مهندسی عمران شریف (پاییز ۱۴۰۱)
دوره‌ی ۲ - ۳۸، شماره‌ی ۳/۲، ص. ۲۱-۳۲، (پژوهشی)

Original Article

ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپلین و سنگدانه‌های بازیافتی در مقاومت مکانیکی بتن

صادق قاسمی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
جلیل شفائی* (استادیار)
میثم جلالی (استادیار)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان

در سال‌های اخیر، نوع جدیدی از بتن مسلح با الیاف متشکل از چند نوع الیاف مختلف که به بتن مسلح به الیاف هیبریدی شهرت گرفته، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. هدف نوشتار حاضر، بررسی تأثیر نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی در مشخصات مکانیکی بتن مسلح به الیاف هیبریدی (الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن) بوده است. به همین منظور، بر روی بتن‌های مسلح به الیاف هیبریدی با نسبت‌های حجمی ۰/۰، ۰/۵ و ۱٪ درصد الیاف فولادی و ۰/۰ و ۰/۴ درصد الیاف پلی‌پروپیلن و نسبت جایگزینی ۰/۰، ۰/۲۵ و ۰/۵۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی، آزمایش‌های مقاومت فشاری، کشش برزیلی و خمشی توسط آزمون‌های خمش چهار نقطه‌یی انجام شده است. نتایج نشان داده‌اند که افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه‌ی بازیافتی منجر به کاهش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی شده است. در صورت افزودن الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی به بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن افزایش پیدا کرده است که الیاف فولادی در مقایسه با الیاف پلی‌پروپلین کارایی بیشتری در بهبود مقاومت‌های کششی و خمشی بتن داشته است. ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با الیاف فولادی موجب افزایش میزان جذب انرژی و افزایش طاقت خمشی بتن حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی شده است. همچنین بتن مسلح به الیاف هیبریدی بعد از شکسته شدن از هم گسیخته نشده و الیاف هیبریدی در حفظ پیوستگی بتن نقش مهمی داشته است.

واژگان کلیدی: بتن بازیافتی، سنگدانه‌ی بازیافتی، بتن حاوی الیاف هیبریدی، الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن.

sadeghghasemi7474@gmail.com
jshafaei@shahroodut.ac.ir
mjalali@shahroodut.ac.ir

۱. مقدمه

بتن، مخلوطی از سنگدانه‌های طبیعی، ماسه، سیمان، آب و مواد افزودنی است که با توجه به مزایایی همچون: شکل‌پذیری، دسترسی آسان، مقاومت در برابر حریق، و مقاومت فشاری بالا به‌عنوان دومین ماده‌ی پر مصرف دنیا بعد از آب شناخته می‌شود.[۱] افزایش مصرف بتن در ساخت و ساز، منجر به افزایش استفاده از ذخایر معادن طبیعی سنگدانه‌ها می‌شود. از طرفی، عواملی همچون: جنگ، سیل، زلزله و تغییر کاربری ساختمان‌های منجر به تولید بتن ضایعاتی می‌شود. جمع‌آوری و انبار حجم زیاد بتن‌های ضایعاتی پس از جنگ و زلزله، مشکلاتی از قبیل: کمبود مکان‌های انبار، تولید گرد و غبار، آلودگی محیط‌زیست و چشم‌اندازهای ناخوشایند را ایجاد می‌کند.[۲]

ساخت و ساز منجر به تولید ۳۰٪ ازگازهای دی‌اکسیدکربن جهان و استفاده از ۵۰٪ منابع طبیعی می‌شود. از سوی دیگر، ساخت و ساز در تولید زباله، نقش قابل توجهی دارد. برای مثال، میزان تولید زباله‌ی ساخت و ساز در اتحادیه‌ی اروپا تقریباً ۲۵ الی ۳۰ درصد از کل زباله‌های شهری است. همچنین اتحادیه‌ی اروپا، سالانه ۴۶۱ میلیون تن ضایعات ساختمانی تولید می‌کند که حدود ۶۰ الی ۷۰ درصد از ضایعات مذکور، متعلق به ضایعات بتنی است.[۳] حال اگر این حجم بالای مصالح سنگی می‌توانست بازیافت شود، دیگر معادن شن و ماسه به سرعت رو به کاهش نمی‌رود و به حفظ محیط‌زیست کمک شایانی می‌شود. امکان‌سنجی استفاده‌ی

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۴، اصلاحیه ۱۴۰۰/۳/۳۱، پذیرش ۱۴۰۱/۶/۱.
DOI:10.24200/J30.2022.56347.3074

مجدد از ضایعات بتنی، اولین بار توسط خلف و همکارانش (۲۰۰۷)، بعد از جنگ جهانی دوم انجام گرفت و بعد از آن به دلیل نیاز دنیا به بتن مقرون به صرفه، بررسی امکان استفاده‌ی مجدد از بتن‌های ضایعاتی درکشورهای مختلف گسترش یافت.[۴] طوقا والد احمد و همکارانش (۲۰۲۰)، در مطالعه‌ی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و میکروسیلیس، سنگدانه‌های بازیافتی با نسبت ۰/۰٪، ۵۰٪، ۱۰۰٪ جایگزین سنگدانه‌ی طبیعی در بتن شده است. تأثیر افزودن ۰/۰٪، ۰/۱۵، ۰/۳۰، ۰/۴۵، ۰/۶۰، ۰/۷۵، ۰/۹۰ درصد حجمی از الیاف پلی ـ پروپیلن به بتن را بررسی کردند و دریافتند که افزودن ۰ تا ۰/۶۰ درصد الیاف پلی‌پروپیلن به بتن حاوی سنگ‌دانه‌های بازیافتی باعث افزایش مقاومت مکانیکی می‌شود و افزودن بیشتر از ۰/۶۰٪ الیاف پلی‌پروپیلن باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود.[۵]

حسن جلیلان‌فر و همکارانش (۲۰۱۶)، در بررسی تأثیر الیاف فولادی بر بتن حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، نتایج آزمایش‌های بتن با نسبت جایگزینی ۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه‌های بازیافتی و افزودن ۰/۰٪، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد الیاف فولادی را ارائه کرده‌اند. افزودن ۰/۰٪ تا ۱ درصد الیاف فولادی به بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی باعث افزایش مقاومت مکانیکی و افزودن بیشتر از ۱٪ الیاف فولادی باعث کاهش مقاومت فشاری شده است. همچنین با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به دلیل افزایش خلل و فرج، مقاومت فشاری بتن کاهش یافته است.[۶]

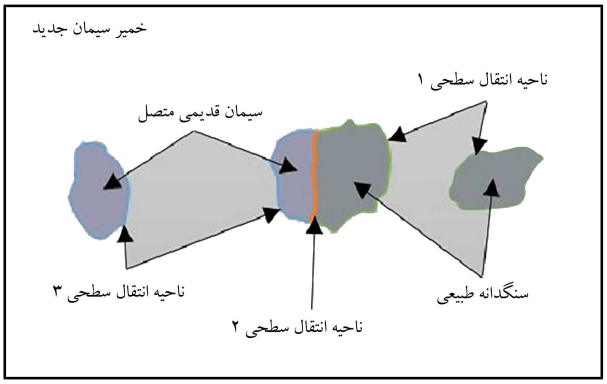
اندرو و مایرن (۲۰۱۴)، در بررسی تأثیر نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی در بتن با کارایی بالا، بتن مذکور را با استفاده از جایگزینی ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌ی طبیعی تولید کردند. ایشان از سه نوع سنگدانه‌ی بازیافتی که از خرد کردن بتن مادر با مقاومت فشاری ۱۰۰، ۶۰ و ۴۰ مگاپاسکال به‌دست آمده بودند، استفاده و خصوصیات فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن‌های بازیافتی و بتن با کارایی بالا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که با توجه به خصوصیات مکانیکی، در صورت تولید سنگدانه‌های بازیافتی از بتن مادر با کمینه‌ی مقاومت فشاری ۶۰ مگاپاسکال می‌توان از ۱۰۰٪ جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی را در تولید بتن با کارایی بالا استفاده کرد. هنگامی که خواص دوام در نظر گرفته می‌شود، می‌توان بیشینه‌ی ۵۰٪ سنگدانه‌ی بازیافتی با سنگدانه‌ی طبیعی را در تولید بتن با کارایی بالا جایگزین کرد.[۷]

نتایج مطالعات کوتالمیس آکشا و همکارانش (۲۰۱۵)، نشان می‌دهد که تأثیر اضافه‌کردن الیاف پلی‌پروپیلن در بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی در مقاومت فشاری نسبت به مقاومت کششی و خمشی بتن کمتر است. اضافه‌کردن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی باعث کاهش کارایی و امکان قالب‌ریزی بتن می‌شود.[۸] سنگدانه‌های بازیافتی را می‌توان از جمع‌آوری و خردکردن بتن‌های قدیمی در اندازه‌های مختلف تولید کرد. بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی (RAC)[۱] از جایگزینی کامل یا نسبی سنگدانه‌های بازیافتی[۲] (RCA) با سنگدانه‌ی طبیعی(NA)[۳] در بتن تولید می‌شود. سنگدانه‌ی بازیافتی از دو بخش سنگدانه‌ی طبیعی و ملات متصل تشکیل شده است. مطابق شکل ۱، بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی دارای ۳ ناحیه‌ی انتقال سطحی(ITZ)[۴] به این شرح است:

الف) ناحیه‌ی انتقال سطحی بین سنگدانه‌های طبیعی و خمیر سیمان جدید (ناحیه‌ی انتقال سطحی ۱)؛

ب) ناحیه‌ی انتقال سطحی بین سنگدانه‌ی طبیعی و خمیر سیمان قدیمی (ناحیه‌ی انتقال سطحی ۲)؛

ج) ناحیه‌ی انتقال سطحی بین خمیرهای سیمانی جدید و قدیمی (ناحیه‌ی انتقال سطحی ۳) است.[۹] نقص بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی در اتصال ضعیف فیزیکی و شیمیایی بین سنگدانه‌های طبیعی و خمیر سیمان قدیمی (ناحیه‌ی انتقال سطحی ۲) است. که باعث کاهش خواص مکانیکی و دوام می‌شود.[۹] علاوه بر این، ملات متصل نیز بخش ضعیف در بتن حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی است. وجود ملات متصل باعث افزایش تخلخل بتن حاوی سنگدانه‌ی بازیافتی نسبت به بتن حاوی سنگدانه‌ی طبیعی[۵] می‌شود.[۹]



شکل ۱. نمایش ریزساختار بتن حاوی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی.[۹]

با توجه به اهمیت مسئله‌ی محیط‌زیست و هزینه‌ی ساخت بتن، می‌توان با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی به دو هدف موردنظر رسید. اما جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی باعث کاهش خواص مکانیکی بتن می‌شود. برای جبران کاهش خواص مکانیکی بتن ناشی از جایگزینی سنگدانه‌ها از افزودن ترکیب الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن استفاده شده است. الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، پرمصرف‌ترین الیاف مورد استفاده در بتن محسوب می‌شوند که به منظور کنترل ترک‌های به وجود آمده به واسطه‌ی تغییرات حجمی ناشی از افت بتن و نیز جهت بهبود مشخصات مکانیکی بتن اعم از مقاومت‌های کششی و خمشی و ... استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، سعی برآن است گامی هر چند کوچک در راستای حفظ منابع مالی و محیط‌زیست برداشته شود.

۲. روش انجام پژوهش

در پژوهش حاضر، به ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن و سنگدانه‌های بازیافتی در مشخصات مکانیکی بتن پرداخته شده است. بنابراین، ابتدا سنگدانه‌های بازیافتی از خرد کردن و سرند کردن بتن مادر با مقاومت ۳۵تا ۴۵ مگاپاسکال با بیشینه‌ی سایز ۱۲/۵ میلی‌متر تولید شده‌اند. سپس آزمایش‌هایی برای تعیین خواص مکانیکی سنگدانه‌های بازیافتی و مقایسه‌ی آن‌ها با سنگدانه‌های طبیعی صورت گرفته است. سه نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی (۰، ۲۵ و ۵۰ درصد وزنی) همراه سه مقدار مختلف حجم الیاف فولادی (۰/۰، ۰/۵ و ۱ درصد) و دو مقدار مختلف حجم الیاف پلی‌پروپیلن (۰/۰ و ۰/۴ درصد) برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر استفاده شده است. در مجموع، بر روی ۱۲ نمونه‌ی طرح اختلاط در سن ۲۸ روزه، آزمایش‌های مقاومت فشاری، کشش برزیلی و خمشی چهارنقطه‌یی صورت گرفته است. در ادامه، مصالح مصرفی در پژوهش حاضر، طرح اختلاط نمونه‌ها، شرایط ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی و تفسیر نتایج آزمایش‌ها تشریح شده است.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی.

SiO_2	MgO	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	So_3
٪۲۱/۱۱	٪۱/۳۷	٪۶۳/۶۳	٪۱۴/۴۸	٪۳/۹۱	٪۲/۵۸

جدول ۲. مشخصات فیزیکی سیمان مصرفی.

چگالی (g/cm^3)	سطح مخصوص (cm^2/g)	مقاومت فشاری (MPa)
۳/۱	۳۱۵۵	۴۳۵

۳. مصالح مصرفی

مصالح مصرفی در پژوهش حاضر: آب، سیمان، سنگدانه‌ها، الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن بوده است. ویژگی مصالح مصرفی به این شرح بوده است:

۱.۳. آب

آب استفاده شده در طرح اختلاط بتن، آب شُرب شهرستان شاهرود بوده است. همچنین آب مصرفی جهت عمل‌آوری نمونه‌های بتنی، آب بدون طاقت با مقدار ۴۰ گرم آهک در هر مترمکعب بوده است.

۲.۳. سیمان

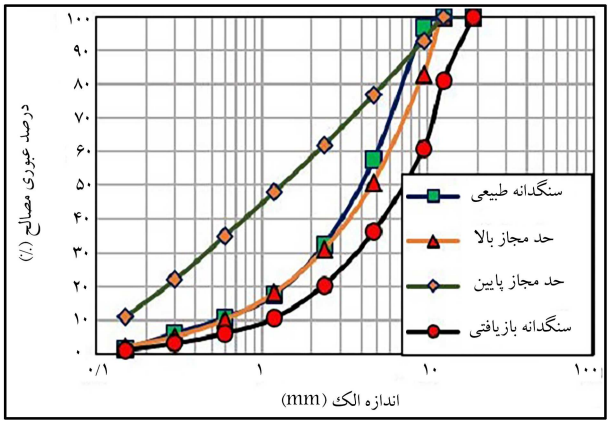
سیمان مصرفی در پژوهش حاضر، سیمان تیپ II (اصلاح شده) شاهرود است که مشخصات شیمیایی و فیزیکی آن به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

۳.۳. سنگدانه‌ها

در پژوهش حاضر از دو نوع سنگدانه‌ی طبیعی و بازیافتی استفاده شده است. سنگدانه‌های طبیعی (NA) مصرفی در پروژه‌ی حاضر از معادن سنگ شاهرود تهیه شده است. ماسه‌ی مصرفی از نوع ماسه‌ی رودخانه‌یی (۴/۷۵-۰ میلی‌متر) و شن مصرفی از نوع شن طبیعی با بیشینه‌ی سایز ۱۲/۵ میلی‌متر بوده است. همچنین مدول نرمی ماسه‌ی مصرفی ۳/۹ بوده است. سنگدانه‌های بازیافتی (RCA)، از خرد کردن و سرند کردن بتن مادر با مقاومت ۳۵ تا ۴۵ مگاپاسکال و نمونه‌های مکعبی و استوانه‌یی به ترتیب با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ و ۱۵×۳۰ سانتی‌متری تولید شده است. نمونه‌های بتنی مادر، ابتدا توسط چکش به بیشینه‌ی بُعد ۷ سانتی‌متر شکسته، سپس توسط ماشین سنگ‌شکن فکی خُرد و در آخر توسط دستگاه شیکر لرزاننده الک شده‌اند. در شکل ۲، منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ی بازیافتی و طبیعی مصرفی مشاهده می‌شود که مطابق آن، درصد عبوری سنگ‌دانه‌های بازیافتی کمتر از سنگدانه‌های طبیعی بوده است؛ که نشان می‌دهد بافت سنگدانه‌های بازیافتی، نسبت به سنگدانه‌های طبیعی خشن‌تر بوده و همچنین منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌ی بازیافتی در خارج از محدوده‌ی استاندارد $ASTM\,C33/C33M$ قرار گرفته است.[۱۰] لازم به ذکر است شکل ۲، نشان‌دهنده‌ی منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های بازیافتی بعد از خرد و سرند کردن است و منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های بازیافتی استفاده شده در پژوهش حاضر مطابق دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی اصلاح شده است.

۴.۳. الیاف

در پژوهش حاضر از دو نوع الیاف (ماکروفولادی و میکروپلی‌پروپیلن) استفاده شده است، که مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. همچنین



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی.[۱۰]

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف‌های مصرفی.

جنس الیاف	فولادی	پلی‌پروپیلن
نوع الیاف	دو سر قلاب	ساده
طول (mm)	۳۵	۱/۸
قطر (mm)	۰/۸	۰/۲
نسبت طول به قطر* (L/D)	۶۲/۵	۹۰
چگالی (Kg/cm)	۷/۸۵	۰/۹۱
تنش تسلیم (MPa)	۲۱۰۰	۲۰
مدول کشسانی (MPa)	۲۰۰۰۰۰	۱۱۴۰

*Length/Diameter

شکل ۳. شماتیک الیاف فولادی.

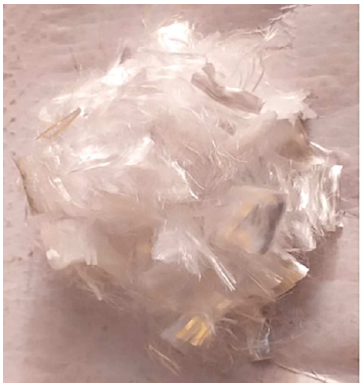
در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب، شماتیک الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن مصرفی مشاهده می‌شود.

۴. طرح اختلاط

در پروژه‌ی آزمایشگاهی حاضر، طرح اختلاط نمونه‌های بتنی براساس طرح ملی بتن ایران به روش وزنی و برای سنگدانه‌های طبیعی محاسبه شده است. برای جایگزینی سنگدانه‌ها از نسبت وزنی و برای افزودن الیاف به نمونه‌ها، از نسبت حجمی استفاده شده است. در جدول ۴، جزئیات طرح اختلاط بتن شاهد ارائه شده است. با توجه به اینکه سنگدانه‌های مصرفی در پروژه‌ی حاضر در هنگام اختلاط در سطح رطوبت کارگاهی بوده و در وضعیت اشباع با سطح خشک قرار نداشته‌اند و همچنین

جدول ۴. طرح اختلاط بتن شاهد.

