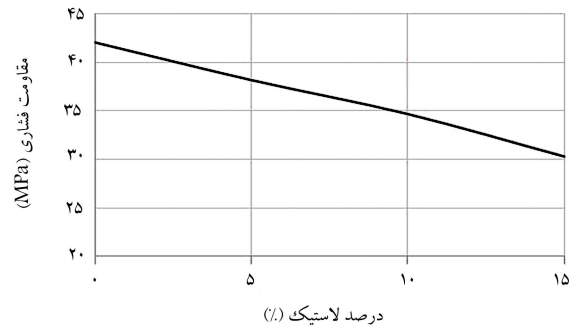
آزمایش سقوط وزنه با ضربه‌های تکرارشونده، ساده‌ترین نوع آزمایش ضربه است. تعداد ضربه برای ایجاد سطح مشخص از گسیختگی یا شکست در آزمون در آزمایش مذکور به‌دست می‌آید که نشان‌دهنده‌ی میزان ظرفیت جذب انرژی مصالح است. دستگاه آزمایش سقوط وزنه (مطابق شکل ۵) از یک چکش به جرم $۴/۵۴$ کیلوگرم، گوی فولادی به قطر $۶۳/۵$ میلی‌متر، شمارنده برای شمارش تعداد ضربات وارد شده بر گوی و همچنین نگهدارنده‌ی فولادی برای جلوگیری از تکان خوردن گوی از محل اعمال وزنه تشکیل شده است که مطابق ACI۵۴۴ انجام شده است. در آزمایش اخیر، ابتدا یک نمونه‌ی دیسکی شکل بتنی به قطر ۱۵۰ و ضخامت ۶۴ میلی‌متر ساخته شد و پس از آماده‌سازی سطوح باربر، در سطح زیرین بر روی صفحه‌ی فولادی قرار گرفت. سقوط وزنه از ارتفاع $۰/۵$ متری انجام شده و ضربه‌های تکراری تا رسیدن به سطح مشخص از ترک خوردگی (اولین ترک خوردگی و گسیختگی نهایی) ادامه یافته است.

• **دال بتنی:** پس از آماده کردن سطح ارتجاعی مطابق شکل ۳، دال بتنی

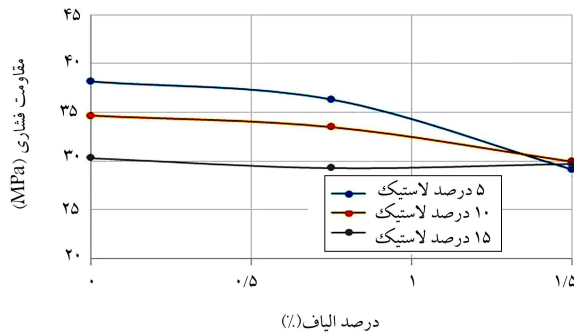
زیرین در سه لایه ریخته و هر لایه به وسیله کمیکتور (مشابه شکل ۳) متراکم شد.

۳. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

• **مشخصات مکانیکی:** آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های مکعبی مطابق استاندارد ASTM C۳۹ انجام شد و با قرانت بار بیشینه و تقسیم آن بر سطح مقطع نمونه، مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال به‌دست آمد. آزمایش مقاومت کششی برزیلی نیز مطابق استاندارد ASTM C۴۹۶ انجام شد و نمونه‌های استوانه‌یی به‌صورت افقی داخل دو کفه‌ی جک و تحت نیروی فشاری قرار گرفتند، تا به مرحله‌ی شکست برسند. مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها برحسب مگاپاسکال از رابطه‌ی $f_t = \frac{P_{max}}{\pi \cdot D \cdot L}$ محاسبه شد که در آن P بیشینه‌ی بار قرانت شده از روی دستگاه بر حسب نیوتن و L و D به ترتیب طول و قطر نمونه‌ها بر حسب میلی‌متر است. مقاومت خمشی نمونه تیرهای بتنی مطابق استاندارد ASTM D۶۲۷۲ به‌صورت چهار نقطه‌یی (مطابق شکل ۴) تعیین شد و مقاومت خمشی نهایی (MPa) بر حسب بار بیشینه، طول دهانه و مشخصات قطعه و رابطه $f_r = \frac{PL}{bd^2}$



الف) بتن حاوی تنها پودر لاستیک؛



ب) بتن با ترکیب پودر لاستیک و الیاف.

شکل ۷. درصد تغییرات مقاومت فشاری با درصد متفاوت لاستیک و الیاف.

ولی نوع تغییرات متناسب با درصد پودر لاستیک به کار رفته متفاوت است و با افزایش میزان پودر لاستیک استفاده شده، میزان تأثیر منفی افزایش الیاف هم کاهش پیدا می‌کند، به طوری که در مخلوط‌های حاوی ۱۵٪ پودر لاستیک، افزایش درصد‌های مختلف الیاف تأثیر منفی بسیار جزئی داشته است؛ لذا الیاف‌های PPS نه فقط کمکی به افزایش مقاومت فشاری نمی‌کنند، بلکه به تناسب درصد الیاف اضافه شده باعث کاهش مقاومت فشاری خواهند شد. مطابق شکل ۷، با افزایش درصد لاستیک تا ۱۵٪، مقاومت فشاری به صورت نسبتاً خطی و تا ۳۱٪ کاهش یافته است. همچنین افزایش الیاف هم باعث کاهش مقاومت شده است، به طوری که تأثیر منفی کمتر از ۵٪ نسبت به افزایش پودر لاستیک است؛ ولی با افزایش الیاف تا ۱/۵٪ افت زیاد مقاومت فشاری اتفاق افتاده است. ضمناً در نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف پودر لاستیک، افت مقاومت با افزایش درصد الیاف ثابت بوده است. براساس منحنی‌های به دست آمده از شکل ۷، رابطه‌ی ۱ که به صورت خطی است، برای نمونه‌های حاوی فقط پودر لاستیک و رابطه‌های ۲ که به صورت درجه ۲ است، برای نمونه‌های حاوی پودر لاستیک و الیاف پیشنهاد می‌شود:

$$f_{c-rubber} = f_c \cdot (1 - 0.7 \cdot 2 \alpha_1) \quad (1)$$

$$f_{c-0\%r-f} = f_c \cdot (1 - 0.7 \cdot 2 \alpha_1) \cdot (1 + 0.7 \cdot 14 \alpha_2 - 0.7 \cdot 24 \alpha_2^2)$$

$$f_{c-10\%r-f} = f_c \cdot (1 - 0.7 \cdot 2 \alpha_1) \cdot (1 + 0.7 \cdot 49 \alpha_2 - 0.7 \cdot 17 \alpha_2^2)$$

$$f_{c-15\%r-f} = f_c \cdot (1 - 0.7 \cdot 2 \alpha_1) \cdot (1 - 0.7 \cdot 7 \alpha_2 - 0.7 \cdot 21 \alpha_2^2) \quad (2)$$

که در آن، f_c مقاومت فشاری نمونه‌ی مرجع بدون لاستیک و الیاف، α_1 درصد لاستیک اضافه شده (۵، ۱۰ و ۱۵) و α_2 درصد الیاف (۱/۵ و ۱) و $f_{c-0\%r-f}$ ، $f_{c-10\%r-f}$ و $f_{c-15\%r-f}$ مقاومت‌های فشاری نمونه‌های الیافی حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد لاستیک هستند.



