

اللَّهُمَّ ارْحَمْنِي



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

بررسی آزمایشگاهی تاثیر افزودن همزمان ماکرو الیاف فولادی و میکرو الیاف پلی - پروپلین بر مقاومت مکانیکی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی

نگارنده:

صادق قاسمی

اساتید راهنما:

دکتر جلیل شفائی

دکتر میثم جلالی

مهر ۱۴۰۰

شماره: ۵۴۴
تاریخ: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳
ویرایش:

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای صادق قاسمی با شماره دانشجویی ۹۷۱۲۸۷۴ رشته مهندسی عمران گرایش سازه تحت بررسی آزمایشگاهی تاثیر افزودن همزمان ماکرو الیاف فولادی و میکرو الیاف پلی پروپلین بر مقاومت مکانیکی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی که در تاریخ ۱۴۰۲/۰۷/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می گردد:

☒ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
☐ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی	

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر جلیل شفائی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر میثم جلالی	استادیار	
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- استاد داور اول	دکتر فرشید جندقی علائی	دانشیار	
۵- استاد داور دوم	دکتر حسین پهلوان	استادیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر ابراهیم زمانی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر رضا نادری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم به مادرم...

مادری که عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودش که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان بود، و قلب بزرگش که فریاد رس است و سرگردانی و ترس در پناهش به شجاعت می‌گراید، و محبت‌های بی دریغش که هرگز فروکش نمی‌کند.

تقدیم به برادرم...

که همواره در طول تحصیل متحمل زحماتم بود و تکیه‌گاه من در مواجهه با مشکلات، و وجودش مایه دلگرمی من می‌باشد.

تقدیم به خواهرم...

که با حضورش و همراهی‌اش همیشه راه را به من نشان داده و مرا در این راه استوار و ثابت قدم نموده است.

تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات و رهنمودهای استاد فرهیخته، جناب آقای دکتر جلیل شفائی، که چه در این پژوهش و چه در طول دوره تحصیل همواره یاری‌ام نموده‌اند، تشکر و قدردانی کنم.

همچنین شایسته است از استاد عزیزم جناب آقای دکتر میثم جلالی که ایشان نیز در مسیر تکامل این پایان‌نامه، بنده را یاری نموده، سپاسگزاری کنم.

تعهدنامه

اینجانب صادق قاسمی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران- سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تاثیر الیاف فولادی میکرو و ماکرو در بتن حاوی سنگدانه بازیافتی بر مقاومت خمشی و برشی تحت راهنمایی دکتر جلیل شفائی و دکتر میثم جلالی متعهد می شوم

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
 - در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
 - مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
 - کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
 - حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
 - در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده:

بتن به دلیل فواید و مزایای خود به عنوان دومین ماده پر مصرف دنیا بعد از آب شناخته می‌شود. با افزایش مصرف بتن، ذخایر معادن طبیعی سنگدانه‌ها روبه کاهش می‌رود، که این امر ضرورت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی آشکار می‌سازد. در این پژوهش، سنگدانه‌های بازیافتی به نسبت‌های ۲۵٪ و ۵۰٪ وزنی جایگزین سنگدانه‌های طبیعی شده است. جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی باعث کاهش خواص مکانیکی بتن می‌شود. برای جبران کاهش خواص مکانیکی بتن ناشی از جایگزینی سنگدانه‌ها، از ترکیب همزمان الیاف‌های فولادی با نسبت‌های ۰/۵ و ۱ درصد حجمی و ۰/۴ درصد حجمی الیاف پلی-پروپیلن در نمونه‌های بتن استفاده شده است. در مجموع ۱۲ طرح اختلاط مورد آزمایش فشاری، کشش برزیلی و خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفت. در این بررسی آزمایشگاهی، عواملی همچون درصد سایش سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی، درصد رطوبت و جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی، چگالی سنگدانه‌ها، وزن مخصوص بتن تازه، مقاومت فشاری، مقاومت شکافت کششی، مدول الاستیسیته، بیشینه بار خمشی، مدول گسیختگی، طاقت خمشی و مقاومت خمشی معادل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که، جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی به ترتیب باعث کاهش ۱۴٪ و ۱۵٪ مقاومت فشاری، ۳٪ و ۱۳٪ مقاومت کشش برزیلی و ۱۰٪ و ۱۲٪ مدول گسیختگی نسبت به بتن شاهد می‌شود. همچنین افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن شاهد باعث افزایش ۱٪ مقاومت فشاری، ۱٪ مقاومت کششی و ۳۳٪ مدول گسیختگی می‌شود. در صورت افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۱٪ درصد الیاف فولادی به بتن بدون سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۳٪ مقاومت فشاری، ۲۶٪ درصد مقاومت کشش برزیلی و ۶۶٪ مدول گسیختگی نسبت به بتن شاهد می‌شود. که نشان می‌دهد الیاف فولادی در مقایسه با الیاف پلی‌پروپیلن کارایی بیشتری در بهبود مقاومت کششی و خمشی بتن دارد. همچنین بتن مسلح به الیاف هیبریدی بعد از شکسته شدن از هم گسیخته نمی‌شود، و الیاف در حفظ پیوستگی بتن نقش مهمی دارد.

کلمات کلیدی: بتن بازیافتی، بتن الیافی، الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن، خمش چهار نقطه‌ای.

فهرست مطالب

فصل اول	۱
کلیات تحقیق	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۱-۲- تعریف مسئله	۳
۱-۳- اهداف پژوهش	۳
۱-۳-۱- اهداف کلی پژوهش	۳
۱-۳-۲- اهداف جزئی پژوهش	۴
۱-۴- اهمیت ارزش تحقیق	۴
۱-۵- روش انجام پژوهش	۵
۱-۶- ساختار پایان نامه	۶
فصل دوم	۷
مروری بر ادبیات فنی و پژوهش‌های گذشته	۷
۲-۱- مقدمه	۸
۲-۲- مروری بر تحقیقات گذشته	۸
۲-۳- بتن ساخته شده از مواد بازیافتی	۱۱
۲-۳-۱- ضرورت استفاده از مواد بازیافتی	۱۱
۲-۳-۲- موارد کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی	۱۳
۲-۳-۳- سنگدانه‌های بازیافتی	۱۳
۲-۳-۴- سنگ شکن ها	۱۵
۲-۳-۵- ریز ساختار سنگدانه‌های بازیافتی	۱۶
۲-۳-۶- نقص در ریز ساختار بتن بازیافتی	۱۷
۲-۳-۷- خواص سنگدانه‌های بازیافتی	۱۹
۲-۳-۷-۱- ضریب تورق و تطویل	۱۹
۲-۳-۷-۲- چگالی، جذب آب و خلل فرج سنگدانه‌های بازیافتی	۲۰
۲-۳-۷-۳- درصد خردشدگی و سایش	۲۱
۲-۳-۷-۴- سطح رطوبت سنگدانه‌های بازیافتی	۲۲

۲۲	۸-۳-۲- خواص مکانیکی بتن بازیافتی
۲۲	۱-۸-۳-۲- مقاومت فشاری بتن
۲۳	۲-۸-۳-۲- مقاومت خمشی بتن
۲۵	۳-۸-۳-۲- مقاومت برشی
۲۶	۴-۲- بتن الیافی
۲۶	۱-۴-۲- مقدمه
۲۶	۲-۴-۲- تاریخچه بتن الیافی
۲۷	۳-۴-۲- تاثیر افزودن الیاف در بتن
۲۷	۴-۴-۲- انواع الیاف
۲۸	۱-۴-۴-۲- الیاف طبیعی
۲۸	۲-۴-۴-۲- الیاف شیشه
۲۹	۳-۴-۴-۲- الیاف مصنوعی
۲۹	۱-۳-۴-۴-۲- الیاف کولار (آرامید)
۳۰	۲-۳-۴-۴-۲- الیاف پلیپروپیلین
۳۱	۳-۳-۴-۴-۲- الیاف کربن
۳۲	۴-۴-۴-۲- الیاف فولادی
۳۳	۵-۲- افزودنی‌های کاهنده آب
۳۳	۱-۵-۲- روان کننده‌ها
۳۴	۲-۵-۲- فوق روان کننده‌ها
۳۴	۳-۵-۲- فرا روان کننده
۳۴	۶-۲- بررسی تاثیر افزودن الیاف فولادی و پلیپروپیلین بر بتن بازیافتی
۳۴	۱-۶-۲- بررسی تاثیر الیاف پلیپروپیلین بر بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی
۳۵	۲-۶-۲- بررسی تاثیر الیاف فولادی بر بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی
۳۷	۷-۲- جمع بندی فصل دوم
۳۹	فصل سوم
۳۹	برنامه آزمایشگاهی
۴۰	۱-۳- مقدمه
۴۰	۲-۳- مواد مصرفی

۴۰	 آب ۱-۲-۳
۴۰	 سیمان ۲-۲-۳
۴۱	 سنگدانه‌ها ۳-۲-۳
۴۱	 سنگدانه‌های طبیعی ۱-۳-۲-۳
۴۱	 سنگدانه‌های بازیافتی ۲-۳-۲-۳
۴۲	 مواد افزودنی ۴-۲-۳
۴۲	 الیاف ۵-۲-۳
۴۳	 شرایط ساخت و عمل آوری نمونه‌های آزمایشگاهی ۳-۳
۴۴	 شرایط اختلاط مصالح نمونه‌های بتنی بدون الیاف ۱-۳-۳
۴۵	 شرایط اختلاط مصالح نمونه‌های بتنی حاوی الیاف ۲-۳-۳
۴۶	 قالب ریزی نمونه‌های فاقد و حاوی الیاف ۳-۳-۳
۴۷	 طرح اختلاط ۴-۳
۵۰	 آزمایش‌های انجام شده ۵-۳
۵۰	 آزمایش‌های سنگدانه‌ها ۱-۵-۳
۵۰	 دانه‌بندی سنگدانه‌ها ۱-۱-۵-۳
۵۲	 وزن مخصوص سنگدانه ۲-۱-۵-۳
۵۵	 تعیین درصد کلی رطوبت سنگدانه‌ها ۳-۱-۵-۳
۵۶	 ضربه و درصد سایش سنگدانه‌ها ۴-۱-۵-۳
۵۸	 تعیین چگالی و جذب آب مصالح سنگی ریز ۵-۱-۵-۳
۶۱	 تعیین چگالی و جذب آب مصالح سنگی درشتدانه ۶-۱-۵-۳
۶۴	 آزمایش‌های بتن تازه ۲-۵-۳
۶۴	 آزمایش وزن مخصوص بتن تازه ۱-۲-۵-۳
۶۶	 آزمایش اسلامپ ۲-۲-۵-۳
۶۷	 آزمایش‌های بتن سخت شده ۳-۵-۳
۶۸	 آزمایش تک محوره مقاومت فشاری نمونه استوانه ای بتن ۱-۳-۵-۳
۷۰	 بررسی مدول الاستیسیته ۲-۳-۵-۳
۷۱	 آزمایش مقاومت کششی به روش دو نیم شدن (کشش برزلی) ۳-۳-۵-۳
۷۳	 آزمایش مقاومت خمش چهار نقطه ای ۴-۳-۵-۳

۷۶	۳-۵-۳-۴-۱- بررسی مدول گسیختگی
۷۶	۳-۵-۳-۴-۲- بررسی طاقت خمشی
۷۷	۳-۵-۳-۴-۳- بررسی مقاومت خمشی معادل
۷۸	۳-۶- کلاهک گذاری در نمونه‌های استوانه ای بتن
۷۹	۳-۷- روش انجام آزمایش
۸۱	فصل چهارم
۸۱	بررسی و تحلیل نتایج آزمایشگاهی
۸۲	۴-۱- مقدمه
۸۲	۴-۲- نتایج آزمایش‌های سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی
۸۲	۴-۲-۱- نتایج آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی
۸۳	۴-۲-۲- نتایج آزمایش درصد رطوبت و جذب آب سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی
۸۴	۴-۲-۳- نتایج آزمایش درصد رطوبت کلی
۸۴	۴-۲-۴- نتایج آزمایش درصد سایش
۸۶	۴-۳- وزن مخصوص بتن تازه
۸۷	۴-۴- بررسی نتایج آزمایش نمونه‌های سخت شده بتن
۸۷	۴-۴-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن
۸۹	۴-۴-۲- بررسی نمودار تنش_کرنش فشاری بتن
۹۱	۴-۴-۳- بررسی مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی
۹۲	۴-۴-۴- نتایج آزمایش مقاومت شکافت کششی بتن
۹۴	۴-۴-۵- بررسی نتایج آزمایش خمش چهار نقطه ای
۹۹	۴-۴-۵-۱- بررسی نتایج مدول گسیختگی MOR
۱۰۱	۴-۴-۵-۲- بررسی نتایج طاقت خمشی
۱۰۳	۴-۴-۵-۳- بررسی نتایج مقاومت خمشی معادل
۱۰۴	۴-۵- نتیجه گیری
۱۰۷	فصل پنجم
۱۰۷	نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۰۸	۵-۱- مقدمه
۱۰۸	۵-۲- جمع بندی و نتیجه‌گیری

۱۱۲		۵-۳-پیشنهادهات برای تحقیقات آتی
۱۱۳		مراجع
۱۱۹		پیوست

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ نمودار توسعه پایدار ۱۲
- شکل ۲-۲ سنگ شکن فکی ۱۵
- شکل ۳-۲ سنگ شکن ضربه ای ۱۵
- شکل ۴-۲ سنگ شکن مخروطی ۱۶
- شکل ۵-۲ ریز ساختار بتن ۱۷
- شکل ۶-۲ سطح سنگدانه ۱۸
- شکل ۷-۲ ناحیه اتصال در بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی ۱۹
- شکل ۸-۲ شماتیک آزمایش برشی در آزمایش دانیگ و همکارانش ۲۵
- شکل ۹-۲ نمونه‌ای از الیاف شیشه ۲۹
- شکل ۱۰-۲ نمونه‌ای از الیاف کولار ۳۰
- شکل ۱۱-۲ نمونه‌ای از الیاف پلی پروپیلن ۳۱
- شکل ۱۲-۲ نمونه‌ای از الیاف کربن ۳۱
- شکل ۱۳-۲ انواع الیاف فولادی ۳۲
- شکل ۱-۳ - نمونه‌های بتنی قدیمی ۴۲
- شکل ۲-۳ - دستگاه سنگ شکن فکی ۴۲
- شکل ۳-۳ - سنگدانه بازیافتی ۴۲
- شکل ۴-۳ - شماتیک الیاف مصرفی ۴۳
- شکل ۵-۳ - حوضچه عمل آوری ۴۴
- شکل ۶-۳ - وسایل استفاده شده برای ساخت نمونه ۴۴
- شکل ۷-۳ - آزمایش اسلامپ نمونه‌های فاقد الیاف ۴۵
- شکل ۸-۳ - قالب استوانه ای ۴۷
- شکل ۹-۳ - قالب منشوری ۴۷
- شکل ۱۰-۳ - نمونه‌های بتنی بعد گذشت ۲۴ ساعت در قالب ۴۷
- شکل ۱۱-۳ - ترازو با دقت ۰/۵ گرم ۵۱
- شکل ۱۲-۳ - الک ها به ترتیب نحوه قرار گیری ۵۱
- شکل ۱۴-۳ - کوره ۵۱

شکل ۳-۱۳	دستگاه لرزاننده	۵۱
شکل ۳-۱۵	توزین مصالح مانده بر روی الک ها	۵۲
شکل ۳-۱۶	میله متراکم	۵۴
شکل ۳-۱۷	مصالح نگهداری شده در کوره	۵۴
شکل ۳-۱۸	وزن قالب حاوی سنگدانه‌ها	۵۴
شکل ۳-۲۰	دستگاه لس آنجلس	۵۷
شکل ۳-۲۱	گلوله فولادی در آزمایش لس آنجلس	۵۷
شکل ۳-۲۲	وزن سنگدانه‌ها در آزمایش درصد سایش	۵۸
شکل ۳-۲۳	ریز دانه اشباع در آب	۶۰
شکل ۳-۲۴	ریز دانه پهن شده بر جسم عدم جاذب آب	۶۰
شکل ۳-۲۵	چگالی سنج حاوی نمونه و آب	۶۱
شکل ۳-۲۶	چگالی سنج حاوی آب	۶۱
شکل ۳-۲۷	درشت دانه های نگهداری شده در آب	۶۳
شکل ۳-۲۸	درشت دانه های پهن شده روی سطح عدم جاذب آب	۶۳
شکل ۳-۲۹	وزن درشت دانه ها اشباع با سطح خشک	۶۴
شکل ۳-۳۰	مشخصات مخلوط ناقص اسلامپ	۶۶
شکل ۳-۳۱	نحوه محاسبه ارتفاع ریزش بتن	۶۷
شکل ۳-۳۲	اتصال فک بالای در دستگاه جک فشاری	۶۸
شکل ۳-۳۳	دستگاه جک فشاری	۶۸
شکل ۳-۳۴	LVDT با دقت ۰.۰۰۵ میلیمتر	۷۱
شکل ۳-۳۵	نگهدارنده LVDT بر روی نمونه بتنی	۷۱
شکل ۳-۳۶	دستگاه ثبت اطلاعات	۷۱
شکل ۳-۳۷	شماتیک نصب LVDT در بررسی مدول الاستیسته	۷۱
شکل ۳-۳۸	تکیه گاه و تخته چندلا در آزمایش کشش برزیلی	۷۲
شکل ۳-۳۹	جزئیات آزمایش مقاومت کششی	۷۳
شکل ۳-۴۰	ماشین آزمایش خمشی	۷۴
شکل ۳-۴۱	محور بارگذاری دو آیین‌نامه	۷۴
شکل ۳-۴۲	نحوه نصب LVDT در دو وجه تیر	۷۵

- شکل ۳-۴۳ شماتیک منحنی نیرو تغییر-مکان ۷۵
- شکل ۳-۴۴ شماتیک محاسبه طاقت خمشی ۷۷
- شکل ۴-۱ منحنی دانه‌بندی سنگدانه ۸۳
- شکل ۴-۲ منحنی درصد سایش درشت دانه ها ۸۵
- شکل ۴-۳ درشت دانه ها پس از آزمایش درصد سایش ۸۵
- شکل ۴-۴ منحنی وزن مخصوص بتن تازه ۸۷
- شکل ۴-۵ نمودار تغییرات مقاومت فشاری ۸۸
- شکل ۴-۶ منحنی تنش-کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی بدون سنگدانه بازیافتی ۸۹
- شکل ۴-۷ منحنی های تنش-کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی ۹۰
- شکل ۴-۹ نمودار تغییرات مدول الاستیسته بتن ۹۲
- شکل ۴-۱۰ نتایج مقاومت کشش برزیلی بتن ۹۳
- شکل ۴-۱۱ تاثیر الیاف بر پیوستگی بتن ۹۴
- شکل ۴-۱۲ نمودار بار خمشی در مراحل مختلف بار گذاری ۹۵
- شکل ۴-۱۳ نمودار نیرو-تغییرمکان بتن بدون سنگدانه بازیافتی ۹۶
- شکل ۴-۱۴ الگوی ترک بعد از آزمایش خمش چهار نقطه ای در نمونه‌های بدون سنگدانه‌های بازیافتی ۹۶
- شکل ۴-۱۵ نمودار نیرو-تغییرمکان بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی ۹۷
- شکل ۴-۱۶ الگوی ترک بعد از آزمایش خمش چهار نقطه ای در نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی ۹۸
- شکل ۴-۱۷ نمودار نیرو-تغییرمکان بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی ۹۹
- شکل ۴-۱۸ الگوی ترک بعد از آزمایش خمش چهار نقطه ای در نمونه‌های حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی ۹۹
- شکل ۴-۱۹ مدول گسیختگی بتن ۱۰۱
- شکل ۴-۲۰ نتایج طاقت خمشی در مراحل مختلف تغییر مکان ۱۰۲
- شکل ۴-۲۱ نمودار مقاومت خمشی معادل ۱۰۴

فهرست جداول

جدول ۱-۲ آیین نامه استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در برخی کشورها	۱۴
جدول ۲-۲ نتایج بررسی بلتران و همکاران بر روی اثر جایگزینی سنگدانه بازیافتی بر مقاومت خمشی بتن	۲۴
جدول ۳-۲ نتایج بررسی دانیگ و همکاران بر خواص مکانیکی بتن بازیافتی	۲۶
جدول ۴-۲ مشخصات فیزیکی و مکانیکی انواع الیاف	۲۸
جدول ۵-۲ نتایج تحقیقات طوقا والد احمد	۳۵
جدول ۶-۲ نتایج بررسی مقاومت فشاری جلیلیان فر	۳۶
جدول ۷-۲ نتایج بررسی مدول پارگی تحقیقات آقای جلیلیان فر	۳۶
جدول ۸-۲ نتایج بررسی آقای شیرانی بید ابادی	۳۷
جدول ۱-۳ مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی	۴۱
جدول ۲-۳ مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف مصرفی	۴۳
جدول ۳-۳ طرح اختلاط بتن شاهد	۴۸
جدول ۴-۳ جزئیات طرح اختلاط بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و الیاف های فولادی و پلی پروپیلن	۴۹
جدول ۴-۱ دانه‌بندی سنگدانه‌ها	۸۳
جدول ۲-۴ درصد جذب آب و وزن مخصوص سنگدانه‌ها	۸۴
جدول ۳-۴ درصد رطوبت سنگدانه‌ها	۸۴
جدول ۴-۴ وزن مخصوص بتن تازه	۸۶
جدول ۵-۴ مقاومت فشاری بتن	۸۸
جدول ۶-۴ مدول الاستیسیته	۹۱
جدول ۴-۷ مقاومت کششی بتن بازیافتی حاوی الیاف	۹۳
جدول ۸-۴ نتایج آزمایش خمش چهار نقطه ای	۹۵
جدول ۹-۴ بیشینه بار خمشی و مدول گسیختگی	۱۰۰
جدول ۱۰-۴ طاقت خمشی نمونه‌های بتنی	۱۰۲
جدول ۴-۱۱ مقاومت خمشی معادل	۱۰۴

جدول ۴-۱۲ یافته‌های کلیدی آزمایش‌های بتن حاوی سنگدانه بازیافتی و الیاف فولادی و پلی پروپیلن
۱۰۵

فصل اول

کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

بتن، مخلوطی از سنگدانه‌های طبیعی، ماسه، سیمان، آب و مواد افزودنی است، که با توجه به مزایای زیر به عنوان دومین ماده پر مصرف دنیا بعد از آب شناخته می‌شود:

(۱) شکل پذیری بالا: به طوری که به راحتی شکل قالب را گرفته و به اندازه و شکل های خاص محدود نمی‌شود.

(۲) دسترسی آسان: مصالح اولیه بتن در اکثر نقاط یافت می‌شود.

(۳) مقاومت در برابر حریق: سازه‌های بتنی می‌تواند چندین ساعت در برابر آتش دوام آورند.

(۴) مقاومت فشاری بالا: بتن دارای مقاومت فشاری خوب و قابل قبول است، با توجه به ضعف آن در کشش با قرار دادن میلگرد در ناحیه کششی مقطع، می‌توان مشکل را برطرف کرد [۱].

بتن اساسا از مواد سیمان (۷ تا ۱۵ درصد)، آب (۱۴ تا ۲۱ درصد)، سنگدانه (۶۰ تا ۷۵ درصد) و هوا (۵/۰ تا ۳ درصد) تشکیل شده است [۱]. با افزایش مصرف بتن، ذخایر معادن طبیعی سنگدانه‌ها روبه کاهش است. همچنین تولید سنگدانه‌های طبیعی و انتقال آن به محل ساخت، نیازمند هزینه و زمان زیادی است، که این امر ضرورت جایگزینی مناسب برای سنگدانه‌های طبیعی در ساخت بتن را آشکار می‌کند. از طرف دیگر تخریب ساختمان‌های قدیمی و عواملی همچون زلزله، سیل و جنگ باعث تولید بسیار زیادی بتن ضایعاتی می‌گردد، که انتقال و دپو کردن این بتن ضایعاتی، باعث به‌وجود آمدن مشکلاتی همچون کمبود مکان‌های دپو، تولید گرد و غبار، آلودگی محیط زیست و ایجاد چشم اندازهای ناخوشایند می‌شود [۲].

به دلیل حجم زیاد ضایعات بتن و مشکلات مذکور، کشورهای توسعه یافته با هدف حفظ منابع طبیعی، محیط زیست و ساخت بتن اقتصادی نسبت به ساخت بتن حاوی سنگدانه‌های بتنی بازیافتی اقدام کردند. بنابراین درصد جایگزینی سنگدانه‌های بتن بازیافتی برای تولید بتن مقرون به‌صرفه با مقاومت فشاری و کششی مورد نیاز، اهمیت فراوانی دارد.

۱-۲- تعریف مسئله

بعد از انقلاب صنعتی، ساخت و ساز به طور چشم‌گیری در حال رشد است، در نتیجه در افزایش استفاده از منابع طبیعی و اثرات زیست محیطی نقش زیادی دارد. به طوریکه نیاز به کاهش اثرات زیست محیطی بخش ساخت و ساز، انگیزش محققین را به دنبال راه حل‌های استفاده مناسب از منابع طبیعی و اثرات زیست محیطی زیاد کرده است. یکی از راه‌های خلاقانه استفاده مجدد از ضایعات بتنی است. با توجه به تحقیق‌های گذشته استفاده از راه حل‌های مختلفی در استفاده از ضایعات بتنی از جمله در فعالیت‌های روسازی جاده دنبال شد. اخیراً ثابت شده که می‌توان از این ضایعات بتنی در عضوهای سازه‌ای بتنی استفاده کرد. استفاده از ضایعات بتنی در عضوهای سازه‌ای باعث کاهش خواص مکانیکی بتن می‌شود. یکی از راه‌های موثر برای بهبود رفتار مکانیکی بتن حاوی ضایعات بتنی، مسلح کردن بتن به الیاف است. به طور معمول الیاف‌های ماکرو با هدف جلوگیری از گسترش ترک و الیاف‌های میکرو با هدف جلوگیری از ایجاد ترک‌های ریز به بتن افزوده می‌شود. و ترکیب الیاف ماکرو فولادی و میکرو پلی‌پروپیلن به بتن می‌تواند رفتار قبل و بعد از ترک را بهبود ببخشد.

۱-۳- اهداف پژوهش

۱-۳-۱- اهداف کلی پژوهش

با توجه به اهمیت مسئله‌ای محیط زیست و هزینه ساخت بتن، می‌توان با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی به دو هدف مورد نظر رسید. الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن پر مصرف‌ترین الیاف مورد استفاده در بتن محسوب می‌شوند، که به منظور کنترل ترک‌های به وجود آمده به واسطه تغییرات حجمی ناشی از افت بتن، و نیز جهت بهبود مشخصات مکانیکی بتن اعم از مقاومت کششی و خمشی و... مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۱-۳-۲- اهداف جزئی پژوهش

در این پژوهش، تاثیر جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی مورد آزمایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی قرار گرفت، و برای بهبود مشخصات مکانیکی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی از ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلین استفاده می‌شود. در ادامه مولفه‌های همچون مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت شکافت کششی، بیشینه بارنهایی خمشی، افزایش تغییرمکان، مقدار جذب انرژی خمشی مورد بررسی قرار می‌گیرد، در این بررسی سعی بر آن است گامی هر چند کوچک در راستای حفظ منابع مالی و محیط زیست برداشته شود.

۱-۴- اهمیت ارزش تحقیق

بخش ساخت و ساز از زمان انقلاب صنعتی در حال رشد بوده، و در کاهش منابع طبیعی نقش زیادی دارد. در حقیقت، ردپای اکولوژیک موجود در دنیا به طور متوسط $2/8$ هکتار در سال تخمین زدند. که در حال افزایش است و در طولانی مدت پایدار نیست [۳].

ساخت و ساز مسئولیت 30% از انتشار گازهای دی‌اکسید کربن جهان و استفاده 50% از منابع طبیعی را بر عهده دارد. از طرف دیگر، بخش ساخت و ساز نیز نقش اساسی در تولید زباله دارد. در اتحادیه اروپا تقریباً میزان زباله ساخت ساز، 25% الی 30% از کل زباله‌های تولید شده است. همچنین سالیانه، 461 میلیون تن ضایعات ساختمانی تولید می‌کنند، که حدود $60-70\%$ از این ضایعات متعلق به ضایعات بتنی است [۳].

حجم سنگدانه‌های مصرفی جهان در سال 2015 به میزان 48 میلیارد تن تخمین زده می‌شود. از سال 2010 تا 2015 تقاضای استفاده از سنگدانه‌های طبیعی سالانه به میزان 5% افزایش داشته است. بیشترین سهم افزایش تقاضا در جهان مربوط به منطقه‌ی آسیا-اقیانوسیه است [۴].

تخمین زدند که برای هر نفر سالانه 1 متر مکعب بتن تولید می‌شود، و تمام عناصر تشکیل دهنده بتن دارای تأثیرات مهمی در محیط زیست هستند. تولید سیمان 5% از کل انتشار گاز CO_2 جهان را تولید می‌کند.

در سال ۲۰۱۲ میزان مصرف سنگدانه ۴۵ میلیارد تن تخمین زدند. پیش بینی می‌شود که تا سال ۲۰۲۲ به ۶۶ میلیارد تن برسد. بنابراین کاهش تأثیرات زیست محیطی بتن تا حد زیادی در کاهش ردپای اکولوژیک و کاهش فشار موجود بر محیط زیست کمک می‌کند [۳].

در کشورهای اروپایی سالانه بیش از ۵۱۰ میلیون تن ضایعات ساختمانی تولید می‌شود، این مقدار در کشورهایی همچون آمریکا، ژاپن، هند به ترتیب برابر است با ۳۲۵، ۷۷ و ۵۳۰ میلیون تن می‌باشد [۳].

دو مزیت زیر، اهمیت بازیافت بتن را برجسته کرد، تا استفاده از سنگدانه بازیافتی می‌تواند راه حلی برای مشکل مواجه با ضایعات ساختمانی و کمبود سنگدانه‌های طبیعی باشد:

(۱) کاهش استفاده از مصالح طبیعی، در نتیجه کاهش هزینه‌های استخراج و حمل و نقل مصالح طبیعی

(۲) جلوگیری از دفن زباله‌های غیرضروری که می‌توان بازیافت و بازگردانده شوند [۳].

با این وجود بتن ساخته شده با سنگدانه‌های بازیافتی باید از لحاظ کیفیت و کاربرد ارزیابی گردد. از این رو مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی، عاملی مهم در ارزیابی کیفیت آن محسوب می‌گردد. و در این پژوهش بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی مورد آزمایش و بررسی قرار می‌گیرند. در این پژوهش بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی به اختصار بتن بازیافتی و بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی را بتن الیافی بازیافتی نامیده می‌شود.