نمونه	آب (Kg)	سیمان (Kg)	W/C	درشت دانه (Kg)		ریزدانه (Kg)	
				طبیعی	بازیافتی	طبیعی	بازیافتی
R۰	۱۸۵	۴۰۰	۰/۴۳	۵۳۰	۰/۰	۷۹۴	۰/۰
R۲۵	۱۸۹	۴۰۰	۰/۴۳	۳۹۷	۱۳۳	۷۹۴	۰/۰
R۵۰	۱۹۳	۴۰۰	۰/۴۳	۲۶۵	۲۶۵	۷۹۴	۰/۰



شکل ۴. شماتیک الیاف پلی‌پروپیلن.

شکل ۵. وسایل استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها.

سنگدانه‌های بازیافتی درصد جذب آب بیشتر (۴/۴۵٪ جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی و ۰/۹۵٪ جذب آب سنگدانه‌های طبیعی) و درصد رطوبت کارگاهی کمتری (۰/۰۰٪ رطوبت سنگدانه‌های بازیافتی و ۰/۹۵٪ رطوبت سنگدانه‌های طبیعی) نسبت به سنگدانه‌های طبیعی داشته‌اند؛ بنابراین، جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی موجب کاهش کارایی بتن می‌شود. برای رفع مشکل اشاره شده و همچنین اشباع با سطح خشک قرار دادن سنگدانه‌های بازیافتی در نمونه‌های بتنی ۲۵ و ۵۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی، مقدار آب آزاد بتن اصلاح شده است که به ترتیب ۴ و ۸ کیلوگرم آب در مترمکعب به آب آزاد بتن شاهد جهت اشباع کردن سنگدانه‌های بازیافتی و جلوگیری ازکاهش کارایی بتن اضافه شده است.

نماد طرح اختلاط بتن حاوی درشت‌دانه‌ی بازیافتی مسلح به الیاف هیبریدی به صورت (عدد S ـ عدد P ـ عدد R) است. عدد R، نشان‌دهنده‌ی درصد وزنی جایگزینی درشت‌دانه‌ی بازیافتی با سنگدانه‌ی طبیعی، عدد P نشان‌دهنده‌ی درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن و عدد S نشان‌دهنده‌ی درصد حجمی الیاف فولادی است. به عنوان مثال، $R25-P4-S5$ نشان‌دهنده‌ی نمونه‌ی بتنی حاوی ۲۵٪ درشت‌دانه‌ی بازیافتی با ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۵٪ الیاف فولادی است. لازم به ذکر است در پژوهش حاضر، جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی فقط در محدوده‌ی درشت‌دانه‌ها انجام شده است. به عنوان مثال، بتن با نسبت جایگزینی ۲۵٪ سنگدانه‌ی بازیافتی به این معناست که: بتن حاوی ۱۰۰٪ ریزدانه‌ی طبیعی، ۷۵٪ درشت‌دانه‌ی طبیعی و ۲۵٪ درشت‌دانه‌ی بازیافتی است.

۵. شرایط ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی

در برنامه‌ی آزمایشگاهی ذکر شده، ساخت و عمل‌آوری آزمونه‌ها مطابق با استاندارد ملی ایران شماره‌ی ۵۸۱ انجام شده است. برای ساخت نمونه‌های بتنی، ابتدا مصالح مصرفی توزین و مطابق شکل ۵، وسایل ساخت و عمل‌آوری فراهم شده است. سپس وسایل، اعم از: میکسر، بیلچه، تخماق، سطل و ... شسته و در معرض هوا خشک شده‌اند، تا از عاری بودن آن‌ها ازگرد و غبار اطمینان حاصل شود. به مدت ۲ دقیقه، سنگدانه‌های ریز و درشت در میکسر مخلوط شده‌اند. سپس سیمان به مخلوط سنگدانه اضافه و به مدت دو دقیقه مخلوط شده است. آب به آرامی به مخلوط اضافه شده است، تا ازکلوخه شدن آن جلوگیری شود. بعد از اضافه کردن کل آب به مخلوط، عمل اختلاط به مدت ۳ دقیقه درون میکسر انجام شده است. سپس الیاف‌ها، به صورت پراکنده و به آرامی به مخلوط اضافه و به مدت ۵ دقیقه درون میکسر مخلوط شده‌اند. بعد از مخلوط کردن مصالح در میکسر، مصالح از میکسر خارج شده، در سطلی ریخته، و درون سطل بتن با بیلچه مخلوط شده‌اند، تا از یکنواخت پخش شدن مصالح اطمینان حاصل شود.

برای هر آزمایش، سه نمونه‌ی آزمایشی ساخت شده و نتایج ارائه شده در بخش بعدی، حاصل میانگین سه نمونه‌ی آزمایشی است. برای ساخت نمونه‌های فشاری و کششی از قالب‌های استوانه‌یی ۲۰۰×۱۰۰ میلی‌متری، همچنین برای ساخت نمونه‌های خمشی از منشورهایی به طول ۳۵۰ میلی‌متر و مقطع ۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. ابتدا وجه‌های داخلی قالب‌های استوانه‌یی و منشوری با روغن قالب، روغن‌کاری شده است. سپس قالب در دو لایه، بتن‌ریزی و هرلایه با تخماق، ۲۵ ضربه کوبیده شده است. در هرلایه، دو ضربه با چکش لاستیکی به هر وجه بیرونی بدنه‌ی قالب زده شد، تا حباب هوای موجود در بتن خارج شود. بعد از اتمام عملیات تراکم و قالب‌ریزی، سطح قالب‌ها باگونی مرطوب جهت جلوگیری از تبخیر آب نمونه‌ها پوشانده شد. نمونه‌های بتنی بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شدند و به مدت ۲۸ روز در حوضچه‌ی عمل‌آوری آب قرارگرفتند. همچنین نمونه‌های بتنی پس از خارج شدن از حوضچه‌ی عمل‌آوری، به مدت ۱ ساعت در هوای آزاد قرارگرفتند و سپس آزمایش شدند. برای گپاینق[۶] سطح ناصاف نمونه‌ها در آزمایش فشاری ازگچ در ترکیب خمیر سیمان در یک لایه‌ی نازک (ضخامت ۱ الی ۲ سانتی‌متر) استفاده شده است. لازم به ذکر است گچ فقط برای تنظیم زمان گیرش خمیر سیمان استفاده شده و همچنین نتایج گپاینق ترکیب خمیر سیمان و گچ با گپاینق گوگرد مقایسه شده است، که نتایج مشابه‌یی به دست آمده است.

جدول ۵. درصد جذب آب و وزن مخصوص سنگدانه‌ها.

شرح	طبیعی		شن بازیافتی
	ماسه	شن	
جرم مصالح خشک در هوا (Kg)	۱/۱۱	۵/۲۱	۴/۵۱
چگالی توده‌یی مصالح خشک (Kg/m^3)	۱۶۸۱/۱۱	۱۵۶۴/۳۷	۱۳۳۸/۹۸
چگالی توده‌یی مصالح اشباع با سطح خشک (Kg/m^3)	۱۷۹۴/۷۵	۱۵۶۱/۰۶	۱۴۰۰
درصد جذب آب	٪۶/۷۶	٪۰/۹۵	٪۴/۴۵

جدول ۶. درصد رطوبت سنگ‌دانه‌ها.

سنگدانه	وزن خالص (Kg)		درصد رطوبت
	مرطوب	خشک	
ماسه طبیعی	۲/۰۹۷	۱/۹۸۱	٪۵/۸۵
شن طبیعی	۴/۱۹۴	۴/۱۶۸	٪۰/۶۲
شن بازیافتی	۴/۱۰۰	۴/۱۰۰	٪۰/۰

۶. تفسیر نتایج آزمایش

در بخش کنونی، به بررسی نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی سنگ‌دانه‌ها و نمونه‌های بتنی پرداخته شده است.

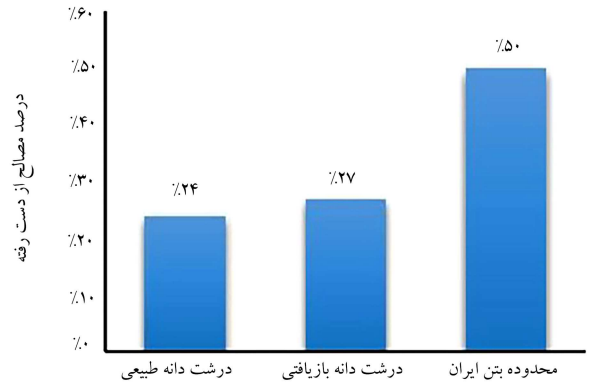
۱.۶. تفسیر نتایج آزمایش سنگدانه‌ها

۱.۱.۶. نتایج آزمایش جذب آب و چگالی سنگدانه‌ها

مطابق آیین‌نامه‌ی ASTM C۲۹/C۲۹M ، درصد جذب آب و وزن مخصوص سنگدانه‌های مصرفی اندازه‌گیری شده است.[۱۱] نتایج آزمایش درصد جذب آب و چگالی توده‌یی سنگدانه‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به اینکه ملات متصل در سنگدانه‌های بازیافتی، وزن مخصوص کمتر و خلل فرج بیشتری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی داشته‌اند، ملات متصل در سنگدانه‌های بازیافتی باعث کاهش ۱۴٪ چگالی خشک، کاهش ۱۰٪ چگالی اشباع با سطح خشک، و افزایش ۳۶۸٪ جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به طبیعی شده است.