شکل ۵. دستگاه آزمایش ضربه (سقوط افتان).



شکل ۶. سیستم قرارگیری و نحوه آزمایش دال بتنی روی بستر خاکی.

ساخته شده (مطابق شکل ۶) روی بستر خاکی قرار گرفته و برای برقراری تماس یکسان خاک با دال بتنی، بستر خاکی کاملاً با ماسه پر شده است. هفت عدد تغییرمکان‌سنج (LVDT) مطابق شکل مذکور، برای اندازه‌گیری خیز دال در ۴ گوشه‌ی دال، محل اعمال بار، مرکز دال و در نقطه‌ی مقابل اعمال بار در مرکز لبه‌ی دال قرار گرفتند. محل قرارگیری نیرو در بحرانی‌ترین حالت در مرکز لبه‌ی بالایی دال قرار دارد، تا با اعمال نیرو از چرخ‌های کامیون در لبه‌ی خارجی روسازی بتنی جاده‌ها که در یک جاده‌ی واقعی اتفاق می‌افتد، شبیه‌سازی آزمایشگاهی شود.

۴. تجزیه و تحلیل نتایج

۱.۴. مقاومت فشاری

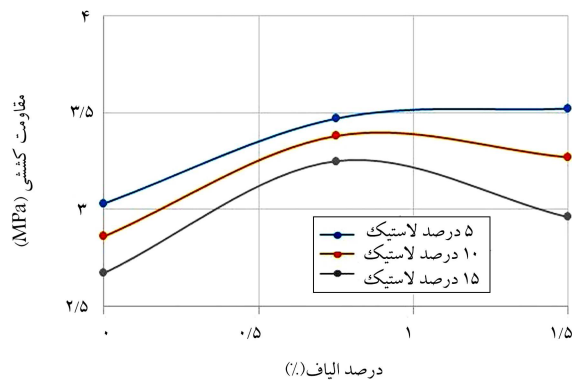
نتایج متوسط مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری حاوی پودر لاستیک و همچنین ترکیب پودر لاستیک و الیاف به مقاومت فشاری متوسط نمونه‌های استوانه‌یی استاندارد ۱۵۰ × ۳۰۰ میلی‌متری تبدیل و نتایج در شکل ۷ و جدول ۶ ارائه شده‌اند، که مطابق آن‌ها با افزایش درصد لاستیک تا ۱۵٪، مقاومت فشاری به صورت نسبتاً خطی و تا ۳۱٪ کاهش یافته است. همچنین افزایش الیاف هم باعث کاهش مقاومت شده است، ولی تأثیر منفی افزایش الیاف کمتر از افزایش پودر لاستیک و بیشینه‌ی افت مقاومت بابت افزایش الیاف حدود ۱۰٪ بوده است، که تأییدکننده‌ی نتایج مطالعات نمازاده (۱۳۹۷) است،^[۳۷] که افزایش لاستیک فقط باعث افت تا ۳۱٪ شده و ترکیب الیاف و پودر تا ۴۱٪ کاهش داشته است. ضمناً مقاومت فشاری با افزایش درصد الیاف کاهش پیدا کرده است.

جدول ۶. درصد کاهش مقاومت فشاری با درصد متفاوت لاستیک و الیاف.

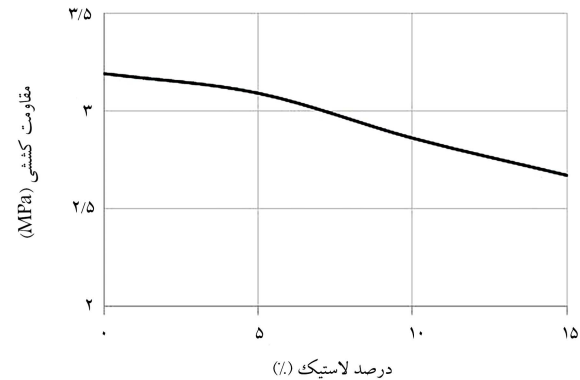
بتن‌های حاوی ترکیب پودر لاستیک و الیاف						بتن‌های حاوی پودر لاستیک			بتن معمولی	نام طرح اختلاط
RC۱۵F۱/۵	RC۱۰F۱/۵	RC۵F۱/۵	RC۱۵F۰/۷۵	RC۱۰F۰/۷۵	RC۵F۰/۷۵	RC۱۵	RC۱۰	RC۵	C	
۲۸/۷۲	۲۷/۵۹	۲۹/۸۸	۳۱/۶۴	۳۷/۳۹	۴۲/۷۳	۳۳/۷۸	۳۹/۶۹	۴۳/۹۳	۴۸/۸۹	مقاومت (MPa)
۴۱/۳۶	۴۳/۶۷	۳۹	۳۵/۴۰	۲۳/۶۶	۱۲/۷۶	۳۱/۰۳	۱۸/۹۷	۱۰/۴	۰	درصد کاهش نسبت به نمونه مرجع بتن معمولی (%)

جدول ۷. درصد تغییرات مقاومت کششی با درصد متفاوت لاستیک و الیاف.

بتن‌های حاوی ترکیب پودر لاستیک و الیاف						بتن‌های حاوی پودر لاستیک			بتن معمولی	نام طرح اختلاط
RC۱۵F۱/۵	RC۱۰F۱/۵	RC۵F۱/۵	RC۱۵F۰/۷۵	RC۱۰F۰/۷۵	RC۵F۰/۷۵	RC۱۵	RC۱۰	RC۵	C	
۲/۹۶	۳/۲۷	۳/۵۱	۳/۲۵	۳/۳۸	۳/۵۳	۲/۶۷	۲/۸۶	۳/۰۹	۳/۱۹	مقاومت (MPa)
-۷/۲	+۲/۵	+۱۰	+۱/۹	+۶	+۱۰/۷	-۱۶/۳	-۱۰/۳	-۳/۱	۰	درصد تغییر نسبت به نمونه مرجع بتن معمولی (%)



ب) بتن با ترکیب پودر لاستیک و الیاف.



الف) بتن حاوی تنها پودر لاستیک؛

شکل ۸. درصد تغییرات مقاومت کششی با درصد متفاوت لاستیک و الیاف.