۱-۵- روش انجام پژوهش

این پژوهش بررسی آزمایشگاهی تأثیر افزودن همزمان ماکرو الیاف فولادی و میکرو الیاف پلی‌پروپیلین بر مقاومت مکانیکی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی را دنبال می‌کند. بنابراین در این پژوهش از دو نوع سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی استفاده می‌شود. برای انجام این پژوهش در ابتدا بتن‌های قدیمی توسط دستگاه سنگ شکن خرد می‌شود. و پس از عملیات الک کردن، سنگدانه‌های بازیافتی بتنی با بیشینه سائز اسمی ۱۹/۵ میلی‌متر فراهم می‌گردد. چون سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی دارای خواص مکانیکی متفاوتی

هستند، پس آزمایش‌های همچون درصد سایش، درصد رطوبت، درصد جذب آب و چگالی سنگدانه‌ها برای تعیین خواص مکانیکی سنگدانه‌های بازیافتی و مقایسه آن با سنگدانه‌های طبیعی صورت می‌گیرد. سپس طرح اختلاط بتن شاهد با توجه به مشخصات سیمان و سنگدانه طبیعی مطابق طرح ملی اختلاط بتن ایران محاسبه می‌شود. و در ادامه درشت‌دانه‌های بازیافتی با درشت‌دانه‌های طبیعی به نسبت وزنی جایگزین می‌شود، سپس الیاف پلی‌پروپیلین و الیاف فولادی به نسبت‌های حجمی به بتن اضافه می‌شود. و در آخر خواصی همچون مقاومت فشاری، مقاومت شکافت کششی، مدول الاستیسیته، بیشینه بار خمشی، مدول گسیختگی، طاقت خمشی و مقاومت خمشی معادل بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه پنج فصل دارد. فصل اول آن شامل مقدمه، اهداف، اهمیت و روش انجام پژوهش است. در فصل دوم تحقیقات گذشته، انواع بتن الیافی، ریز ساختار بتن بازیافتی، و مبانی پژوهش شرح داده شده است. در فصل سوم ابتدا مصالح مصرفی و سپس آزمایش‌ها و تجهیزات وسایل مورد استفاده در این پژوهش ارائه گردید. در فصل چهارم نتایج آزمایش‌ها و تحلیل آن‌ها مورد بحث قرار گرفته است. در نهایت فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر ادبیات فنی و

پژوهش‌های گذشته

۲-۱- مقدمه

پر کاربردترین مصالح در ساخت و ساز، بتن است. که ضرورت استفاده از بتن بر هیچ کس پوشیده نیست. ایده‌ی بازیافت و استفاده مجدد از ضایعات بتن به عنوان سنگدانه‌های بازیافتی، به اواخر جنگ جهانی دوم برمی‌گردد. که می‌تواند علاوه بر تامین نیازهای ساخت و ساز به حفظ منابع طبیعی کمک کند [۵]. در این فصل، ابتدا مروری بر تحقیقات گذشته و سپس تعاریفی در ارتباط با بتن بازیافتی و ضرورت استفاده از بتن بازیافتی آورده شده است. در ادامه فصل برخی از تحقیقات تاثیر جایگزینی سنگدانه بازیافتی بر خواص بتن بررسی گردیده است. در آخر کلیاتی در مورد بتن الیافی، انواع الیاف، مزایای استفاده از الیاف فولادی در بتن و برخی از تحقیقات انجام شده بر روی بتن حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن ارایه گردیده است. بررسی نتایج تحقیقات پیشین باعث درک بهتر مسئله و همچنین کمکی برای نحوه انجام روند کار آزمایشگاهی می‌شود.

۲-۲- مروری بر تحقیقات گذشته

اقای مقصودیان و همکارانش به مطالعه در زمینه رفتار مکانیکی بتن آرمه با الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن تحت نیروی برشی پرداختند. در این تحقیق، آزمایش‌های روی ۱۶ نمونه تیر بتن آرمه (۴ نمونه بتن آرمه بدون الیاف و خاموت، ۴ نمونه بعدی بدون الیاف همراه خاموت و ۸ نمونه بدون خاموت همراه الیاف) صورت گرفت. برای بررسی خواص مکانیکی و نحوه خرابی بتن آرمه با حجم متفاوت الیاف فولادی با درصدهای ۰-۱٪ الیاف فولادی و ۰/۲۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن تحت نیروی برشی قرار داده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن الیاف فولادی همراه پلی‌پروپیلن می‌تواند جایگزین حداقل آرماتور برشی باشد [۶].

اقای بردجم و همکارانش به بررسی تاثیر جایگزینی ترکیب‌های مختلف سنگدانه‌های بازیافتی (سنگدانه‌های درشت و ریز بازیافتی) با طبیعی بر خواص مکانیکی و دوام بتن پرداختند. پنج سری از مخلوط‌های بتنی، تولید شده با ترکیبات سنگدانه‌ای مختلف (طبیعی / بازیافتی)، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد

که، جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی هیچ تاثیر قابل توجه‌ای از نظر دوام ایجاد نمی‌کند. استفاده از ماسه بازیافتی در بتن، تخلخل و آسیب‌پذیری آن را در برابر یک محیط مهاجم افزایش می‌دهد[۷].

اندرو و مایرن به بررسی تاثیر نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی بر بتن با کارایی بالا پرداختند. در این مطالعه، بتن با کارایی بالا با استفاده از جایگزینی ۲۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی تولید شد. از سه نوع سنگدانه‌های بازیافتی که از خرد کردن بتن مادر با مقاومت فشاری ۱۰۰، ۶۰ و ۴۰ مگاپاسکال استفاده شد. خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام بتن با کارایی بالا حاوی سنگدانه‌های بازیافتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با توجه به خواص مکانیکی، در صورت تولید سنگدانه بازیافتی از بتن مادر با حداقل مقاومت فشاری ۶۰ مگاپاسکال، می‌توان ۱۰۰٪ جایگزین سنگدانه‌های درشت را امکان پذیر کرد. هنگامی که خواص دوام در نظر گرفته شود، می‌توان حداکثر ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی با سنگدانه طبیعی در تولید بتن با کارایی بالا جایگزین کرد[۸].

آلتوبات و همکارانش با مقایسه یک تیر بتنی بدون میلگرد برشی (خاموت) و با اضافه کردن ۵/۰-۱٪ الیاف نسبت به نمونه مرجع (تیر بتنی با میلگرد عرضی و بدون الیاف) آن ۱۴-۳۰٪ با کاهش مقاومت برشی روبرو شدند[۹].

کانفورتی و همکارانش با آزمایش بر روی ۱۴ نمونه تیر کم‌عمق و ۱۹ نمونه تیر عمیق و با اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن (ماکرو) نشان دادند که، می‌توان از این الیاف بجای میلگرد برشی استفاده کرد[۱۰].

گورای و همکارانش با افزایش نسبت طول دهانه به عمق از ۲/۵ به ۴ به مطالعه بر تاثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر رفتار برشی ۱۱ نمونه تیر بتنی با و بدون میلگرد عرضی پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که، استفاده از ماکرو الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش مقاومت برشی تیر شده است. توانایی جایگزینی ماکرو الیاف بجای میلگردهای فولادی وجود دارد[۱۱].

ناواس و همکارانش با آزمایش بر روی ۱۶ نمونه بتنی با و بدون استفاده از الیاف پلی پروپیلن و میلگرد عرضی، به مطالعه بر رفتار تیر بتنی تحت نیروی برشی پرداختند. همچنین نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که، این الیاف در ترکیب با میلگرد عرضی باعث افزایش زیاد مقاومت برشی در تیر می گردد [۱۲].

دانیگ گو و همکارانش به مطالعه در زمینه رفتار مکانیکی بتن بازیافتی به همراه الیاف فولادی تحت نیروی برشی پرداختند. در این تحقیق، آزمایشاتی روی بیش از ۱۰۰ نمونه بتنی، برای بررسی خواص مکانیکی و نحوه خرابی بتن با حجم متفاوت الیاف فولادی با درصدهای ۰-۲٪ الیاف فولادی و با نسبت جایگزینی ۰-۱۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی تحت نیروی برشی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن الیاف فولادی به طور موثری می‌تواند مقاومت و سختی برشی بتن بازیافتی را بهبود بخشد [۱۳].

کارنیرو و همکاران با ترکیب مقدار ۰/۷۵٪ الیاف فولادی و ۲۵٪ از سنگدانه‌های بازیافتی دریافتند که، اضافه کردن الیاف فولادی در بتن بازیافتی می‌تواند باعث جلوگیری از فروپاشی بتن شود. و خواص مکانیکی بتن بازیافتی را نیز افزایش دهد [۱۴].

تحقیقات کانگ و همکارانش نشان می‌دهد که مقاومت کششی بتن بازیافتی و بتن معمولی اختلاف زیادی ندارد [۱۵].

نتایج تحقیقات کوتالمیس و همکارانش نشان می‌دهد که، وجود الیاف پلی پروپیلن در بتن‌های بازیافتی تأثیر خاصی بر مقاومت فشاری بتن ندارد. اما اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن به بتن باعث افزایش قابل توجه مقاومت بتن در کشش و خمش می‌شود. اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن به بتن‌های بازیافتی باعث ناهمگن تر شدن بتن می‌شود. همچنین با افزایش میزان استفاده از این الیاف، کارایی و امکان قالب‌ریزی بتن کاهش می‌یابد [۱۶].

شیرانی بیدآبادی و همکارانش به بررسی تأثیر ابعاد و همچنین میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی بر خواص مکانیکی بتن و سپس بررسی تأثیر الیاف پلی پروپیلن و فولادی در بهبود خواص مکانیکی بتن بازیافتی

پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی، مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. همچنین جایگزینی ماسه بازیافتی تا میزان ۳۰ درصد، کاهش چندان بر مقاومت فشاری بتن ندارد و می‌تواند به عنوان طرح اختلاط بهینه بتن بازیافتی مدنظر قرار گیرد. علاوه بر این در صورت استفاده از الیاف، مقاومت کششی و خمشی بتن بازیافتی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد که در این میان، الیاف فولادی نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن از کارایی بالاتری در بهبود مقاومت کششی و خمشی بتن برخوردار است [۱۷].

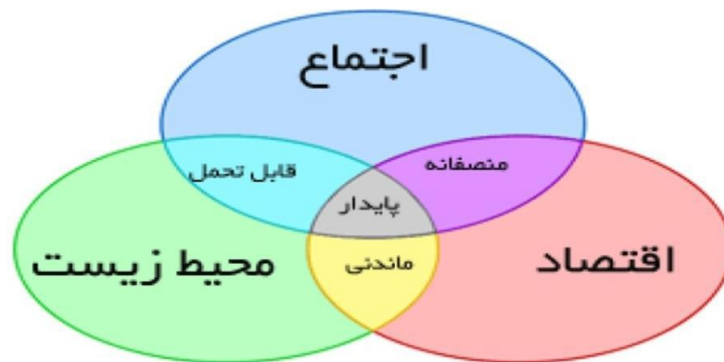
۲-۳- بتن ساخته شده از مواد بازیافتی

برای اولین بار راو و همکارانش در کشور المان بعد جنگ جهانی دوم به بررسی بازیافت بتن‌های ناشی از تخریب پرداختند [۱۸]. بعد از آن بررسی امکان استفاده مجدد از بتن‌های بازیافتی در کشورهای مختلف ادامه یافت. و اقتصاد توجه زیادی به استفاده از سنگدانه‌ها به دست آمده از مواد بازیافتی دارد. طبق مطالعات انجام شده، ضایعات جامد شهری در کشورهای توسعه یافته ۳۵ درصد و در کشورهای در حال توسعه ۵۰ درصد از کل ضایعات را شامل می‌شوند [۱۹]. حال اگر این حجم بالای ضایعات سنگی می‌توانست از مواد مضاف صنایع بازیافت شود، دیگر معادن شن و ماسه به سرعت رو به کاهش نمی‌رود و به حفظ محیط زیست کمک شایانی می‌شود.

۲-۳-۱- ضرورت استفاده از مواد بازیافتی

انقلاب صنعتی در قرن ۱۸ میلادی و حرکت ملتها به سوی صنعتی سازی و تولید انبوه در صنایع مختلف، استفاده بی‌مهابا از منابع طبیعی را به همراه داشت، که این مسئله به تولید بی‌رویه انواع آلاینده‌ها و تولید آلودگی‌های زیست‌محیطی منجر گردید، در نتیجه بعد از مدتی خطر اتمام سوخت‌های فسیلی و به دنبال آن بحران انرژی و یا افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی و به دنبال آن بروز امراض مختلف حس گردید، که باعث ایجاد نگرانی از آینده می‌شد. در این زمان بود که واژه‌هایی چون حفظ منابع طبیعی، میزان بهره‌وری،

میزان آلاینده‌گی، بومی‌سازی، تصفیه و استفاده از پسماندهای صنایع و ... مورد توجه قرار گرفتند. در همین راستا نهادها و سازمان‌هایی برای حفظ منابع طبیعی و محیط زیست، نظارت بر میزان تولید آلاینده‌ها، کنترل میزان مصرف انرژی توسط صنایع مختلف ایجاد شدند، که همه یک هدف مشترک را دنبال کرده و می‌کنند و آن هدف توسعه پایدار است. دورنما توسعه پایدار در حقیقت ایجاد تعادل میان توسعه و محیط زیست است، در سال ۱۹۸۰ برای نخستین بار نام توسعه پایدار در گزارش سازمان جهانی حفاظت از منابع طبیعی آمد. پایداری می‌تواند چهار جنبه داشته باشد: ۱- پایداری در منابع طبیعی ۲- پایداری سیاسی ۳- پایداری اجتماعی ۴- پایداری اقتصادی. مطابق شکل ۱-۲ توسعه پایدار تنها بر جنبه زیست محیطی اتفاقی تمرکز ندارد بلکه به جنبه‌های اجتماعی و اقتصادی آن هم توجه می‌کند. توسعه پایدار محل تلاقی جامعه، اقتصاد و محیط زیست است [۲۰].



شکل ۱-۲ نمودار توسعه پایدار

می‌توان در توسعه و پایداری بتن دو عامل ویژه زیر را بررسی کرد:

(۱) سنگدانه‌ها: باتوجه به اینکه حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد حجم بتن را سنگدانه تشکیل می‌دهد، می‌توان با هدف حفظ محیط زیست بجای استفاده از سنگدانه طبیعی از سنگدانه حاصل از بازیافت بتن‌های ضایعاتی استفاده کرد.

(۲) سیمان: یکی از آلاینده‌ترین و پر هزینه‌ترین صنایع جهان تولید سیمان است (برای تولید هر تن سیمان نیاز به ۴ الی ۶ تن مواد خام است و ۲/۸ تن دی‌اکسید کربن تولید می‌شود)، اگر مواد پوزولانی (خاکستر پوسته‌ی برنج، متاکائولن، زئولیت و ...) یا مواد شبه سیمانی جایگزین سیمان‌های پرتلند معمولی گردد، می‌تواند به توسعه پایدار بتن کمک شایانی کرد [۲۰].

۲-۳-۲- موارد کاربرد سنگدانه‌های بازیافتی

برای پر کردن گودها، زیر اساس جاده و خاکریز می‌توان از سنگدانه‌های بازیافتی خرد و سرنده استفاده کرد. همچنین می‌توان در ساخت بتن روسازی، شانه‌ی راه، سرعت گیر، پیاده‌رو ها، جدول کشی‌ها، شالوده‌ی پل‌ها، بتن قیری و غیره از سنگدانه‌های بازیافتی در اندازه‌های مشخص خرد شده، استفاده کرد. همچنین تحقیقات جدید نشان می‌دهد امکان استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در اجزا سازه‌ای وجود دارد.

۲-۳-۳- سنگدانه‌های بازیافتی

سنگدانه‌های بازیافتی از جمع‌آوری، خرد و سپس سرنده کردن ضایعات تخریب ساختمان در اندازه‌های مورد نیاز حاصل می‌گردند. که می‌توان سنگدانه‌های بازیافتی را به چهار نوع زیر تقسیم کرد:

- (۱) سنگدانه بتنی بازیافتی
- (۲) سنگدانه بنایی بازیافتی
- (۳) سنگدانه بازیافت شده مخلوط (متشکل از ترکیبی از بتن بازیافت شده و مصالح ساختمان بنایی بازیافتی و تخریب ضایعات)

۴) سنگدانه بازیافتی ساختمانی و تخریب (که با طبقات قبلی متفاوت است زیرا از نظر آلودگی مقادیر زیادی مانند آسفالت، شیشه، پلاستیک و چوب وجود دارد) [۳].

اتحادیه بین‌المللی آزمایشگاه‌ها و کارشناسان مصالح ساختمانی و همچنین برخی از کشورهای توسعه‌یافته، مطابق جدول (۲-۱) استانداردهای برای نحوه استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی را تدوین کرده‌اند [۳].

جدول ۲-۱ آیین‌نامه استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در برخی کشورها [۳]

کشور	استاندارد	ملزومات لازم در بتن بازیافتی	زمینه استفاده از بتن بازیافتی
برزیل	NBR نشریه ۱۵.۱۶۶، سنگدانه بازیافتی ضایعات حاصل از ساختمانی ۲۰۰۵	۱. تولید بتن بازیافتی با بیش از ۹۰٪ مصالح طبیعی ۲. سنگدانه مصالح بازیافتی کمتر از ۹۰٪ مصالح طبیعی	• فقط در اعضای غیرسازه‌ای
آلمان	استاندارد دین ۴۲۶-۱۰۰-۲۰۰۲ سنگدانه بازیافتی	۱. ضایعات بتنی ۲. ضایعات مصالح بنایی ۳. ضایعات ترکیبی (بتنی و مصالح بنایی) ۴. سایر ضایعات ساختمانی	• بتن با چگالی بیشتر از ۱۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب • امکان استفاده بتن تیپ ۱ و ۲ در مولفه‌های سازه‌ای • امکان استفاده بتن تیپ ۳ و ۴ در مولفه‌های غیرسازه‌ای
هنگ کنگ	بخشنامه فنی شماره ۲۰۰۲/۱۲ "مشخصات تسهیل استفاده از سنگدانه بازیافتی"	۱. مقدار ۲۰٪ سنگدانه بازیافتی ۲. مقدار ۱۰۰٪ سنگدانه بازیافتی	۱. مولفه‌های سازه‌ای با بیشینه مقاومت ۳۵ مگاپاسکال ۲. مولفه‌های غیرسازه‌ای با بیشینه مقاومت ۲۰ مگاپاسکال
ژاپن	استاندارد پیشنهادی برای استفاده از مصالح بازیافتی ۱۹۷۷	۱. بتن بازیافتی حاوی درشت‌دانه بازیافتی (حداکثر ۱۸ مگاپاسکال) ۲. بتن بازیافتی حاوی درشت‌دانه و ریزدانه بازیافتی (حداکثر ۱۲ مگاپاسکال)	پیشنهاد می‌شود هر دو نوع بتن بازیافتی برای مولفه‌های غیرسازه‌ای استفاده شود.
	JIS A 5021 (2005)	Class H	بتن پرمقاومت (عملکرد بالا)
RILEM	توصیه ۱۹۹۴ "مشخصات مربوط به سنگدانه‌های درشت برای بتن"	۱. تیپ ۱: سنگدانه متشکل از ضایعات مصالح بنایی ۲. تیپ ۲: سنگدانه متشکل از ضایعات بتنی ۳. سنگدانه متشکل از بیش از ۸۰٪ سنگدانه طبیعی و کمتر از ۱۰٪ از سنگدانه تیپ ۱	• در مولفه‌های سازه‌ای مورد استفاده قرار گیرد، به ویژه هنگامی که در سنگدانه تیپ ۲، تا ۱۰۰٪ سنگدانه طبیعی با مصالح بازیافت شده جایگزین شود و حداکثر مقاومت ۵۰-۶۰ مگاپاسکال است.

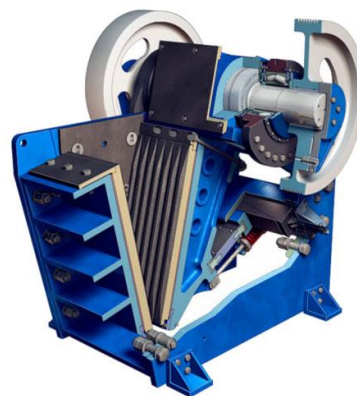
۲-۳-۴- سنگ شکن‌ها

سنگ شکن‌های تولید سنگدانه‌های بازیافتی مشابه با سنگ شکن تولید سنگدانه‌های طبیعی از سیستم باز یا بسته استفاده می‌کنند. که استفاده از سیستم بسته برای تولید سنگدانه‌های بازیافتی رایج‌تر می‌باشد [۲۱]. سیستم باز تولید سنگدانه‌های بازیافتی مزایای همچون ظرفیت تولید بالاتری نسبت به سیستم بسته دارد، اما بیشینه اندازه اسمی سنگدانه‌های تولیدی کوچکتر است. سنگ شکن تولید سنگدانه‌های بازیافتی می‌تواند در یک مکان ثابت و یا با قابلیت جابجایی داشته باشند. کارخانه‌هایی که قابلیت جابجایی دارند معمولاً دارای یک دستگاه سنگ شکن و چند دستگاه غربال هستند [۲۲].

به طور کلی برای تولید سنگدانه بازیافتی سه نوع دستگاه سنگ شکن فکی (شکل ۲-۲) ، سنگ شکن ضربه‌ای (شکل ۲-۳)، سنگ شکن مخروطی (شکل ۲-۴) موجود است. سنگ شکن مخروطی تنها قادر به خرد کردن سنگ‌ها با ابعاد کمتر از ۲۰۰ میلیمتر است، به همین دلیل امکان استفاده از سنگ شکن مخروطی به عنوان سنگ شکن اولیه نیست، معمولاً از سنگ شکن‌های فکی و ضربه‌ای به عنوان سنگ شکن اولیه استفاده می‌کنند [۲۲].



شکل ۲-۳ سنگ شکن ضربه‌ای



شکل ۲-۲ سنگ شکن فکی



شکل ۲-۴ سنگ شکن مخروطی

۲-۳-۵- ریز ساختار سنگدانه‌های بازیافتی

بتن حاوی سنگدانه‌های طبیعی^۱ (NAC) ماده کامپوزیتی از جمله سنگدانه‌های طبیعی^۲ (NA) و خمیر سیمان است. و دارای یک ناحیه انتقال سطحی^۳ (ITZ) بین خمیر سیمان و سنگدانه‌های طبیعی است [۲۶]. بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی^۴ (RAC) ماده کامپوزیتی است از جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی به طور کامل یا جزئی با سنگدانه‌های بازیافتی^۵ (RCA) ساخته می‌شود. با توجه به اینکه سنگدانه‌های بازیافتی از سنگدانه طبیعی و ملات متصل تشکیل شده است ، بنابراین مطابق شکل ۲-۵، بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی دارای سه ناحیه انتقال سطحی به شرح زیر است [۲۳].

(۱) ناحیه انتقال سطحی بین سنگدانه‌های طبیعی و خمیر سیمان قدیمی (ناحیه انتقال سطحی قدیمی) ،

(۲) ناحیه انتقال سطحی بین سنگدانه طبیعی و خمیر سیمان جدید (ناحیه انتقال سطحی جدید) ،

(۳) ناحیه انتقال سطحی بین خمیرهای سیمانی جدید و قدیمی (ناحیه انتقال سطحی جدید).

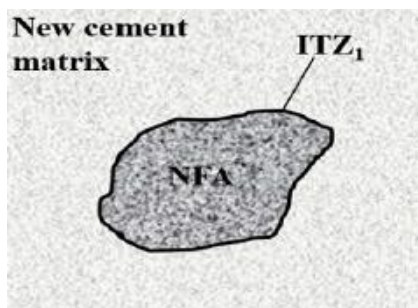
¹ Natural aggregate concrete

² Natural aggregate

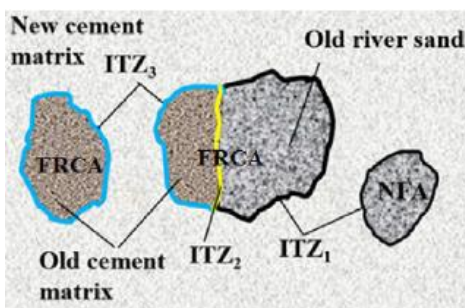
³ Interfacial transition zone

⁴ Recycled aggregate concrete

⁵ Recycled concrete aggregate



ب) بتن حاوی سنگدانه‌های طبیعی



الف) بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

شکل ۲-۵ ریز ساختار بتن [۲۳]

اوتسوکی و همکاران دریافتند که مقاومت ناحیه انتقال سطحی به نسبت آب به سیمان بستگی دارد. تحت شرایط نسبت آب به سیمان کم، ناحیه انتقال سطحی قدیمی بر خواص بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی تأثیر می‌گذارد. ناحیه انتقال سطحی جدید تحت نسبت زیاد نسبت آب به سیمانی دارای اثر است. بنابراین، تحت یک نسبت بالای آب به سیمان بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، اگر ناحیه انتقال سطحی قدیمی قوی‌تر از ناحیه انتقال سطحی جدید باشد، مقاومت بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی برابر است با بتن حاوی سنگدانه طبیعی. تحت نسبت آب به سیمان کم، اگر ناحیه انتقال سطحی قدیمی ضعیف‌تر از ناحیه انتقال سطحی جدید باشد، مقاومت بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی از بتن حاوی سنگدانه طبیعی کمتر است. بنابراین، پذیرفته شده است که ناحیه انتقال سطحی بر قدرت بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی تأثیر می‌گذارد [۲۳].

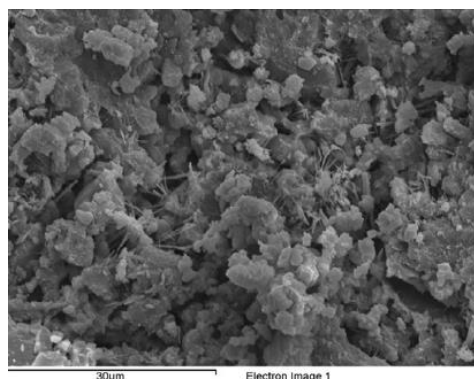
۲-۳-۶- نقص در ریز ساختار بتن بازیافتی

نقص ریزساختار بتن بازیافتی در اتصال ضعیف فیزیکی و شیمیایی بین سنگدانه‌های بازیافتی و خمیر سیمان است [۲۳]. همچنین ملات متصل نیز بخش ضعیف در بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی است. وجود ملات متصل باعث می‌شود تخلخل بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بالاتر از بتن حاوی سنگدانه‌های طبیعی، به

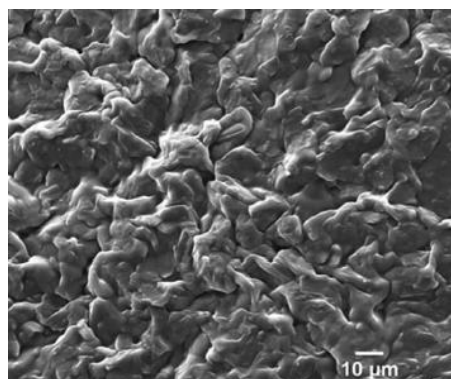
خصوص بتن حاوی ریزدانه بازیافتی^۱ (FRCA) باشد. با افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و نسبت آب به سیمان تخلخل افزایش می‌یابد. ضعیف بودن اتصال فیزیکی و شیمیایی بین سنگدانه‌های بازیافتی و خمیر سیمان را می‌توان به دو دلیل زیر نسبت داد:

(۱) سطح بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی دارای ذرات سست است (شکل ۶-۲)

(۲) یک لایه آب در نزدیکی سنگدانه‌ها تشکیل می‌شود، و یک لایه متخلخل‌تر از $Ca(OH)_2$ بین سطح سنگدانه‌های بازیافتی و خمیر سیمان به دلیل جذب آب زیاد سنگدانه‌های بازیافتی (شکل ۷-۲) [۲۳].



ب) سنگدانه بازیافتی

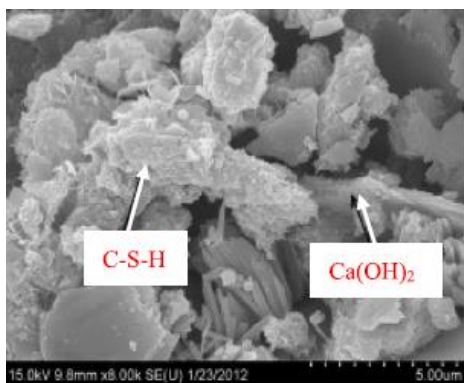


الف) سنگدانه طبیعی

شکل ۶-۲ سطح سنگدانه [۲۳]

¹ Fine recycled concrete aggregate

² Calcium hydroxide



ب) ناحیه انتقال سطحی جدید



الف) ناحیه انتقال سطحی قدیمی

شکل ۲-۷ ناحیه اتصال در بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی [۲۳]

۲-۳-۷- خواص سنگدانه‌های بازیافتی

با توجه به اینکه سنگدانه‌های بازیافتی از خرد و سرنده کردن بتن مادر ساخته می‌شود، و ممکن است مقاومت فشاری، نسبت آب به سیمان و نوع کاربرد بتن مادر متفاوت باشد. در نتیجه سنگدانه‌های بازیافتی تولید شده از بتن‌های مادرهای متفاوت خواص متفاوتی دارند. که در این قسمت نتایج بررسی تحقیقات گذشته بر روی خواص سنگدانه‌های بازیافتی متفاوت آورده شده است.

۲-۳-۷-۱- ضریب تورق و تطویل

به درصد وزنی دانه‌های پولکی شکل در کل نمونه شاخص تورق می‌گویند. به درصد وزنی ذرات سوزنی شکل در کل نمونه شاخص تطویل می‌گویند. این دو شاخص برای ارزیابی سنگدانه‌ها مفید هستند اما قادر به تعیین شکل سنگدانه‌ها نیستند [۲۴].

به طور کلی به سنگدانه‌هایی که ضخامت آن‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به دو بعد دیگر کمتر است، سنگدانه‌های پولکی شکل و به سنگدانه‌هایی که طول آن از ۱/۸ دو بعد دیگر سنگدانه بزرگتر باشد سنگدانه‌های سوزنی شکل گویند. به میانگین اندازه سوراخ دو الک متوالی که سنگدانه از یکی رد شده و بر روی دیگری باقی مانده است، میانگین ابعاد سنگدانه گویند [۱]. مقاومت خمشی و دوام بتن با حضور

سنگدانه‌های پولکی و سوزنی در بتن کاهش می‌یابد [۲۵]، بررسی تحقیقات گذشته بیانگر این است که شاخص تورق و تطویل سنگدانه‌های بازیافتی بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی است [۲۶].

۲-۳-۷-۲ چگالی، جذب آب و خلل فرج سنگدانه‌های بازیافتی

مهمترین عامل در میزان چگالی، جذب آب و خلل و فرج سنگدانه‌های بازیافتی ملات متصل است. چگالی سنگدانه‌های بازیافتی به دلیل کمتر بودن چگالی ملات متصل نسبت به سنگدانه‌های طبیعی کمتر از سنگدانه‌های طبیعی است. بررسی مطالعات گذشته نشان دهنده کاهش ۲ الی ۷ درصدی چگالی سنگدانه‌های بازیافتی اشباع با سطح خشک نسبت به سنگدانه‌های طبیعی است [۲۷].

جذب آب و خلل و فرج سنگدانه‌های بازیافتی به نوع سنگدانه‌های طبیعی موجود در بتن مادر و همچنین ملات متصل به سنگدانه‌ها وابسته است. سنگدانه‌های طبیعی خلل و فرج کمتری نسبت به سنگدانه‌های بازیافتی دارند، در نتیجه جذب آب آنها کمتر است. تحقیق‌ها نشان می‌دهد که جذب آب سنگدانه‌های طبیعی در محدوده‌ی ۰/۵ تا ۱ درصد و جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی اشباع با سطح خشک در محدوده‌ی ۴ تا ۴/۷ درصد است [۲۸]. تحقیق‌های دیگری نشان می‌دهد که جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی در محدوده‌ی ۴/۹ تا ۵/۲ درصد است و جذب آب سنگدانه‌های طبیعی در محدوده‌ی ۱ تا ۲/۵ درصد است [۲۷]. [۲۹]. همچنین با کاهش بیشینه اندازه اسمی سنگدانه‌های بازیافتی حجم ملات متصل افزایش یافته، و در نتیجه باعث افزایش جذب آب می‌شود [۳۰].

اندازه منافذ داخل سنگدانه‌ها در دامنه وسیعی تغییر می‌نماید. اگرچه تا کنون رابطه‌ی واضحی بین مقاومت فشاری بتن و جذب آب سنگدانه‌های مصرفی وجود ندارد. ولی به تجربه ثابت شده است، که منافذ موجود در سطح سنگدانه‌ها بر پیوستگی سنگدانه‌ها و ملات سیمان تأثیر مطلوب گذاشته، و در نتیجه مقاومت فشاری افزایش می‌یابد [۳۱].