۲.۱.۶. نتایج آزمایش رطوبت کلی سنگدانه‌ها

برای محاسبه‌ی آب آزاد در طرح اختلاط بتن، محاسبه‌ی درصد رطوبت سنگدانه‌ها، امری ضروری است. به همین دلیل مطابق آیین‌نامه‌ی ASTM C۵۶۶/C۵۶۶M، درصد رطوبت کلی سنگدانه‌های مصرفی اندازه‌گیری شده است.[۱۲] نتایج آزمایش درصد رطوبت سنگدانه‌ها در شرایط کارگاهی در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که سنگدانه‌های بازیافتی در شرایط کارگاهی در حالت تقریباً خشک بوده و سنگدانه‌های طبیعی بیش از ۵۰٪ رطوبت داشته‌اند. علت خشک بودن سنگدانه‌های بازیافتی در شرایط کارگاهی به دو دلیل است: ۱) بتن مادر سنگدانه‌های بازیافتی در حالت خشک بوده، و ۲) سنگدانه‌های بازیافتی ۱ سال در آزمایشگاه نگهداری شده‌اند.



شکل ۶. منحنی درصد سایش درشت‌دانه‌ها.

شکل ۷. درشت‌دانه‌ها پس از آزمایش لس‌آنجلس.

۳.۱.۶. درصد سایش درشت‌دانه

مطابق آیین‌نامه‌ی ASTM C۱۳۱/C۱۳۱M، درصد سایش درشت‌دانه‌های مصرفی اندازه‌گیری شده است.[۱۳] نتایج آزمایش درصد سایشی درشت‌دانه‌های مصرفی در شکل ۶ مشاهده می‌شود. نتایج آزمایش نشان می‌دهند که شن‌های بازیافتی، ۱۳/۹٪ نسبت به شن‌های طبیعی، درصد سایش بیشتری داشته‌اند که علت آن کمتر بودن مقاومت سایشی ملات متصل در درشت‌دانه‌های بازیافتی نسبت به درشت‌دانه‌های طبیعی است. همچنین درصد مصالح از دست رفته‌ی سنگدانه‌های بازیافتی در محدوده‌ی مجاز آیین‌نامه‌ی بتن ایران (کمتر از ۵۰ درصد) بوده است. در نتیجه، امکان استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی از نقطه‌نظر سایشی در اعضاء سازه‌یی بلامانع است. همچنین مطابق شکل ۷ و بازدید عینی، شن‌های بازیافتی نسبت به شن‌های طبیعی خردتر شده‌اند، اما از الک ۷ میلی‌متر عبور نکرده‌اند.

۲.۶. تفسیر نتایج آزمایش نمونه‌های بتن

۱.۲.۶. وزن مخصوص بتن تازه

با توجه به اینکه وزن مخصوص بتن‌های بدون الیاف و بتن‌های حاوی بیشینه‌ی ۲٪ حجمی الیاف مشابه است، مطابق با استاندارد ASTM C۱۳۸/C۱۳۸M ، برای محاسبه‌ی وزن مخصوص بتن تازه می‌توان از رابطه‌ی ۱ استفاده کرد:[۱۴]

$$T = \frac{W - D}{V} \qquad (۱)$$

که در آن، T وزن مخصوص بتن تازه بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب، W وزن قالب حاوی بتن تازه بر حسب کیلوگرم، D وزن قالب بدون بتن تازه بر حسب کیلوگرم و V

جدول ۷. وزن مخصوص بتن تازه.

نمونه	وزن مخصوص (kg/m^3)	تغییرات نسبت به بتن شاهد (٪)
R۰ – P۰ – S۰	۲۳۹۵/۴۲۹	
R۰ – P/۴ – S۰	۲۳۷۱/۴۲۹	−۱/۰۰
R۰ – P۰۴ – S/۴	۲۳۸۰/۸۵۷	−۰/۶۰۸
R۰ – P۰۴ – S۱	۲۴۳۵/۷۱۴	۱/۶۸
R۲۵ – P۰ – S۰	۲۳۷۴/۸۵۷	−۰/۸۵۹
R۲۵ – P۰۴ – S۰	۲۳۶۶/۸۵۷	−۱/۱۹۳
R۲۵ – P۰۴ – S۰۵	۲۳۸۰/۰۰۰	−۰/۶۴۴
R۲۵ – P۰۴ – S۱	۲۴۳۳/۴۲۹	۱/۵۸۶۴
R۵۰ – P۰ – S۰	۲۳۶۵/۷۱۴	−۱/۲۴
R۵۰ – P۰۴ – S۰	۲۳۰۸/۵۷۱	−۳/۶۲۶
R۵۰ – P۰۴ – S۰۵	۲۳۷۷/۱۴۳	−۰/۷۶۳
R۵۰ – P۰۴ – S۱	۲۳۸۸/۵۷۱	−۰/۲۸۶

حجم قالب بر حسب مترمکعب است. نتایج وزن مخصوص بتن تازه در جدول ۷ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که وزن مخصوص اجزاء مصرفی بتن در وزن مخصوص بتن تازه، تأثیر مستقیم دارد. به عنوان مثال، در صورت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی، چون سنگدانه‌های بازیافتی وزن مخصوص کمتری دارند، باعث کاهش وزن مخصوص بتن تازه می‌شوند. همچنین در صورت استفاده از الیاف فولادی که وزن مخصوص بالاتری نسبت به بقیه‌ی اجزاء بتن دارند، وزن مخصوص بتن تازه افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی تا ۵۰٪ و افزودن الیاف (الیاف فولادی یا پلی‌پروپیلن) تا ۱٪، باعث افزایش یا کاهش کمتر از ۵٪ وزن مخصوص بتن تازه می‌شود، که قابل صرف‌نظر است.

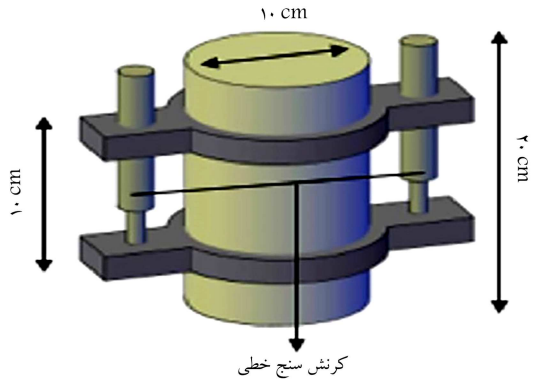
۲.۲.۶. مقاومت فشاری

یکی از مرسوم‌ترین و مهم‌ترین معیارها برای بررسی کیفیت بتن، آزمایش مقاومت فشاری است. همچنین عواملی همچون: نسبت آب به سیمان، خواص مکانیکی و فیزیکی سنگدانه‌ها و سیمان و... در مقاومت فشاری بتن، تأثیر فراوانی دارد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن در جدول ۸ ارائه شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده، جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی به ترتیب باعث کاهش ۱۴/۵۲٪ و ۱۵/۳٪ درصد مقاومت فشاری شده است.

افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌ی شاهد و حاوی ۲۵٪ سنگ‌دانه‌ی بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۱/۵۲٪ و ۱/۵۴٪ درصد مقاومت فشاری بتن شده است که نشان می‌دهد الیاف پلی‌پروپیلن، تأثیر ناچیزی در مقاومت فشاری بتن دارند. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱ درصد الیاف فولادی به بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌ی بازیافتی به ترتیب ۷/۸٪ و ۴/۴۵٪ درصد مقاومت فشاری را بهبود بخشیده است. لازم به ذکر است افزودن ۱٪ الیاف فولادی به همراه ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن باعث کاهش کارایی بتن می‌شود و امکان پدیده‌ی گلوله شدن (بالینگ) را افزایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که جایگزینی سنگدانه‌ی بازیافتی تأثیر بیشتری نسبت به الیاف در مقاومت فشاری بتن دارد و نمی‌توان با افزودن همزمان الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی، تأثیر سنگدانه‌ی بازیافتی را در مقاومت فشاری جبران کرد.

جدول ۸. مقاومت فشاری.

نمونه	نیرو (N)	مقاومت فشاری (MPa)	تغییرات نسبت به بتن شاهد (٪)
R۰ – P۰ – S۰	۲۸۵۰۱۳	۳۶/۲۹	
R۰ – P۰۴ – S۰	۲۸۹۳۳۲	۳۶/۸۴	۱/۵۲
R۰ – P۰۴ – S۰۵	۲۷۲۶۰۴	۳۴/۷۱	−۴/۳۵
R۰ – P۰۴ – S۱	۲۹۵۳۰۱	۳۷/۶	۳/۶۱
R۲۵ – P۰ – S۰	۲۴۳۶۲۳	۳۱/۰۲	−۱۴/۵۲
R۲۵ – P۰ – S۰	۲۴۷۳۹۳	۳۱/۵	−۱۳/۲۰
R۲۵ – P۰۴ – S۰۵	۲۶۲۷۰۸	۳۳/۴۵	۷/۸۳
R۲۵ – P۰۴ – S۱	۲۵۴۲۲۵	۳۲/۳۷	−۷/۶۹
R۵۰ – P۰ – S۰	۲۴۱۸۹۶	۳۰/۸	−۱۵/۱۳
R۵۰ – P۰۴ – S۰	۲۴۵۰۳۷	۳۳/۵۵	−۸/۰۳
R۵۰ – P۰۴ – S۰۵	۲۵۵۴۸۲	۳۲/۵۳	−۱۰/۳۶
R۵۰ – P۰۴ – S۱	۲۱۱۱۰۹	۲۶/۸۸	−۲۵/۹۳



شکل ۸. نصب کرنش‌سنج خطی بر روی نمونه‌ی آزمایشگاهی درمدول کشسانی.