درصد و نمونه‌های حاوی ۱۰٪ لاستیک برابر ۱۶/۴ و ۱۲/۸ درصد و نمونه‌های حاوی ۱۵٪ لاستیک برابر ۱۸/۱ و ۹ درصد بوده است. بنابراین، اگرچه بیشترین مقاومت کششی در نمونه‌ی حاوی ۵٪ لاستیک و ۷۵٪ الیاف اتفاق افتاده است، ولی بیشترین تأثیر پذیری الیاف‌ها برای جبران کاهش مقاومت کششی در نمونه‌های حاوی ۱۵٪ لاستیک با ۷۵٪ الیاف بوده است. براساس منحنی‌های به دست آمده از شکل ۸، رابطه‌ی ۳ برای نمونه‌های حاوی فقط پودر لاستیک و رابطه‌های ۴، برای نمونه‌های حاوی لاستیک و الیاف پیشنهاد شده است:

$$f_{t-rubber} = f_t \cdot (1 - 0.11\alpha_1) \quad (3)$$

$$f_{t-5\%r-f} = f_t \cdot (1 - 0.11\alpha_1) \cdot (1 + 0.29\alpha_2 - 0.13\alpha_2^2)$$

$$f_{t-10\%r-f} = f_t \cdot (1 - 0.11\alpha_1) \cdot (1 + 0.39\alpha_2 - 0.2\alpha_2^2)$$

$$f_{t-15\%r-f} = f_t \cdot (1 - 0.11\alpha_1) \cdot (1 + 0.5\alpha_2 - 0.29\alpha_2^2) \quad (4)$$

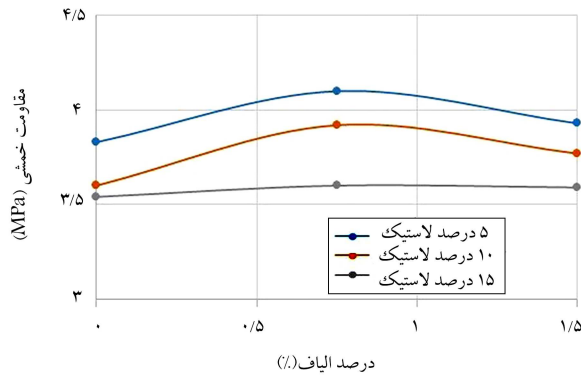
که در آن‌ها، f_t مقاومت کششی نمونه‌ی مرجع بدون لاستیک، α_1 درصد لاستیک اضافه شده (۵، ۱۰ و ۱۵)، α_2 درصد الیاف و $f_{t-10\%r-f}$ ، $f_{t-5\%r-f}$ و $f_{t-15\%r-f}$ مقاومت‌های کششی نمونه‌های الیافی حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد لاستیک هستند.

۲.۴. مقاومت کششی برزیلی

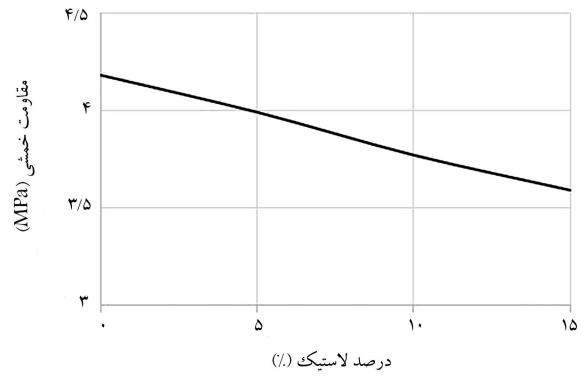
متوسط مقاومت کششی همه‌ی نمونه‌های استوانه‌ی محاسبه و نتایج و تغییرات مثبت یا منفی مرتبط در جدول ۷ و شکل ۸ مشاهده می‌شوند. نتایج نشان داد که مقاومت کششی با افزایش لاستیک کاهش یافته و افزودن تا ۱۵٪ پودر لاستیک، باعث کاهش مقاومت کششی تا ۱۶/۳٪ شده است که این میزان کاهش حدوداً نصف میزان کاهش در مقاومت فشاری با درصدهای مشابه لاستیک بوده است. اما با اضافه کردن همزمان لاستیک و الیاف، درصد مقاومت کششی برزیلی بتن نسبت به نمونه‌ی کنترل بدون لاستیک و الیاف افزایش یافته است. افزودن مقدار ۵٪ لاستیک و ۷۵٪ الیاف باعث افزایش تا ۱۲/۵ درصدی مقاومت کششی شده است. افزودن الیاف به بتن حاوی ۵٪ پودر لاستیک باعث افزایش مقاومت کششی شده است، که نسبت به بتن حاوی پودر لاستیک به میزان حدود ۱۷٪ افزایش سهم افزودن الیاف است. گرچه افزایش ۱/۵ درصدی نسبت به ۷۵٪ درصدی الیاف، تأثیر جزئی در افزایش ظرفیت کششی داشته است، اما افزودن ۱۵٪ الیاف در کنار افزودن پودر لاستیک به دلیل کم شدن حجم مصالح درگیر، تأثیر مناسبی در مقاومت کششی نداشته است. ترتیب افزایش مقاومت کششی نمونه‌های بتنی با افزودن ۷۵٪ و ۱/۵ درصد الیاف به‌طور همزمان در نمونه‌های حاوی ۵٪ لاستیک برابر ۱۳/۸ و ۱۳/۱

جدول ۸. تغییرات مقاومت خمشی با افزایش درصد لاستیک و الیاف.

بتن های حاوی ترکیب پودر لاستیک و الیاف						بتن های حاوی پودر لاستیک			بتن معمولی	نام طرح اختلاط
RC۱۵F۱/۵	RC۱۰F۱/۵	RC۵F۱/۵	RC۱۵F۰/۷۵	RC۱۰F۰/۷۵	RC۵F۰/۷۵	RC۱۵	RC۱۰	RC۵	C	
۳/۵۴	۳/۶	۳/۸۳	۳/۶	۳/۹۲	۴/۱	۳/۵۹	۳/۷۷	۳/۹۳	۴/۱۸	مقاومت (MPa)
-۱۵/۳	-۱۳/۸	-۸/۳	-۱۳/۸	-۶/۲	-۲	-۱۴/۱۱	-۹/۸	-۶	۰	کاهش نسبت به نمونه مرجع بتن معمولی (%)



(ب) بتن با ترکیب پودر لاستیک و الیاف.

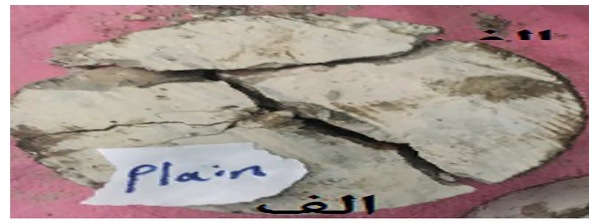


(الف) بتن حاوی تنها پودر لاستیک؛

شکل ۹. درصد تغییرات مقاومت خمشی با درصد متفاوت لاستیک و الیاف.



(ب) نمونه RC ۱۰؛



(الف) نمونه Plain؛



(د) نمونه RC ۱۰ F ۱/۵



(ج) نمونه RC ۱۰ F ۰/۷۵

شکل ۱۰. شکست نمونه های قرص بتنی تحت آزمایش ضربه.

مقاومت خمشی با افزایش درصد الیاف تا ۷۵٪ بیشترین افزایش را مانند مقاومت کششی نتیجه داده است. افزایش الیاف تا ۱/۵٪ به دلیل چگالی پایین آن، باعث زیاد بودن بیش از حد و کم شدن ملات لابه لای سنگ دانه ها شده و مقاومت خمشی را کاهش داده است.