تعیین چگالی، جذب آب و خلل و فرج سنگدانه‌های بازیافتی برای به دست آوردن طرح اختلاط مناسب، لازم است. از این ویژگی‌ها برای محدود کردن جذب آب بتن ساخته شده به حداکثر ۵ درصد برای بتن‌های سازه‌ای، استفاده می‌شود [۳۲].

۲-۳-۷-۳- درصد خردشدگی و سایش

آزمایش درصد خردشدگی و سایش لوس آنجلس به منظور سنجش مقاومت سنگدانه‌ها با دانه‌بندی استاندارد در برابر فشار و سایش انجام می‌شود. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که مقدار خردشدگی سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی بالاتر است. در مطالعه‌ای میزان ۲۳٪ برای خردشدگی سنگدانه‌های بازیافتی و میزان ۱۵٪ برای بازالت (یک نوع سنگدانه‌ی طبیعی) اندازه‌گیری شده است. در مطالعه‌ی دیگر میزان . سنگدانه‌های بازیافتی و میزان ۱۳٪ برای بازالت اندازه‌گیری شده است [۲۸]، [۲۹]. میزان سایش سنگدانه‌های بازیافتی نیز نسبت به سنگدانه‌های طبیعی بیشتر است. در مطالعه‌ای آزمایش سایش لوس آنجلس مقادیر ۳۳٪ برای سنگدانه‌های بازیافتی و ۱۱٪ برای سنگدانه‌های طبیعی را نشان می‌دهد. در مطالعه‌ای دیگر میزان ۲۶٪ و ۴۲٪ برای سنگدانه‌های بازیافتی و میزان ۲۲٪ برای سنگدانه‌های طبیعی اندازه‌گیری شده است [۲۸]، [۳۳].

دلیل منطقی برای کمتر بودن مقاومت در برابر سایش و خرد شدن سنگدانه‌های بازیافتی، شکستن آسان ملات خشک شده‌ی سیمان در سنگدانه‌های بازیافتی است. در واقع ناحیه‌ی اتصال ملات سیمان و سنگدانه نقطه ضعف سنگدانه‌های بازیافتی است [۳۴].

۲-۳-۷-۴- سطح رطوبت سنگدانه‌های بازیافتی

سطح رطوبت سنگدانه‌ها در سه حالت قابل بررسی است [۳۵]:

الف- وضعیت OD^1 (کاملاً خشک): برای دسترسی به این حالت باید سنگدانه‌ها را به مدت ۲۴ ساعت در کوره با دمای ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سلسیوس قرار داده شوند. زمانی که وزن سنگدانه‌ها به مقدار ثابتی رسید، سنگدانه‌ها در حالت OD هستند.

ب- وضعیت SSD^2 (اشباع با سطح): برای دسترسی به این حالت، سنگدانه‌های کاملاً خشک در مخزن پر از آب ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت در آن باقی می‌مانند. پس از خارج کردن سنگدانه‌ها و خشک کردن سطح آن‌ها، سنگدانه‌ها در حالت SSD هستند.

ج- وضعیت AD^3 (خشک شده در هوا): برای دسترسی به این حالت، سنگدانه‌هایی که در وضعیت SSD هستند به مدت ۲۴ ساعت در سطحی صاف پهن می‌شوند [۳۵].

۲-۳-۸- خواص مکانیکی بتن بازیافتی

در این بخش به بررسی پژوهش‌های گذشته در رابطه با خواص مکانیکی همچون مقاومت فشاری، مقاومت خمشی و مقاومت برشی بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی می‌پردازیم.

۲-۳-۸-۱- مقاومت فشاری بتن

بنابراین تعریف، مقاومت فشاری برابر است با مقدار تنش فشاری تک محوری، هنگامی که عضو مورد نظر کاملاً گسیخته می‌شود. مقاومت فشاری بتن از رابطه (۱-۲) محاسبه می‌شود. نسبت آب به سیمان مهمترین عامل در مقاومت فشاری بتن است. هرچه نسبت W/C کمتر باشد، مقاومت فشاری بتن بیشتر می‌شود [۱].

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (1-2)$$

¹ Oven dry

² Saturated Surface Dry

³ Air dry

در رابطه فوق f_c مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال، P نیروی فشاری تک محوری بر حسب نیوتن و A سطح مقطع عضو فشاری بر حسب میلی متر مربع است.

مقاومت فشاری بتن تحت تاثیر مستقیم نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی قرار دارد. در بررسی پژوهش راثو و همکارانش مشخص شد، که جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی به نسبت ۲۵٪ الی ۳۰٪ مقاومت فشاری بتن به طور قابل توجهی تغییر نخواهد کرد [۳۶]، در بررسی پژوهش هلال و همکارانش مشخص شد، که جایگزینی ۱۰۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی، موجب کاهش ۵۰٪ مقاومت فشاری خواهد شد [۳۷]، در بررسی پژوهش کو و پون مشخص شد، برای ساخت بتن پرمقاومت حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، باید مقاومت فشاری بتن مادر بالای ۶۰ مگا پاسکال باشد [۳۸]، یاگوشیتا و همکارانش نشان دادند، با افزایش مقاومت فشاری بتن مادر، مقدار ملات چسبیده به سنگدانه‌ها کاهش پیدا خواهد کرد [۳۹]. همچنین شیرانی بیدآبادی و همکارانش نشان دادند که، جایگزینی ماسه بازیافتی تا میزان ۳۰٪ کاهش چندان‌ی بر مقاومت فشاری بتن ندارد، و می‌تواند به عنوان طرح اختلاط بهینه بتن بازیافتی مدنظر قرار گیرد [۱۷].

۲-۸-۳- مقاومت خمشی بتن

مدول گسیختگی یا مقاومت کشش درخمش، در محاسبات عرض ترک و تغییر شکل تیرهای بتن مسلح دارای اهمیت است. مقاومت کشش در خمش که از رابطه‌ی (۲-۲) محاسبه می‌شود، مقادیر آن نسبت به مقاومت کشش مستقیم بزرگتر است [۴۰].

$$F_r = 0.63\sqrt{F_c} \quad (2-2)$$

در رابطه‌ی فوق F_r مقاومت کشش در خمش بتن و F_c مقاومت مشخصه بتن می‌باشد و هر دو برحسب نیوتن بر میلی‌متر مربع هستند.

مقاومت خمشی بتن بازیافتی و بتن معمولی به نسبت آب به سیمان وابسته است. با توجه به نسبت آب به سیمان دارای روند افزایشی یا کاهشی خواهد بود. در نتیجه مقاومت خمشی بتن بازیافتی و تعیین رابطه‌ی بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بتن بازیافتی نیاز به بررسی دارد [۳۳]. پژوهش‌های گذشته نشان دهنده این است که، جایگزینی ۱۵ تا ۵۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی، موجب کاهش ۱۳٪ مقاومت خمشی می‌شود [۴۱].

بلتران و همکارانش به منظور بررسی تاثیر جایگزینی شن بازیافتی با طبیعی از دو نسبت آب به سیمان ۰/۵ و ۰/۶ استفاده کردند. جدول (۲-۲) نشان دهنده‌ی نتایج مقاومت خمشی این تحقیق می‌باشد. مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی در هر دو نسبت آب به سیمان و درصدهای جایگزینی تفاوت چندانی با بتن شاهد نداشته است. به طور مثال در نسبت آب به سیمان ۰/۵، در جایگزینی ۲۰ و ۵۰ درصدی، مقاومت خمشی به میزان ۰/۷۸ و ۰/۱۹ افزایش و در جایگزینی ۱۰۰ درصدی مقاومت خمشی ۳٪ افزایش یافته است [۴۲].

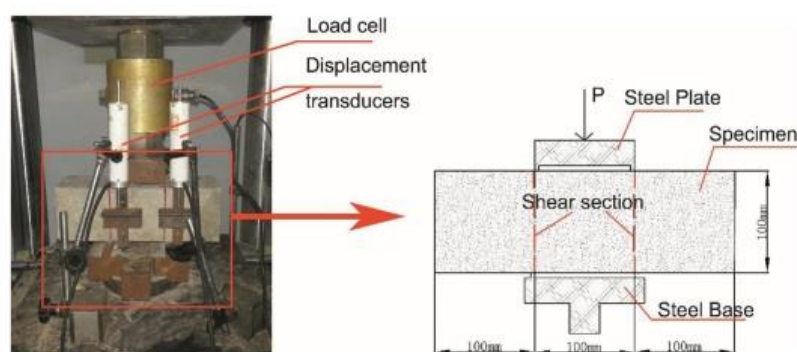
جدول ۲-۲ نتایج بررسی بلتران و همکاران بر روی اثر جایگزینی سنگدانه بازیافتی بر مقاومت خمشی بتن [۴۲]

نسبت اب به سیمان ۰/۶				نسبت اب به سیمان ۰/۵				مقاومت خمشی (MPa)
مبنا	جایگزینی ۲۰دصد	۵۰ درصد	۱۰۰درصد	مبنا	جایگزینی ۲۰دصد	۵۰ درصد	۱۰۰درصد	
۵/۰۹	۵/۱۳	۵/۱	۵/۲۵	۴/۷۱	۴/۶۱	۴/۶۸	۴/۸	

فرانکلین و گومده به منظور بررسی مقاومت خمشی بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی نمونه‌های بتنی را با نسبت آب به سیمان ۰/۵ و عیار سیمان ۴۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب ساختند. نتایج نشان می‌دهد که جایگزینی ۲۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪، ۸۰٪ و ۱۰۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی به ترتیب باعث کاهش ۸٪، ۳٪، ۳۲٪، ۳۷٪ و ۴۸٪ مقاومت خمشی می‌شود [۴۳].

۲-۳-۸-۳- مقاومت برشی

دانیگ گو و همکارانش به منظور بررسی مقاومت برشی نمونه‌های بتنی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و الیاف فولادی با مشخص‌های فیزیکی (طول ۰/۳۵ میلیمتر و قطر ۵۹ میلیمتر) پرداخته است. ابتدا به ساخت نمونه‌های بتنی با استفاده از نسبت جایگزینی ۰/۳۰، ۰/۵۰، ۰/۷۰ و ۱/۰۰٪ برای سنگدانه بازیافتی و ۰/۱، ۰/۱۵، ۰/۲٪ برای الیاف فولادی پرداخته است. سپس نمونه‌های نامبرده برای بررسی مقاومت فشاری و برشی مطابق شکل (۲-۸) در زیر جک هیدرولیکی تحت نیروی قائم ۲۸۰ کیلونیوتن قرار می‌گیرد [۱۳].



شکل ۲-۸ شماتیک آزمایش برشی در آزمایش دانیگ و همکارانش [۱۳]

مطابق جدول (۲-۳) نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که، افزایش سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری را کاهش می‌دهد، و تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت برشی ایجاد نخواهد کرد. همچنین با افزایش حجم الیاف مقاومت فشاری و برشی نیز افزایش پیدا خواهد کرد. شایان ذکر است که استفاده کمتر از ۰/۵٪ حجم الیاف تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر بهبود مقاومت برشی نخواهد گذاشت [۱۳].

جدول ۳-۲ نتایج بررسی دانیگ و همکاران بر خواص مکانیکی بتن بازیافتی [۱۳]

نمونه	Slump/mm	Elastic moduls/GPa	Fcu/MPa	Fts/MPa	Ffv(test)/MPa	Ffv(calculated)/MPa
C45R50F0	55	29.7	44.9	2.77	6.2	6.5
C45R50F5/0	60	34	45.6	4.11	9.0	9.0
C45R50F1	54	38.4	46.8	5.57	11.8	11.3
C45R50F1.5	50	41.9	48.1	7.02	13.9	13.9
C45R50F2	48	42.9	49.9	7.61	14.6	16.6
C45R0F1	62	33	45.4	5.6	12.8	11.2
C45R30F1	60	34.6	46.0	5.53	12.2	11.2
C45R100F1	52	37.8	47.2	5.35	11.7	11.4
C30R50F1	65	28.8	34.7	4.79	14/0	9.6
C60R50F1	52	44.2	62.3	6.72	13.5	13.3

۲-۴- بتن الیافی

۲-۴-۱- مقدمه

بتن‌های مسلح به الیاف مصالحی ترکیبی از سیمان‌های هیدرولیکی، سنگدانه، آب، هوا و الیاف‌های گسسته با پخشی یکنواخت است. الیاف‌ها ممکن است از جنس فلز، شیشه، پلیمر، کربن، سلولز و ... باشند. طول الیاف‌ها عموماً از ۳ تا ۸۵ میلی‌متر متفاوت است. قطر آن‌ها ممکن است از چند میکرون تا ۱ میلی‌متر متغیر باشند. سطح مقطع الیاف‌ها می‌تواند دایره، بیضی، چند وجهی، هلالی، مثلثی و مستطیلی باشد.

۲-۴-۲- تاریخچه بتن الیافی

استفاده از فیبرها در جهت تقویت موضوع جدیدی نیست، به نوعی فیبرها از زمان باستان در جهت تقویت مورد استفاده بوده است. موی اسب در گذشته در کاه‌گل و آجرهای گلی مورد استفاده بوده است، و باور بر این بوده که موی این حیوان باعث تقویت و بهبود مقاومت می‌شود. مصری‌ها از کاه برای مسلح کردن آجرهای گلی استفاده می‌کرده‌اند. شواهدی است که در حدود ۵۰۰۰ سال قبل از الیاف آریست در ساخت ظروف گلی استفاده شده است. در اوایل سال‌های ۱۹۰۰ الیاف آریستی (پشم شیشه) جهت تقویت بتن مورد استفاده قرار گرفتند. در سالهای ۱۹۵۰ مفهوم مواد کامپوزیتی رواج یافته، و تحقیقات و استفاده از

الیاف و بتن مسلح به الیاف مورد توجه بسیار قرار گرفت. با این حال با کشف سرطان‌زا بودن الیاف پشم شیشه و خطرناک تشخیص دادن آن‌ها، محققین به دنبال جایگزین‌هایی برای این الیاف بودند. بدین ترتیب در سال ۱۹۶۰ به تدریج الیاف فولادی، الیاف شیشه و الیاف مصنوعی دیگر مانند پلی پروپیلن در بتن مورد استفاده قرار گرفتند. استفاده از الیاف پشم شیشه نه تنها در بتن بلکه استفاده از آن‌ها در کل اروپا و ایالات متحده ممنوع اعلام شد. استفاده از الیاف نام برده همچنان بعد از گذشت ۴۰ سال ادامه داشته و همچنان در زمینه‌ی تقویت بتن یا مسلح کردن آن به این الیاف تحقیقات صورت می‌گیرد [۲۰].

۲-۴-۳- تاثیر افزودن الیاف در بتن

دو ضعف بتن، اولی رفتار شکننده و دومی مقاومت کششی کم، استفاده از بتن را با مشکلاتی روبرو کرده است. که با به کار بردن الیاف، از توسعه ترک‌های ریز جلوگیری شده و باعث تاخیر ترک‌های کششی در بتن می‌شود، در نتیجه مقاومت کششی و خمشی بتن به میزان زیادی افزایش می‌یابد. همچنین این امکان را فراهم کرده است که بتوان بتنی شکل پذیر و با قابلیت جذب انرژی بیشتر، و نیز بتنی با توسعه‌ی ترک خوردگی کمتر تحت بار و تنش‌های ناشی از انقباض و حرارت تولید نمود.

۲-۴-۴- انواع الیاف

الیاف‌ها از لحاظ جنس، شکل و اندازه انواع مختلفی دارند. پارامتر مناسبی که برای تعریف هر نوع الیافی می‌توان به کار برد، نسبت ظاهری الیاف $(L/D)^1$ می‌باشد. که در آن، L^2 طول الیاف و D^3 قطر آن است. نسبت (L/D) از ۳۰ تا ۱۰۰ متغیر بوده و L نیز بازه تغییر بین ۳ تا ۸۵ میلی‌متر را دارا می‌باشد. مطابق آیین‌نامه ASTM C1116/C1116M الیاف را می‌توان در چهار دسته‌ی الیاف طبیعی، مصنوعی، شیشه و فولادی طبقه‌بندی کرد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی انواع الیاف در جدول (۲-۴) آمده است [۴۴].

¹ Length/Diameter

² Length

³ Diameter

جدول ۴-۲ مشخصات فیزیکی و مکانیکی انواع الیاف

نوع الیاف	قطر (μm)	وزن مخصوص (g/cm^3)	تسلیم کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)
Metallic				
steel	5-1000	7.85	200-2600	195-210
Glass				
E glass	8-15	2.54	2000-4000	72
Ar glass	8-20	2.70	1500-3700	80
Synthetic				
Acrylic(PAN)	5-17	1.18	200-1000	14.6-19.6
Aramid	10-12	1.4-1.5	2000-3500	62-130
Carbon (low modulus)	7-18	1.6-1.7	800-1100	38-43
Carbon (high modulus)	7-18	1.7-1.9	1500-4000	200-800
Nylon (polyamide)	20-25	1.16	965	5.17
Polyester(e.g PET)	8-10	1.34-1.39	280-1200	10-18
Polyethylene (PE)	25-1000	0.96	80-600	5.00
Polyethylene (HPPE)	-	0.97	3000-4100	80-150
Polypropylene (PP)	10-200	0.90-0.91	310-760	3.5-4.9
Polyvinyl acetate (PVA)	3-8	1.2-2.5	800-3600	20-80
Natural-organic				
Cellulose (wood)	15-125	1.5	300-2000	10-50
coconut	100-400	1.12-1.15	120-200	19-25
Bamboo	50-400	1.5	50-350	33-40
Jute	100-200	1.02-1.04	250-350	25-32
Natural-inorganic				
Asbestos	0.02-25	2.55	200-1800	164
Wollastonite	25-40	2.87-3.09	2700-4100	303-530

۲-۴-۴-۱- الیاف طبیعی

الیاف طبیعی، به الیافی گفته می‌شود که از منابع طبیعی تولید شود. از الیاف‌های طبیعی همچون کاه، پنبه، کنف، بامبو، کتان، چتایی، سیسال، پوسته نارگیل و تفاله نیشکر برای بهبود خواص بتن استفاده می‌شود. تنها مزیت الیاف طبیعی سادگی تولید آن‌ها است، ولی در محیط‌های قلیایی آسیب‌پذیری آن‌ها زیاد می‌باشد، بنابراین تمایل بیشتر به استفاده از الیاف مصنوعی می‌باشد [۴۴].

۲-۴-۴-۲- الیاف شیشه

الیاف شیشه در بتن تازه به یکدیگر چسپیده و باعث کاهش کارایی بتن تازه می‌شود، که باید برای جبران این کاهش کارایی از روان کننده‌های مناسب استفاده گردد. واضح است که در صورت کلوخه شدن بتن

تازه، توزیع الیاف دیگر یکنواخت نیست، بنابراین باید از وقوع این پدیده جلوگیری به عمل آید [۴۵]. تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از الیاف شیشه بر مقاومت فشاری نهایی بتن تأثیر ناچیزی دارد اما مقاومت فشاری بتن را در سنین اولیه بالا می‌برد. همچنین استفاده از این الیاف تا حدودی باعث افزایش مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن می‌گردد [۴۶]. درحقیقت استفاده از الیاف شیشه باهدف مقاومت در برابر محیط‌های خورنده است. در شکل (۹-۲) الیاف شیشه نشان داده شده است.



شکل ۲-۹ نمونه‌ای از الیاف شیشه

۲-۴-۴-۳- الیاف مصنوعی

الیاف ، پلی پروپیلین، کولار و کربن از جمله الیاف مصنوعی هستند که، امروزه در بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۴-۴-۱- الیاف کولار (آرامید)

الیاف آرامید از زنجیره‌ای مولکولی طولانی پلی‌پارافتیلن ترفنال آمید تولید شده‌اند. که دارای ویژگی همچون نقطه ذوب بالا، پایداری حرارتی عالی، مقاومت در برابر شعله و غیر قابل حل بودن در بسیاری از حلال‌های آلی و سبکی هستند. آرایش بافتگی بالای زنجیرها به همراه اتصال خوب بین آنها، تلفیق منحصر به فردی از خواص را ایجاد می‌نماید. استحکام کششی بالا و وزن کم، ازدیاد طول کم در پارگی و چقرمگی خوب از جمله ویژگی‌های این الیاف است [۴۷]. در شکل (۱۰-۲) الیاف کولار نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۰ نمونه‌ای از الیاف کولار

۲-۴-۳-۲ الیاف پلی پروپیلین

پلی پروپیلین یک پلیمر ترمو پلاستیک است که فرمول مولکولی آن $[CH - CH(CH_3)]_N$ می‌باشد. این الیاف مقاومت بالایی در مقابل اکثر محیط‌های خورنده، اعم از قلیایی، اسیدی و نمکی داشته و این ویژگی به همراه چگالی و جذب رطوبت پایین آن را به پر مصرف‌ترین الیاف پلیمری مورد استفاده در بتن بدل کرده است. پروپیلین از مشتقات نفت بوده و از مواد اولیه دیگری که برای پلیمریزاسیون و تشکیل الیاف مصنوعی استفاده می‌شوند ارزانتر است. الیاف پلی پروپیلین از طریق پلیمریزاسیون پروپیلین به صورت یک پلیمر خطی تهیه می‌گردد و به اختصار آنرا PP^1 می‌نامند [۴۸].

الیاف PP از ترک خوردگی و جمع شدگی بتن به خصوص در سنین اولیه آن جلوگیری می‌کند. بتن ساخته شده با این الیاف از شکل پذیری بسیار زیادی برخوردار است و هرگز خرد نمی‌شود [۴۹]. در شکل (۲-۱۱) الیاف پلی پروپیلین نشان داده شده است.

¹ Polypropylene



شکل ۲-۱۱ نمونه‌ای از الیاف پلی پروپیلن

۲-۴-۳-۳- الیاف کربن

از مزایای اصلی الیاف کربن، استحکام بالا در مقابل خستگی، مقاومت در برابر خوردگی و ضریب انبساط حرارتی پایین هستند. اما باید توجه داشت که این نوع الیاف قیمت بالایی دارد [۴۹]، کاربرد الیاف کربن عموماً در حالت‌های خاص در مواردی که نیاز به مقاومت بالایی باشد صورت می‌پذیرد. مقاومت این الیاف ۲ تا ۳ برابر مقاومت فولاد است. در شکل (۲-۱۲) الیاف کربن نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۲ نمونه‌ای از الیاف کربن

۲-۴-۴-۲- الیاف فولادی

مطابق آیین نامه ASTM A820/A820M الیاف فولادی از نقطه نظر ساخت به ۵ دسته تقسیم شده‌اند که عبارت‌اند از [۵۰]:

(۱) سرد نورد شده

(۲) ورق برش خورده

(۳) ذوب شده

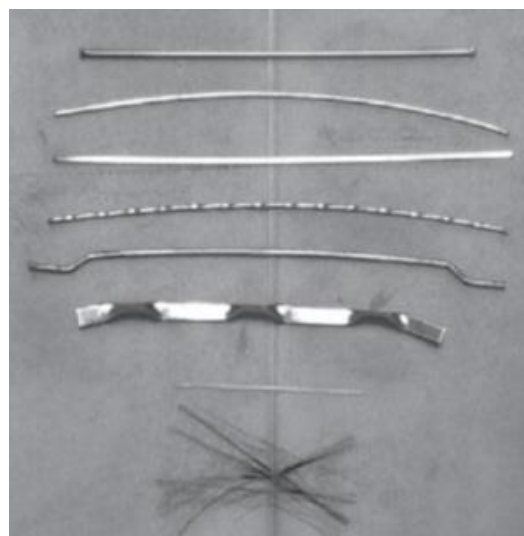
(۴) برش کارخانه

(۵) سرد نورد شده اصلاح شده

همچنین الیاف فولادی از نظر شماتیک انواع مختلفی همچون ساده، انتهای قلاب، موجدار، دم پهن و غیره دارند. انواع الیاف فولادی در شکل (۲-۱۳) نشان داده شده است.



ب) شماتیک انواع الیاف فولادی



الف) تصویری از انواع الیاف فولادی

شکل ۲-۱۳ انواع الیاف فولادی

طبق تحقیقات مقاومت فشاری بتن‌های الیافی به مقدار ناچیزی با اضافه کردن الیاف بهبود می‌یابد. این در حالی است که مقاومت کششی بتن الیافی بسیار تحت تأثیر الیاف قرار می‌گیرد. به عنوان مثال با افزودن الیاف فولادی به مقدار ۱/۵٪ از حجم بتن، مقاومت فشاری را حداکثر تا ۱۵٪ افزایش می‌دهد، این در حالی است که مقاومت کششی را در حدود ۳۰٪ تا ۴۰٪ افزایش می‌دهد [۵۱].

استفاده از الیاف فولادی در بتن موجب افزایش خواص بتن از جمله مقاومت در برابر ترک خوردگی، شکل پذیری، چقرمگی، مقاومت در برابر خستگی و ضربه می‌شود [۵۲].

الیاف فولادی به طور کلی به دو دسته میکرو الیاف و ماکرو الیاف تقسیم می‌شود:

۱) میکرو الیاف: از میکرو الیاف‌ها به طور کلی برای به حداقل رساندن تعداد ترک و کاهش عرض ترک استفاده می‌شود. طول میکرو الیاف فولادی کوچکتر از ۳۸ میلی‌متر و قطر آن کمتر از ۰/۳ میلی‌متر است.

۲) ماکرو الیاف: ماکرو الیاف‌ها (الیاف سازه ای) بطور کلی برای ایجاد مقاومت خمشی بالا و جایگزینی مناسب برای میلگردهای فولادی است. طول ماکرو الیاف‌ها حدوداً بین ۳۸-۵۰ میلی‌متر و قطر آن بیش از ۰/۳ میلی‌متر است.

۲-۵- افزودنی‌های کاهنده آب

مطابق استاندارد ملی ایران ISIRI 2930 افزودنی‌های کاهنده آب به سه دسته روان کننده‌ها، فوق روان کننده‌ها و فرا روان کننده‌ها تقسیم می‌شوند [۵۳].

۲-۵-۱- روان کننده‌ها

در سال ۱۹۳۰ میلادی اولین دسته کاهنده آب روان کننده‌ها بودند، که در بتن مورد استفاده قرار گرفتند. براساس ویژگی‌های این مواد شیمیایی به سه قسمت تقسیم می‌شوند:

۱) روان کننده‌های معمولی

۲) روان کننده های کندگیر

۳) روان کننده های زودگیر

۲-۵-۲- فوق روان کننده ها

در سال ۱۹۵۰ میلادی دومین دسته کاهنده آب فوق روان کننده ها بودند، که در بتن مورد استفاده قرار

گرفتند. براساس ویژگی های این مواد شیمیایی به دو قسمت تقسیم می شوند:

۱) فوق روان کننده معمولی

۲) فوق روان کننده کندگیر

۲-۵-۳- فرا روان کننده

در سال ۱۹۹۰ میلادی سومین دسته کاهنده آب فرا روان کننده ها بودند، که در بتن مورد استفاده قرار

گرفتند. این نوع افزودنی ها با نام های فوق روان کننده توانمند یا ابر روان کننده نیز شناخته می شوند.

۲-۶- بررسی تاثیر افزودن الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر بتن بازیافتی

به طور معمول الیاف های ماکرو با هدف جلوگیری از گسترش ترک و الیاف های میکرو با هدف جلوگیری از

ایجاد ترک های ریز به بتن افزوده می شود. در این بخش به بررسی مطالعات پیشین تاثیر الیاف فولادی ماکرو

و الیاف پلی پروپیلن میکرو بر خواص مکانیکی بتن حاوی سنگدانه های بازیافتی پرداخته می شود.

۲-۶-۱- بررسی تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر بتن حاوی سنگدانه های بازیافتی

طوقا والد احمد به مطالعه تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر بتن حاوی سنگدانه های بازیافتی پرداختند. در این

پژوهش، سنگدانه های بازیافتی با نسبت ۵۰٪ و ۱۰۰٪ جایگزین سنگدانه های طبیعی در بتن شد. و همچنین

الیاف پلی پروپیلن با نسبت های حجمی ۰/۱۵٪، ۰/۳۰٪، ۰/۴۵٪، ۰/۶۰٪، ۰/۷۵٪ و ۰/۹٪ به بتن افزوده شد.

نتایج نشان می دهد، افزودن الیاف پلی پروپیلن تا ۰/۶۰٪ به بتن حاوی سنگدانه های بازیافتی باعث افزایش

خواص مکانیکی می‌شود. همچنین افزودن ۰/۶۰٪ الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش مقاومت فشاری با نسبت جایگزینی ۰/۰، ۵۰/۰، ۱۰۰/۰٪ از سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب ۲۰٪، ۱۵٪ و ۱۱٪ شد. همچنین آقای والد احمد درصد بهینه سنگدانه‌های بازیافتی و الیاف پلی‌پروپیلن به ترتیب ۴۲٪ و ۳۹٪ محاسبه کردند. نتایج بررسی طوقا واحد احمد در جدول (۵-۲) آمده است [۵۴].

جدول ۵-۲ نتایج تحقیقات طوقا والد احمد [۵۴]

الیاف pp (%)	جایگزینی سنگدانه (%)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت خمشی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (MPa)
0.00	0.0	66	4.53	2.7	32.560
	50	61.2	4.37	2.67	31.417
	100	59.5	3.9	1.98	31.025
0.15	0.0	71.2	4.76	2.81	33.690
	50	67.2	4.67	2.77	32.830
	100	65.1	4.08	2.19	32.370
0.30	0.0	78.3	4.8	2.91	35.234
	50	74.6	4.73	2.83	34.478
	100	72.6	4.16	2.25	34.060
0.45	0.0	79.3	4.85	2.95	35.510
	50	75.1	4.77	2.87	34.656
	100	73.9	4.24	2.34	34.408
0.60	0.0	80.1	4.9	3.01	35.746
	50	76.4	4.89	2.91	34.998
	100	74.0	4.34	2.44	34.503
0.75	0.0	76.3	4.83	2.93	35.053
	50	73.3	4.78	2.81	34.433
	100	70.1	4.26	2.36	33.757
0.9	0.0	60.9	4.34	2.41	31.800
	50	56.3	4.23	2.31	30.724
	100	53.2	3.76	1.75	29.975

۲-۶-۲- بررسی تاثیر الیاف فولادی بر بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

آقای جلیلان‌فر و همکارانش به بررسی تاثیر الیاف فولادی بر بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی پرداختند. در این بررسی نتایج آزمایش‌های بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی با جایگزینی ۳۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ و مقدار حجم الیاف فولادی ۰/۵٪، ۱٪ و ۱/۵٪ آورده شده است. با افزایش مقدار الیاف از ۰ به ۱/۵٪ افزایش قابل

توجهی در مقاومت فشاری و خمشی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی مشاهده شد [۳۰]. نتایج بررسی مقاومت

فشاری و خمشی اقای جلیلیان فر به ترتیب در جدول (۲-۶) و (۲-۷) آمده است [۳۰].