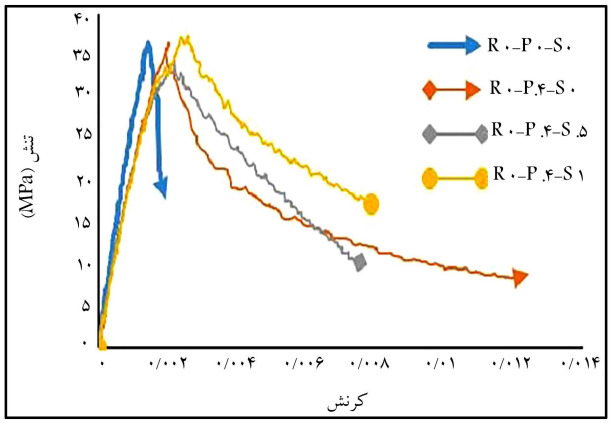
۳.۲.۶. بررسی مدول کشسانی و منحنی تنش ـ کرنش

مطابق آیین‌نامه‌ی ASTM C۴۶۹/C۴۶۹M ، مدول کشسانی رابطه‌ی بین تنش ـ کرنش، معیاری برای صلبیت مواد جامد است. می‌توان مدول کشسانی را مطابق رابطه‌ی ۲ محاسبه کرد.[۱۵]

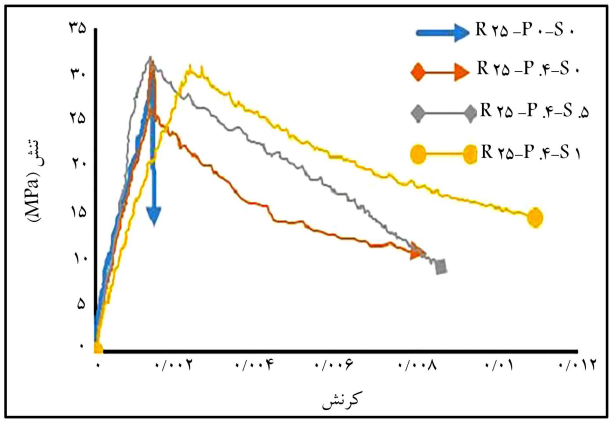
$$E = \frac{s_۲ - s_۱}{\varepsilon_۲ - ۰/۰۰۰۰۵} \qquad (۲)$$

که در آن، $s_۲$ تنش متناظر با ۴۰٪ بار نهایی، $s_۱$ تنش اولیه و $s_۲$ کرنش متناظر با تنش $s_۲$ هستند. برای محاسبه‌ی دقیق کرنش از دو کرنش‌سنج خطی[۷](LVDT) با دقت ۰/۰۰۵ میلی‌متر مطابق شکل ۸ استفاده شده است که دو کرنش‌سنج خطی توسط دو ابزار ثابت به فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متر از هم در پهلوی نمونه نگه داشته و نمونه به‌صورت تغییرمکان کنترل (DC)[۸] با سرعت بارگذاری ۱ میلی‌متر بر دقیقه، تحت بار فشاری بارگذاری شده است.

در شکل ۹، منحنی‌های تنش ـ کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی بدون سنگدانه‌ی بازیافتی مشاهده می‌شود که مطابق آن، افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن، تأثیر چندانی در مقاومت فشاری بتن نمونه‌ی شاهد نگذاشته است. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱ درصد الیاف فولادی به ترتیب باعث کاهش حدود ۴٪ و افزایش ۳٪ مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد شده است، که نشان می‌دهد افزودن الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، تأثیر قابل توجهی در مقاومت فشاری بتن شاهد ندارد.



شکل ۹. منحنی تنش ـ کرنش نمونه‌های فشاری بدون سنگدانه‌ی بازیافتی.

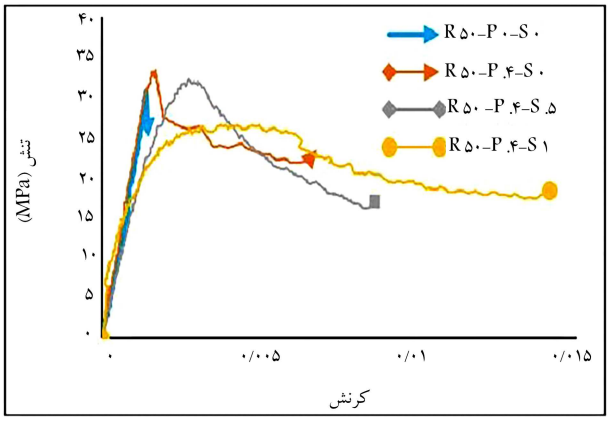


شکل ۱۰. منحنی‌های تنش ـ کرنش نمونه‌های فشاری حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌ی بازیافتی.

در شکل ۱۰، منحنی‌های تنش ـ کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی مشاهده می‌شود که مطابق آن، افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن، تأثیر چندانی در مقاومت فشاری بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی ندارد. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱ درصد الیاف فولادی به ترتیب باعث افزایش ۷/۸٪ و ۴ درصد مقاومت فشاری بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی می‌شود.

در شکل ۱۱، منحنی‌های تنش ـ کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی مشاهده می‌شود که مطابق آن، افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش ۷/۸٪ مقاومت فشاری بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی شده است. همچنین ترکیب ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱ درصد الیاف فولادی به ترتیب باعث افزایش ۵/۶٪ و کاهش ۱۴/۶ درصدی مقاومت فشاری بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی شده است. کاهش ۶/۱۴ درصدی مقاومت فشاری نمونه‌ی حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌ی بازیافتی و ۱٪ الیاف فولادی با ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن، احتمالاً به‌خاطر پدیده‌ی گلوله شدن الیاف‌هاست.

مطابق شکل‌های ۹ الی ۱۱، مسلح کردن بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی به الیاف هیبریدی (الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن)، تأثیری در مقاومت فشاری بتن نداشته است، اما باعث بهبود رفتار پس از ترک بتن شده است، که نشان می‌دهد الیاف فولادی نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن، کارایی بهتری دارند. نتایج بررسی مدول کشسانی نمونه‌های بتنی در جدول ۹ ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد



شکل ۱۱. منحنی‌های تنش ـ کرنش نمونه‌های فشاری حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌ی بازیافتی.

جدول ۹. مدول کشسانی.

نمونه	مدول کشسانی (MPa)	تغییرات نسبت به بتن شاهد (٪)
R۰ – P۰ – S۰	۲۹۰۰۰	
R۰ – P۰.۴ – S۰	۲۳۰۰۰	−۲۰/۶۹
R۰ – P۰.۴ – S۰.۵	۲۴۴۵۴	−۱۵/۶۷
R۰ – P۰.۴ – S۱	۲۳۳۶۲	−۱۹/۴۴
R۲۵ – P۰ – S۰	۲۲۳۱۰	−۲۳/۰۷
R۲۵ – P۰.۴ – S۰	۲۵۵۶۰	−۱۱/۸۶
R۲۵ – P۰.۴ – S۰.۵	۲۵۰۷۷	−۱۳/۵۲
R۲۵ – P۰.۴ – S۱	۱۵۸۳۳	−۴۵/۴۰
R۵۰ – P۰ – S۰	۱۸۷۰۰	−۳۵/۵۱
R۵۰ – P۰.۴ – S۰	۲۲۲۳۵	−۲۲/۳۲
R۵۰ – P۰.۴ – S۰.۵	۱۷۰۳۳	−۴۱/۲۶
R۵۰ – P۰.۴ – S۱	۳۰۳۷۱	+۴/۷۲

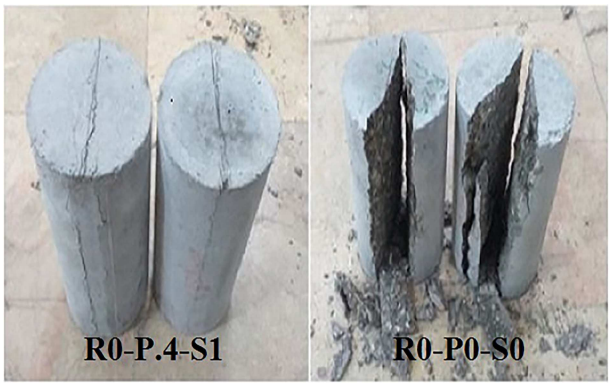
که جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و افزودن الیاف، باعث کاهش مدول کشسانی بتن شده است. جایگزینی ۲۵ و ۵۰ درصد سنگ‌دانه‌ی بازیافتی به ترتیب باعث کاهش ۲۳ و ۳۵ درصد مدول کشسانی بتن شده است. همچنین افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن شاهد، باعث کاهش ۲۰٪ مدول کشسانی شده است. ترکیب افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵ و ۱ درصد الیاف فولادی به بتن شاهد به ترتیب باعث کاهش ۱۵ و ۱۹ درصدی مدول کشسانی شده است.