۴.۴. مقاومت ضربه

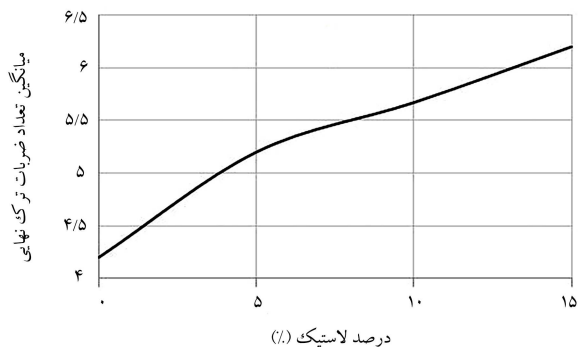
نمونه هایی از عکس های نمونه های ترک خورده بعد از آزمایش سقوط آزاد ضربه در شکل ۱۰ مشاهده می شود که وجود پودر لاستیک و به خصوص در ترکیب با الیاف باعث کاهش آسیب شده و نمونه، انسجام کلی خود را حفظ کرده است. نتایج اولیه تعداد ضربات (مقاومت ضربه) برای ایجاد اولین ترک و همچنین ترک نهایی

۳.۴. مقاومت خمشی

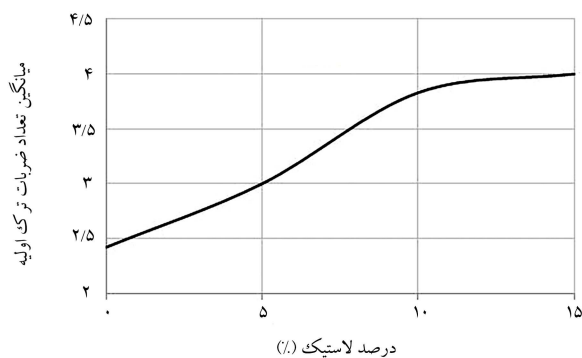
متوسط مقاومت خمشی همه ی نمونه های تیر مکعب مستطیلی محاسبه و نتایج تغییرات منفی مرتبط در جدول ۸ و شکل ۹ مشاهده می شوند، که مطابق آن ها، با جایگزینی ۱۵٪ لاستیک به جای ماسه، مقاومت خمشی نمونه ها، ۱۴/۱۱٪ کاهش یافته است. همچنین افزودن الیاف علاوه بر شکست نرم تر، باعث افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه های با لاستیک شده است، به طوری که مقاومت خمشی بتن های حاوی ۵، ۱۰، و ۱۵ درصد لاستیک و ۷۵٪ الیاف به ترتیب ۴، ۳/۵ و ۴/۰ درصد افزایش پیدا کرده است. اگرچه در مجموع افزایش لاستیک به همراه الیاف باعث کاهش مقاومت خمشی نسبت به نمونه ی مرجع شده است، ولی افت مقاومت در نمونه های حاوی الیاف کمتر از نمونه های فقط با لاستیک بوده است.

جدول ۹. درصد افزایش تعداد برخورد متوسط ضربه برای ایجاد ترک اولیه نمونه‌ها.

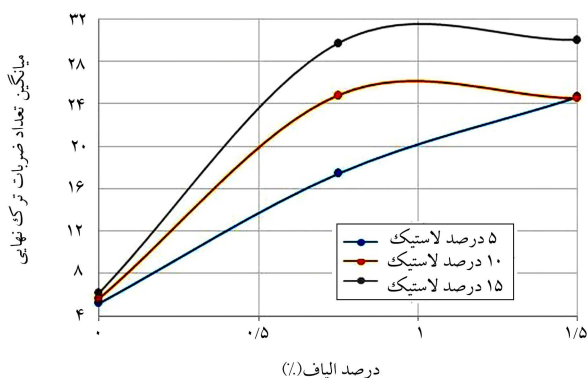
بتن‌های حاوی ترکیب پودر لاستیک و الیاف						بتن‌های حاوی پودر لاستیک			بتن معمولی	نام طرح اختلاط
RC۱۵F۱/۵	RC۱۰F۱/۵	RC۵F۱/۵	RC۱۵F۰/۷۵	RC۱۰F۰/۷۵	RC۵F۰/۷۵	RC۱۵	RC۱۰	RC۵	C	نام طرح اختلاط
۱۰/۳۳	۸/۷۵	۸/۴۲	۷/۵	۷/۰۸	۶	۴	۳/۸۳	۳	۲/۴۲	تعداد متوسط برخورد
۴۲۷	۳۵۴	۳۴۸	۳۱۰	۲۹۳	۲۴۸	۶۵	۵۸	۲۴	۰	افزایش نسبت به نمونه مرجع بتن معمولی (%)



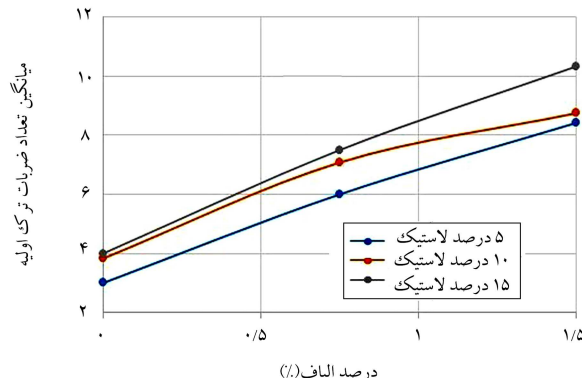
الف) بتن حاوی تنها پودر لاستیک؛



الف) بتن حاوی تنها پودر لاستیک؛



ب) بتن با ترکیب پودر لاستیک و الیاف.



ب) بتن با ترکیب پودر لاستیک و الیاف.

شکل ۱۲. تغییرات مقاومت ضربه برای ایجاد ترک نهایی با درصد متفاوت لاستیک و الیاف.

شکل ۱۱. تغییرات مقاومت ضربه برای ایجاد اولین ترک با درصد متفاوت لاستیک و الیاف با درصد متفاوت لاستیک و الیاف.

داده است. مقاومت نمونه‌ها نیز در برابر ایجاد ترک نهایی تا ۷ برابر افزایش داشته است.