جدول ۲-۶ نتایج بررسی مقاومت فشاری جلیلیان فر [۳۰]

نمونه	مقاومت فشاری (MPa)		نسبت مقاومت ۷ روزه به ۲۸ روزه (/.)
	۷ روزه	۲۸ روزه	
R0-S0	34.5	51.6	49
R0-S0.5	38	55.1	45
R0-S1	36.9	50	36
R0-S1.5	41.6	49.6	19
R30-S0	31.1	52.4	69
R30-S0.5	36	56.2	56
R30-S1	34.2	59.6	74
R30-S1.5	39	54.7	40
R50-S0	30.2	53.8	78
R50-S0.5	35.1	53.8	53
R50-S1	35.8	57.6	61
R50-S1.5	38	52.2	39
R100-S0	30.9	49.6	60
R100-S0.5	33.8	54/0	49
R100-S1	35.1	52.2	49
R100-S1.5	36.7	48.9	33

جدول ۲-۷ نتایج بررسی مدول پارگی تحقیقات اقای جلیلیان فر [۳۰]

نمونه	بیشینه بار خمشی (KN)	مدول پارگی (MPa)	T_{150}^D (J)
R0-S0	6.43	5.14	0.313
R0-S0.5	8.44	6.75	11.17
R0-S1	10.72	8.58	12.57
R0-S1.5	12.16	9.73	14.83
R30-S0	7.88	6.30	0.590
R30-S0.5	8.34	6.66	3.66
R30-S1	10.62	8.50	9.86
R30-S1.5	13.33	10.66	11.17
R50-S0	5.34	4.27	0.291
R50-S0.5	8.72	6.98	8.49
R50-S1	15.3	8.42	10.39
R50-S1.5	11.49	9.19	10.52
R100-S0	4.5	3.6	0.251
R100-S0.5	8.04	6.43	4.41
R100-S1	10.02	8.02	9.27
R100-S1.5	12.05	9.64	11..27

آقای شیرانی بید آبادی به بررسی تاثیر افزودن الیاف پلی پروپیلن و فولادی به بتن حاوی ۳۰٪ (درصد بهینه) ریزدانه بازیافتی بر مقاومت خمشی و کششی بتن پرداختند. نتایج نشان می دهد الیاف فولادی نسبت به الیاف پلی پروپیلن کارایی بهتری در مقاومت کششی و خمشی بتن بازیافتی دارد. نتایج بررسی آقای شیرانی بید آبادی در جدول (۸-۲) نشان داده شده است [۱۷].

جدول ۸-۲ نتایج بررسی آقای شیرانی بید آبادی [۱۷]

تغییرات مقاومت خمشی نسبت به بتن شاهد (٪)	تغییرات مقاومت کششی نسبت به بتن شاهد (٪)	مقاومت خمشی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	طرح اختلاط
0	0	5.16	2.92	cc
-4.7	-4.5	4.92	2.79	R30
5.3	10	5.43	3.23	R30-P1
9.2	25.1	5.63	3.66	R30-P1.5
16.5	36.1	6.01	3.98	R30-S1
29.6	56.6	6.68	4.58	R30-S1.5

۲-۷- جمع بندی فصل دوم

پس از بررسی مبانی و پژوهش های گذشته در مورد بتن حاوی سنگدانه های بازیافتی و الیاف، می توان نتیجه گرفت که وجود ملات متصل در سنگدانه های بازیافتی باعث کاهش خواص مکانیکی سنگدانه های بازیافتی نسبت به سنگدانه های طبیعی می شود. که در صورت جایگزینی سنگدانه های بازیافتی با طبیعی در عضوهای سازه ای باعث کاهش خواص مکانیکی بتن می شود. بنابراین راه های مختلفی برای جبران کاهش خواص مکانیکی بتن ناشی از جایگزینی سنگدانه های بازیافتی توسط محققین گذشته ارائه شده است، که می توان به راه حل های همچون حذف ملات متصل، افزودن میکروسیلیس ها و افزودن الیاف و ... اشاره کرد.

حذف ملات متصل راهی زمان بر و پرهزینه است. همچنین افزودن میکرو سیلیس ها بیشتر مقاومت فشاری بتن را بهبود می بخشد، و تاثیری چندانی بر ضعف بتن یعنی کشش و خمش ندارد. اما افزودن الیاف باعث افزایش خواص مکانیکی بتن می شود. از این رو محققین زیادی به بررسی تاثیر الیاف های مختلف بر خواص مکانیکی بتن حاوی سنگدانه های بازیافتی پرداختند، که الیاف پلی پروپیلن و فولادی پرکاربردترین الیاف ها

هستند. به طوریکه الیاف پلی پروپیلن با جلوگیری از ایجاد ترک‌های ریز باعث افزایش مقاومت کششی و فشاری می‌شود، و الیاف فولادی با جلوگیری از گسترش ترک‌ها باعث افزایش شکل پذیری بتن می‌شود. در این پژوهش سعی بر این است با ترکیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن شکل پذیری و همچنین مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی را بهبود ببخشیم.

فصل سوم

برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مقدمه

شاید بتوان ادعا کرد که مرحله عملی، مهم‌ترین و حساس‌ترین قسمت هر پژوهش آزمایشگاهی یا تجربی است، زیرا که شرایط و عوامل محیطی، انسانی و ابزاری در نتایج حاصله بسیار تاثیر گذار می‌باشند. بنابراین قسمت آزمایشگاهی پژوهش باید با دقت فراوان و برنامه‌ریزی دقیق و کنترل شرایط به انجام برسد. بر این اساس در این فصل، ابتدا خواص فیزیکی و شیمیایی مصالح مصرفی در این پژوهش و سپس روش‌های تولید و مصرف مصالح شرح داده شده‌اند. سپس نحوه انجام آزمایش‌های صورت گرفته در این پژوهش ارائه گردیده است. در انتها مشخصات طرح اختلاط‌ها و نحوه ساخت نمونه‌ها شرح داده شده است.

۳-۲- مواد مصرفی

مصالح مصرفی در این پژوهش آب، سیمان، سنگدانه‌ها، الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن است. ویژگی مصالح مصرفی به شرح زیر است:

۳-۲-۱- آب

مطابق با مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، آب مصرفی در بتن باید قابل آشامیدن باشد، مزه یا بوی مشخصی نداشته و تمیز و صاف باشد [۵۵]. به همین دلیل آب استفاده شده در طرح اختلاط بتن، آب شرب شهرستان شاهرود است، همچنین آب مصرفی جهت عمل‌آوری نمونه‌های بتنی، آب بدون سختی با مقدار ۴۰ گرم آهک در هر مترمکعب است.

۳-۲-۲- سیمان

سیمان مصرفی در این تحقیق، سیمان تیپ دو (اصلاح شده) شاهرود است، که مشخصات شیمیایی آن در جدول (۳-۱) آمده است.

جدول ۳-۱ مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی

SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	So ₃
%۲۱/۱۱	%۱/۳۷	%۶۳/۶۳	%۴/۴۸	%۳/۹۱	%۲/۵۸

۳-۲-۳- سنگدانه‌ها

در این پژوهش از دو سنگدانه بازیافتی و طبیعی استفاده می‌شود. چون سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی دارای خواص مکانیکی متفاوتی هستند، پس آزمایش‌های همچون درصد سایش، درصد رطوبت، درصد جذب آب و چگالی سنگدانه‌ها برای تعیین خواص مکانیکی سنگدانه‌های بازیافتی و مقایسه آن با سنگدانه‌های طبیعی صورت می‌گیرد. در ادامه این فصل آزمایش‌های برای تعیین ویژگی سنگدانه‌ها مختصراً شرح داده شده است.

۳-۲-۳-۱- سنگدانه‌های طبیعی

سنگدانه‌های طبیعی مورد استفاده در این پروژه از معادن سنگ شاهرود تهیه شده است، ماسه مصرفی از نوع ماسه شسته با بیشینه اندازه اسمی ۴/۷۵ میلی‌متر و مدول نرمی ۳/۹ است. و درشت‌دانه‌های مصرفی در این بررسی آزمایشگاهی، از نوع درشت‌دانه شکسته با بیشینه اندازه اسمی ۱۲/۵ میلی‌متر است.

۳-۲-۳-۲- سنگدانه‌های بازیافتی

در این پژوهش سنگدانه‌های بازیافتی، از خرد و الک کردن بتن مادر با مقاومت ۳۵ تا ۴۵ مگاپاسکال، و با ابعاد ۱۵*۱۵*۱۵ و ۱۵*۳۰ سانتی‌متری نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای تولید شد. نمونه‌های بتنی مادر مطابق شکل (۳-۱) ابتدا توسط چکش به حداقل بعد ۷ سانتی‌متر شکسته، سپس مطابق شکل (۳-۲) توسط ماشین سنگ‌شکن فکی خرد شده اند. و در انتها مطابق شکل (۳-۳) توسط دستگاه شیکر لرزاننده الک شده‌اند.



شکل ۳-۱- نمونه‌های بتنی قدیمی



شکل ۳-۳- سنگدانه بازیافتی



شکل ۳-۲- دستگاه سنگ شکن فکی

۳-۲-۴- مواد افزودنی

در این پروژه تحقیقاتی برای افزایش روانی، کارایی و مقاومت بتن از مواد افزودنی استفاده نشده است.

۳-۲-۵- الیاف

در این پروژه از دو نوع الیاف (ماکرو فولادی و میکرو پلی پروپیلن) استفاده شد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف‌های مصرفی توسط شرکت سازنده در جدول (۲-۳) آمده است. همچنین شکل (۴-۳) شماتیک الیاف مصرفی در این پروژه تحقیقاتی نشان می‌دهد.

جدول ۲-۳ مشخصات فیزیکی و مکانیکی الیاف مصرفی

جنس الیاف	فولادی	پلی پروپیلن
نوع الیاف	دو سر قلاب	ساده
طول (mm)	35	1.8
قطر (mm)	0.8	0.2
نسبت طول به قطر L/D ^۱	62.5	90
چگالی (Kg/cm)	7.85	0.91
تنش تسلیم (MPa)	2100	20
مدول الاستیسیته (MPa)	200000	1140



18 mm
diameter
d=0.2 mm

ب) الیاف پلی پروپیلن



35 mm
diameter
d=0.8 mm

الف) الیاف فولادی

شکل ۳-۴ شماتیک الیاف مصرفی

۳-۳- شرایط ساخت و عمل آوری نمونه‌های آزمایشگاهی

در این پروژه آزمایشگاهی مطابق شکل (۳-۵) از حوضچه آب بدون سختی با مقدار ۴۰ گرم آهک در هر مترمکعب استفاده شد. همچنین در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از وسایلی همچون قالب، ترازو، میکسر، تخماق، بیلچه، چکش پلاستیکی و سطل استفاده شده است. وسایل استفاده شده برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل (۳-۶) نشان داده شده است.

¹ Length/Diameter



شکل ۳-۶ وسایل استفاده شده برای ساخت نمونه



شکل ۳-۵ حوضچه عمل آوری

۳-۳-۱- شرایط اختلاط مصالح نمونه‌های بتنی بدون الیاف

برای اختلاط مصالح نمونه‌های بتنی بدون الیاف، به ترتیب گام‌های زیر انجام شد:

- در گام اول مصالح مصرفی را توزین کرده، و مطابق شکل (۳-۶) وسایل ساخت نمونه را فراهم می‌کنیم.
- در گام دوم میکسر و وسایل ساخت را شسته، و در معرض هوا خشک می‌کنیم. تا از عاری بودن میکسر و وسایل ساخت نمونه از گرد و غبار اطمینان حاصل شود.
- در گام سوم سنگدانه‌های ریز و درشت به میکسر اضافه می‌کنیم و به مدت دو دقیقه مخلوط می‌کنیم.
- در گام چهارم مقدار آب محاسبه شده جهت اشباع شدن با سطح خشک را به میکسر اضافه می‌کنیم، تا از اشباع شدن مصالح و همچنین ترکیب سنگدانه‌ها اطمینان حاصل شود.
- گام پنجم سیمان را به مخلوط سنگدانه اضافه کرده و به مدت دو دقیقه مخلوط می‌شود.
- در گام ششم آب را به آرامی به مخلوط اضافه کرده تا ز کلوخه شدن جلوگیری شود، و بعد از اضافه کردن کامل آب به مخلوط عمل اختلاط به مدت ۸ دقیقه درون میکسر انجام می‌گیرد.

- در گام هفتم مخلوط را از میکسر خارج کرده و در سطلی ریخته، و درون سطل بتن را با بیلچه مخلوط می‌کنیم. تا از یکنواخت پخش شدن مصالح اطمینان حاصل شود،
- در گام آخر مطابق شکل (۷-۳) آزمایش اسلامپ نمونه‌های فاقد الیاف گرفته می‌شود.



شکل ۷-۳ آزمایش اسلامپ نمونه‌های فاقد الیاف

۳-۳-۲- شرایط اختلاط مصالح نمونه‌های بتنی حاوی الیاف

برای اختلاط مصالح نمونه‌های بتنی حاوی الیاف به ترتیب گام‌های زیر انجام شد:

- در گام اول مصالح مصرفی را توزین کرده، و وسایل ساخت نمونه را فراهم می‌کنیم.
- در گام دوم میکسر و وسایل ساخت نمونه را شسته و در معرض هوا خشک می‌کنیم، تا از عاری بودن میکسر و وسایل ساخت نمونه از گرد و غبار اطمینان حاصل شود.
- در گام سوم سنگدانه‌های ریز و درشت به میکسر اضافه می‌کنیم. و به مدت دو دقیقه مخلوط می‌کنیم.

- در گام چهارم مقدار آب محاسبه شده جهت اشباع شدن با سطح خشک را به میکسر اضافه کرده، تا از اشباع شدن مصالح و همچنین ترکیب سنگدانه‌ها اطمینان حاصل شود.
- در گام پنجم سیمان را به مخلوط سنگدانه اضافه کرده و به مدت دو دقیقه مخلوط می‌شود.
- در گام ششم آب را به آرامی به مخلوط اضافه کرده تا از کلوخه شدن جلوگیری شود، و بعد از اضافه کردن کامل آب به مخلوط عمل اختلاط به مدت ۳ دقیقه درون میکسر انجام می‌گیرد.
- در گام هفتم ابتدا الیاف پلی‌پروپیلن و سپس الیاف فولادی به صورت پراکنده و به آرامی به مخلوط اضافه می‌شود. و به مدت ۵ دقیقه درون میکسر مخلوط می‌گردد.
- در گام آخر مصالح را از میکسر خارج کرده و در سطلی ریخته و درون سطل بتن را با بیلچه مخلوط می‌کنیم تا از یکنواخت پخش شدن مصالح اطمینان حاصل شود.

۳-۳-۳- قالب‌ریزی نمونه‌های فاقد و حاوی الیاف

- برای ساخت نمونه‌های فشاری و کششی، از قالب‌های استوانه‌ای 10×20 سانتی‌متری (شکل ۳-۸)، همچنین برای ساخت نمونه‌های خمشی، از قالب منشوری به طول ۳۵ سانتی‌متر و مقطع 10×10 سانتی‌متر (شکل ۳-۹) استفاده گردید. برای قالب‌ریزی نمونه‌های فاقد و حاوی الیاف به ترتیب گام‌های زیر انجام شد:
- در گام اول سطوح داخلی قالب را با روغن مخصوص قالب، روغن کاری می‌کنیم.
 - در گام دوم نصف ارتفاع قالب‌های استوانه‌ای و منشوری را بتن‌ریزی می‌کنیم.
 - در گام سوم بتن ریخته شده را، با ۲۵ ضربه تخماق کوبیده می‌شود، سپس به هر وج خارجی قالب با چکش لاستیکی به بدنه قالب دو ضربه زده می‌شود. تا حباب هوای موجود در بتن خارج گردد.
 - در گام چهارم نصف دیگر قالب‌ها را بتن‌ریزی کرده، و مطابق آنچه گفته شد تراکم انجام می‌شود.
 - در گام پنجم سطح نمونه‌ها را با خط کش یا ماله صاف می‌کنیم.

بعد از اتمام عملیات تراکم و قالب‌ریزی، برای جلوگیری از تبخیر آب نمونه‌های بتنی، سطح فوقانی قالب با گونی مرطوب پوشانده می‌شود. مطابق شکل (۳-۱۰) نمونه‌های بتنی بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج می‌شود و در حوضچه عمل‌آوری آب قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۹ قالب منشوری



شکل ۳-۸ قالب استوانه‌ای



شکل ۳-۱۰ نمونه‌های بتنی بعد گذشت ۲۴ ساعت در قالب

۳-۴- طرح اختلاط

در این پروژه تحقیقاتی طرح اختلاط نمونه‌های بتنی بر اساس طرح ملی بتن ایران به روش وزنی و برای سنگدانه‌های طبیعی محاسبه شد. و پس از چندین بار تعدیل، طرح اختلاط نهایی بتن شاهد در جدول

(۳-۳) آورده شده است. لازم به ذکر است که آب آزاد محاسبه شده ۱۷۲ کیلوگرم برای هر مترمکعب بتن بود. و آب اضافه موجود در جدول (۳-۳) برای اشباع کردن سنگدانه‌های طبیعی است.

جدول ۳-۳ طرح اختلاط بتن شاهد

اسلامپ (mm)	مقاومت فشاری هدف (MPa)	ریزدانه (Kg)	درشت‌دانه (Kg)	W/C	سیمان (Kg)	آب (Kg)	نمونه
15	35	794	530	4/0 3	400	185	بتن شاهد

در این پروژه تحقیقاتی، مقدار ۲۵٪ و ۵۰٪، درشت‌دانه‌های بازیافتی با نسبت وزنی جایگزین درشت‌دانه‌های طبیعی می‌شوند. باتوجه به اینکه سنگدانه‌های مصرفی در این پروژه در هنگام اختلاط در سطح رطوبت کارگاهی بوده و در وضعیت اشباع با سطح خشک قرار ندارند، و همچنین سنگدانه‌های بازیافتی درصد جذب آب بیشتری نسبت به سنگدانه‌های طبیعی دارد. بنابراین جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی موجب کاهش کارایی بتن می‌شود. برای رفع مشکل مذکور در نمونه‌های بتنی حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب ۴ و ۸ کیلوگرم آب در مترمکعب به طرح اختلاط بتن شاهد جهت اشباع کردن سنگدانه‌های بازیافتی اضافه گردید.

در این پژوهش، برای جایگزینی سنگدانه‌ها از نسبت وزنی و برای افزودن الیاف به نمونه‌ها از نسبت حجمی استفاده شد. نماد طرح اختلاط بتن حاوی درشت‌دانه‌های بازیافتی مسلح به الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به صورت (عدد S- عدد P- عدد R) است. عدد R نشان دهنده درصد وزنی جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی با طبیعی، عدد P نشان دهنده درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن و عدد S نشان دهنده درصد حجمی الیاف فولادی است. به عنوان مثال: R25-P.4-S.5 نشان دهنده نمونه بتنی حاوی ۲۵٪ درشت‌دانه بازیافتی با ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۵٪ الیاف فولادی است. لازم به ذکر است که در این پروژه تحقیقاتی جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی فقط در محدوده درشت‌دانه‌ها انجام شده است. به عنوان مثال: بتن با نسبت

جایگزینی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی به این معنا است که: بتن حاوی ۱۰۰٪ ریزدانه طبیعی، ۷۵٪ درشت‌دانه طبیعی و ۲۵٪ درشت‌دانه بازیافتی است.

این پژوهش، ارزیابی آزمایشگاهی تاثیر الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن و سنگدانه‌های بازیافتی بر مشخصات مکانیکی بتن را دنبال می‌کند. بنابراین سه نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی (۰، ۲۵ و ۵۰ درصد وزنی) همراه سه مقدار مختلف حجم الیاف فولادی (۰، ۰/۵ و ۱ درصد) و دو مقدار مختلف حجم الیاف پلی‌پروپیلن (۰ و ۰/۴ درصد) برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی این پژوهش استفاده شد. در مجموع ۱۲ نمونه طرح اختلاط برای آزمایش مقاومت فشاری، کشش برزیلی و خمش چهار نقطه‌ای ساخته شد. جزئیات طرح اختلاط بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن در جدول (۳-۴) نشان داده شده است.

جدول ۳-۴ جزئیات طرح اختلاط بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و الیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن

طرح اختلاط	آب (Kg)	سیمان (Kg)	W/C	ریزدانه (Kg)	درشت‌دانه طبیعی (Kg)	درشت‌دانه بازیافتی (Kg)	الیاف PP (Kg)	الیاف فولادی (Kg)
R0-P0-S0	185	400	4/0 3	698.64	468.45	0	0	0
R0-P.4-S0	185	400	4/0 3	698.64	468.45	0	189.2	0
R0-P.4-S.5	185	400	4/0 3	698.64	468.45	0	189.2	39.25
R0-P.4-S1	185	400	4/0 3	698.64	468.45	0	189.2	78.50
R25-P0-S0	189.2	400	4/0 3	690	345	115	0	0
R25-P.4-S0	189.2	400	4/0 3	690	345	115	189.2	0
R25-P.4-S.5	189.2	400	4/0 3	690	345	115	189.2	39.25
R25-P.4-S1	189.2	400	4/0 3	690	345	115	189.2	78.50
R50-P0-S0	193.1	400	4/0 3	690	228	228	0	0
R50-P.4-S0	193.1	400	4/0 3	690	228	228	189.2	0
R50-P.4-S.5	193.1	400	4/0 3	690	228	228	189.2	39.25
R50-P.4-S1	193.1	400	4/0 3	690	228	228	189.2	78.50

۳-۵- آزمایش‌های انجام شده

در این بخش چگونگی آزمایش‌های انجام شده برای تعیین عواملی همچون درصد سایش سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی، درصد رطوبت و جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی، چگالی سنگدانه‌ها، وزن مخصوص بتن تازه، مقاومت فشاری، مقاومت شکافت کششی، مدول الاستیسیته، بیشینه بار خمشی، مدول گسیختگی، طاقت خمشی و مقاومت خمشی معادل شرح داده می‌شود. در ابتدای این بخش آزمایش‌های مربوط به تعیین خواص مکانیکی سنگدانه‌ها و سپس آزمایش‌های مربوط به بتن تازه شرح داده شده است. در آخر این بخش آزمایش‌های بر روی نمونه‌های سخت شده بتن بیان می‌شود.

۳-۵-۱- آزمایش‌های سنگدانه‌ها

در این پژوهش از دو نوع سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی استفاده می‌شود. چون سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی دارای خواص مکانیکی متفاوتی هستند، پس انجام آزمایش‌های همچون درصد سایش، درصد رطوبت، درصد جذب آب و چگالی سنگدانه‌ها برای تعیین خواص مکانیکی سنگدانه‌های بازیافتی و مقایسه آن با سنگدانه‌های طبیعی امری ضروری است.

۳-۵-۱-۱- دانه‌بندی سنگدانه‌ها

مطابق آزمایش ASTM C136/C136M این آزمایش نحوه توزیع اندازه دانه‌ها در مصالح ریزدانه و درشت‌دانه را به کمک الک تعیین می‌کند [۵۶].

وسایل آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها عبارت‌اند از:

(۱) ترازو با دقت ۰/۵ گرم (شکل ۳-۱۱)

(۲) الک‌ها با مشخصات ذکر شده در آیین نامه ASTM E11 (شکل ۳-۱۲)

(۳) لرزاننده مکانیکی الک‌ها که باید لرزش قائم و جانبی به الک منتقل کند (شکل ۳-۱۳)

(۴) کوره بادمای یکنواخت 110 ± 5 درجه سانتی گراد (شکل ۳-۱۴)



شکل ۳-۱۲ الک‌ها به ترتیب نحوه قرار گیری



شکل ۳-۱۱ ترازو با دقت ۰/۵ گرم



شکل ۳-۱۳ دستگاه لرزاننده



شکل ۳-۱۴ کوره

برای انجام آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌ها گام‌های زیر را به ترتیب انجام می‌دهیم

- در گام اول نمونه برداری مطابق آیین نامه ASTM D75 انجام می‌دهیم. مطابق آیین‌نامه ASTM C136/C136M حداقل وزن نمونه برای انجام آزمایش دانه‌بندی ۱ کیلوگرم است.
- در گام دوم نمونه آزمایش را به مدت ۲۴ ساعت در دمای 110 ± 5 در کوره خشک می‌کنیم.
- در گام سوم مطابق شکل (۳-۱۳) الک‌ها را به ترتیب شماره از کوچک به بزرگ و از سینی لرزاننده به بالا بر روی دستگاه لرزاننده قرار می‌دهیم.
- در گام چهارم نمونه را روی الک بالای می‌ریزیم، نمونه به کمک ماشین لرزاننده به مدت ۱۵ دقیقه الک می‌شوند.
- گام پنجم مطابق شکل (۳-۱۵) مصالح مانده روی الک‌ها توزین می‌کنیم.
- در گام ششم درصد مانده روی هر الک، درصد عبوری هر الک و مدول نرمی را محاسبه و گزارش می‌دهیم [۵۶].



شکل ۳-۱۵ توزین مصالح مانده بر روی الک‌ها

۳-۵-۱-۲- وزن مخصوص سنگدانه

مطابق آیین‌نامه ASTM C29/C29M این آزمایش برای تعیین وزن مخصوص مصالح سنگی متراکم و غیر متراکم بکار می‌رود. این روش برای مصالح سنگی تا حداکثر اندازه اسمی ۱۵۰ میلی‌متر قابل استفاده است [۵۷].

وسایل آزمایش وزن مخصوص سنگدانه‌ها عبارت‌اند از:

- (۱) ترازو با دقت ۰٫۵ گرم
 - (۲) خط کش فولادی یا تیغه
 - (۳) میله تراکم فولادی با قطر ۱۶ میلی‌متر و طول ۴۰۰ میلی‌متر (شکل ۳-۱۶).
 - (۴) قالب که باید برای کاربرد های سخت مقاومت کافی داشته باشد. در این پژوهش از قالب فولادی با ابعاد داخلی ۱۵*۱۵*۱۵ سانتی‌متر استفاده شد.
- برای تعیین وزن مخصوص سنگدانه‌ها گام‌های زیر را به ترتیب انجام می‌دهیم:
- گام اول نمونه برداری مطابق آیین‌نامه ASTM D75 انجام می‌دهیم.
 - در گام دوم مطابق شکل (۱۷-۳) نمونه آزمایش را تا رسیدن به وزن ثابت در دمای 110 ± 5 در کوره به مدت ۲۴ ساعت نگهداری می‌کنیم.
 - گام سوم کالیبراسیون ظرف را انجام می‌دهیم. در این پژوهش چون از قالب‌های فولادی با حجم مشخص استفاده شد. نیازی به کالیبراسیون حجمی ظرف نبود. و فقط ظرف را وزن می‌کنیم.
 - در گام چهارم روش آزمایش را انتخاب می‌کنیم. در این پژوهش از روش کوبیدن با میله استفاده شده است.
 - در گام پنجم یک سوم ظرف را از سنگدانه‌های خشک پر کرده، با انگشت سطح آن را صاف می‌کنیم. با ۲۵ ضربه توسط میله تخم‌ماق تمام سطح را به طور یکنواخت می‌کوبیم.
 - در گام ششم تا دو سوم ظرف را پر کرده و مانند لایه اول آن را می‌کوبیم.
 - در گام هفتم ظرف را لبریز نموده و مانند لایه های قبل متراکم می‌کنیم. و سطح مصالح را با یک تیغه صاف می‌کنیم.

➤ در گام هشتم مطابق شکل (۳-۱۸) جرم ظرف حاوی مصالح خشک را را وزن می‌کنیم. مطابق

فرمول (۳-۱) وزن مخصوص مصالح در حالت خشک را حساب و گزارش می‌کنیم.

در صورت دانستن درصد رطوبت جذب شده سنگدانه می‌توان وزن مخصوص در حالت اشباع با سطح خشک

مطابق فرمول (۳-۲) حساب کرد [۵۷].

$$M = \frac{G-T}{V} \quad (۱-۳)$$

$$M_{SSD} = M \left[1 + \left(\frac{K}{100} \right) \right] \quad (۲-۳)$$

در رابطه‌های بالا G وزن ظرف و نمونه، T وزن ظرف بدون نمونه، V حجم ظرف و K درصد رطوبت سنگدانه است.



شکل ۳-۱۷ مصالح نگهداری شده در کوره



شکل ۳-۱۶ میله متراکم



شکل ۳-۱۸ وزن قالب حاوی سنگدانه‌ها

۳-۵-۱-۳- تعیین درصد کلی رطوبت سنگدانه‌ها

چون سنگدانه‌ها در شرایط کارگاهی استفاده می‌شود. تعیین درصد رطوبت موجود در سنگدانه‌ها برای محاسبه طرح اختلاط مناسب امری ضروری است. مطابق آیین نامه ASTM C566/C566M این روش آزمایش برای تعیین درصد رطوبت قابل تبخیر در نمونه‌ای از سنگدانه بکار می‌رود [۵۸].

وسایل آزمایش تعیین درصد کلی رطوبت سنگدانه‌ها عبارت‌اند از:

(۱) ترازو با دقت 0.01% وزن نمونه آزمایش

(۲) کوره (اون) مجهز به تهویه، که بتواند دمای اطراف نمونه را در حدود 110 ± 5 درجه سانتی گراد به طور ثابت نگه دارد.

(۳) ظرف که نمونه در آن ریخته شود تحت تاثیر دما قرار نگیرد (شکل ۳-۱۹)

برای انجام آزمایش درصد رطوبت کلی گام‌های زیر را به ترتیب انجام می‌دهیم:

➤ در گام اول نمونه گیری مطابق آیین نامه ASTM D75 انجام می‌دهیم. حداقل وزن نمونه برای ریز

دانه‌ها ۵۰۰ گرم و برای درشت‌دانه‌ها با بیشینه بعد اسمی $12/5$ میلی‌متر ۲۰۰۰ گرم است.

➤ در گام دوم نمونه را وزن می‌کنیم.

➤ در گام سوم نمونه را در ظرف مناسب به مدت ۲۴ ساعت دمای ثابت 110 ± 5 در کوره نگهداری

می‌کنیم، تا کاملاً خشک شود.

➤ در گام چهارم نمونه خشک شده را وزن می‌کنیم و مطابق رابطه (۳-۳) مقدار رطوبت کلی را

محاسبه، و گزارش می‌کنیم [۵۸].

$$P = 100 \frac{W-D}{D} \quad (3-3)$$

که در رابطه بالا P مقدار رطوبت کلی نمونه بر حسب درصد، W وزن اولیه نمونه بر حسب گرم و D وزن نمونه خشک شده بر حسب گرم است.



شکل ۳-۱۹ ظرفی که در کوره قرار میگیرد

۳-۵-۱-۴- ضربه و درصد سایش سنگدانه‌ها

مطابق آیین نامه ASTM C131/C131M این آزمایش، روش تعیین مقاومت سایش درشت‌دانه‌های کوچکتر حداکثر اندازه اسمی ۳۷/۵ میلی‌متر توسط دستگاه لوس آنجلس بیان می‌کند [۵۹].
وسایل آزمایش درصد سایش سنگدانه‌ها عبارت‌اند از:

(۱) دستگاه لس آنجلس: یک استوانه تو خالی که دو انتهای آن بسته است و با سرعت معین می‌چرخد (شکل ۳-۲۰).

(۲) الک با مشخصات استاندارد ASDTM E11

(۳) ترازو با دقت ۰/۱٪ وزن نمونه آزمایش

(۴) گلوله فولادی با قطر متوسط ۴۶/۸ میلی‌متر و وزن ۳۹۰ تا ۴۴۵ گرم (شکل ۳-۲۱)



شکل ۳-۲۱ گلوله فولادی در آزمایش لس آنجلس



شکل ۳-۲۰ دستگاه لس آنجلس

برای تعیین درصد سایش درشت‌دانه‌ها گام‌های زیر را به ترتیب انجام می‌دهیم:

- در گام اول نمونه برداری مطابق آیین نامه ASTM D75 انجام می‌دهیم. حداقل نمونه برداشت شده در این گام ۶ کیلوگرم است.
- در گام دوم نمونه را شسته و داخل کوره در دمای 110 ± 5 درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک می‌کنیم.
- در گام سوم با توجه به نوع دانه‌بندی سنگدانه‌ها تعداد گلوله‌ها را مشخص می‌کنیم. در این پژوهش تعداد گلوله‌های فولادی با توجه به دانه‌بندی سنگدانه‌ها ۸ عدد (20 ± 3330 گرم) بود.
- در گام چهارم نمونه‌ها و گلوله‌ها را داخل دستگاه لس آنجلس ریخته، و اجازه می‌دهیم ۵۰۰ دور بچرخد. در این بررسی ۵۰۰۰ گرم درشت‌دانه حاوی ۸ عدد گلوله فولادی در دستگاه لس آنجلس ریخته شد.
- در گام پنجم مصالح را از ماشین خارج کرده، و از الک $1/7$ میلی‌متر عبور می‌دهیم.

➤ در گام ششم مصالح بزرگتر از ۱/۷ میلی‌متر را شسته و در داخل کوره در دمای ثابت 110 ± 5 درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت نگهداری می‌کنیم.