۴.۲.۶. آزمایش مقاومت شکافت کششی (کشش برزیلی) بتن

نتایج آزمایش مقاومت کشش برزیلی بتن در جدول ۱۰ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، تأثیر کمتری در کاهش مقاومت کشش برزیلی نسبت به مقاومت فشاری داشته است. به عنوان مثال، جایگزینی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی، باعث کاهش ۱۴/۵۲٪ مقاومت فشاری می‌شود؛ اما باعث کاهش ۳/۶۵٪ مقاومت کششی می‌شود. الیاف پلی‌پروپیلن تأثیر کمتری نسبت به الیاف فولادی در بهبود مقاومت کششی دارند. به عنوان مثال، افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن شاهد، باعث افزایش ۱/۴۶٪ مقاومت کششی می‌شود. در صورتی که افزودن ۱٪ الیاف فولادی به بتن بدون سنگ‌دانه‌ی بازیافتی حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش ۲۶/۴۳٪

جدول ۱۰. مقاومت کششی.

نمونه	نیرو (N)	مقاومت کششی (MPa)	تغییرات نسبت به بتن شاهد (٪)
R۰ – P۰ – S۰	۱۳۷۰۰۰	۱/۹۴	
R۰ – P۰۴ – S۰	۱۳۹۰۰۰	۱/۹۷	٪۱/۴۶
R۰ – P۰۴ – S۰۵	۱۴۰۰۰۰	۱/۹۸	٪۲/۱۹
R۰ – P۰۴ – S۱	۱۷۳۲۱۰	۲/۴۵	٪۲۶/۴۳
R۲۵ – P۰ – S۰	۱۳۲۰۰۰	۱/۸۷	٪ – ۳/۶۵
R۲۵ – P۰۴ – S۰	۱۳۸۰۰۰	۱/۹۵	٪۰/۷۳
R۲۵ – P۰۴ – S۰۵	۱۳۴۰۷۱	۱/۹۰	٪ – ۲/۱۴
R۲۵ – P۰۴ – S۱	۱۵۰۶۰۰	۲/۱۳	٪۹/۹۳
R۵۰ – P۰ – S۰	۱۱۸۰۸۰	۱/۶۷	٪ – ۱۳/۸۱
R۵۰ – P۰۴ – S۰	۱۳۲۰۰۰	۱/۸۷	٪ – ۳/۶۵
R۵۰ – P۰۴ – S۰۵	۱۳۳۰۰۰	۱/۸۸	٪ – ۲/۹۲
R۵۰ – P۰۴ – S۱	۱۵۹۰۸۵	۲/۲۵	٪۱۶/۱۲

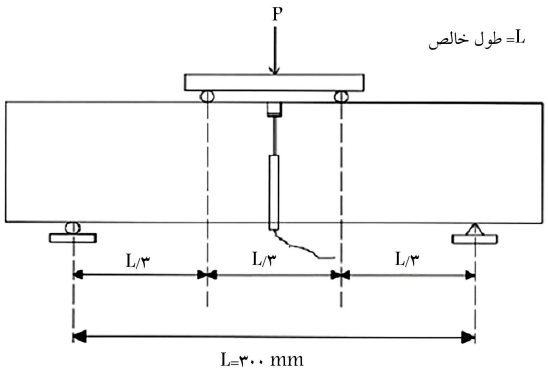


شکل ۱۲. تاثیر الیاف بر پیوستگی بتن.

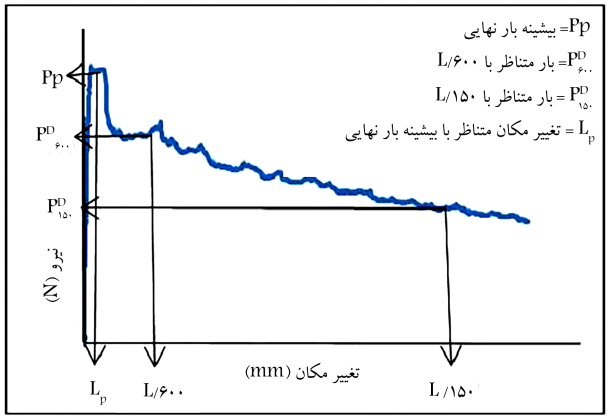
مقاومت کشش برزیلی می‌شود. مطابق شکل ۱۲، افزودن الیاف فولادی به بتن در آزمایش کشش برزیلی به حفظ پیوستگی بتن کمک می‌کند و مانع ازگسیختگی آن می‌شود.

۵.۲.۶. بررسی آزمایش خمش چهارنقطه‌یی

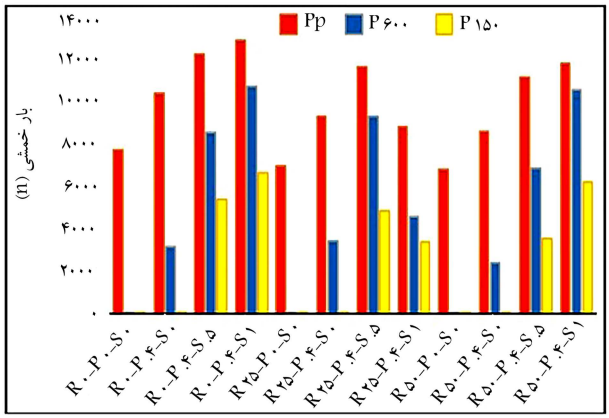
مطابق آیین‌نامه‌ی ASTM C۱۶۰۹/C۱۶۰۹M، آزمایش مقاومت خمشی بتن الیافی اندازه‌گیری شده است.[۱۶] برای محاسبه‌ی دقیق تغییرمکان وسط تیر از دو LVDT با دقت ۰/۰۰۵ میلی‌متر در دو وجه کناری تیر مطابق شکل ۱۳ استفاده شده است که آن ها در هر ثانیه، تغییرمکان وسط تیر را ثبت می‌کردند و تغییرمکان ارائه شده در نمودار، از میانگین تغییرمکان ثبت‌شده توسط LVDTها به‌دست آمده است. همچنین برای حذف برش و ایجاد خمش ثابت در میانه‌ی تیر از محور بارگذاری دو نقطه‌یی در طول $\frac{1}{3}$ و $\frac{2}{3}$ استفاده شده است. نمونه به صورت تغییرمکان کنترل تا جابه‌جایی $L/۱۵۰$ بارگذاری شده است. با برداشت نیرو از ماشین آزمایش و تغییرمکان از سیستم ثبت اطلاعات، منحنی نیرو ـ تغییرمکان ترسیم شده است. مطابق شکل ۱۴، می‌توان بیشینه‌ی بار نهایی[۹] (P_p) $P^D_{۶۰۰}$ بار متناظر با $L/۶۰۰$ و $P^D_{۱۵۰}$ بار متناظر با $L/۱۵۰$ را برداشت کرد. لازم به ذکر است در پژوهش حاضر، طول تیر ۳ برابر عرض مقطع به اضافه‌ی ۵۰ میلی‌متر (۳۵۰ میلی‌متر طول تیر و ۳۰۰ میلی‌متر طول خالص) انتخاب شده است که طول $L/۶۰۰$ برابر ۰/۵ میلی‌متر و طول $L/۱۵۰$ برابر ۲ میلی‌متر بوده است.



شکل ۱۳. نحوه‌ی نصب کرنش‌سنج خطی در دو وجه تیر.



شکل ۱۴. شماتیک منحنی نیرو تغییر ـ مکان.[۱۶]



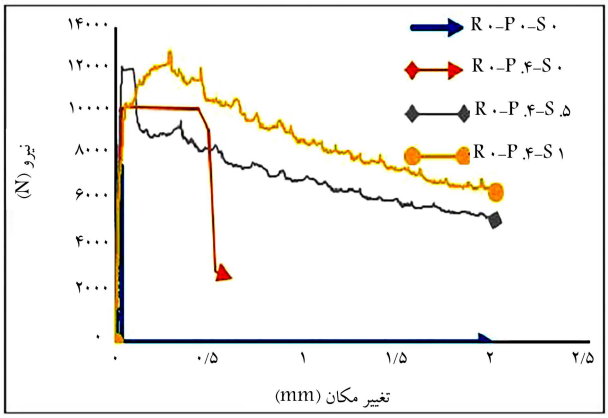
شکل ۱۵. نمودار بار خمشی در مراحل مختلف بارگذاری.

در آزمایش خمش چهار نقطه‌یی، رفتار کششی نمونه‌ها تحت خمش محض در وسط تیر (وسط تیر بدون برش است) ارزیابی می‌شود. نتایج آزمایش خمش چهارنقطه‌یی در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی باعث کاهش بیشینه‌ی بار خمشی در بتن‌های فاقد الیاف و حاوی ٪۰/۴ الیاف پلی‌پروپیلن شده است. همچنین تأثیر کمتری در بیشینه‌ی بار خمشی نمونه‌های حاوی ٪۰/۴ الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۵ و ۱ درصد الیاف فولادی داشته است. همچنین افزایش جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی باعث کاهش تغییرشکل متناظر با بیشینه‌ی بار خمشی شده است. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در نمونه‌های بتنی فقط باعث افزایش بیشینه‌ی بار خمشی

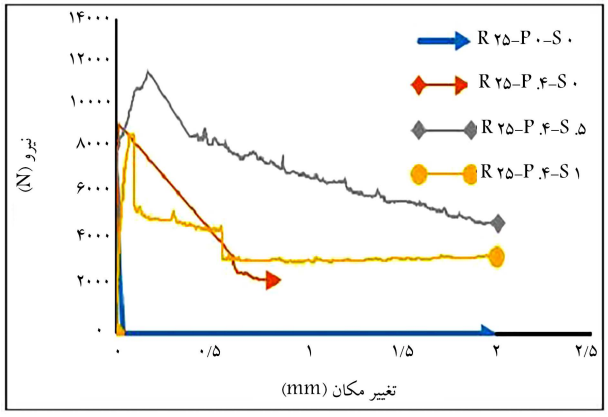
می‌شود و تأثیر زیادی در بهبود رفتار شکننده‌ی بتن ندارد. همچنین نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در ناحیه‌ی پست ـ ترک به کمتر از ۲۵٪ بیشینه‌ی بار خمشی رسیده‌اند، و ادامه‌ی بارگذاری توسط دستگاه آزمایش قطع شده‌اند. و بار متناظر با $L/150$ کمتر از ۲۵٪ بیشینه‌ی بار خمشی بوده است. استفاده از الیاف فولادی طاقت خمشی و بیشینه‌ی بار خمشی را بهبود می‌بخشد و از رفتار ترد بتن بعد از بار نهایی جلوگیری به عمل می‌آورد و در حفظ پیوستگی بتن بعد از ترک کمک می‌کند.