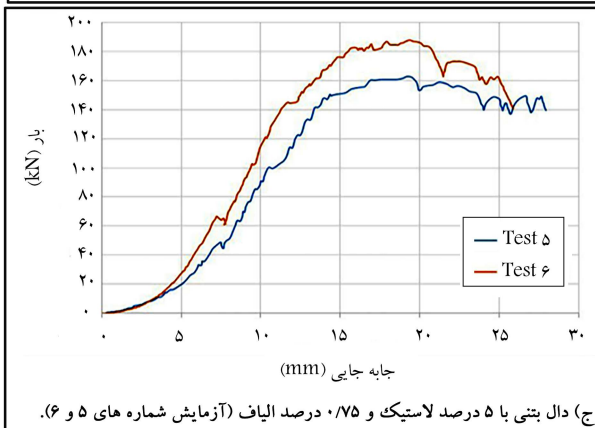
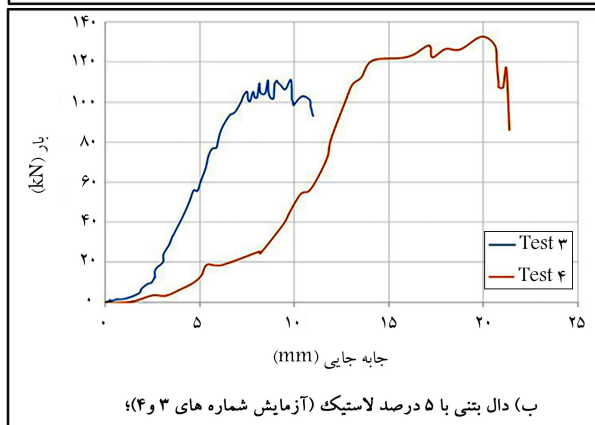
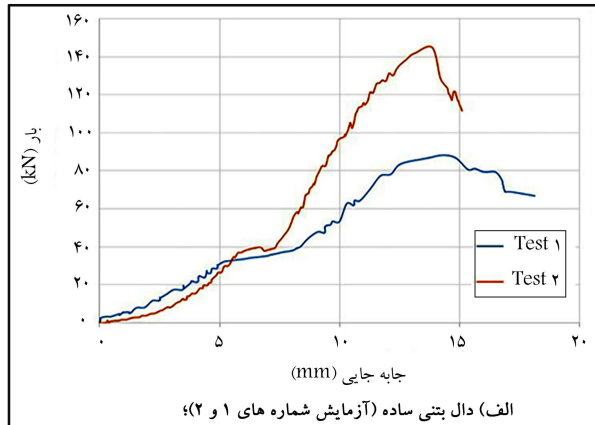
خردشدگی نمونه‌های قرص بتنی در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شوند. مطابق جدول ۹ نیز مقاومت متوسط ضربه با افزایش درصد جایگزینی لاستیک بهبود یافته است. برای نمونه‌های با فقط درصدهای لاستیک ۵، ۱۰، و ۱۵، مقاومت ضربه در ترک اول نسبت به نمونه میثا به ترتیب ۲۴، ۵۸ و ۶۵ درصد افزایش نشان داده است.

اضافه کردن ۱/۵٪ الیاف به نمونه‌های حاوی لاستیک در ترک اولیه نسبت به طرح اختلاط‌های ۰/۷۵٪ الیاف نیز افزایش قابل ملاحظه را تا ۱۰۰٪ نسبت به نمونه‌های دارای الیاف ۰/۷۵٪ نشان می‌دهد. لازم به ذکر است افزودن ۱/۵٪ الیاف به نمونه‌های حاوی ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد لاستیک باعث افزایش مقاومت ایجاد ترک نهایی تا ۲/۲۴، ۲/۹۵ و ۳/۶ برابری شده است که تأثیر بسیار قابل توجه الیاف‌ها در افزایش مقاومت ضربه‌ی نمونه‌های حاوی پودر لاستیک ضایعاتی را نشان می‌دهد. متوسط نسبت افزایش تعداد ضربه‌ها در ایجاد ترک نهایی نسبت به تعداد ضربه‌ها در ایجاد ترک اولیه در نمونه‌های حاوی فقط پودر لاستیک ضایعاتی حدوداً برابر ۱/۶ بود، در حالی که این نسبت برای بتن‌های ترکیب پودر لاستیک و الیاف ۰/۷۵ و ۱/۵ درصد به ترتیب ۳/۵ و ۲/۸ بوده است که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر الیاف در افزایش مقاومت نهایی بوده است. اگرچه مطابق جدول ۶، مقاومت

همین‌طور مقاومت ضربه در ترک نهایی مطابق جدول ۱۰ به میزان ۲۴، ۳۵ و ۴۸ درصد افزایش یافته است. نتایج افزودن الیاف به میزان نمونه‌های لاستیکی در جدول‌های مرتبط نشان می‌دهد که افزودن ۰/۷۵٪ الیاف به نمونه‌های لاستیکی، باعث افزایش چشمگیر مقاومت ضربه‌ی شده است، به طوری که بتن حاوی ۵٪ لاستیک و ۰/۷۵٪ الیاف نسبت به نمونه‌ی ۵٪ لاستیک در تعداد ضربه‌ی ترک اولیه، مقاومت دو برابری نشان داده است. همچنین مقاومت ضربه‌ی ترک اولیه برای نمونه‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد لاستیک با الیاف ۰/۷۵٪ نسبت به نمونه‌های حاوی فقط لاستیک به ترتیب ۱۸ و ۱۸۵ درصد افزایش نشان

جدول ۱۰. درصد افزایش تعداد برخورد متوسط ضربه برای ایجاد ترک نهایی نمونه‌ها.

بتن‌های حاوی ترکیب پودر لاستیک و الیاف						بتن‌های حاوی پودر لاستیک			بتن معمولی	نام طرح اختلاط
RC۱۵F۱/۵	RC۱۰F۱/۵	RC۵F۱/۵	RC۱۵F۰/۷۵	RC۱۰F۰/۷۵	RC۵F۰/۷۵	RC۱۵	RC۱۰	RC۵	C	
۳۰	۲۴/۵	۲۴/۱۶	۲۹/۷	۲۴/۸	۱۷/۴	۶/۲	۵/۶۷	۵/۲	۴/۲	تعداد متوسط برخورد
۷۲۰	۵۸۵	۵۷۲	۷۰۵	۵۹۲	۴۱۵	۴۷	۳۵	۲۳/۸	۰	افزایش نسبت به نمونهی مرجع بتن معمولی



فشاری نمونه‌های بتنی حاوی لاستیک تا ۳۰٪ کاهش یافته است، ولی مقاومت در ایجاد ترک‌های اولیه و نهایی به ترتیب ۶۵ و ۴۷ درصد افزایش یافته است. در حالی که افزایش الیاف تا ۱/۵٪ باعث کاهش تا ۴۳٪ در مقاومت فشاری شده است، ولی منجر به افزایش مقاومت ضربه بیش از ۴/۲ برابری در تعداد ضربه‌های منجر به ایجاد ترک اولیه و ۷/۲ برابری در تعداد ضربه‌های منجر به ترک نهایی شده است که نشانگر تأثیر بسیار قابل توجه ترکیب پودر لاستیک و الیاف در افزایش مقاومت ضربه است.