➤ در گام هفتم مطابق شکل (۳-۲۲) مصالح خشک شده را وزن می‌کنیم، مطابق فرمول (۳-۴) درصد مصالح از دست رفته محاسبه و گزارش می‌کنیم [۵۹].

$$L = \left[\frac{W-D}{W} \right] 100 \quad (۳-۴)$$

در رابطه فوق W وزن اولیه مصالح خشک، D وزن مصالح خشک خارج شده از ماشین و L درصد مصالح از دست رفته است.



ب) سنگدانه‌های طبیعی



الف) سنگدانه‌های بازیافتی

شکل ۳-۲۲ وزن سنگدانه‌ها در آزمایش درصد سایش

۳-۵-۱-۵- تعیین چگالی و جذب آب مصالح سنگی ریز

مطابق آیین‌نامه ASTM C128/C128M در این آزمایش روش تعیین وزن مخصوص فضایی و ظاهری و روش تعیین درصد جذب آب سنگدانه‌ها با بیشینه اندازه اسمی ۵ میلی‌متر بیان می‌گردد [۶۰].

وسایل مورد نیاز در آزمایش تعیین چگالی و جذب آب مصالح سنگی ریز عبارت‌اند از:

(۱) ترازو با دقت ۰/۱ گرم

(۲) چگالی سنج (پیکنومتر) ظرفی با دقت قرائت حجم ۱ لیتر

(۳) کوره که بتواند مصالح را در دمای 110 ± 5 سانتی گراد نگه دارد.

برای تعیین درصد جذب آب و چگالی ریز دانه‌ها گام‌های زیر را به ترتیب انجام می‌دهیم:

➤ در گام اول نمونه را به وزن تقزیمی ۱ کیلوگرم از مصالح ریز با استفاده از روش $\frac{1}{4}$ نمونه برداری می‌کنیم.

➤ در گام دوم مطابق شکل (۲۳-۳) نمونه را به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار می‌دهیم.

➤ در گام سوم مطابق شکل (۲۴-۳) نمونه‌ها را روی یک سطح صاف که جاذب رطوبت نباشد پهن می‌کنیم. تا سطح دانه‌ها به طور یکنواخت خشک شود.

➤ در گام چهارم قسمتی از چگالی‌سنج را با آب پر کرده، و ۵۰۰ گرم ماسه اشباع با سطح خشک دار داخل آن می‌ریزیم. سپس تا پر شدن حجم ظرف، آب می‌ریزیم.

➤ در گام پنجم برای خارج کردن حباب‌های هوا چگالی‌سنج را تکان می‌دهیم. در این پژوهش از ویبراتور صفحه‌ای استفاده شد.

➤ در گام ششم مطابق شکل (۲۵-۳) سطح آب چگالی‌سنج را تا سطح نشانه مشخص پر کرده، و وزن کل چگالی‌سنج حاوی آب و مصالح ریزدانه را ثبت می‌کنیم.

➤ گام هفتم مصالح را از چگالی‌سنج خارج کرده، و آن را در دمای 110 ± 5 تا رسیدن به وزن ثابت خشک می‌کنیم.

➤ گام هشتم مطابق شکل (۲۶-۳) چگالی‌سنج را تا سطح نشانه مشخص پر آب کرده و وزن می‌کنیم.

➤ در گام نهم مصالح خشک شده را وزن می‌کنیم. و به ترتیب چگالی فضایی خشک، چگالی فضای اشباع با سطح خشک، چگالی ظاهری و درصد جذب آب مصالح ریز به ترتیب از رابطه (۳-۵) تا (۳-۸) قابل محاسبه و گزارش است [۶۰].

$$S_d = \frac{A}{(B+S-C)} \quad (۳-۵)$$

$$S_s = \frac{S}{(B+S-C)} \quad (۳-۶)$$

$$S_a = \frac{S}{B+A-C} \quad (۳-۷)$$

$$K = \left[\frac{(S-A)}{A} \right] 100 \quad (۳-۸)$$

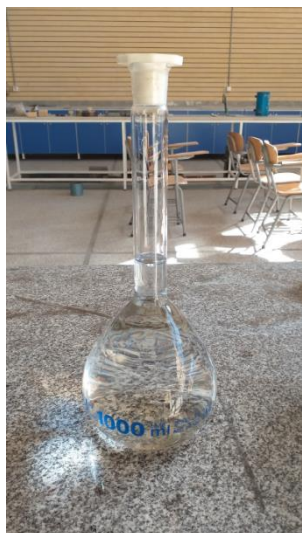
در روابط فوق S_d چگالی فضایی خشک، A وزن نمونه خشک شده در کوره، B وزن چگالی سنج پر از آب، C وزن چگالی سنج حاوی نمونه و آب، S وزن نمونه اشباع با سطح خشک، S_s چگالی فضایی اشباع، S_a چگالی ظاهری و K درصد جذب آب است. لازم به ذکر است A ، B ، C و S بر حسب گرم است.



شکل ۳-۲۴ ریز دانه پهن شده بر جسم عدم جاذب آب



شکل ۳-۲۳ ریز دانه اشباع در آب



شکل ۳-۲۶ چگالی سنج حاوی آب



شکل ۳-۲۵ چگالی سنج حاوی نمونه و آب

۳-۵-۱-۶- تعیین چگالی و جذب آب مصالح سنگی درشت‌دانه

مطابق آیین‌نامه ASTM C127/C127M این روش آزمایش برای تعیین چگالی و جذب آب مصالح سنگی

درشت‌دانه به کار می‌رود، این روش آزمایش برای دانه‌های ریز طراحی نشده است [۶۱].

وسایل مورد نیاز در آزمایش تعیین چگالی و جذب آب مصالح سنگی درشت‌دانه عبارتند از:

(۱) ترازو با دقت 0.05% وزن نمونه

(۲) ظرف مخصوص نمونه: که از مبحوس شدن هوا هنگام خیس کردن دانه‌ها جلوگیری شود.

(۳) مخزن آب برای وزن ظرف حاوی نمونه

(۴) الک با مشخصات مطابق آیین‌نامه ASTM E11

برای تعیین چگالی و درصد جذب آب درشت‌دانه‌ها گام‌های زیر را به ترتیب انجام می‌دهیم:

➤ در گام اول نمونه را به مقدار تقریبی ۵ کیلوگرم از مصالح درشت با استفاده از روش $\frac{1}{4}$ کردن جدا می‌کنیم.

➤ در گام دوم مصالح را از الک ۴ عبور می‌دهیم. و سپس مصالح مانده روی الک ۴ با آب شست‌وشو می‌دهیم.

➤ در گام سوم مطابق شکل (۳-۲۷) درشت‌دانه‌ها را به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق داخل آب نگه می‌داریم.

➤ در گام چهارم مطابق شکل (۳-۲۸) روی سطح جاذب رطوبت نباشد پهن می‌کنیم، تا به حالت اشباع با سطح خشک برسد.

➤ در گام پنجم مطابق شکل (۳-۲۹) مصالح اشباع با سطح خشک را وزن می‌کنیم.

➤ در گام ششم درشت‌دانه با سطح خشک را در ظرف حاوی آب ریخته و وزن مصالح داخل آب را وزن می‌کنیم.

➤ در گام هفتم مصالح را از آب خارج کرده، و در دمای 110 ± 5 درجه سانتیگراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک می‌کنیم.

➤ در گام هشتم درشت‌دانه خشک شده را و وزن می‌کنیم. و به ترتیب چگالی فضایی خشک، چگالی فضای اشباع با سطح خشک، چگالی ظاهری و درصد جذب آب مصالح ریز را با روابط (۳-۹) تا (۳-۱۲) محاسبه و گزارش می‌کنیم [۶۱].

$$S_D = \frac{A}{B-C} \quad (۳-۹)$$

$$S_S = \frac{B}{B-C} \quad (۳-۱۰)$$

$$S_A = \frac{A}{A-C} \quad (۳-۱۱)$$

$$K = \left[\frac{B-A}{A} \right] 10 \quad (۳-۱۲)$$

در روابط فوق S_D چگالی فضایی خشک، A وزن نمونه خشک شده در کوره، B وزن نمونه اشباع با سطح خشک در هوا، C وزن نمونه اشباع در آب، S_S چگالی فضایی اشباع با سطح خشک، S_A چگالی ظاهری و K درصد جذب آب است. لازم به ذکر است A ، B و C بر حسب گرم است.



ب) درشت دانه‌های بازیافتی



الف) درشت دانه‌های طبیعی

شکل ۳-۲۷ درشت دانه‌های نگهداری شده در آب



شکل ۳-۲۸ درشت دانه‌های پهن شده روی سطح عدم جاذب آب



ب) درشت دانه‌های بازیافتی



الف) درشت دانه‌های طبیعی

شکل ۳-۲۹ وزن درشت دانه‌ها اشباع با سطح خشک

۳-۵-۲- آزمایش‌های بتن تازه

برای بررسی خواص بتن تازه آزمایش‌های همچون وزن مخصوص بتن و اسلامپ انجام شد. این آزمایش‌ها بلافاصله بعد از اختلاط مصالح صورت گرفت. برای آزمایش وزن مخصوص سه نمونه آزمایشی ساخته شده، و نتایج حاصل از میانگین هر سه نمونه گزارش شده است. و برای تعیین روانی بتن شاهد فقط یک بار آزمایش اسلامپ انجام شد. لازم به ذکر است که آزمایش اسلامپ فقط برای نمونه شاهد انجام شده است. در این بخش چگونگی انجام آزمایش‌های وزن مخصوص بتن تازه و اسلامپ را مختصر شرح داده می‌شود.

۳-۵-۲-۱- آزمایش وزن مخصوص بتن تازه

مطابق آیین‌نامه ACI 544.3R-08 وزن مخصوص بتن حاوی حداکثر ۲٪ حجمی الیاف مطابق بتن فاقد الیاف می‌باشد. در این پژوهش برای تعیین وزن مخصوص بتن تازه از آیین‌نامه ASTM C138/C138M

استفاده شد [۶۴]. از آزمایش وزن مخصوص بتن تازه معمولاً برای تعیین نسبت اجزای مصرفی طرح اختلاط بتن استفاده می‌شود.

وسایل مورد نیاز در آزمایش وزن مخصوص بتن تازه عبارت‌اند از:

(۱) ترازو با دقت ۰/۱ گرم

(۲) میله تراکم فولادی

(۳) خط کش یا ماله

(۴) قالب استوانه‌ای

برای تعیین وزن مخصوص بتن گام‌های زیر به ترتیب انجام می‌شود:

➤ در گام اول وزن قالب استوانه‌ای را اندازه‌گیری کرده و ثبت می‌کنیم.

➤ در گام دوم بتن تازه را مطابق ساخت نمونه‌های استوانه‌ای، در دو لایه ریخته و هر لایه با میله متراکم

۲۵ ضربه متراکم می‌شود. و در هر لایه برای خروج هوای بتن یا چکش لاستیکی ۴ ضربه به وجه‌های

قالب زده می‌شود

➤ در گام سوم با ماله یا خط کش سطح نمونه را صاف و پرداخت می‌کنیم.

➤ در گام چهارم قالب استوانه‌ای مملو از بتن تازه را وزن می‌کنیم. و مطابق رابطه (۳-۱۳) وزن مخصوص

بتن تازه را حساب و گزارش می‌کنیم.

$$P = \frac{W-D}{V} \quad (۳-۱۳)$$

در رابطه فوق P 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 حجم قالب بر حسب مترمکعب است.

۳-۵-۲-۲- آزمایش اسلامپ

مطابق آیین‌نامه ASTM C143/C143M این روش آزمایش روانی و کارایی بتن تازه در آزمایشگاه یا کارگاه تعیین می‌کند [۶۲].

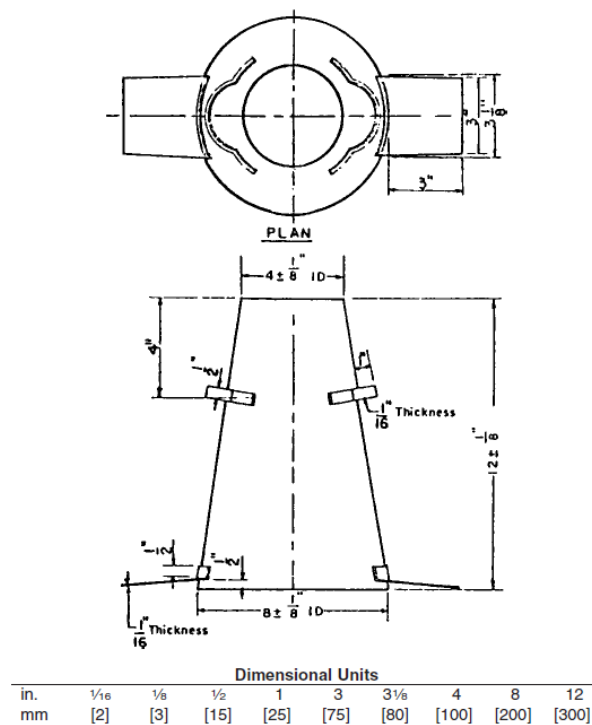
وسایل مورد نیاز برای آزمایش اسلامپ عبارت‌اند از:

(۱) مخروط ناقص اسلامپ با مشخصات مطابق شکل (۳۰-۳)

(۲) میله مدور تراکم

(۳) بیلچه و ماله

(۴) خط‌کش



شکل ۳-۳۰ مشخصات مخروط ناقص اسلامپ [۶۲]

برای تعیین اسلامپ بتن شاهد گام‌های زیر به ترتیب انجام شد:

- در گام اول مخلوط ناقص را مرطوب کرده و آن را روی یک سطح تخت، مرطوب و نفوذ ناپذیر قرار می‌دهیم.
- در گام دوم مخلوط ناقص را در ۳ لایه پر می‌کنیم، و هر لایه را با ۲۵ ضربه میله مخصوص می‌کوبیم.
- در گام سوم بعد از تراکم لایه بالا مقداری بتن اضافه می‌ریزیم و سطح بالای مخروط را صاف می‌کنیم.
- در گام چهارم مخروط را به آرامی به صورت قائم به سمت بالا کشیده شود.
- در گام ششم مطابق شکل (۳-۳۱) ارتفاع ریزش بتن را اندازه‌گیری کرده، و به عنوان اسلامپ بتن گزارش می‌کنیم [۶۲].



شکل ۳-۳۱ نحوه محاسبه ارتفاع ریزش بتن

۳-۵-۳- آزمایش‌های بتن سخت شده

برای بررسی خواص مکانیکی بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و مسلح به الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن آزمایش‌های همچون مقاومت فشاری، مقاومت کشش برزیلی و مقاومت خمش چهار نقطه‌ای انجام شد. این آزمایش‌ها بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری نمونه‌ها صورت گرفت. برای هر آزمایش سه نمونه آزمایشی ساخته شده، و نتایج حاصل از میانگین هر سه نمونه گزارش می‌شود. در این بخش ابتدا چگونگی انجام آزمایش‌های

مقاومت فشاری، کشش برزلی، خمش چهار نقطه‌ای شرح داده می‌شود. همچنین چگونگی محاسبه بررسی - های همچون طاقت خمشی، مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی معادل و مدول پارگی شرح داده می‌شود.

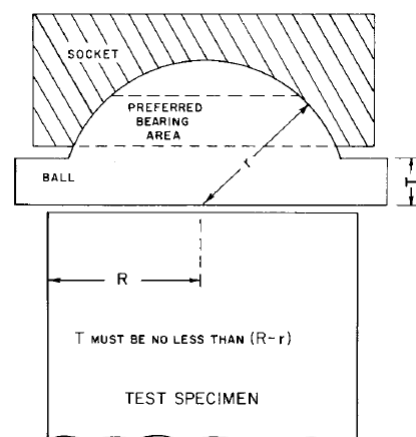
۳-۵-۱- آزمایش تک محوره مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بتن

مطابق آیین‌نامه ASTM C39/C39M این آزمایش روش تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای بتن شامل می‌شود. این آزمایش برای بتن‌های که وزن مخصوص آنها بیش از ۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶۳].

برای آزمایش مقاومت فشاری بتن از دستگاه جک فشاری استفاده می‌شود، دستگاه جک فشاری باید دارای ظرفیت کامل بوده و سرعت بارگذاری به صورت پیوسته و بدون تغییرات ناگهانی اعمال نماید. همچنین درصد خطایی تعیین بار نباید از ۱٪ بار نشان داده شده تجاوز نماید. سطح صفحات بارگذاری باید بزرگتر یا مساوی سطح مقطع نمونه‌ها باشد. همچنین مطابق شکل (۳-۳۲) یکی از صفحات بارگذاری باید دارای اتصال کروی باشد، تا در اثر اعمال بار، تغییرشکل صفحه مذکور از حد مجاز عبور نکند. شکل (۳-۳۳) دستگاه جک فشاری استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳۳ دستگاه جک فشاری



شکل ۳-۳۲ اتصال فک بالای در دستگاه جک

فشاری [۶۳]

برای تعیین مقاومت فشاری بتن گام‌های زیر به ترتیب انجام شد:

➤ در گام اول، اگر از نمونه استوانه‌ای استفاده کرده‌اید. سطح نمونه استوانه‌ای را کپینگ انجام می‌دهیم. در این پژوهش برای کپینگ از خمیر گچ استفاده شد. (چگونگی انجام کپینگ نمونه‌های استوانه‌ای در انتهای فصل توضیح داده می‌شود).

➤ در گام دوم بلوک تکیه‌گاهی پایین در جای خود قرار می‌دهیم.

➤ در گام سوم سطوح تکیه‌گاه نمونه را تمیز نموده و نمونه را روی تکیه‌گاه پایینی قرار می‌دهیم.

➤ در گام چهارم با دقت محور نمونه و مرکز بلوک تکیه‌گاهی که نشیمن‌کروی دارد، هم امتداد قرار می‌دهیم.

➤ در گام پنجم بارگذاری را شروع می‌کنیم، و حداکثر باری که نمونه تحمل می‌کند ثبت می‌کنیم. و با توجه به رابطه (۳-۱۴) مقاومت فشاری بتن حساب و گزارش می‌کنیم.

در این پروژه، سرعت بارگذاری به صورت تغییر مکان کنترل^۱ و با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است [۶۳].

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (۳-۱۴)$$

در رابطه فوق f_c مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال، F بیشینه بار فشاری بر حسب نیوتن و A سطح باربر بر حسب میلی‌متر مربع است.

¹ Displacement- Control

۳-۵-۲- بررسی مدول الاستیسیته

مطابق آیین‌نامه ASTM C469/C469M، مدول الاستیسیته رابطه بین تنش و کرنش، و معیاری برای صلبیت مواد جامد است [۶۴].

وسایل مورد نیاز برای بررسی مدول الاستیسیته عبارت‌اند از:

(۱) جک فشاری: با مشخصات مطابق دستگاه جک فشاری آزمایش مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای

(۲) دو LVDT^۱ با دقت ۰/۰۰۵ میلی‌متر جهت محاسبه دقیق تغییر مکان طولی (شکل ۳-۳۴)

(۳) نگه‌دارنده LVDT بر روی نمونه بتنی یا ابزار ثابت (شکل ۳-۳۵)

(۴) دستگاه ثبت اطلاعات^۲ (شکل ۳-۳۶)

برای تعیین مدول الاستیسیته ابتدا ابزار ثابت را بر روی نمونه‌های بتنی نصب و سپس تراز می‌کنیم. مطابق شکل (۳-۳۷) LVDT را بر روی نمونه‌های بتنی نصب می‌کنیم. سپس مطابق گام‌های آزمایش مقاومت فشاری نمونه را بارگذاری می‌کنیم. با برداشت نیرو از دستگاه جک فشاری و تغییر مکان از دستگاه ثبت اطلاعات، منحنی نیرو-تغییر مکان فشاری قابل ترسیم است. مدول الاستیسیته را با رابطه (۳-۱۵) محاسبه و گزارش می‌کنیم [۶۴].

$$E = \frac{s_2 - s_1}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (۳-۱۵)$$

در رابطه فوق E مدول الاستیسیته بر حسب مگاپاسکال، s_2 تنش متناظر با ۴۰٪ بار نهایی بر حسب مگاپاسکال، s_1 تنش اولیه بر حسب مگاپاسکال و ε_2 : کرنش متناظر با تنش s_2 است.

^۱ Linear Variable Differential Transformer

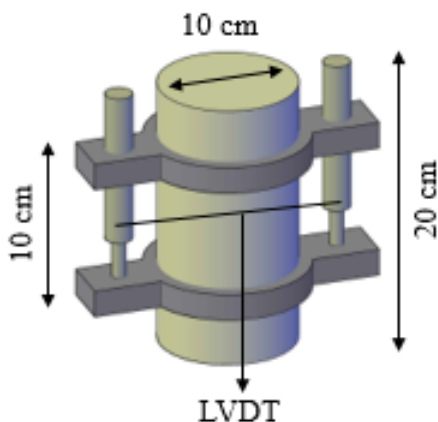
^۲ Data Recording System



شکل ۳-۳۵ نگاه‌دارنده LVDT بر روی نمونه بتنی



شکل ۳-۳۴ LVDT با دقت ۰.۰۵.۰ میلی‌متر



شکل ۳-۳۷ شماتیک نصب LVDT در بررسی مدول الاستیسته



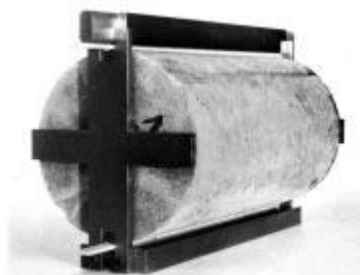
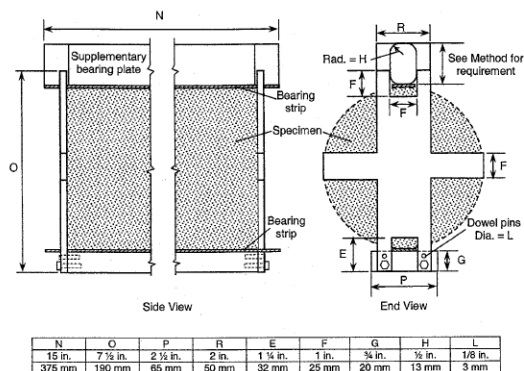
شکل ۳-۳۶ دستگاه ثبت اطلاعات

۳-۵-۳- آزمایش مقاومت کششی به روش دو نیم شدن (کشش برزیلی)

مطابق آیین نامه ASTM C496/C496M این آزمایش برای تعیین مقاومت کششی به روش دو نیم شدن نمونه‌های استوانه‌ای قالب گیری شده یا مغزه گیری شده بکار می رود [۶۵].

برای آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم باید از دستگاه جک فشاری استاندارد مطابق استاندارد ASTM C39 استفاده کرد، مشروط بر آن که ظرفیت دستگاه، سرعت بارگذاری لازم را تامین کند. مطابق شکل (۳-۳۸) دو نوار تسمه تکیه‌گاهی از جنس تخته چندلا با ضخامت $\frac{3}{2}$ میلی‌متر، عرض ۲۵ میلی‌متر

و طولی بیشتر یا مساوی نمونه استوانه‌ای استفاده می‌شود. بلوک تکیه‌گاهی مستطیلی مساوی با طول و قطر نمونه‌های استوانه‌ای از جنس فولاد، همچنین ضخامت تکیه‌گاه مستطیلی نباید کمتر از فاصله لبه‌ی بلوک تکیه‌گاهی تا انتهای استوانه باشد.



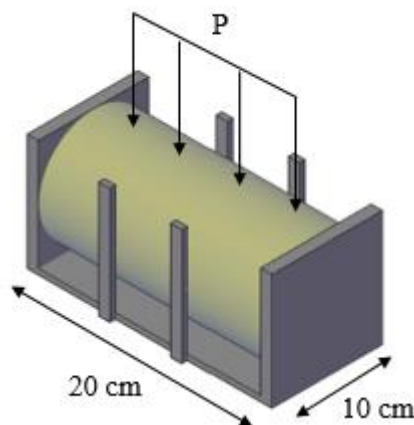
شکل ۳-۳۸ تکیه‌گاه و تخته چندلا در آزمایش کشش برزیلی [۶۵]

برای تعیین مقاومت کششی بتن گام‌های زیر به ترتیب انجام شد:

- در گام اول خط قطری که از محور نمونه عبور می‌کند، رسم می‌کنیم. خط قطری را از طریق محاسبه متوسط ۳ قطر نمونه آزمایش با دقت ۰/۲۵ میلی‌متر تعیین می‌کنیم.
- در گام دوم مراکز نوارهای چندلایه را بر مرکز تکیه‌گاه‌های پایین منطبق می‌کنیم.
- در گام سوم نمونه را روی نوار چندلا طوری که خطوط قطری دو انتها در امتداد عمود بر محور چندلا باشد قرار می‌دهیم.
- در گام چهارم نوار چندلا دوم را مطابق خطوط قطری روی نمونه قرار می‌دهیم.
- در گام پنجم مطابق شکل (۳-۳۹) نمونه را در زیر جک فشاری قرارداده و با سرعت ثابت ۱۰۰۰ کیلوپاسکال در دقیقه تا هنگام گسیختگی بارگذاری می‌کنیم.
- در گام ششم بیشترین بار اعمال شده در زمان گسیختگی را ثبت می‌کنیم و مقاومت کششی را از رابطه (۳-۱۶) محاسبه و گزارش می‌کنیم [۶۵].

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \quad (۱۶-۳)$$

در رابطه فوق T مقاومت کششی دو نیم شدن بر حسب مگاپاسکال، P بیشترین بار اعمال شده بر حسب نیوتن، L طول نمونه بر حسب میلی‌متر و d قطر نمونه بر حسب میلی‌متر است.



شکل ۳-۳۹ جزئیات آزمایش مقاومت کششی

۳-۵-۴- آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه‌ای

مطابق آیین‌نامه ASTM C1609/C1609M این آزمایش مقاومت خمشی بتن الیافی تعیین می‌گردد [۶۹].

وسایل آزمایش مقاومت خمشی چهار نقطه‌ای عبارت‌اند از [۶۶]:

(۱) دستگاه آزمایش، ماشین‌های آزمایشی که از کنترل جابجایی یا کنترل بار استفاده می‌کنند (شکل

۳-۴۰).

(۲) تجهیزات اندازه‌گیری تغییرمکان (LVDT)، برای این که تغییرمکان خالص وسط تیر اندازه‌گیری

شود از دو (LVDT) با دقت 0.005 میلی‌متر در وسط دو وجه تیر استفاده شد (شکل ۳-۳۴).

(۳) محور بارگذاری دو آیین‌نامه. برای حذف برش و ایجاد خمشی محض در طول $\frac{1}{3}$ میانی تیر از محور

بارگذاری دو آیین‌نامه استفاده می‌شود (شکل ۳-۴۱).

۴) سیستم ضبط اطلاعات: یک دستگاه که مستقیماً به خروجی‌های LVDT متصل می‌شود. و در هر صدم ثانیه تغییرات LVDT را ذخیره می‌کند (شکل ۳-۳۶)



شکل ۳-۴۱ محور بارگذاری دو آیین‌نامه

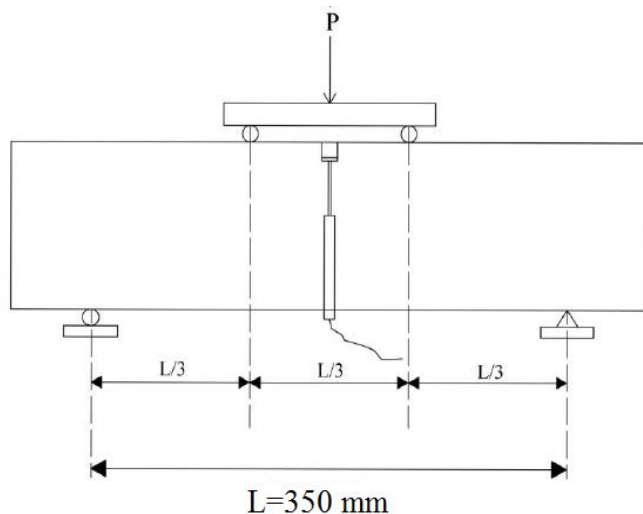


شکل ۳-۴۰ ماشین آزمایش خمشی

برای انجام آزمایش خمش چهار نقطه‌ای به ترتیب گام‌های زیر انجام شد:

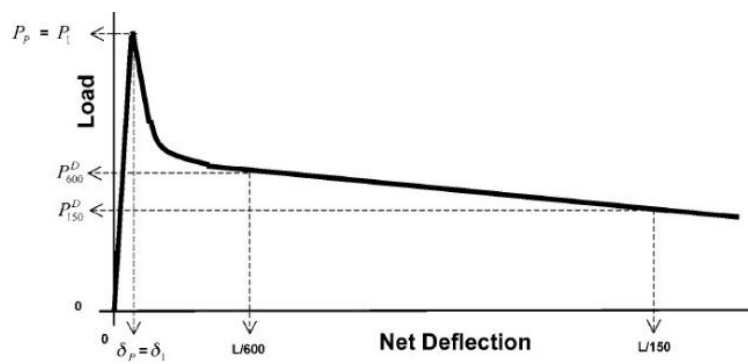
- گام اول نمونه آزمایش نسبت به وضعیتی که قالب‌گیری شده ۹۰ درجه می‌چرخانیم.
- گام دوم نمونه را بر روی دو تکیه‌گاه که فاصله آنها ۳۰ سانتی‌متر است، قرار می‌دهیم.
- گام سوم مطابق شکل (۳-۴۲) برای محاسبه دقیق تغییر مکان وسط تیر، دو LVDT با دقت ۰/۰۰۵ میلی‌متر در دو وجه میانی نصب می‌کنیم.
- در گام چهارم مطابق شکل (۳-۴۲) برای حذف برش و ایجاد خمش ثابت، محور بارگذاری دو آیین‌نامه در طول یک سوم و دو سوم تیر منطبق می‌کنیم.
- در گام پنجم نمونه را به صورت تغییر مکان کنترل تا جابجای $L/150$ بارگذاری می‌کنیم. با برداشت نیرو از ماشین آزمایش و تغییر مکان از سیستم ثبت اطلاعات، منحنی نیرو-تغییر مکان قابل ترسیم است [۶۶].

در این پروژه، سرعت بارگذاری به صورت تغییرمکان کنترل و با سرعت ۰/۰۷۵ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است.



شکل ۳-۴۲ نحوه نصب LVDT در دو وجه تیر

جزئیات نمودار نیرو-تغییر مکان در شکل (۳-۴۳) نشان داده شده است. با توجه به نمودار نیرو-تغییر مکان، می‌توانیم P_p بیشینه بار خمشی^۱، P_{600}^D بار متناظر با $L/600$ ، P_{150}^D بار متناظر با $L/150$ و δ_p تغییر مکان متناظر با بیشینه بار خمشی را برداشت کنیم. لازم به ذکر است در این پژوهش طول تیر ۳ برابر عرض مقطع (۳۰۰ میلی‌متر) به اضافه ۵۰ میلی‌متر انتخاب شد. که طول $L/600$ برابر ۰/۵ میلی‌متر و طول $L/150$ برابر ۲ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۳-۴۳ شماتیک منحنی نیرو تغییر مکان [۶۶]

¹ Peak load

۳-۵-۳-۴-۱- بررسی مدول گسیختگی^۱

مدول گسیختگی یا مقاومت کشش در خمش، در محاسبات عرض ترک و تغییر شکل تیرهای بتن مسلح دارای اهمیت است. مطابق آیین نامه ASTM C1609/C1609M مدول گسیختگی (MOR) را می توان با توجه به رابطه (۳) محاسبه کرد [۶۶].

$$MOR = \frac{PL}{BD^2} \quad (۳-۱۷)$$

در رابطه فوق MOR مدول گسیختگی بر حسب مگاپاسکال، P بیشینه بار خمشی بر حسب نیوتن، L طول نمونه بر حسب میلی متر، B عرض نمونه بر حسب میلی متر و D ارتفاع نمونه بر حسب میلی متر است.