در نمودار اخیر، P_P بیشینه‌ی بار خمشی، P_{600} بار خمشی متناظر با $L/600$ و P_{150} بار خمشی متناظر با $L/150$ است. نمودار نیرو ـ تغییرمکان نمونه‌های فاقد سنگدانه‌های بازیافتی در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن شاهد، باعث افزایش ۳۳٪ بیشینه‌ی بار خمشی و ۰/۰۲۵ میلی‌متر تغییرشکل متناظر با بار نهایی نسبت به بتن شاهد شده است. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱٪ درصد الیاف فولادی به بتن شاهد به ترتیب باعث افزایش ۵۷ و ۶۶ درصدی بیشینه‌ی بار خمشی و افزایش ۰/۰۶۵ و ۰/۲۲۵ میلی‌متری تغییرشکل متناظر با بار نهایی نسبت به بتن شاهد شده است.

نمودار نیرو ـ تغییرمکان نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که جایگزینی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی به بتن شاهد، باعث کاهش ۱۰ درصدی بیشینه‌ی بار خمشی و ۰/۲۲۵ میلی‌متری تغییرشکل متناظر با بیشینه‌ی بار خمشی شده است. افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی باعث افزایش ۲۰٪ بیشینه‌ی بار خمشی



شکل ۱۶. نمودار نیرو ـ تغییرمکان بتن بدون سنگدانه‌ی بازیافتی.

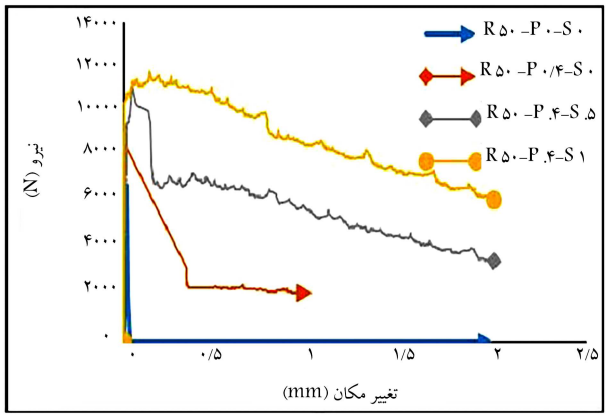


شکل ۱۷. نمودار نیرو ـ تغییرمکان بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌ی بازیافتی.

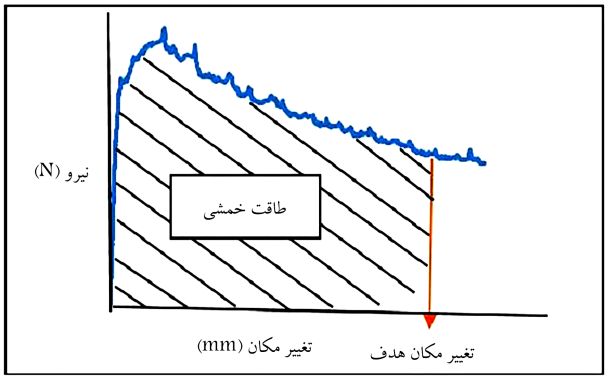
و کاهش ۰/۰۱۷۵ میلی‌متری تغییرشکل متناظر با بیشینه‌ی بار خمشی نسبت به بتن شاهد شده است. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵ و ۱ درصد الیاف فولادی به بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۵۰ و ۱۳ درصد بیشینه‌ی بار خمشی و افزایش ۰/۱۴ و ۰/۰۶ میلی‌متر تغییرشکل متناظر با بیشینه‌ی بار خمشی نسبت به بتن شاهد شده است. نمودار نیرو ـ تغییرمکان نمونه‌های حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی در شکل ۱۸ مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که جایگزینی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به بتن شاهد، باعث کاهش ۱۲ درصدی بیشینه‌ی بار خمشی و ۰/۰۱۲۵ میلی‌متری تغییرشکل متناظر با بیشینه‌ی بار خمشی شده است. افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی باعث افزایش ۱۱ درصدی بیشینه‌ی بار خمشی و کاهش ۰/۰۱۷۵ میلی‌متری تغییرشکل متناظر با بیشینه‌ی بار خمشی نسبت به بتن شاهد شده است. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵ و ۱ درصد الیاف فولادی به بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۴۳ و ۵۲ درصدی بیشینه‌ی بار خمشی و ۰/۰۱۷۵ و ۰/۱۱ میلی‌متری تغییرشکل متناظر با بیشینه‌ی بار خمشی نسبت به بتن شاهد شده است.

۶.۲.۶. بررسی طاقت خمشی

طاقت خمشی[10] (T_b) اصطلاحی است که قابلیت جذب انرژی بتن را بیان می‌کند. مطابق شکل ۱۹، طاقت خمشی از مساحت زیر نمودار نیرو ـ تغییرمکان تا تغییرشکل هدف محاسبه می‌شود. طاقت خمشی به طول تیر بستگی دارد. برای محاسبه‌ی طاقت T^D_{150} منشور ۳۵۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر مساحت زیر نمودار نیرو ـ تغییرشکل تا تغییرشکل ۲ میلی‌متر و برای طاقت T^D_{600} مساحت زیر نمودار نیرو ـ تغییرشکل



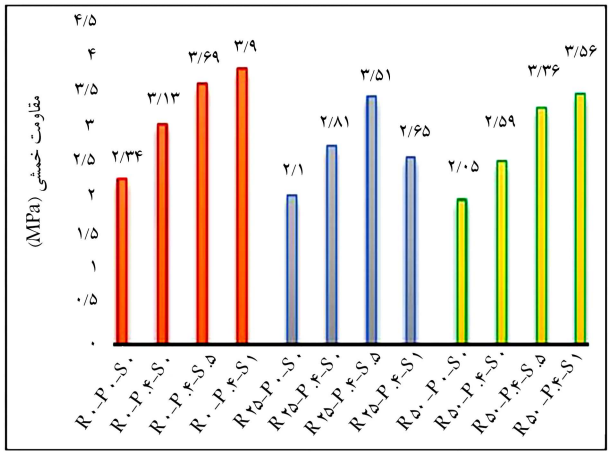
شکل ۱۸. نمودار نیرو ـ تغییرمکان بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌ی بازیافتی.



شکل ۱۹. شماتیک طاقت خمشی.[17]

جدول ۱۱. طاقت خمشی.

نمونه	$T^D_{۶۰۰}$ (J)	تغییرات نسبت به بتن شاهد (درصد)	$T^D_{۱۵۰}$ (J)	تغییرات نسبت به بتن شاهد (درصد)	تغییرات $T^D_{۱۵۰}$ نسبت به $T^D_{۶۰۰}$ (درصد)
$R۰-P۰-S۰$	۰/۱۸۰	۰	۰/۱۸۰	۰	۰
$R۰-P۰۴-S۰$	۵/۱۵۲	۲۷۶۲	-	-	-
$R۰-P۰۴-S۰۵$	۴/۱۸۰	۲۵۷۲	۱۴/۹۱۰	۸۱۸۳	۲۱۰
$R۰-P۰۴-S۱$	۵/۶۱	۳۰۱۶	۱۸/۳۲۸	۱۰۰۸۲	۲۲۶/۷۲
$R۲۵-P۰-S۰$	۰/۱۲۶	-۲۹/۹۲	۰/۱۲۶	-۲۹/۹۲	۰
$R۲۵-P۰۴-S۰$	۳/۹۴۵	۲۰۹۱	-	-	-
$R۲۵-P۰۴-S۰/۵$	۴/۸۵۷	۲۵۹۸	۱۴/۶۵۰	۸۰۳۸	۲۰۱/۶
$R۲۵-P۰۴-S۱$	۲/۶۵۰	۱۳۷۲	۷/۶۵۰	۴۱۵۰	۱۸۸/۷۲
$R۵۰-P۰-S۰$	۰/۱۱۲	-۳۷/۵۸	۰/۱۱۲	-۳۷/۵۸	۰
$R۵۰-P۰۴-S۰$	۲/۳۸۹	۱۲۲۸	-	-	-
$R۵۰-P۰۴-S۰۵$	۳/۹۱۳	۲۰۷۴	۱۱/۷۱۵	۶۴۰۸	۱۹۹/۳۵
$R۵۰-P۰۴-S۱$	۵/۵۸۹	۳۰۰۵	۱۷/۹۰۷	۹۴۴۸	۲۲۰/۳۹



شکل ۲۰. مدول گسیختگی بتن.