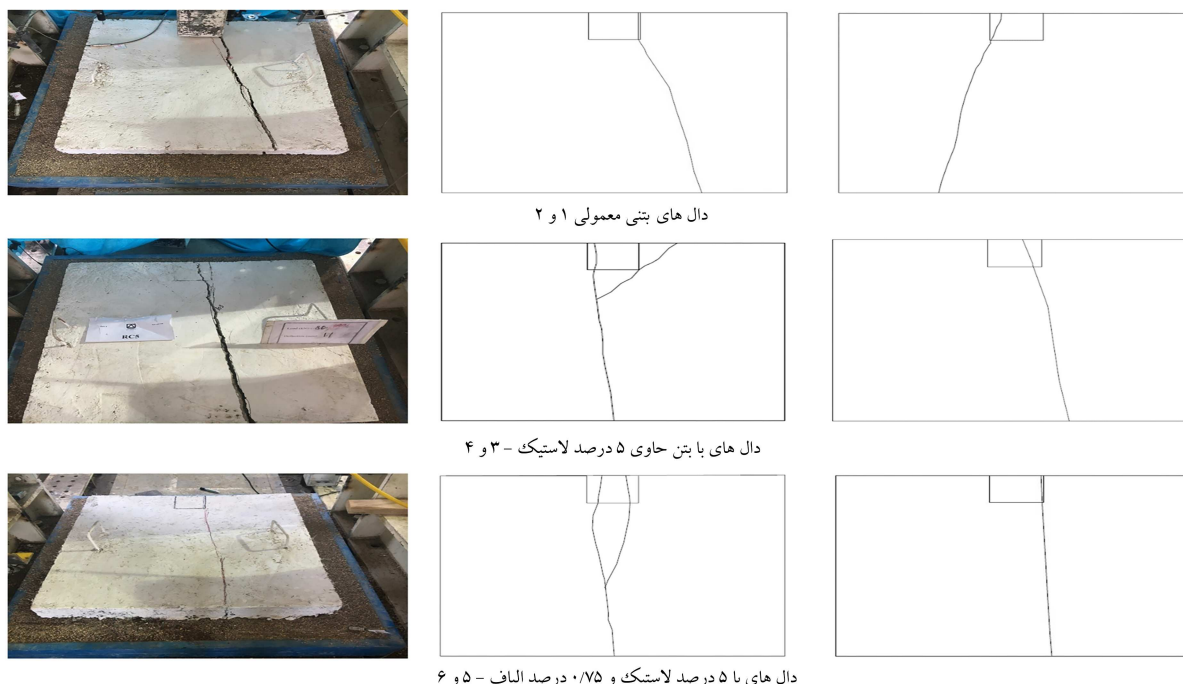
۵.۴. مقاومت سازه‌ی دال بتنی روسازی

شش دال بتنی روسازی در قالب ۳ تیپ دوتایی مشابه انتخاب شدند که نمونه‌های: یک و دو با بتن معمولی، سه و چهار با بتن حاوی ۵٪ پودر لاستیک، و پنج و شش با بتن حاوی ۵٪ پودر لاستیک و ۷۵٪ الیاف (که به عنوان بهترین طرح اختلاط با بیشترین مقاومت خمشی بودند) ساخته و مطابق شکل ۷ تحت بار متمرکز در لبه‌ی دال (مشابه روسازی بتنی) به صورت خمشی آزمایش شدند.

ورق فولادی زیر بار با طول و عرض ۱۵ سانتی‌متر جهت شبیه‌سازی ابعاد لاستیک خودرو و ضخامت ۲ سانتی‌متر در مرکز لبه‌ی بالایی دال قرار گرفته است. آزمایش تا بیشینه‌ی بار قابل تحمل توسط دال و مشاهده‌ی ترک‌های خمشی در دال‌ها ادامه پیدا کرد و بعد از افت بار نیز بارگذاری تا مرحله‌ی شکست نهایی ادامه یافت و تغییرمکان‌ها توسط تغییرمکان‌سنج‌ها و مقدار بار توسط بارسنج اندازه‌گیری شدند. منحنی‌های اولیه‌ی بار- تغییرمکان شش دال متناسب با تغییرمکان در محل اعمال بار در شکل ۱۳ مشاهده می‌شوند. لذا تغییرمکان‌ها در لبه‌ی دال داده شده‌اند. همچنین نتایج بارهای بیشینه‌ی نمونه‌ها در جدول ۱۱ ارائه و بارهای بیشینه‌ی دال‌های جفت با جنس بتن یکسان نیز میانگین گرفته شده‌اند. نمای شماتیک و واقعی ترک‌های ۶ نمونه در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، ترک‌ها بیشتر به سمت مرکز دال گسترش یافته بودند. در دال‌های یک و دو، ترک‌ها به کناره‌ها کشیده شده‌اند، ولی ترک‌ها در نمونه‌های حاوی لاستیک و الیاف رفتار متعادل‌تر و به سمت مرکز دال در وجه مقابل داشته‌اند، ضمن اینکه برای دال‌های الیافی، ترک‌های ریز شکل گرفته، به سادگی قابل مشاهده نبودند.

نتایج نشان می‌دهد بتن حاوی لاستیک نسبت به بتن ساده، بار بیشتری تحمل کرده است. همچنین بتن حاوی لاستیک و الیاف نسبت به بتن لاستیکی همین نتیجه را در برداشته است که البته با نتایج نمونه‌های فشاری کششی، و خمشی مطابقت ندارد. انتظار داشتن سختی بیشتر در مراحل اولیه و سختی کمتر در مراحل بعدی به دلیل ترک‌خوردگی با آنچه در نمودارهای بار- تغییرمکان مشاهده می‌شود، متفاوت است و علت آن قرارگیری دال بر روی خاک است؛ که ابتدا یک نشست در خاک

شکل ۱۳. نمودارهای بار- تغییرمکان دال‌های بتنی روسازی تحت بار متمرکز در لبه.



شکل ۱۴. نقشه‌ی شماتیک و نمای واقعی ترک‌های خمشی دال‌های بتنی روسازی با میزان بار نهایی وارده.

جدول ۱۱. نتایج بیشینه‌ی بار وارد شده بر دال‌های روسازی و میزان تغییرات.

شماره	نام دال	توضیحات	بار نهایی (kN)	بار میانگین نهایی (kN)	ضریب تغییرات (%)	درصد افزایش بار نسبت به نمونه‌ی کنترل (%)
۱	Plain concrete	بتن ساده	۸۶/۸۳	۱۱۵/۸۳	۳۵/۴	۰
۲			۱۴۴/۸۳			
۳	RC5	بتن با ۵٪ لاستیک	۱۱۱/۱۶	۱۲۱/۹۱	۱۲/۴۷	+۵/۲۵
۴			۱۳۲/۶۶			
۵	RC5F ^۰ /۷۵	بتن با ۵٪ لاستیک و ۷۵٪ الیاف PPS	۱۶۲/۸۳	۱۷۵/۳۳	۱۰	+۵۱/۳۶
۶			۱۸۷/۸۳			

مقاومت کششی نسبت به بتن معمولی، افزایش بیش از ۵۰٪ در ظرفیت باربری دال بتنی در روسازی اتفاق افتاده است، که نشان از تأثیر قابل توجه ترکیب پودر لاستیک و الیاف در روسازی‌های بتنی دارد.

طاق‌ت از مشخصه‌های جذب انرژی مصالح است که نمایانگر قابلیت مقاومت مصالح در برابر گسیختگی تحت بارهای استاتیکی، دینامیکی یا ضربه است. اگر تغییرمکان نمونه در لحظه‌ی ایجاد اولین ترک برابر δ باشد، به ترتیب سطح زیر منحنی بار - تغییرمکان تا ۳۵٪ تقسیم بر سطح زیر منحنی بار - تغییرمکان تا اولین ترک (δ) را با اندیس‌های I_5 نشان می‌دهند. از آنجایی که میزان تغییرمکان نهایی در دال‌های آزمایش شده کوچک بودند، نسبت سطح زیر منحنی بار - تغییرمکان تا ۲ و ۳ برابر δ ، تقسیم بر سطح زیر منحنی بار - تغییرمکان تا اولین ترک را با اندیس‌های I_2 و I_3 تعریف کرده و مقادیر به‌دست آمده برای هر نمونه در جدول ۱۲ ارائه شده‌اند. نتایج نشان داد که افزودن لاستیک باعث افزایش ۱/۶ و ۲/۷ برابری اندیس طاق‌ت ۲ و ۳ برابری تغییرمکان ترک‌خوردگی دال‌های بتنی روسازی شده است.