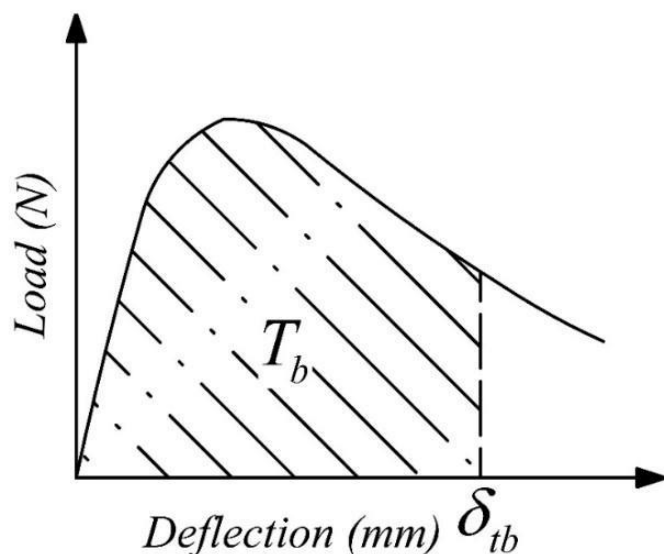
۳-۵-۳-۴-۲- بررسی طاق خمشی^۲

طاق خمشی (T_b) اصطلاحی است که قابلیت جذب انرژی بتن را بیان می کند. مطابق شکل (۴۴-۳) طاق خمشی از مساحت زیر نمودار نیرو-تغییر مکان تا تغییر شکل هدف^۳ محاسبه می شود. طاق خمشی به طول تیر بستگی دارد. برای محاسبه طاق خمشی T_{150}^D منشور $۱۰۰*۱۰۰*۳۵۰$ میلی متر مساحت زیر نمودار نیرو-تغییر شکل تا تغییر شکل ۲ میلی متر و برای طاق خمشی T_{600}^D مساحت زیر نمودار نیرو-تغییر شکل تا تغییر شکل ۰/۵ میلی متر در نظر گرفته شد.

^۱ modulus of rupture

^۲ Flexural toughness

^۳ Target deflection



شکل ۳-۴۴ شماتیک محاسبه طاقت خمشی [۶۷]

۳-۵-۳-۴-۳- بررسی مقاومت خمشی معادل^۱

مقاومت خمشی معادل باتوجه به رابطه (۳-۱۸) تعریف می‌شود. لازم به ذکر است که مقاومت خمشی معادل معمولاً برای بتن‌های که جذب انرژی دارند بیان می‌شود. و نتایج مقاومت خمشی معادل برای بتن‌های با شکل پذیری کم استفاده نمی‌شود.

$$Fe = \frac{T}{\delta} \times \frac{L}{BD^2} \quad (۳-۱۸)$$

در فرمول بالا Fe مقاومت خمشی معادل بر حسب مگاپاسکال، δ تغییر شکل بر حسب متر (در این پژوهش دوتغییر شکل ۰/۰۰۰۵ متر برای تغییر شکل $L/600$ و ۰/۰۰۲ متر برای تغییر شکل $L/150$ استفاده شد)، T طاقت خمشی بر حسب ژول (در این پژوهش برای مقاومت خمشی معادل Fe_{600}^D از طاقت خمشی T_{600}^D و برای مقاومت خمشی معادل Fe_{150}^D از طاقت خمشی T_{150}^D استفاده شد). بقیه پارامترها شبیه رابطه مدول گسیختگی انتخاب شد.

^۱ Equivalent flexural strength

۳-۶- کلاhek گذاری در نمونه‌های استوانه‌ای بتن^۱

استوانه‌هایی که با روش استاندارد قالب‌گیری می‌شوند، دارای سطوح (به ویژه سطح بالای نمونه) ناصاف هستند، و این سطوح لزوماً مسطح و یا موازی نیستند. اگر در این شرایط تحت آزمایش قرار گیرند، مقاومت فشاری که به دست می‌آید به نحو قابل ملاحظه‌ای کمتر است، و دلیل آن تمرکز تنش است که در حین بارگذاری ایجاد می‌شود. هدف از کلاhek گذاری نمونه‌های استوانه‌ای جلوگیری از ایجاد تمرکز تنش در نمونه‌های استوانه‌ای یا توزیع یکنواخت تنش روی کل سطح نمونه و در نتیجه عدم کاهش مقاومت فشاری بتن می‌باشد.

برای کلاhek گذاری نمونه‌های استوانه‌ای در این پژوهش از خمیر گچ استفاده شد. به ترتیب گام‌های زیر انجام شد:

- در گام اول نمونه‌های فشاری را از وان نگهداری خارج کرده، و به مدت یک ساعت در هوای آزاد خشک می‌کنیم.
- در گام دوم یک صفحه فلزی را بر روی زمین تراز می‌کنیم. ابعاد صفحه فلزی باید طوری باشد که، بتوانیم تمام نمونه‌ها روی آن صفحه بچینیم.
- در گام سوم اطراف سطح بالای نمونه‌های استوانه‌ای را یک دور با نوار کاغذی چسب می‌زنیم. در این پژوهش اختلاف ارتفاع نوار کاغذی به سطح بالای نمونه استوانه‌ای معمولاً ۰٫۷ سانتی‌متر بود.
- در گام چهارم تمام نمونه‌ها را روی صفحه تراز فلزی می‌چینیم.
- در گام پنجم خمیر گچ را درست می‌کنیم. لازم به ذکر است که خمیر گچ روانی بالایی باید داشته باشد، تا بتواند تمام منافذ در سطح نمونه را پر کند.

¹ Capping Cylindrical Concrete Specimens

➤ در گام ششم خمیر گچ با روانی بالا را به ضخامت ۰/۴ سانتی متر بر روی سطح نمونه های بتن می ریزیم. چند دقیقه صبر می کنیم تا خمیر گچ خشک شود.

➤ در گام هفتم و بعد از خشک شدن خمیر گچ، نوار کاغذی را بر می داریم. و می توانیم نمونه استوانه ای را تحت آزمایش فشاری قرار دهیم.

۳-۷- روش انجام آزمایش

برای انجام کارهای آزمایشگاهی پس از بررسی و مطالعه آیین نامه ها، برنامه ریزی برای انجام آزمایش ها امری ضروری است. از این رو ترتیب مراحل انجام آزمایش در این پژوهش به صورت زیر برنامه ریزی شد:

➤ در گام اول بتن های ضایعاتی جمع آوری می شود.

➤ در گام دوم بتن های ضایعاتی توسط دستگاه خرد و سرنده می شوند، تا سنگدانه های بازیافتی حاصل شود

➤ در گام سوم مصالح مصرفی مورد نیاز اعم از سنگدانه های طبیعی، ماسه، سیمان و الیاف تهیه می شود.

➤ در گام چهارم آزمایش های برای تعیین خواص سنگدانه ها، و مقایسه آن ها با یکدیگر انجام گرفت.

➤ در گام پنجم طرح اختلاط مطابق آیین نامه طرح اختلاط بتن ایران برای سنگدانه های طبیعی محاسبه می شود.

➤ در گام ششم نمونه های اولیه ساخته می شود. پس از آزمایش فشاری نمونه اولیه، طرح اختلاط اولیه بهینه می شود.

➤ در گام هفتم نمونه های طرح اختلاط بهینه ساخته می شود. پس از آزمایش فشاری نمونه بهینه، طرح اختلاط نهایی می شود.

➤ در گام هشتم باتوجه به طرح اختلاط نهایی، نمونه های مورد نیاز ساخته می شود.

➤ در گام نهم پس از عمل آوری نمونه‌های ساخته شده، نمونه‌ها مورد آزمایش قرار می‌گیرند.

فصل چهارم

بررسی و تحلیل نتایج

آزمایشگاهی

۴-۱- مقدمه

این فصل به بررسی نتایج آزمایش‌های تاثیر افزودن همزمان ماکرو الیاف فولادی و میکرو الیاف پلی پروپیلین بر مقاومت مکانیکی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی می پردازد. این نتایج مربوط به آزمایش‌های سنگدانه‌ها، بتن تازه و بتن سخت شده می‌باشد

۴-۲- نتایج آزمایش‌های سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

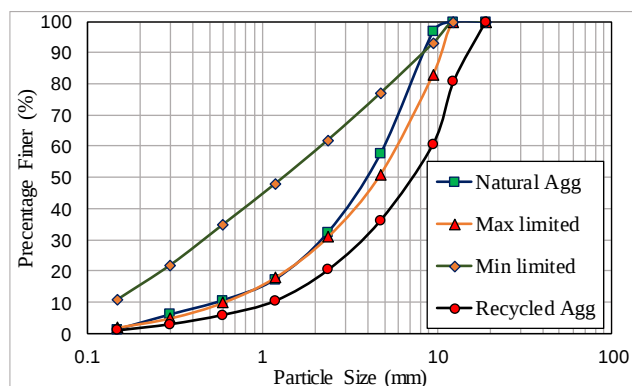
در این بخش به بررسی نتایج آزمایش‌های انجام شده برای تعیین مشخصات مکانیکی سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی پرداخته می‌شود. این بخش پارامترهای همچون دانه‌بندی، درصد جذب آب، درصد سایش، درصد رطوبت کلی و چگالی سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی باهم مقایسه می‌شود.

۴-۲-۱- نتایج آزمایش دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

کیفیت دانه‌بندی سنگدانه‌ها بر مقاومت فشاری، چگالی و تراکم بتن تاثیر قابل توجهی دارد. بنابراین تعیین کیفیت دانه‌بندی سنگدانه‌ها برای اختلاط بتنی با مقاومت، تراکم و روانی مورد نیاز امری ضروری است. کیفیت دانه‌بندی سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی در شکل (۴-۱) و جدول (۴-۱) آمده است. مطابق جدول (۴-۱) درصد عبوری سنگدانه‌های بازیافتی کمتر از سنگدانه‌های طبیعی است. نتایج نشان می‌دهد بافت سنگدانه‌های بازیافتی خشن‌تر از سنگدانه‌های طبیعی است، و موجب می‌شود سنگدانه بازیافتی در خارج از محدوده استاندارد ASTM C33/C33M قرار گیرد.

جدول ۴-۱ دانه‌بندی سنگدانه‌ها

سنگدانه	نمره الک (mm)							
	۰/۱۵	۰/۳	۰/۶	۱/۱۹	۲/۳۸	۴/۷۵	۹/۵	۱۲/۵
درصد عبوری سنگدانه‌های طبیعی	۱	۶	۹	۱۷	۳۲	۵۷	۹۶	۱۰۰
محدوده درشت دانه	۲	۵	۱۰	۱۸	۳۱	۵۱	۸۳	۱۰۰
محدوده ریزدانه	۱۱	۲۲	۳۵	۴۸	۶۲	۷۷	۹۳	۱۰۰
درصد عبوری سنگدانه‌های بازیافتی	۱	۳	۶	۹	۲۴	۳۶	۶۰	۸۱



شکل ۴-۱ منحنی دانه‌بندی سنگدانه

۴-۲-۲- نتایج آزمایش درصد رطوبت و جذب آب سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

نتایج آزمایش جذب آب، وزن مخصوص خشک و اشباع با سطح خشک سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی در جدول (۴-۲) آمده است. با توجه به اینکه ملات متصل در درشت‌دانه‌های بازیافتی وزن مخصوص کمتری و خلل فرج بیشتری نسبت به درشت‌دانه‌های طبیعی دارند. باعث کاهش ۱۴٪ وزن مخصوص خشک، کاهش ۱۰٪ چگالی اشباع با سطح خشک و افزایش ۳۶۸٪ جذب آب درشت‌دانه‌های بازیافتی نسبت به درشت‌دانه‌های طبیعی می‌شود.

جدول ۴-۲- درصد جذب آب و وزن مخصوص سنگدانه‌ها

شرح	ماسه طبیعی	شن طبیعی	شن بازیافتی
جرم مصالح خشک در هوا (Kg)	1.11	5.21	4.51
وزن مخصوص مصالح خشک (Kg/m^3)	1681.11	1564.37	1338.98
وزن مخصوص مصالح اشباع با سطح خشک (Kg/m^3)	1794.75	1561.06	1400
درصد جذب آب	6.76%	0.95%	4.45%

۴-۲-۳- نتایج آزمایش درصد رطوبت کلی

برای محاسبه آب آزاد در طرح اختلاط بتن محاسبه درصد رطوبت سنگدانه‌های مصرفی در شرایط کارگاهی امری ضروری است. نتایج آزمایش درصد رطوبت سنگدانه‌ها در شرایط کارگاهی در جدول (۴-۳) آمده است. نتایج نشان می‌دهد سنگدانه‌های بازیافتی در شرایط کارگاهی در حالت تقریباً خشک است. و سنگدانه‌های طبیعی بیش از ۵۰٪ رطوبت دارد. خشک بودن سنگدانه‌های بازیافتی در شرایط کارگاهی به دو دلیل می‌تواند باشد، اولی بتن مادر سنگدانه‌های بازیافتی در حالت خشک است، و دومی سنگدانه‌های بازیافتی استفاده شده در این پژوهش به مدت یک سال در آزمایشگاه نگهداری شده‌اند.

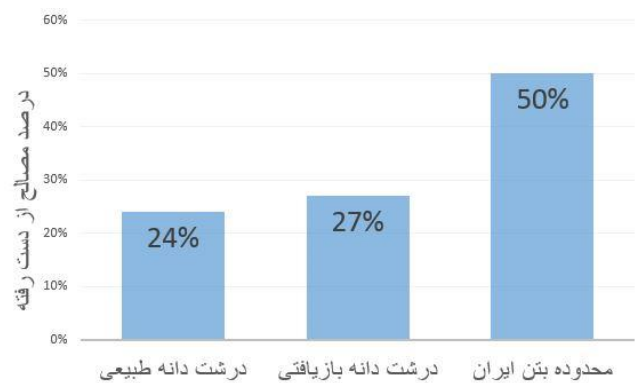
جدول ۴-۳- درصد رطوبت سنگدانه‌ها

سنگدانه	وزن خالص مرطوب (Kg)	وزن خالص خشک (Kg)	درصد رطوبت
ماسه طبیعی	2.097	1.981	5.85%
شن طبیعی	4.194	4.168	0.62%
شن بازیافتی	4.100	4.100	0.0%

۴-۲-۴- نتایج آزمایش درصد سایش

مطابق آیین‌نامه ASTM C131/C131M درصد سایش سنگدانه‌های مصرفی فقط در محدوده درشت‌دانه‌ها اندازه‌گیری می‌شود. نتایج آزمایش درصد سایش شن‌های طبیعی و بازیافتی در شکل (۴-۲) آمده است. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که شن‌های بازیافتی ۱۳٪ نسبت به شن‌های طبیعی درصد سایش بیشتری

دارند. علت این امر این است که ملات متصل به درشت‌دانه‌های بازیافتی نسبت به درشت‌دانه‌های طبیعی مقاومت سایشی کمتری دارد. همچنین درصد مصالح از دست‌رفته درشت‌دانه‌های بازیافتی در محدوده آیین-نامه بتن ایران (کمتر از ۵۰٪) است. در نتیجه امکان استفاده از سنگدانه بازیافتی از نقطه نظر سایشی در اعضا سازه‌ای بلامانع است. همچنین مطابق شکل (۳-۴) و بازدید عینی شن‌های بازیافتی نسبت به شن‌های طبیعی خردتر شده، اما از الک ۱/۷ میلی‌متر عبور نکرده‌اند.



شکل ۲-۴ منحنی درصد سایش درشت‌دانه‌ها



ب) درشت دانه بازیافتی



الف) درشت دانه طبیعی

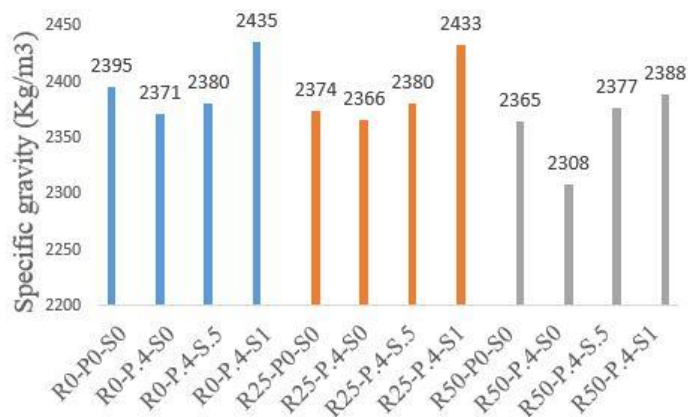
شکل ۳-۴ درشت‌دانه‌ها پس از آزمایش درصد سایش

۴-۳- وزن مخصوص بتن تازه

نتایج وزن مخصوص بتن تازه در شکل (۴-۴) و جدول (۴-۴) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که، وزن مخصوص اجزای مصرفی بتن بر وزن مخصوص بتن تازه تاثیر مستقیم دارد. به عنوان مثال در صورت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی، چون سنگدانه‌های بازیافتی وزن مخصوص کمتری دارند، باعث کاهش وزن مخصوص بتن تازه می‌شود. همچنین در صورت استفاده از الیاف فولادی که وزن مخصوص بالاتری نسبت به بقیه اجزا بتن دارد، باعث افزایش وزن مخصوص بتن تازه می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که، نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی تا ۵۰٪ و افزودن الیاف (الیاف فولادی یا پلی پروپیلن) تا ۱٪ باعث افزایش یا کاهش کمتر از ۵٪ وزن مخصوص بتن تازه می‌شود. که تاثیر چندانی ندارد. و می‌توان در بررسی‌های آزمایشگاهی از تغییرات تا ۵٪ صرفه نظر کرد.

جدول ۴-۴ وزن مخصوص بتن تازه

نمونه	وزن مخصوص (Kg/m ³)	تغییرات نسبت به بتن شاهد (درصد)
R0-P0-S0	2395.429	
R0-P.4-S0	2371.429	-1.00
R0-P.4-S.5	2380.857	-0. 608
R0-P.4-S1	2435.714	1.68
R25-P0-S0	2374.857	-0. 859
R25-P.4-S0	2366.857	-1.193
R25-P.4-S.5	2380.000	-0. 644
R25-P.4-S1	2433.429	1.5864
R50-P0-S0	2365.714	-1.24
R50-P.4-S0	2308.571	-3.626
R50-P.4-S.5	2377.143	-0.763
R50-P.4-S1	2388.571	-0. 286



شکل ۴-۴ منحنی وزن مخصوص بتن تازه

۴-۴- بررسی نتایج آزمایش نمونه‌های سخت شده بتن

در این بخش به بررسی نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، منحنی تنش-کرنش فشاری، مدول الاستیسیته، مقاومت کشش برزیلی، مدول گسیختگی، جذب انرژی خمشی و مقاومت خمشی معادل نمونه‌های سخت شده بتن پرداخته می‌شود.

۴-۴-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن

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... بر مقاومت فشاری بتن تاثیر فراوانی دارد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن در جدول (۴-۵) و شکل (۴-۵) آمده است. مطابق نتایج به دست آمده جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی به ترتیب باعث کاهش ۱۴٪ و ۱۵٪ مقاومت فشاری شده است.

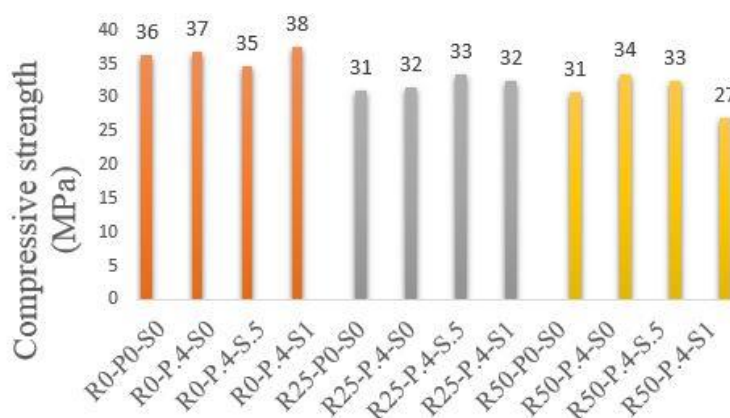
افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه شاهد و حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۱/۵۲٪ و ۱/۵۴٪ مقاومت فشاری بتن می‌شود. که نشان می‌دهد الیاف پلی‌پروپیلن تاثیر ناچیزی بر مقاومت فشاری بتن دارد. همچنین می‌توان با افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی، به ترتیب ۷٪ و ۴٪ مقاومت فشاری را بهبود بخشید. لازم به ذکر است

که افزودن ۱٪ الیاف فولادی به همراه ۴٪ الیاف پلی پروپیلن به بتن باعث کاهش کارایی بتن می‌شود، و امکان پدیده گلوله شدن (بالینگ) افزایش می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهد که، جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی تاثیر بیشتری نسبت به افزودن الیاف در مقاومت فشاری بتن دارد. و نمی‌توان با افزودن همزمان الیاف پلی پروپیلن و فولادی تاثیر سنگدانه‌های بازیافتی را بر مقاومت فشاری جبران کرد.

جدول ۴-۵ مقاومت فشاری بتن

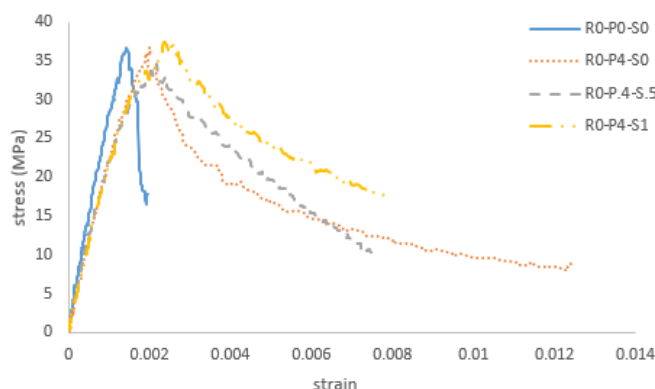
نام نمونه	نیرو (N)	مقاومت فشاری (MPa)	تغییرات نسبت به بتن شاهد
R0-P0-S0	285013	36.29	
R0-P4-S0	289332	36.84	1.52%
R0-P4-S.5	272604	34.71	-4.35%
R0-P4-S1	295301	37.6	3.61%
R25-P0-S0	243623	31.02	-14.52%
R25-P4-S0	247393	31.5	-13.20%
R25-P4-S.5	262708	33.45	-7.83%
R25-P4-S1	254225	32.37	-7.69%
R50-P0-S0	241896	30.8	-15.13%
R50-P4-S0	245037	33.55	-8.03%
R50-P4-S.5	255482	32.53	-10.36%
R50-P4-S1	211109	26.88	-25.93%



شکل ۴-۵ نمودار تغییرات مقاومت فشاری

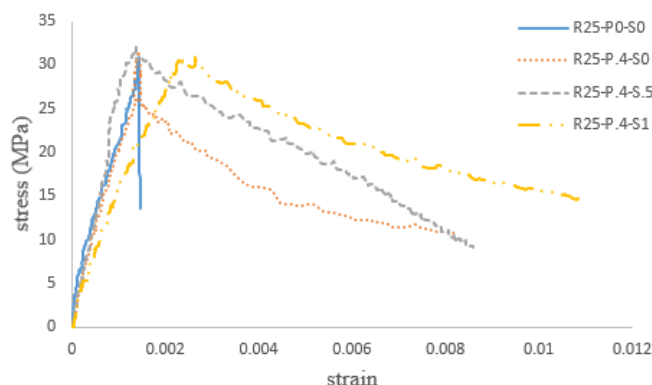
۲-۴-۴- بررسی نمودار تنش- کرنش فشاری بتن

برای درک بهتر، عملکرد نمونه‌های بتنی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی و الیاف‌های پلی‌پروپیلن و فولادی زیر جک فشاری، به بررسی نمودار تنش کرنش در ناحیه قبل و بعد از ترک پرداخته‌ایم. شکل (۴-۶) منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی بدون سنگدانه بازیافتی را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴-۶) افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن نمونه شاهد نمی‌گذارد. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به ترتیب باعث کاهش حدود ۴ درصد و افزایش ۳٪ مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد می‌شود. که نشان می‌دهد افزودن الیاف فولادی و پلی-پروپیلن تاثیری قابل توجه‌ای در مقاومت فشاری بتن شاهد ندارد.



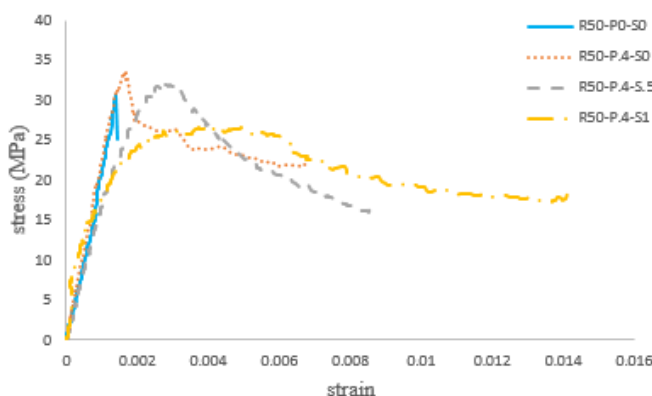
شکل ۴-۶ منحنی تنش-کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی بدون سنگدانه بازیافتی

شکل (۴-۷) منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴-۷) افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی ندارد. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به ترتیب باعث افزایش ۸.۷٪ و ۴۵.۴٪ مقاومت فشاری بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی می‌شود.



شکل ۴-۷ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی

شکل (۴-۸) منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴-۸) افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن باعث افزایش ۸/۷٪ مقاومت فشاری بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی می‌شود. همچنین ترکیب ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به ترتیب باعث افزایش ۶۱/۵٪ و کاهش ۶/۱۴٪ مقاومت فشاری بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی می‌شود. کاهش ۶/۱۴ درصدی مقاومت فشاری نمونه حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی و ۱٪ الیاف فولادی با ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن احتمالاً بخاطر پدیده گلوله شدن الیاف‌هاست.



شکل ۴-۸ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی

مطابق شکل‌های (۴-۶)، (۴-۷) و (۴-۸) مسلح کردن بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی به الیاف هیبریدی (الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن) تاثیر قابل توجه‌ای بر مقاومت فشاری بتن ندارد. اما باعث بهبود رفتار بتن پس از ترک می‌شود، که الیاف فولادی نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن از کارایی بهتری برخوردار است.

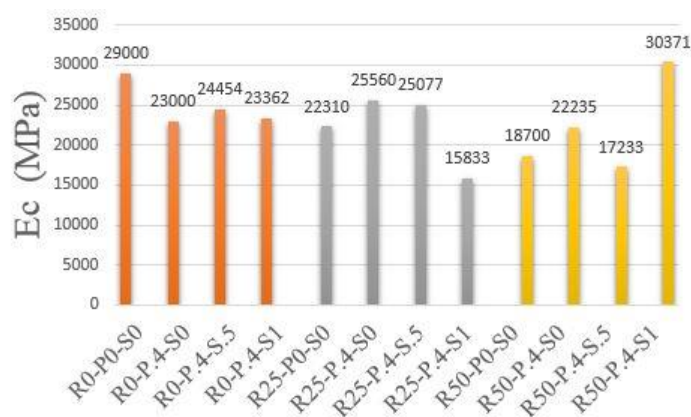
۴-۳- بررسی مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی

مدول الاستیسیته معیاری که از تغییر شکل مصالح در برابر نیرو به دست می‌آید. مدول الاستیسیته بتن با توجه عواملی همچون مصالح مصرفی، مقاومت فشاری، نسبت آب به سیمان و ... می‌تواند تغییر کند [۶۸].

نتایج بررسی مدول الاستیسیته نمونه‌های بتنی در جدول (۴-۶) و شکل (۴-۹) آمده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که، جایگزینی سنگدانه بازیافتی و افزودن الیاف به بتن بدون سنگدانه‌های بازیافتی باعث کاهش مدول الاستیسیته بتن می‌شود. اما افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی باعث افزایش مدول الاستیسیته بتن می‌شود. جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی به ترتیب باعث کاهش ۲۳٪ و ۳۵٪ مدول الاستیسیته بتن می‌شود. همچنین افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن شاهد و حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث کاهش ۲۰٪، ۱۱٪ و ۲۳٪ مدول الاستیسیته نسبت به بتن شاهد می‌شود. ترکیب افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به بتن شاهد به ترتیب باعث کاهش ۱۵٪ و ۱۹٪ مدول الاستیسیته می‌شود.

جدول ۴-۶ مدول الاستیسیته

نمونه	مدول الاستیسیته (MPa)	تغییرات نسبت به بتن شاهد (درصد)
R0-P0-S0	29000	
R0-P.4-S0	23000	-20.69
R0-P.4-S.5	24454	-15.67
R0-P.4-S1	23362	-19.44
R25-P0-S0	22310	-23.07
R25-P.4-S0	25560	-11.86
R25-P.4-S.5	25077	-13.52
R25-P.4-S1	15833	-45.40
R50-P0-S0	18700	-35.51
R50-P.4-S0	22235	-23.32
R50-P.4-S.5	17033	-41.26
R50-P.4-S1	30371	+4.72



شکل ۴-۹ نمودار تغییرات مدول الاستیسته بتن

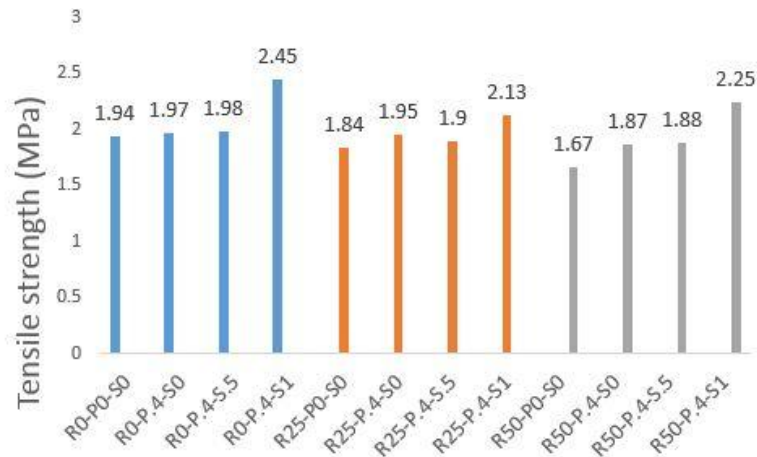
۴-۴-۴- نتایج آزمایش مقاومت شکافت کششی بتن

نتایج آزمایش مقاومت شکافت کششی بتن در جدول (۴-۷) و شکل (۴-۱۰) آمده است. نتایج نشان می‌دهد که، جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی تاثیر کمتری در کاهش مقاومت شکافت کششی نسبت به مقاومت فشاری بتن دارد. به عنوان مثال در صورت جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی به ترتیب باعث کاهش ۱۴٪ و ۱۵٪ مقاومت فشاری می‌شود، اما باعث کاهش ۳٪ و ۱۳٪ مقاومت کششی می‌شود. افزودن ۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن شاهد و حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۱٪، ۰٫۷٪ و کاهش ۳٪ مقاومت کشش برزلی نسبت به بتن شاهد می‌شود. ترکیب افزودن همزمان ۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰٫۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به بتن شاهد به ترتیب باعث افزایش ۲٪ و ۲۶٪ مقاومت کشش برزلی می‌شود. که نشان می‌دهد الیاف فولادی کارایی بهتری نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش مقاومت کششی دارد.

مطابق شکل (۴-۱۱) افزودن الیاف فولادی به بتن در آزمایش شکافت کششی به حفظ پیوستگی بتن کمک می‌کند، و مانع از گسیختگی بتن می‌شود. برای مشاهده بیشتر الگوی ترک نمونه‌ها، در آزمایش مقاومت کشش برزلی به پیوست قسمت ج مراجعه کنید.