تا تغییرشکل ۵/۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.[۱۶] می‌توان با بررسی تغییرات $T^D_{۱۵۰}$ نسبت به $T^D_{۶۰۰}$، افزایش جذب انرژی در ناحیه‌ی پست ـ ترک را بررسی کرد.

نتایج بررسی طاقت خمشی نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول ۱۱ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که بتن بدون الیاف، طاقت خمشی خیلی کمی دارد و جایگزینی ۲۵ و ۵۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی به ترتیب باعث کاهش ۲۹ و ۳۵ درصدی طاقت خمشی نمونه بدون الیاف نسبت به بتن شاهد شده است. افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌ی بدون سنگدانه‌های بازیافتی و حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۲۷، ۲۰ و ۱۲ برابری طاقت خمشی متناظر با $L/۶۰۰$ نسبت به بتن شاهد شده است. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱ درصد الیاف فولادی به بتن طبیعی به ترتیب باعث افزایش ۸۱ و ۱۰۰ برابری طاقت خمشی متناظر با $L/۱۵۰$ نسبت به بتن شاهد شده است.

بررسی تغییرات $T^D_{۱۵۰}$ نسبت به $T^D_{۶۰۰}$ نشان می‌دهد که بتن بدون الیاف با یا بدون سنگدانه‌های بازیافتی، رفتار شکننده دارد و بعد از بیشینه‌ی بار خمشی، دو نیم می‌شود. افزودن الیاف به بتن به حفظ پیوستگی بتن کمک می‌کند. افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌ی بدون و حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی در ناحیه‌ی پست ترک به بارکمتر از ۲۵٪ بیشینه‌ی بار خمشی خود رسیده است. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ الیاف فولادی به نمونه‌ی شاهد و نمونه‌های حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۲۱۰، ۲۰۱ و ۱۹۹ درصدی طاقت خمشی در ناحیه‌ی پست ترک شده است، که نشان می‌دهد الیاف فولادی، کارایی بهتری نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن در ناحیه‌ی پست ترک دارند.

۷.۲.۶. بررسی مدول گسیختگی

مطابق آیین‌نامه‌ی ASTM C۱۶۰۹C/۱۶۰۹M، مدول گسیختگی[۱۱] **(MOR)** را می‌توان با توجه به رابطه‌ی ۳ محاسبه کرد:[۱۶]

$$MOR = \frac{PL}{BD^۲} \qquad (۳)$$

که در آن، MOR مدول گسیختگی بر حسب مگاپاسکال، P بیشینه‌ی بار نهایی بر حسب نیوتن، L طول نمونه بر حسب میلی‌متر، B عرض نمونه بر حسب میلی‌متر و D ارتفاع نمونه بر حسب میلی‌متر است. نتایج بررسی مدول گسیختگی نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، با جایگزینی ۲۵ و ۵۰ درصد سنگ‌دانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی باعث کاهش به ترتیب ۱۰ و ۱۲ درصدی مدول گسیختگی شده است. با افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی به ترتیب می‌توان مدول گسیختگی را ۲۰ و ۱۱ درصد نسبت به بتن شاهد افزایش داد. همچنین افزایش ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن بدون سنگ‌دانه‌ی بازیافتی باعث افزایش ۳۳ درصدی مدول گسیختگی بتن شاهد شده است، که نشان می‌دهد افزودن الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش مدول گسیختگی نسبت به تأثیر جایگزینی سنگدانه‌ی بازیافتی

با سنگدانه‌ی طبیعی مؤثرتر است و تأثیر کاهش جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی را در بیشینه‌ی بار نهایی و مدول گسیختگی جبران می‌کند.

افزودن ترکیب ۱٪ الیاف فولادی و ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌ها نسبت به ۰/۵٪ الیاف فولادی و ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش بیشینه‌ی بار نهایی و افزایش شکل‌پذیری بتن شده است، اما خطر بالینگ را به‌شدت افزایش داده است. در بررسی آزمایشگاهی انجام‌شده، نمونه‌ی $R25-P0.4-S1$ در اثر بالینگ، بیشینه‌ی بار نهایی کمتری تحمل کرده است.

۷. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی خواص مکانیکی بتن مسلح به الیاف هیبریدی (الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن) و حاوی سنگدانه‌های بازیافتی پرداخته شده و این نتایج به‌دست آمده است:

۱. سنگدانه‌ی بازیافتی نسبت به سنگدانه‌ی طبیعی، ۳۶۸٪ جذب آب بیشتر و ۱۰٪ چگالی اشباع با سطح خشک کمتری دارند.

۲. شن بازیافتی ۱۳/۹٪ نسبت به شن طبیعی، درصد سایش بیشتری دارد.

۳. نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی تا ۵۰٪ و ترکیب الیاف فولادی (تا ۱٪) الیاف پلی‌پروپیلن (تا ۰/۴٪) باعث افزایش یا کاهش کمتر از ۵٪ وزن مخصوص بتن تازه شده است، که قابل صرف‌نظر است.

۴. جایگزینی ۲۵ و ۵۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی به ترتیب باعث کاهش ۱۴/۵۹ و ۱۵/۳۹ درصد مقاومت فشاری، ۳ و ۱۳ درصد مقاومت کشش برزیلی، کاهش ۲۳ و ۳۵ درصد مدول کشسانی و کاهش ۱۰ و ۱۲ درصد بیشینه‌ی بار نهایی شده است.

۵. جایگزینی سنگ‌دانه‌ی بازیافتی، تأثیر کمتری در کاهش مقاومت کشش برزیلی نسبت به مقاومت فشاری داشته است.

۶. افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌ی بدون سنگدانه‌ی بازیافتی و حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد سنگدانه‌ی بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۲۷، ۲۰ و ۱۲ برابری طاقت خمشی متناظر با $L/600$ نسبت به بتن شاهد شده است. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵ و ۱ درصد الیاف فولادی به بتن طبیعی به ترتیب باعث افزایش ۸۱ و ۱۰۰ برابری طاقت خمشی متناظر با $L/150$ نسبت به بتن شاهد شده است.

پانوشت‌ها

1. recycled aggregate concrete (RAC)
2. recycled concrete aggregate (RCA)
3. natural aggregate (NA)
4. interfacial transition zone (ITZ)
5. natural aggregate concrete (NAC)
6. Gaping
7. linear variable differential transformer (LVDT)
8. displacement-control
9. peak load
10. flexural toughness
11. modulus of rupture

منابع (References)

1. Mostofinejad, D., *Technology and Concrete Mixing Design*, Forty-Third Edition, Arkan Danesh Publishing Institute (In Persian) (2015).
2. De Melo, A.B., Goncalves, A.F. and Martins, I.M. "Construction and demolition waste generation and management in Lisbon (Portugal)", *Resour. Conserv. Recycl*, **55**(12), pp. 1252-1264 (2011).
3. Pedro, D., De Brito, J., Evangelista, L. and et al. "Technical specification proposal for use of high-performance recycled concrete aggregates in high-performance concrete production", *J. Mater. Civ. Eng*, **30**(12), pp. 19-38 (2018).
4. Rao, A., Jha, K.N. and Misra, S. "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete", *Resour. Conserv. Recycl*, **50**(1), pp. 71-81 (2007).
5. Ahmed, T.W., Ali, A.A.M. and Zidan, R.S. "Properties of high strength polypropylene fiber concrete containing recycled aggregate", *Constr. Build. Mater*, **241**, p. 118010 (2020).
6. Jalilifar, H., Sajedi, F. and Kazemi, S. "RETRACTED: Investigation on the mechanical properties of fiber reinforced recycled concrete", *Civ. Eng. J*, **2**(1), pp. 13-22 (2016).
7. Andreu, G. and Miren, E. "Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete", *Constr. Build. Mater*, **52**, pp. 227-235 (2014).
8. Akca, K.R., Cakir, O. and Ipek, M. ."Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates", *Constr. Build. Mater*, **98**, pp. 620-630 (2015).
9. Wang, R., Yu, N. and Li, Y. "Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review", *Constr. Build. Mater*, **242**, pp.63-89 (2020).
10. ASTM C33/C33M, "Standard specification for concrete aggregates", i(c), pp. 1-11 (2010).
11. C29/C29M-09, "Standard test method for bulk density (' Unit Weight ') and voids in aggregate", *ASTM Int*, **i**(c), pp. 1-5 (2009).
12. C566/C566M, "Standard test method for total evaporable moisture content of aggregate by drying", Reported by ACI Comm. 544, 97(Reapproved 2004), pp. 1-3 (2016).
13. C131/C131M, "Standard test method for resistance to degradation of large-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine 1", **i**, pp. 24-26 (2010).

14. Astm:C138/C138M-13, "Standard test method for density (Unit Weight), yield, and air content (Gravimetric)", *ASTM Int*, **i**, pp. 23-26 (2013).

15. C496/C496M, *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens1*, Man. Hydrocarb. Anal., 6th Ed., pp. 545-545-3 (2008).

16. C1609/C1609M, "Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading) 1", *Astm*, **i**(C), 1609/C 1609M-05, pp. 1-8 (2005).

17. Jamshidi Avanaki, M., Abedi, M., Hoseini, A. and et al. "Effects of fiber volume fraction and aspect ratio on mechanical properties of hybrid steel fiber reinforced concrete", *New Approaches Civ. Eng*, **2**(2), pp. 49-64 (2018).