ایجاد و خاک، کمی متراکم‌تر شده و نشست کمتری در مراحل بعد با بارهای بیشتر اتفاق افتاده است. ضریب تغییرات یک معیار برای اندازه‌گیری توزیع داده‌های آماری به‌کار می‌رود که از تقسیم انحراف معیار بر میانگین به‌دست می‌آید و بی‌بعد است و میزان پراکندگی به ازاء یک واحد از میانگین را بیان می‌کند. ضریب تغییرات برای هر گروه از دال‌ها محاسبه شده و مطابق جدول ۱۱، دال بتنی معمولی ۳۵٪ تغییرات داشته است، ولی با افزودن لاستیک و سپس ترکیب با الیاف، ضریب تغییرات به ۱۲ و ۱۰ درصد کاهش یافته است که نشان از قابلیت اعتماد بیشتر به نتایج نمونه‌های مذکور و عدم تغییر کم در نتایج است.

مقایسه‌ی نتایج مقاومت‌های مخلوط مطابق جدول ۱۱ نشان داد که گرچه افزایش فقط ۵٪ لاستیک منجر به کاهش ۱۰، ۳، و ۶ درصدی مقاومت فشاری، کششی و خمشی شده است، ولی افزایش ۵ درصدی در ظرفیت خمشی دال روسازی با ضریب تغییرات کم مشاهده شده است. تأثیر قابل توجه در رفتار و ظرفیت دال بتنی روسازی حاوی ۵٪ لاستیک و ۷۵٪ الیاف نشان می‌دهد که علی‌رغم کاهش ۱۲/۲ درصدی در مقاومت فشاری و خمشی و افزایش جزئی ۱۰ درصدی در

جدول ۱۲. ضریب طاقت متوسط دال‌های بتنی روسازی.

ضریب طاقت		ضریب طاقت		دال بتنی
متوسط I_2	نسبت هر نمونه به نمونه مرجع I_2	متوسط I_5	نسبت هر نمونه به نمونه مرجع I_5	
۵/۵	-	۹/۹۳	-	Plain concrete
۸/۸	۱/۶	۲۷/۰۴۵	۲/۷۲	RC۵
۷/۲	۱/۳	۱۶/۵۰	۱/۶۶	RC۵F ^o /۷۵

۵. نتیجه‌گیری

با ۱۰ طرح اختلاط، شامل بتن معمولی و بتن‌های حاوی فقط پودر لاستیک ضایعاتی و یا ترکیب پودر مذکور با الیاف مصنوعی، آزمایش‌های تعیین مشخصات مقاومتی مقاومت‌های فشاری، خمشی، کششی و ضربه انجام و سپس آزمایش رفتار خمشی دال‌های بتنی بزرگ بر بستر ارتجاعی به‌عنوان روسازی بتنی تحت بار متمرکز بر لبه‌ی دال انجام شده و این نتایج به‌دست آمده است:

۱. اضافه شدن لاستیک و پودر آن باعث کاهش مقاومت فشاری بتن شده است، به‌طوری که اضافه کردن پودر لاستیک تا ۱۵٪ باعث کاهش ۳۱ درصدی و افزایش الیاف تا ۱۰٪ به ترکیب اخیر باعث کاهش تا ۴۳٪ مقاومت فشاری شده است.
۲. مقاومت کششی نمونه‌های بتنی با افزودن تا ۱۵٪ پودر لاستیک، تا ۱۶٪ کاهش یافته است، ولی با اضافه کردن الیاف کاهش مقاومت اخیر جبران و حتی افزودن الیاف تا ۱۰٪ منجر به افزایش تا ۱۰ درصدی در مقاومت کششی شده است. بنابراین اگرچه بیشترین مقاومت کششی در نمونه‌ی حاوی ۵٪ لاستیک و ۷۵٪ الیاف اتفاق افتاده است، ولی بیشترین تأثیرپذیری الیاف‌ها برای جبران کاهش مقاومت کششی، در نمونه‌های حاوی ۱۵٪ لاستیک با ۷۵٪ الیاف بوده است.
۳. گرچه مقاومت خمشی همه‌ی بتن‌ها با افزودن هم پودر لاستیک و هم الیاف کاهش یافته است، ولی کاهش اخیر حدود نصف کاهش مقاومت فشاری بوده

است. ضمناً افزودن ۷۵٪ الیاف باعث کمتر شدن کاهش مقاومت خمشی شده است که به تعبیری باعث افزایش تا ۴٪ نسبت به نمونه‌های فقط حاوی پودر لاستیک شده است.

۴. افزایش ۵، ۱۰ و ۱۵ درصدی پودر لاستیک ضایعاتی به ترتیب باعث افزایش ۲۴، ۵۸ و ۶۵ درصدی در مقاومت ضربه در ترک اول و ۲۴، ۳۵ و ۴۸ درصد مقاومت ضربه در ایجاد ترک نهایی نسبت به نمونه‌ی مینا با بتن معمولی شده است. افزودن الیاف باعث افزایش قابل توجه در مقاومت ضربه‌ی نمونه‌ها شده است، به‌طوری که مقاومت اولیه و نهایی ضربه‌ی نمونه‌ها نسبت به نمونه با بتن معمولی به میزان ۴/۲ و ۷/۲ برابر شده است. لذا اضافه کردن تا ۱۰٪ الیاف به نمونه‌های حاوی لاستیک باعث افزایش ۳/۲ و ۶/۵ برابری در مقاومت ضربه‌های اولیه و نهایی نسبت به نمونه‌ی حاوی پودر لاستیک شده است.

۵. گرچه افزایش پودر لاستیک و الیاف باعث کاهش قابل توجه مقاومت فشاری و حتی کاهش کمتر یا افزایش جزئی مقاومت‌های کششی و خمشی شده است، ولی دال‌های بتنی روسازی حاوی لاستیک و الیاف نه فقط کاهش ظرفیت نداشتند، بلکه باعث افزایش تا حدود ۵۰ درصدی ظرفیت خمشی نسبت دال مشابه ساخته شده با بتن ساده شده‌اند.

۶. دال‌های بتنی روسازی حاوی فقط لاستیک و یا ترکیب لاستیک و الیاف بر بستر ارتجاعی علاوه بر داشتن کمترین ضریب تغییرات در نتایج، دارای ضریب اندیس طاقت تا ۲/۷ و ۱/۶ برابری نسبت به دال بتنی معمولی بوده و رفتار شکل پذیر همراه با جذب انرژی بیشتری از خود نشان داده‌اند.

پانویس‌ها

1. Zheng
2. Ozbay
3. Al-Tayeba

منابع (References)

1. Siddique, R. and Naik, T.R. "Properties of concrete containing scrap-tire rubber-an overview", *Waste Management*, **24**(6), pp. 563-569 (2004)
2. Shen, W., Shan, L., Zhang, T. and et al. "Investigation on polymer-rubber aggregate modified porous concrete", *Construction and Building Materials*, **38**, pp. 667-674 (2013).
3. Ganjian, E., Khorami, M. and Maghsoudi, A.A. "Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete", *Construction and Building Materials*, **23**(5), pp. 1828-1836 (2009).
4. Khatib Z.K. and Bayomy F.M. "Rubberized Portland cement concrete", *ASCE Journal of Material in Civil Engineering*, **11**(3), pp. 206-213 (1999).
5. Batayneh, M.K., Marie, I. and Asi, I. "Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries", *Waste Management*, **28**(11), pp. 2171-2176 (2008).
6. Oikonomou, N. and Mavridou, S. "Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires", *Cement and Concrete Composites*, **31**(6), pp. 403-407 (2009).
7. Al-Mutairi, N., Al-Rukaibi, F. and Bufarsan, A. "Effect of microsilica addition on compressive strength of rubberized concrete at elevated temperatures", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **12**(1), pp. 41-49 (2010).

8. Aiello, M.A. and Leuzzi, F. "Waste tyre rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state", *Waste Management*, **30**(8-9), pp. 1696-1704 (2010).
9. Wang, H.Y., Chen, B.T. and Wu, Y.W. "A study of the fresh properties of controlled low-strength rubber lightweight aggregate concrete (CLSRLC)", *Construction and Building Materials*, **41**, pp. 526-531 (2013).
10. Gupta, T., Chaudhary, S. and Sharma, R.K. "Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate", *Construction and Building Materials*, **73**, pp. 562-574 (2014).
11. Holmes, N., Browne, A. and Montague, C. "Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement", *Construction and Building Materials*, **73**, pp. 195-204 (2014).
12. Kaloush, K.E., Way, G.B. and Zhu, H. "Properties of crumb rubber concrete", *Transp. Res. Rec.*, **1914**, pp. 8-14 (2006).
13. Richardson, A.E., Coventry, K.A. and Ward, G. "Freeze/thaw protection of concrete with optimum rubber crumb content", *J. Clean Prod.*, **23**(1), pp. 96-103 (2012).
14. Najim, K. and Hall, M. "Crumb rubber aggregate coatings/pre-treatments and their effects on interfacial bonding, air entrapment and fracture toughness in selfcompacting rubberised concrete (SCRC)", *Mater. Struct.*, **46**(12), pp. 2029-2043 (2013).
15. Bignozzi, M.C. and Sandrolini, F. "Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, **36**(4), pp. 735-739 (2006).
16. Yogender, A., Vivek, V. and Bhupinder, S. "Rubberized concrete with crumb rubber", *Int. J. Sci.Res. (IJSR)*, **3**(5), pp. 1481-1483 (2014).
17. Eldin, N.N. and Ahmed, B. "Rubber-tire particulates as concrete aggregates", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **5**(4), pp. 478-496 (1996).
18. Balaha, M.M., Badawy, A.A.M. and Hashish, M. "Effect of using ground waste tire rubber as fine aggregate on the behaviour of concrete mixes", *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, **14**(6), pp. 427-435 (2007).
19. Fattuhi, N.I. and Clark, L.A. "Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber", *Construction and Building Materials*, **10**(4), pp. 229-236 (1996).
20. Zheng, L., Huo, X.S. and Yuan, Y. "Strength, modulus of elasticity, and brittleness index of rubberized concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **20**(11), pp. 692-699 (2008).
21. Kumaran, S., Mushule, N. and Lakshmipathy, M. "A Review on construction technologies that enables environmental protection: Rubberized concrete", *American J. of Engineering and Applied Sciences*, **1**(1), pp. 40-44 (2008).
22. Ganjian, E., Khorami, M. and Maghsoudi, A.A. "Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete", *Construction and Building Materials*, **23**(5), pp. 1828-1836 (2009).
23. Mavroulidou, M. and Figueiredo, J. "Discarded tyre rubber as concrete aggregate: a possible outlet for used tyres", *Global NEST Journal*, **12**(4), pp. 359-387 (2010).
24. Bharathi Murugan, R. and Natarajan, C. "Experimental study on rubberized concrete", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, **6**(5), pp.860-863 (May, 2015).
25. Lv, J., Zhou, T., Du, Q. and et al. "Effects of rubber particles on mechanical properties of lightweight aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, **91**, pp. 145-149 (2015).
26. Da Silva, F.M., Barbosa, L.A.G., Lintz, R.C.C. and et al. "Investigation on the properties of concrete tactile paving blocks made with recycled tire rubber", *Construction and Building Materials*, **91**, pp. 71-79 (2015).
27. Moustafa, A. and ElGawady, M.A. "Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber", *Construction and Building Materials*, **93**, pp. 249-256 (2015).
28. enazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T "Properties of tire rubber ash mortar", *Cement and Concrete Composites*, **26**(7), pp. 821-826 (2004).
29. Al-Akhras, N.M. and Smadi, M.M. "Properties of tire rubber ash mortar", *Cement and Concrete Composites*, **26**(7), pp. 821-826 (2004).
30. Nikoui, A., Dalvand, A., Sharbatdar, M.K. and et al. "Experimental and statistical investigation on mechanical properties and impact resistance of synthetic fiber reinforced concrete", *IJST, Transactions of Civil Engineering*, **39**(C2+), pp. 449-468 (2015).
31. Sharbatdar, M.K. and Noorbaran, M. "Improving of concrete mechanical and structural characteristics with replacing Pet bottles as fine aggregates", *Ferdousi Journal (Civil)*, **32**(3), pp. 67-82 (In Persian) (2019).
32. Topcu, I.B. "The properties of rubberized concretes", *Cement and Concrete Research*, **25**(2), pp. 304-310 (1995).
33. Reda Taha, M.M., El-Dieb, A.S. and et al. "Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **20**(10), pp. 640-649 (2008).
34. Ozbay, E., Lachemi, M. and Sevim, U.K. "Compressive strength, abrasion resistance and energy absorption capacity of rubberized concretes with and without slag", *Materials and Structures*, **44**(7), pp. 1297-1307 (2011).
35. Abu Bakar, B.H., Al-Tayeb, M.M., Ismail, H. and et al. "Impact energy for first crack of reinforced concrete with partial replacements of sand by rubber 1 mm particle size", *Advanced Materials Research*, **701**, pp. 261-264 (2013).
36. Al-Tayeba, M.M., Ismail, H., Dawoud, O. and et al. "Ultimate failure resistance of concrete with partial replacements of sand by waste plastic of vehicles under impact load", *International Journal of Sustainable Built Environment*, **6**(2), pp. 610-616 (Dec., 2017).
37. Namazzade, I. "Experimental and statistical evaluation of mechanical properties of fiber reinforced concrete specimen using steel - plastic fibers with emphasis on size effect", M.S. Thesis, Semnan University, Semnan, Iran (1397).