جدول ۷-۴ مقاومت کششی بتن بازیافتی حاوی الیاف

نام نمونه	نیرو (N)	مقاومت کششی (MPa)	تغییرات نسبت به بتن شاهد
R0-P0-S0	137000	1.94	
R0-P4-S0	139000	1.97	1.46%
R0-P4-S.5	140000	1.98	2.19%
R0-P4-S1	173210	2.45	26.43%
R25-P0-S0	132000	1.87	-3.65%
R25-P4-S0	138000	1.95	0.73%
R25-P4-S.5	134071	1.90	-2.14%
R25-P4-S1	150600	2.13	9.93%
R50-P0-S0	118080	1.67	-13.81%
R50-P4-S0	132000	1.87	-3.65%
R50-P4-S.5	133000	1.88	-2.92%
R50-P4-S1	159085	2.25	16.12%



شکل ۴-۱۰ نتایج مقاومت کشش برزیلی بتن



الف) نمونه بتنی بدون الیاف

ب) نمونه بتنی حاوی الیاف

شکل ۴-۱۱ تاثیر الیاف بر پیوستگی بتن

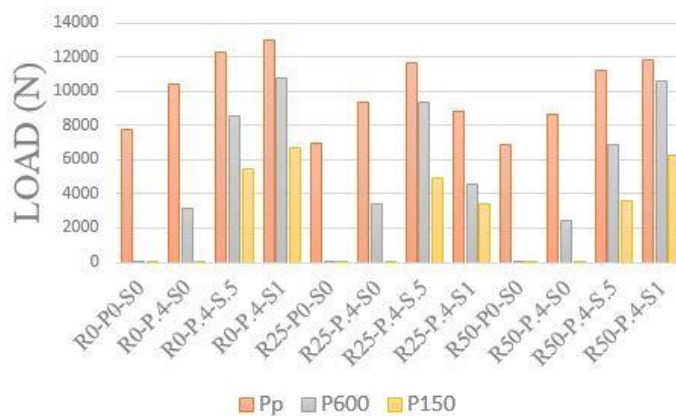
۴-۴-۵- بررسی نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌ای

در آزمایش خمش چهار نقطه‌ای رفتار کششی نمونه‌ها تحت خمش محض در وسط تیر (وسط تیر بدون برش است) ارزیابی می‌شود. نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌ای در جدول (۴-۸) و شکل (۴-۱۲) آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که، جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی باعث کاهش بیشینه بار خمشی در بتن‌های فاقد الیاف و حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن می‌شود. همچنین تاثیر کمتری بر بیشینه بار خمشی نمونه‌های حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی دارد. همچنین افزایش جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی باعث کاهش تغییر شکل متناظر با بیشینه بار خمشی می‌شود.

استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن در نمونه‌های بتنی فقط باعث افزایش بیشینه بار خمشی می‌شود، و تاثیر زیادی برای بهبود رفتار شکننده بتن ندارد. همچنین نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در ناحیه پست ترک به کمتر از ۲۵٪ بیشینه بار خمشی رسیده‌اند، و ادامه بارگذاری توسط دستگاه آزمایش قطع شد. و نیروی متناظر با $L/150$ کمتر از ۲۵٪ بیشینه بار خمشی است. استفاده از الیاف فولادی طاقت خمشی و بیشینه بار خمشی را بهبود می‌بخشد، و از رفتار ترد بتن بعد از بار نهایی جلوگیری می‌کند. و در حفظ پیوستگی بتن بعد از ترک کمک می‌کند.

جدول ۴-۸ نتایج آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای

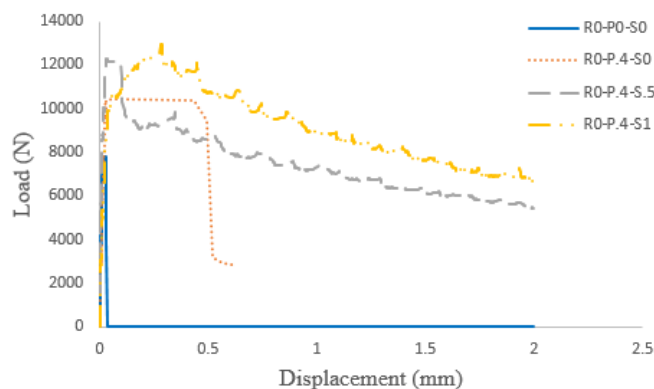
نام نمونه	P_{600}^D (N)	P_{150}^D (N)	بیشینه بار خمشی (N)	δ_p (mm)	تغییرات بیشینه بار خمشی نسبت به بتن شاهد (درصد)
R0-P0-S0	0	0	7796	0.0275	
R0-P.4-S0	3175	---	10428	.05	33.70
R0-P.4-S.5	8566	5417	12288	0.0925	57.54
R0-P.4-S1	10765	6671	12982	0.2825	66.44
R25-P0-S0	0	0	6990	0.005	-10.25
R25-P.4-S0	3434	---	9362	0.01	20.08
R25-P.4-S.5	9330	4900	11700	0.1675	50
R25-P.4-S1	4588	3410	8861	0.0875	13.24
R50-P0-S0	0	0	6846	0.015	-12.22
R50-P.4-S0	2400	---	8624	0.01	11
R50-P.4-S.5	6898	3550	11217	0.045	43.81
R50-P.4-S1	10621	6252	11880	0.14	52.30



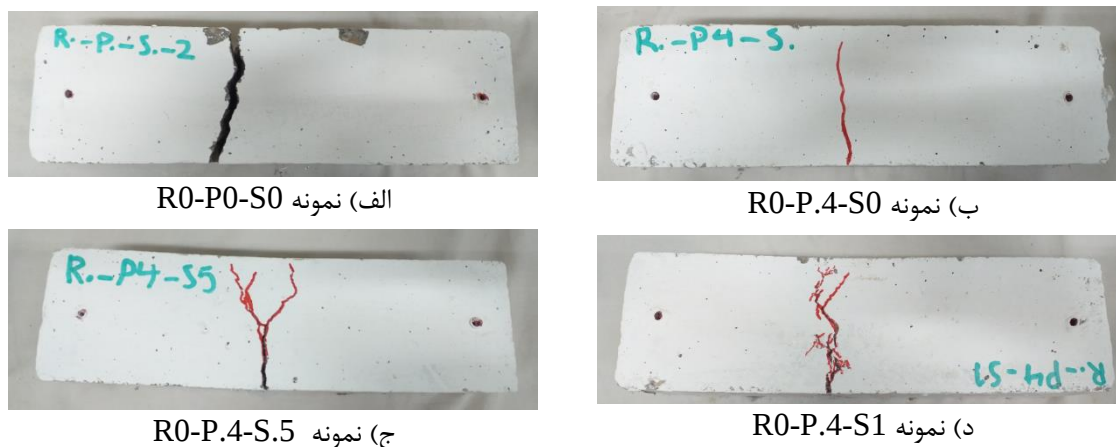
شکل ۴-۱۲ نمودار بار خمشی در مراحل مختلف بار گذاری

در نمودار بالا P_p بیشینه بار خمشی، P_{600} بار خمشی متناظر با $\frac{L}{600}$ و P_{150} بار خمشی متناظر با $\frac{L}{150}$ می‌باشد.

نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های فاقد سنگدانه‌های بازیافتی در شکل (۱۳-۴) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن شاهد باعث افزایش ۳۳٪ بیشینه بار خمشی و ۰/۲۲۵ میلی‌متر تغییر شکل متناظر با بار نهایی نسبت به بتن شاهد می‌شود. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱/۰٪ الیاف فولادی به بتن شاهد به ترتیب باعث افزایش ۵۷٪ و ۶۶٪ بیشینه بار خمشی و افزایش ۰/۶۵ ، ۰/۲۲۵ میلی‌متر تغییر شکل متناظر با بار نهایی نسبت به بتن شاهد می‌شود. الگوی ترک بعد از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نمونه‌های فاقد سنگدانه‌های بازیافتی در شکل (۱۴-۴) نشان داده شده است.

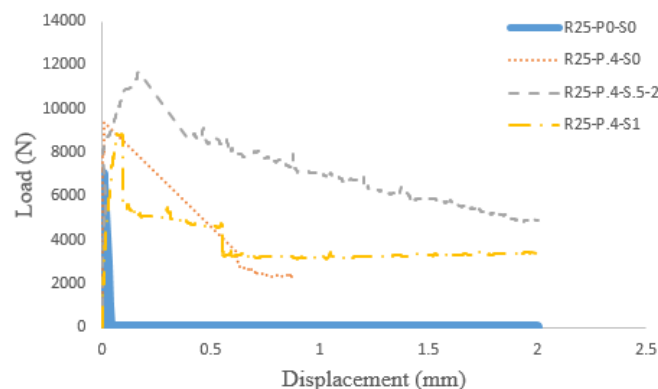


شکل ۴-۱۳ نمودار نیرو-تغییر مکان بتن بدون سنگدانه بازیافتی

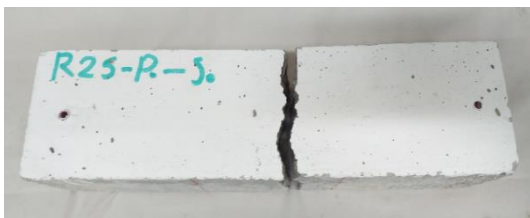


شکل ۴-۱۴ الگوی ترک بعد از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای در نمونه‌های بدون سنگدانه‌های بازیافتی

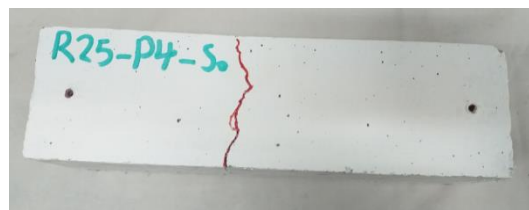
نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی در شکل (۴-۱۵) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، جایگزینی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی به بتن شاهد باعث کاهش ۱۰٪ بیشینه بار خمشی و ۰/۰۲۲۵ میلی‌متر تغییر شکل متناظر با بیشینه بار خمشی می‌شود. افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی باعث افزایش ۲۰٪ بیشینه بار خمشی و کاهش ۰/۰۱۷۵ میلی‌متر تغییر شکل متناظر با بیشینه بار خمشی نسبت به بتن شاهد می‌شود. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۵۰٪ و ۱۳٪ بیشینه بار خمشی و افزایش ۰/۱۴، ۰/۰۶ میلی‌متر تغییر شکل متناظر با بیشینه بار خمشی نسبت به بتن شاهد می‌شود. الگوی ترک بعد از آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی در شکل (۴-۱۶) نشان داده شده است.



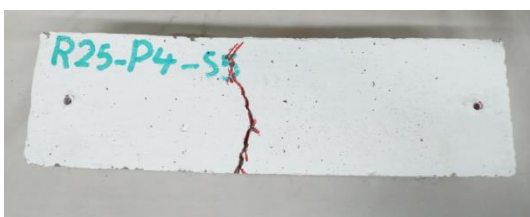
شکل ۴-۱۵ نمودار نیرو-تغییر مکان بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی



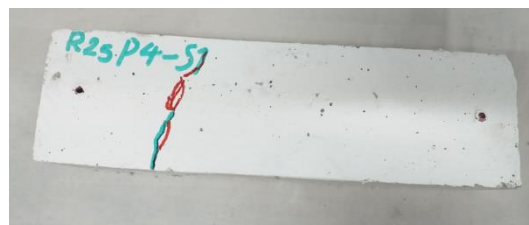
الف) نمونه R25-P0-S0



ب) نمونه R25-P.4-S0



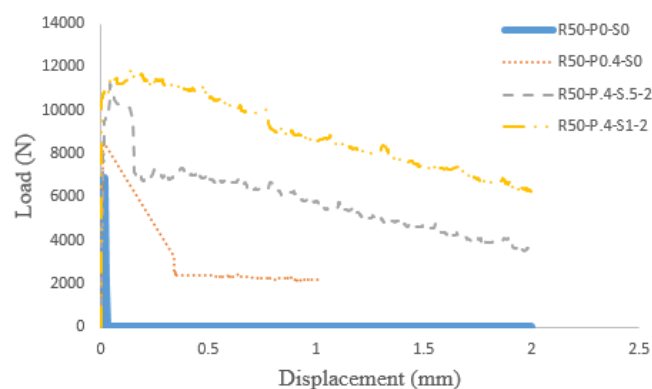
ج) نمونه R25-P.4-S.5



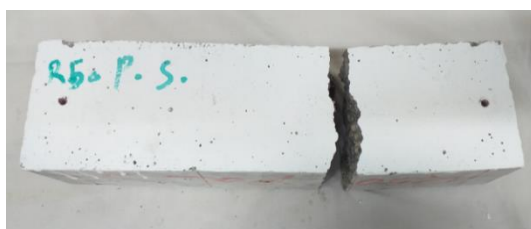
د) نمونه R25-P.4-S1

شکل ۴-۱۶ الگوی ترک بعد از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای در نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی

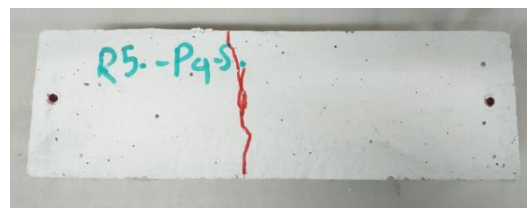
نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه‌های حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی در شکل (۴-۱۷) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، جایگزینی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به بتن شاهد باعث کاهش ۱۲٪ بیشینه بار خمشی و ۰/۱۲۵ میلی‌متر تغییر شکل متناظر با بیشینه بار خمشی می‌شود. افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی باعث افزایش ۱۱٪ بیشینه بار خمشی و کاهش ۰/۱۷۵ میلی‌متر تغییر شکل متناظر با بیشینه بار خمشی نسبت به بتن شاهد می‌شود. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۴۳٪ و ۵۲٪ بیشینه بار خمشی و ۰/۱۷۵، ۰/۱۱ میلی‌متر تغییر شکل متناظر با بیشینه بار خمشی نسبت به بتن شاهد می‌شود. الگوی ترک بعد از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نمونه‌های حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی در شکل (۴-۱۸) نشان داده شده است.



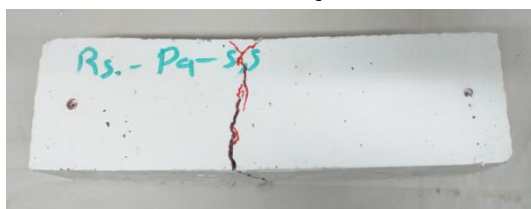
شکل ۴-۱۷ نمودار نیرو-تغییر مکان بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی



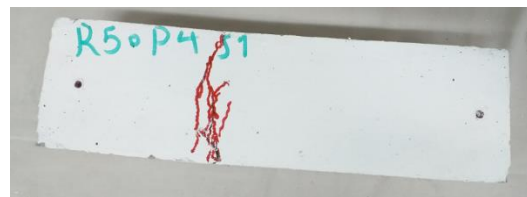
الف) نمونه R50-P0-S0



ب) نمونه R50-P.4-S0



ج) نمونه R50-P.4-S.5



د) نمونه R50-P.4-S1

شکل ۴-۱۸ الگوی ترک بعد از آزمایش خمش چهار نقطه‌ای در نمونه‌های حاوی ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی

۴-۵-۱- بررسی نتایج مدول گسیختگی^۱ MOR

نتایج بررسی مدول گسیختگی نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول (۴-۹) و شکل (۴-۱۹) آمده است. نتایج نشان می‌دهد که با جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی باعث کاهش به ترتیب ۱۰٪ و ۱۲٪ مدول گسیختگی می‌شود. با افزودن ۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی به ترتیب می‌توان مدول گسیختگی ۲۰٪ و ۱۱٪ نسبت به بتن شاهد افزایش دهیم. همچنین افزودن

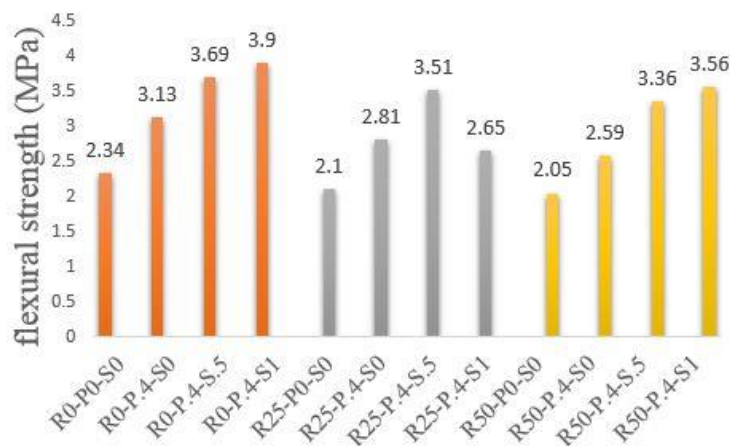
^۱ modulus of rupture

۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن به بتن بدون سنگدانه بازیافتی باعث افزایش ۳۳٪ مدول گسیختگی بتن شاهد می شود. که نشان می دهد افزودن الیاف پلی پروپیلن در افزایش مدول گسیختگی نسبت به تاثیر جایگزینی سنگدانه های بازیافتی با طبیعی موثرتر است. و تاثیر کاهش جایگزینی سنگدانه بازیافتی با طبیعی در مدول گسیختگی را جبران می کند.

افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن با ۰/۵٪ الیاف فولادی به نمونه های شاهد و حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۵۷٪، ۵۰٪ و ۴۳٪ مدول گسیختگی نسبت به بتن شاهد می شود. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن با ۱٪ الیاف فولادی به نمونه های شاهد و حاوی ۵۰٪ سنگدانه های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۶۶٪ و ۵۲٪ مدول گسیختگی نسبت به بتن شاهد می شود. افزودن ترکیب ۱٪ الیاف فولادی و ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن به نمونه ها نسبت به ۰/۵٪ الیاف فولادی و ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش مدول گسیختگی و افزایش شکل پذیری بتن می شود، اما خطر بالینگ را به شدت افزایش می دهد. در این بررسی آزمایشگاهی نمونه R25-P4-S1 در اثر بالینگ بیشینه بار خمشی کمتری تحمل کرده است.

جدول ۴-۹ بیشینه بار خمشی و مدول گسیختگی

تغییرات نسبت به بتن شاهد (درصد)	مدول گسیختگی (Mpa)	بیشینه بار خمشی (N)	نام نمونه
	2.34	7796	R0-P0-S0
33.70	3.13	10428	R0-P4-S0
57.54	3.69	12288	R0-P4-S.5
66.44	3.9	12982	R0-P4-S1
-10.25	2.1	6990	R25-P0-S0
20.08	2.81	9362	R25-P4-S0
50	3.51	11700	R25-P4-S.5
13.24	2.65	8861	R25-P4-S1
-12.22	2.053	6846	R50-P0-S0
11	2.59	8624	R50-P4-S0
43.81	3.36	11217	R50-P4-S.5
52.30	3.56	11880	R50-P4-S1



شکل ۴-۱۹ مدول گسیختگی بتن

۴-۵-۲- بررسی نتایج طاقت خمشی

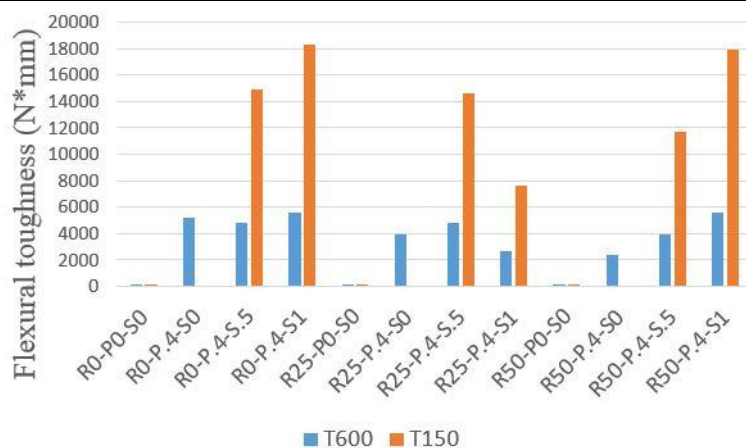
نتایج بررسی طاقت خمشی نمونه‌های آزمایشگاهی در جدول (۴-۱۰) و شکل (۴-۲۰) آمده است. نتایج نشان می‌دهد که بتن بدون الیاف طاقت خمشی خیلی کمی دارد. و جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی به ترتیب باعث کاهش ۲۹٪ و ۳۵٪ طاقت خمشی نمونه بدون الیاف نسبت به بتن شاهد می‌شود. افزودن ۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه بدون سنگدانه‌های بازیافتی و حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۲۷، ۲۰ و ۱۲ برابری طاقت خمشی متناظر با $L/600$ نسبت به بتن شاهد می‌شود. همچنین افزودن همزمان ۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به بتن طبیعی به ترتیب باعث افزایش ۸۱ و ۱۰۰ برابری طاقت خمشی متناظر با $L/150$ نسبت به بتن شاهد می‌شود.

بررسی تغییرات T_{150}^D نسبت به T_{600}^D نشان می‌دهد، که بتن بدون الیاف با یا بدون سنگدانه‌های بازیافتی رفتار شکننده دارد. و بعد از بیشینه بار خمشی مانند شکل (۴-۱۴، ۱۶ و ۱۸) دو نیم می‌شود. افزودن الیاف به بتن به حفظ پیوستگی بتن کمک می‌کند.

افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن به نمونه بدون و حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی در ناحیه پست ترک به نیروی کمتر از ۲۵٪ بیشینه بار خمشی خود می‌رسد. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن با ۰/۴٪ الیاف فولادی به نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۲۱۰٪، ۲۰۱٪ و ۱۹۹٪ طاقت خمشی در ناحیه پست-ترک می‌شود. که نشان می‌دهد الیاف فولادی کارایی بهتری نسب به الیاف پلی پروپیلن در ناحیه پست ترک دارد.

جدول ۴-۱۰ طاقت خمشی نمونه‌های بتنی

نام نمونه	T_{600}^D (J)	تغییرات نسبت به بتن شاهد (درصد)	T_{150}^D (J)	تغییرات نسبت به بتن شاهد (درصد)	تغییرات T_{150}^D نسبت به T_{600}^D (درصد)
R0-P0-S0	0.180	0	0.180	0	0
R0-P4-S0	5.152	2762	---	---	---
R0-P4-S.5	4.810	2572	14.910	8183	210
R0-P4-S1	5.61	3016	18.328	10082	226.72
R25-P0-S0	0.126	-29.92	0.126	-29.92	0
R25-P4-S0	3.945	2091	---	---	---
R25-P4-S.5	4.857	2598	14.650	8038	201.6
R25-P4-S1	2.650	1372	7.650	4150	188.72
R50-P0-S0	0.112	-37.58	0.112	-37.58	0
R50-P4-S0	2.389	1228	---	---	---
R50-P4-S.5	3.913	2074	11.715	6408	199.35
R50-P4-S1	5.589	3005	17.907	9448	220.39



شکل ۲۰-۴ نتایج طاقت خمشی در مراحل مختلف تغییر مکان

در نمودار بالا T_{600} طاقت خمشی متناظر با $\frac{L}{600}$ و T_{150} طاقت خمشی متناظر با $\frac{L}{150}$ است.

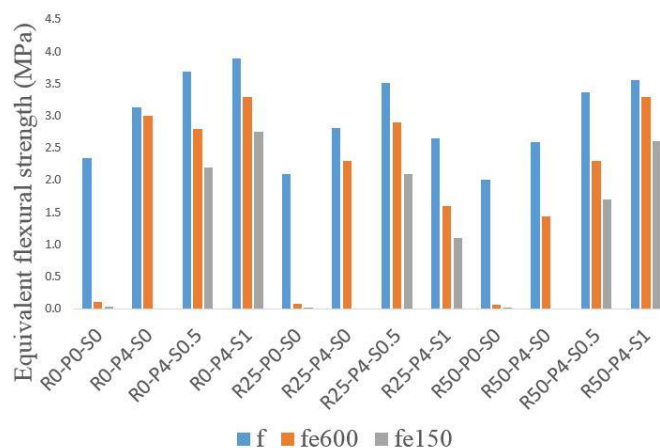
۴-۵-۳- بررسی نتایج مقاومت خمشی معادل

نتایج بررسی مقاومت خمشی معادل در جدول (۴-۱۱) و شکل (۴-۲۱) آورده شده است. در جدول (۴-۱۰)، Fe_{600}^D مقاومت خمشی معادل برای تغییر شکل ۰/۵ میلی‌متر و Fe_{150}^D مقاومت خمشی معادل برای تغییر شکل ۲ میلی‌متر است. نمونه‌های بتنی که حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن و فاقد الیاف فولادی هستند، به ترتیب مقاومت خمشی معادل برای تغییر شکل ۰/۵ میلی‌متر ۳، ۲ و ۱ مگاپاسکال دارند. به دلیل کمتر بودن نیروی متناظر با $L/150$ نمونه‌های حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن از ۲۵٪ بیشینه بار خمشی خود، مقاومت خمشی معادل تا ۲ میلی‌متر عدد مشخصی نداریم. از بررسی نتایج بالا و همچنین شکل‌های (۴-۱۳، ۱۵ و ۱۷) می‌توان نتیجه گرفت، الیاف پلی‌پروپیلن در ناحیه قبل از پست ترک به مقاومت بتن کمک کرده، اما بعد از ترک خوردگی بتن عملکرد ضعیفی دارد.

تغییرات Fe_{150}^D نسبت به Fe_{600}^D نمونه‌های R0-P4-S.5، R25-P4-S.5 و R50-P4-S.5 به ترتیب برابر ۲۲٪، ۲۴٪ و ۲۵٪ است. همچنین تغییرات Fe_{150}^D نسبت به Fe_{600}^D نمونه‌های R0-P4-S1، R25-P4-S1 و R50-P4-S1 به ترتیب برابر ۱۸٪، ۲۷٪ و ۱۹٪ است. که نشان می‌دهد افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به بتن هم در ناحیه قبل و بعد از ترک خوردگی کارایی بهتری نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن دارند. همچنین افزودن ۱٪ الیاف فولادی به نمونه‌های حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن باعث کاهش شیب افت مقاومت در ناحیه بعد از ترک خوردگی نسبت به ۰/۵٪ الیاف فولادی می‌شود.

جدول ۴-۱۱ مقاومت خمشی معادل

نام نمونه	مقاومت خمشی (MPa)	Fe_{600}^D (MPa)	تغییرات Fe_{600}^D نسبت به مقاومت خمشی نمونه (درصد)	Fe_{150}^D (MPa)	تغییرات Fe_{150}^D نسبت به مقاومت خمشی نمونه (درصد)	تغییرات Fe_{150}^D نسبت به Fe_{600}^D (درصد)
R0-P0-S0	2.34	0.108	-95.38	0.027	-98.84	-75
R0-P4-S0	3.13	3.091	-1.12	---	---	---
R0-P4-S.5	3.69	2.886	-21.78	2.236	-39.39	-22.5
R0-P4-S1	3.9	3.366	-13.57	2.75	-29.41	-18.31
R25-P0-S0	2.1	0.075	-96.32	0.019	-99.09	-75
R25-P4-S0	2.81	2.367	-15.71	---	---	---
R25-P4-S.5	3.51	2.914	-16.96	2.197	-37.39	-24.6
R25-P4-S1	2.65	1.59	-40.20	1.147	-56.83	-27.81
R50-P0-S0	2.053	0.067	-96.71	0.016	-99.17	-75
R50-P4-S0	2.59	1.43	-45	---	---	---
R50-P4-S.5	3.36	2.348	-30.22	1.757	-47.77	-25.16
R50-P4-S1	3.56	3.353	-6	2.686	-24.63	-19.90



شکل ۴-۲۱ نمودار مقاومت خمشی معادل

۴-۵- نتیجه گیری

این مطالعه بررسی خواص مکانیکی بتن مسلح به الیاف هیبریدی (الیاف فولادی و پلی پروپیلن) و حاوی سنگدانه‌های بازیافتی را دنبال کرد. یافته‌های کلیدی به شرح جدول زیر است:

جدول ۴-۱۲ یافته‌های کلیدی آزمایش‌های بتن حاوی سنگدانه بازیافتی و الیاف فولادی و پلی پروپیلن

سختی خمشی متناظر با L/150	سختی خمشی متناظر با L/600	مقاومت کشش خمشی	مقاومت کشش برزیلی	مدول الاستیسته	مقاومت فشاری	
-29	-29	-10	-3	-23	-14	جایگزینی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی
-37	-37	-12	-13	-35	-16	جایگزینی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی
---	+2700	+33	تأثیری ندارد	-20	تأثیری ندارد	افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن
+8100	+2500	+55	+10	-15	تأثیری ندارد	ترکیب ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۰/۵٪ الیاف فولادی
+10100	+3000	+65	+26	-19	تأثیری ندارد	ترکیب ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۱٪ الیاف فولادی

لازم به ذکر است تمامی اعداد در جدول بالا درصد تغییرات نسبت به بتن شاهد را نشان می‌دهد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

در این فصل، ابتدا جمع بندی و نتیجه گیری از آزمایش‌های انجام شده آورده شده است. در ادامه فصل پیشنهادات به تحقیقات آتی بیان گردیده است.

۵-۲- جمع بندی و نتیجه گیری

- درصد عبوری سنگدانه‌های بازیافتی کمتر از سنگدانه‌های طبیعی می‌باشد، که نشان می‌دهد سنگدانه بازیافتی خشن‌تر نسبت به سنگدانه طبیعی است، و موجب می‌شود سنگدانه بازیافتی در خارج از محدوده استاندارد قرار گیرد.
- با توجه به اینکه ملات متصل در درشت‌دانه‌های بازیافتی وزن مخصوص کمتر و خلل فرج بیشتری نسبت به درشت‌دانه‌های طبیعی دارند. باعث کاهش ۱۴٪ وزن مخصوص خشک، کاهش ۱۰٪ چگالی اشباع با سطح خشک و افزایش ۳۶۸٪ جذب آب درشت‌دانه‌های بازیافتی نسبت به درشت‌دانه‌های طبیعی می‌شود. در نتیجه هنگام جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی، اقدامات لازم جهت محاسبه آب آزاد بتن صورت بگیرد.
- سنگدانه‌های بازیافتی در شرایط کارگاهی در حالت خشک است. که در محاسبه آب آزاد بتن بسیار تاثیرگذار است.
- نتایج آزمایش درصد سایش درشت‌دانه‌ها نشان می‌دهد که، شن‌های بازیافتی نسبت به شن‌های طبیعی ۱۳٪ درصد سایش بیشتری دارد. امکان خرد شدن سنگدانه‌های بازیافتی در هنگام اختلاط بتن وجود دارد، که نیازمند پژوهش و اقدام‌های لازم است.
- درصد سایش سنگدانه‌های بازیافتی در محدوده آیین‌نامه بتن ایران (کمتر از ۵۰٪) است، در نتیجه امکان استفاده از سنگدانه بازیافتی از نقطه نظر سایشی بلامانع است.
- در صورت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی، چون سنگدانه‌های بازیافتی وزن مخصوص کمتری دارد، باعث کاهش وزن مخصوص بتن تازه می‌شود. و می‌توان بتن سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های سبک برای تولید بتن سبک‌تر استفاده کرد. در صورت افزودن الیاف فولادی باعث

افزایش وزن مخصوص بتن تازه می‌شود. و افزودن الیاف پلی‌پروپیلن باعث کاهش وزن مخصوص بتن می‌شود.

- مقاومت فشاری بتن با نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی نسبت معکوس دارد. به طوریکه جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث کاهش ۱۴٪ و ۱۵٪ مقاومت فشاری شده است. همچنین افزودن الیاف تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن ندارد. در نتیجه نمی‌توان با افزودن الیاف کاهش مقاومت فشاری بتن ناشی از جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی را جبران کرد. راه حل بهتر این است که با توجه به مقاومت مورد نیاز، از نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی استفاده کرد.

- جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی تاثیر کمتری در کاهش مقاومت شکافت کششی نسبت به مقاومت فشاری دارد. در صورت جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی به ترتیب باعث کاهش ۱۴٪ و ۱۵٪ مقاومت فشاری می‌شود، اما باعث کاهش ۳٪ و ۱۳٪ مقاومت کششی می‌شود.
- افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به بتن شاهد و حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۱٪، ۰/۷٪ و کاهش ۳٪ مقاومت کشش برزلی نسبت به بتن شاهد می‌شود. که نشان می‌دهد افزودن الیاف پلی‌پروپیلن در بهبود کاهش مقاومت کششی ناشی از جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی موثر است.

- جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی باعث کاهش بیشینه بار خمشی در بتن‌های فاقد الیاف و حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن می‌شود. همچنین تاثیر کمتری بر بیشینه بار خمشی نمونه‌های حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی دارد. همچنین افزایش جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی باعث کاهش تغییر شکل متناظر با بیشینه بار خمشی می‌شود. که نشان می‌دهد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی در ایجاد سریع‌تر ترک‌های اولیه کمک می‌کند.

- استفاده از الیاف پلی پروپیلن در نمونه‌های بتنی فقط باعث افزایش بیشینه بار خمشی می‌شود، و تاثیر زیادی برای بهبود رفتار شکننده بتن ندارد. همچنین نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن در ناحیه پست ترک به کمتر از ۲۵٪ بیشینه بار خمشی رسیده‌اند، و نیروی متناظر با $L/150$ کمتر از ۲۵٪ بیشینه بار خمشی است. استفاده از الیاف فولادی طاقت خمشی و بیشینه بار خمشی را بهبود می‌بخشد، و از رفتار ترد بتن بعد از بیشینه بار خمشی جلوگیری می‌کند. و در حفظ پیوستگی بتن بعد از ترک کمک می‌کند.

- جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی باعث کاهش به ترتیب ۱۰٪ و ۱۲٪ مدول گسیختگی می‌شود. با افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن به نمونه حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی به ترتیب می‌توان مدول گسیختگی ۲۰٪ و ۱۱٪ نسبت به بتن شاهد افزایش دهیم. همچنین افزایش ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن به بتن بدون سنگدانه بازیافتی باعث افزایش ۳۳٪ مدول گسیختگی بتن شاهد می‌شود. که نشان می‌دهد افزودن الیاف پلی پروپیلن در افزایش مدول گسیختگی نسبت به تاثیر جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی موثرتر است. و تاثیر کاهش جایگزینی سنگدانه بازیافتی با طبیعی در مدول گسیختگی را جبران می‌کند.

- افزودن ترکیب ۱٪ الیاف فولادی و ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن به نمونه‌ها نسبت به ۰/۵٪ الیاف فولادی و ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن باعث افزایش مدول گسیختگی و افزایش شکل پذیری بتن می‌شود، اما خطر بالینگ را به شدت افزایش می‌دهد.

- بتن بدون الیاف طاقت خمشی خیلی کمی دارد. و جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی به ترتیب باعث کاهش ۲۹٪ و ۳۵٪ طاقت خمشی نمونه بدون الیاف می‌شود

- افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن به نمونه بدون سنگدانه بازیافتی و حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۲۷، ۲۰ و ۱۲ برابری طاقت خمشی متناظر با $L/600$ نسبت به

بتن شاهد می‌شود. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به بتن طبیعی به ترتیب باعث افزایش ۸۱ و ۱۰۰ برابری طاقت خمشی متناظر با L/150 نسبت به بتن شاهد می‌شود.

- افزودن ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه بدون و حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی در ناحیه پست ترک به نیروی کمتر از ۲۵٪ بیشینه بار خمشی خود می‌رسد. همچنین افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ الیاف فولادی به نمونه شاهد و نمونه‌های حاوی ۲۵٪ و ۵۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۲۱۰٪، ۲۰۱٪ و ۱۹۹٪ طاقت خمشی در ناحیه پست-ترک می‌شود. که نشان می‌دهد الیاف فولادی کارایی بهتری نسب به الیاف پلی‌پروپیلن در ناحیه قبل و بعد از ترک دارد.

- نمونه‌های بتنی که حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن و فاقد الیاف فولادی هستند، به ترتیب مقاومت خمشی معادل برای تغییر شکل ۰/۵ میلی‌متر ۳، ۲ و ۱ مگاپاسکال دارند. به دلیل کمتر بودن نیروی متناظر با L/150 نمونه‌های حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن از ۲۵٪ بیشینه بار خمشی خود، مقاومت خمشی معادل تا ۲ میلی‌متر عدد مشخصی نداریم. از بررسی نتایج بالا و همچنین می‌توان نتیجه گرفت، الیاف پلی‌پروپیلن در ناحیه قبل از پست ترک به مقاومت بتن کمک کرده، اما بعد از ترک خوردگی بتن عملکرد ضعیفی دارد.

- افزودن همزمان ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰/۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی به بتن هم در ناحیه قبل و بعد از ترک خوردگی کارایی بهتری نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن دارند. همچنین افزودن ۱٪ الیاف فولادی به نمونه‌های حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن باعث کاهش شیب افت مقاومت در ناحیه بعد از ترک خوردگی نسبت به ۰/۵٪ الیاف فولادی می‌شود.

۵-۳-پیشنهادات برای تحقیقات آتی

- ارزیابی بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی در برابر نیروی ضربه
- ارزیابی ترکیب انواع مختلف الیاف بر روی خواص مکانیکی نمونه‌ها
- بررسی تاثیر پوزولان‌های مختلف بر روی خواص مکانیکی بتن حاوی سنگدانه‌های بتن بازیافتی
- ساخت المان‌های سازه‌ای نظیر تیر، ستون با استفاده از بتن حاوی سنگدانه‌های بتن بازیافتی
- بررسی اثر نسبت آب به سیمان بر خواص بتن حاوی سنگدانه‌های بتنی بازیافتی
- بررسی مقاومت‌های سایشی و ضربه‌ای بتن حاوی سنگدانه‌های بتنی بازیافتی به همراه ترکیب الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن
- استفاده از سنگدانه‌های بتن بازیافتی به صورت ترکیبی با سنگدانه‌های سبک جهت ساخت بتن سبک

مراجع

- [1] د. مستوفی نژاد، تکنولوژی و طرح اختلاط بتن، چاپ چهل و سوم. موسسه انتشارات ارکان دانش، ۱۳۹۴.
- [2] A. B. De Melo, A. F. Goncalves, and I. M. Martins, "Construction and demolition waste generation and management in Lisbon (Portugal)," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, no. 12, pp. 1252–1264, 2011.
- [3] D. Pedro, J. De Brito, L. Evangelista, and M. Bravo, "Technical specification proposal for use of high-performance recycled concrete aggregates in high-performance concrete production," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 30, no. 12, p. 4018324, 2018.
- [4] "Global Demand for Construction Aggregates to Exceed 48 Billion Metric Tons in 2015| Concrete Construction Magazine." [Online]. Available: https://www.concreteconstruction.net/business/global-demand-for-construction-aggregates-to-exceed-48-billion-metric-tons-in-2015_o. [Accessed: 04-Jun-2021].
- [5] م. اسماعیل نیا و م. فریدی، "رابطه مقاومت فشاری با مقاومت کششی و ضریب کشسانی در بتن خودتراکم حاوی سنگ دانه بازیافتی و زئولیت طبیعی،" *تحقیقات بتن*, vol. 7, no. 1, pp. 7–22, 1393.
- [6] ش. مقصودیان، ف. جندقی علایی و م. نعمت زاده، "بررسی تأثیر الیاف ترکیبی فولادی موج دار- قلاب دار و پلی پروپیلن اصلاح شده بر رفتار برشی تیرهای بتن آرمه با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و روابط تجربی،" *نشریه مهندسی عمران/امیرکبیر*, vol. 53, no. 4, p. 11, 2021.
- [7] L. Berredjem, N. Arabi, and L. Molez, "Mechanical and durability properties of concrete based on recycled coarse and fine aggregates produced from demolished concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 246, p. 118421, 2020.
- [8] G. Andreu and E. Miren, "Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 52, pp. 227–235, 2014.
- [9] S. Altoubat, A. Yazdanbakhsh, and K.-A. Rieder, "Shear behavior of macro-synthetic fiber-reinforced concrete beams without stirrups," *ACI Mater. J.*, vol. 106, no. 4, p. 381, 2009.
- [10] A. Conforti, F. Minelli, A. Tinini, and G. A. Plizzari, "Influence of polypropylene fibre reinforcement and width-to-effective depth ratio in wide-shallow beams," *Eng. Struct.*, vol. 88, pp. 12–21, 2015.
- [11] G. Arslan, R. S. O. Keskin, and M. Ozturk, "Shear behaviour of polypropylene fibre-reinforced-concrete beams without stirrups," *Proc. Inst. Civ. Eng. Build.*, vol. 170, no. 3, pp. 190–198, 2017.
- [12] F. O. Navas, J. Navarro-Gregori, G. L. Herdocia, P. Serna, and E. Cuenca, "An experimental study on the shear behaviour of reinforced concrete beams with macro-synthetic fibres," *Constr. Build. Mater.*, vol. 169, pp. 888–899, 2018.
- [13] D. Gao, L. Zhang, and M. Nokken, "Mechanical behavior of recycled coarse aggregate concrete reinforced with steel fibers under direct shear," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 79, pp. 1–8, 2017.

- [14] J. A. Carneiro, P. R. L. Lima, M. B. Leite, and R. D. Toledo Filho, "Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 46, pp. 65–72, 2014.
- [15] T. Kang, W. Kim, Y.-K. Kwak, and S.-G. Hong, "The choice of recycled concrete aggregates for flexural members," in *IABSE Congress Report*, 2012, vol. 18, no. 21, pp. 726–731.
- [16] K. R. Akça, Ö. Çakır, and M. İpek, "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 620–630, 2015.
- [17] م. شیرانی بیدآبادی و م. اکبری, "ارزیابی خواص مکانیکی بتن بازیافتی مسلح به الیاف؛ تأثیر ابعاد و میزان سنگدانه بازیافتی، نوع و میزان الیاف," *نشریه مهندسی سازه و ساخت*, vol. 4, no. 1, pp. 138–150, 2017.
- [18] A. Rao, K. N. Jha, and S. Misra, "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 50, no. 1, pp. 71–81, 2007.
- [19] W. Lu, H. Yuan, J. Li, J. J. L. Hao, X. Mi, and Z. Ding, "An empirical investigation of construction and demolition waste generation rates in Shenzhen city, South China," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 4, pp. 680–687, 2011.
- [20] ا. رضایی, "بررسی تاثیر الیاف پلی پروپیلن با اندازه های مختلف بر روی خواص مکانیکی بتن حاوی سنگدانه بازیافتی," *دانشگاه گیلان*, ۱۳۹۴.
- [21] T. C. Hansen, "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985," *Mater. Struct.*, vol. 19, no. 3, pp. 201–246, 1986.
- [22] B. Boesman, "Crushing and Separating Techniques for Demolition Material. EDA/RILEM Demo-Recycling Conference," in *Proc*, 1985, vol. 2.
- [23] R. Wang, N. Yu, and Y. Li, "Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 242, p. 118164, 2020.
- [24] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, ONE Edit. Pearson Prentice Hall, 2002.
- [25] M. L. - Gambhir, *Concrete Technology*, Third Edit. Tata McGraw Hill Companies, 2004.
- [26] P. D. N., "Workability Study for Recycled Aggregates," *IOSR J. Eng.*, vol. 02, no. 05, pp. 1040–1044, 2012.
- [27] M. C. Limbachiya, T. Leelawat, and R. K. Dhir, "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete," *Mater. Struct.*, vol. 33, no. 9, pp. 574–580, 2000.
- [28] A. Shayan and A. Xu, "Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate," *Mater. J.*, vol. 100, no. 5, pp. 371–380, 2003.
- [29] K. K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, and A. H. Taylor, "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 5, pp. 707–712, 2001.
- [30] H. Jalilifar, F. Sajedi, and S. Kazemi, "RETRACTED: Investigation on the

- Mechanical Properties of Fiber Reinforced Recycled Concrete,” *Civ. Eng. J.*, vol. 2, no. 1, pp. 13–22, 2016.
- [31] ف. م. ایراندوست، تکنولوژی بتن و آزمایشگاه همراه با طرح اختلاط بتن، چاپ چهارم، دانشگاه تهران، ۱۳۹۲.
- [32] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Mari, and M. Barra, “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 5, pp. 735–742, 2007.
- [33] M. Tavakoli and P. Soroushian, “Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate,” *Mater. J.*, vol. 93, no. 2, pp. 178–181, 1996.
- [34] K. McNeil and T. H. K. Kang, “Recycled Concrete Aggregates: A Review,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 7, no. 1, pp. 61–69, 2013.
- [35] T. Ji, C.-Y. Chen, Y.-Y. Chen, Y.-Z. Zhuang, J.-F. Chen, and X. Lin, “Effect of moisture state of recycled fine aggregate on the cracking resistibility of concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 44, pp. 726–733, 2013.
- [36] M. C. Rao, S. K. Bhattacharyya, and S. V Barai, “Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 1, pp. 69–80, 2011.
- [37] S. Yehia, K. Helal, A. Abusharkh, A. Zaher, and H. Istaitieh, “Strength and durability evaluation of recycled aggregate concrete,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 9, no. 2, pp. 219–239, 2015.
- [38] S. Kou and C. Poon, “Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 77, pp. 501–508, 2015.
- [39] F. Yagishita, “Behavior of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate,” *Demolition Reuse Concr. Masn.*, pp. 331–342, 1994.
- [40] ش. طاحونی، طراحی سازه های بتن مسلح ۱، پانزدهم، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۹.
- [41] K.-H. Yang, H.-S. Chung, and A. F. Ashour, “Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties,” 2008.
- [42] M. G. Beltrán, A. Barbudo, F. Agrela, A. P. Galvín, and J. R. Jiménez, “Effect of cement addition on the properties of recycled concretes to reach control concretes strengths,” *J. Clean. Prod.*, vol. 79, pp. 124–133, 2014.
- [43] S. O. Franklin and M. T. Gumedde, “Studies on strength and related properties of concrete incorporating aggregates from demolished wastes: part 1—a global perspective,” *Open J. Civ. Eng.*, vol. 4, no. 04, p. 311, 2014.
- [44] C1116/C1116M, “Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete1,” pp. 1–7, 2009.
- [45] د. مستوفی نژاد، “بررسی تجربی خواص بتن مسلح به الیاف شیشه،” *دانشگاه صنعتی اصفهان*، ۱۳۸۰.
- [46] ه. فامیلی، م. م. کیومرثی، ا. شعبان علیزاده و م. م. عبدلی، “بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی بتن حاوی الیاف شیشه،” *دومین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران، ۱۳۸۹*.

- [47] ا. لطفی و م. پورقلی، "بررسی خواص بتن الیافی"، اولین همایش بین المللی بتن های خاتراوا - مخازن ذخیره آب شرب، رشت، ۱۳۹۰.
- [48] W. R. Malisch, "Polypropylene fibers in concrete, what do the test tell us?," *Concr. Constr.*, vol. 31, no. 4, pp. 363–368, 1986.
- [49] "بتن الیافی - ویکی‌پدیا، دانش‌نامه آزاد" [Online]. Available: https://fa.wikipedia.org/wiki/بتن_الیافی. [Accessed: 04-Jun-2021].
- [50] A820/A820M, "Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete," no. October, pp. 1–4, 2011.
- [51] P. Soroushian, "Secondary Reinforcement--Adding Cellulose Fibers," *Concr. Int.*, vol. 19, no. 6, pp. 28–34, 1997.
- [52] K. V Subramaniam, J. S. Popovics, and S. P. Shah, "Fatigue response of concrete subjected to biaxial stresses in the compression-tension region," *ACI Mater. J.*, vol. 96, no. 6, pp. 663–669, 1999.
- [53] I. 2930, ۱، *افزودنی های بتن ملات دوغاب*. چاپ اول. استاندارد ملی ایران، ۱۳۹۲.
- [54] T. W. Ahmed, A. A. M. Ali, and R. S. Zidan, "Properties of high strength polypropylene fiber concrete containing recycled aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 241, p. 118010, 2020.
- [55] م. ن. م. م. ساختمان، *طراحی و اجرای ساختمان های بتن آرمه*. وزارت راه و شهرسازی، ۱۳۹۹.
- [56] C136/C136M, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates 1," vol. i, no. 200, pp. 1–5, 2007.
- [57] C29/C29M-09, "Standard Test Method for Bulk Density (' Unit Weight ') and Voids in Aggregate," *ASTM Int.*, vol. i, no. c, pp. 1–5, 2009.
- [58] C566/C566M, "Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying," (*Reported by ACI Comm. 544*, vol. 97, no. Reapproved 2004, pp. 1–3, 2016).
- [59] C131/C131M, "Standard Test Method for Resistance to Degradation of Large-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine 1," vol. i, pp. 24–26, 2010.
- [60] C128/C128M, "Standard Test Method for Density , Relative Density (Specific Gravity), and Absorption," *ASTM Int.*, pp. 1–6, 2001.
- [61] C127/C127M, "Standard Test Method for Density , Relative Density (Specific Gravity), and Absorption," *ASTM Int.*, pp. 1–6, 2001.
- [62] C143/C143M, "Standard Test Method for Slump of Sealants 1," vol. i, no. Reapproved, pp. 1–4, 2014.
- [63] C39/C39M, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens 1," *ASTM Stand. B.*, vol. i, pp. 1–5, 2003.
- [64] C469/C469M, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson ' s Ratio of Concrete," vol. i, pp. 2–6, 2006.

- [65] C496/C496M, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens1," *Man. Hydrocarb. Anal. 6th Ed.*, pp. 545-545-3, 2008.
- [66] C1609/C1609M, "Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) 1," *Astm*, vol. i, no. C 1609/C 1609M-05, pp. 1-8, 2005.
- [67] M. Jamshidi Avanaki, M. Abedi, A. Hoseini, and M. S. Maerefat, "Effects of fiber volume fraction and aspect ratio on mechanical properties of hybrid steel fiber reinforced concrete," *New Approaches Civ. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 49-64, 2018.
- [68] A. 544.1R-96, "Report on Fiber Reinforced Concrete."

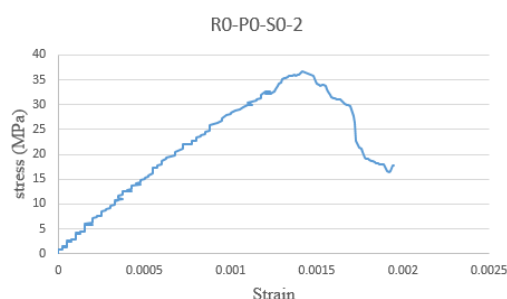
پیوست

پیوست

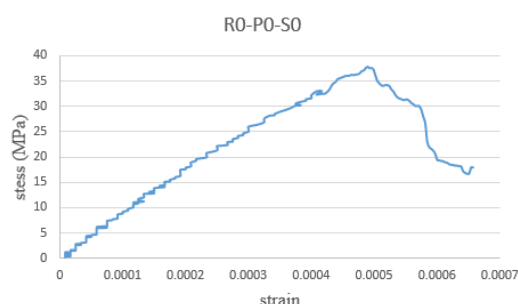
در قسمت پیوست نمودارهای تنش-کرنش، شماتیک ترک در آزمایش فشاری، نمودار بار-تغییرمکان آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای و همچنین نوع ترک بعد از آزمایش کشش برزیلی آورده شده است. در انتهای پیوست عکس‌های از مراحل آزمایش‌های انجام شده آورده شده است.

پیوست - الف - نمودارهای تنش-کرنش

در این بخش از پیوست نمودارهای تنش-کرنش مقاومت فشاری نمونه‌های آزمایش نشان داده شده است. لازم به ذکر است که، این نمودارها مربوط به استوانه 100×200 میلی‌متر بوده است. و ضریب تبدیل ابعاد استوانه اعمال نشده است.

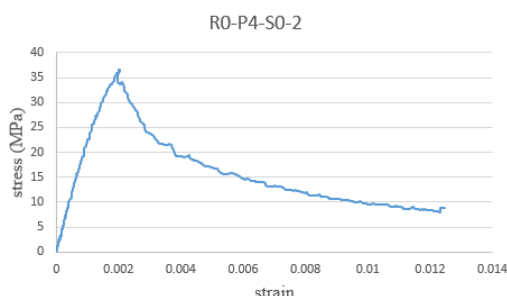


ب) نمونه دوم آزمایش

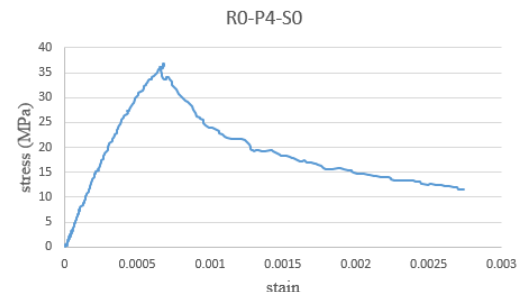


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۱ نمودار تنش-کرنش نمونه R0-P0-S0

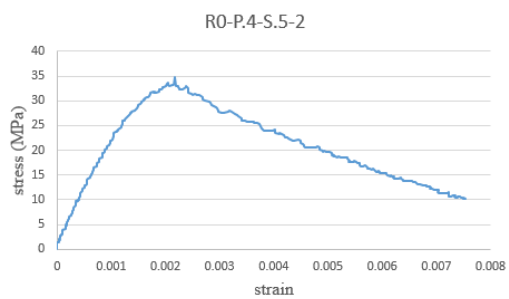


ب) نمونه دوم آزمایش

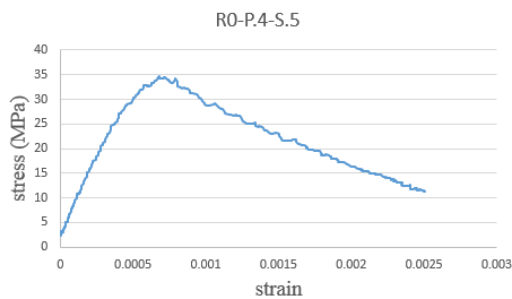


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۲ نمودار تنش-کرنش نمونه R0-P.4-S0

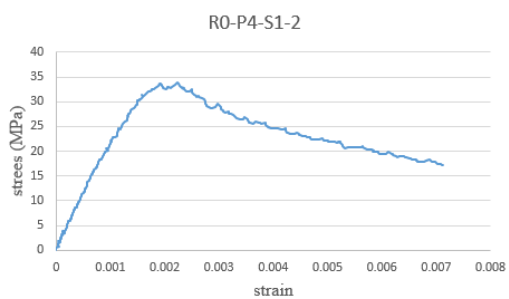


ب) نمونه دوم آزمایش

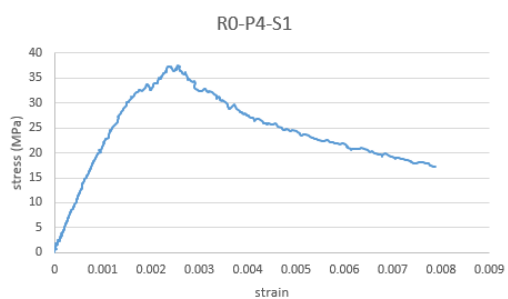


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۳ نمودار تنش-کرنش نمونه R0-P.4-S.5

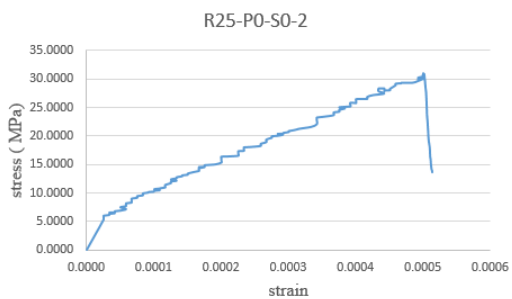


ب) نمونه دوم آزمایش

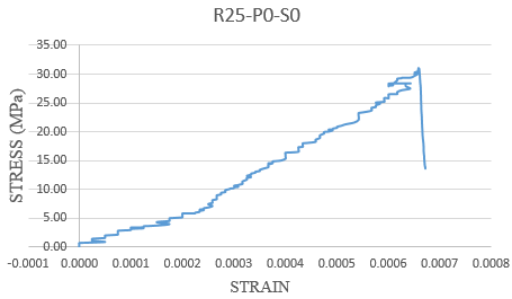


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۴ نمودار تنش-کرنش نمونه R0-P.4-S1

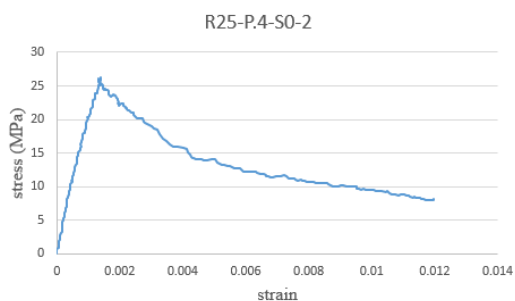


ب) نمونه دوم آزمایش

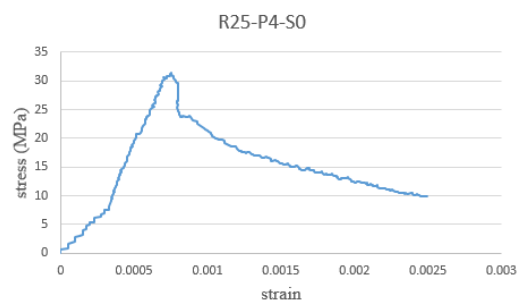


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۵ نمودار تنش-کرنش نمونه R25-P.0-S0

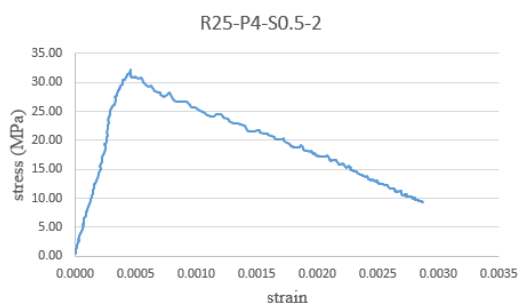


ب) نمونه دوم آزمایش

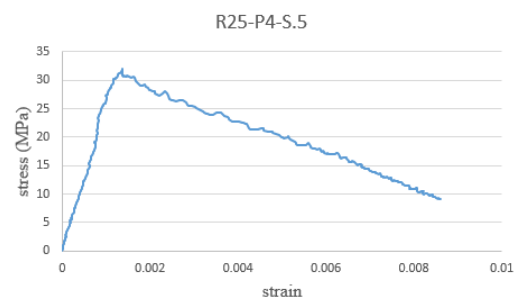


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۶ نمودار تنش-کرنش نمونه R25-P.4-S0

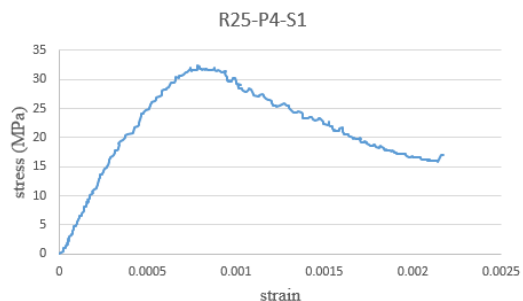


ب) نمونه دوم آزمایش

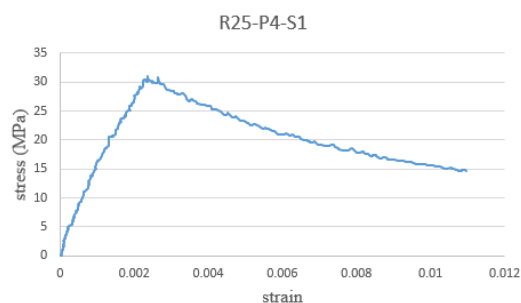


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۷ نمودار تنش-کرنش نمونه R25-P.4-S.5

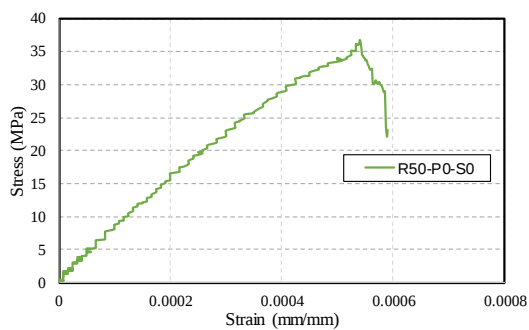


ب) نمونه دوم آزمایش

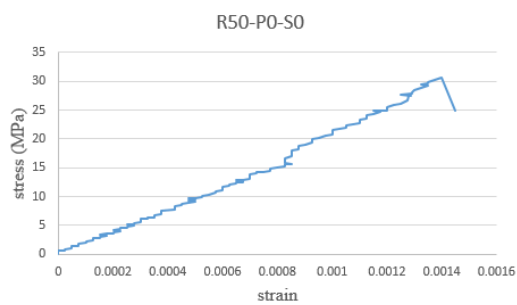


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۸ نمودار تنش-کرنش نمونه R25-P.4-S1

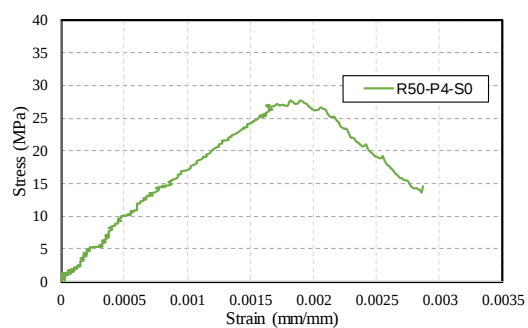


الف) نمونه اول آزمایش

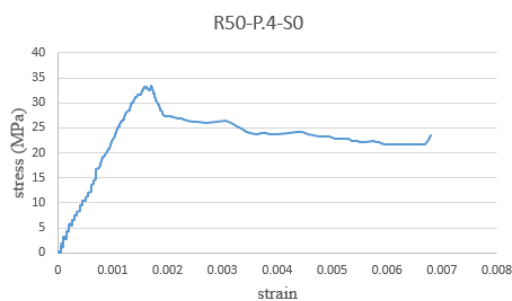


ب) نمونه دوم آزمایش

شکل پ-۹ نمودار تنش-کرنش نمونه R50-P.0-S0

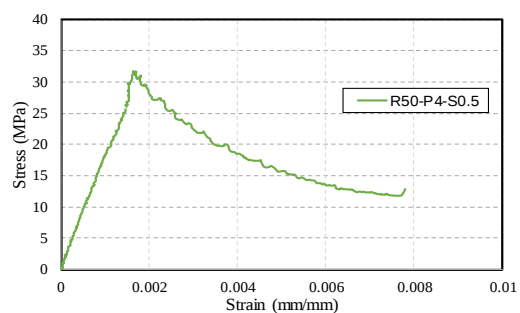


الف) نمونه اول آزمایش

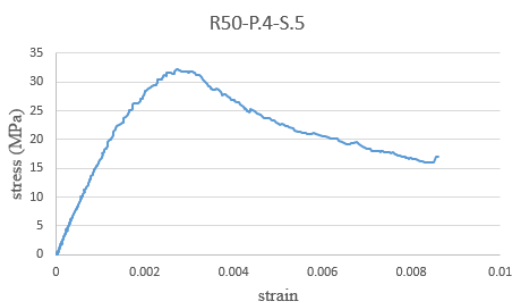


ب) نمونه دوم آزمایش

شکل پ-۱۰ نمودار تنش-کرنش نمونه R50-P.4-S0

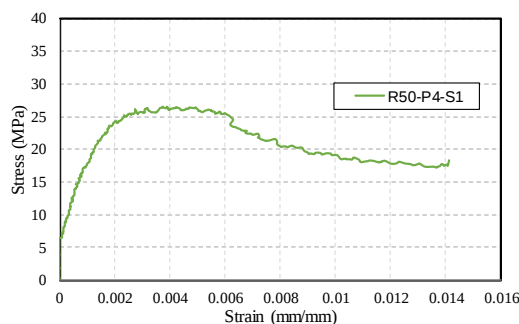


الف) نمونه اول آزمایش

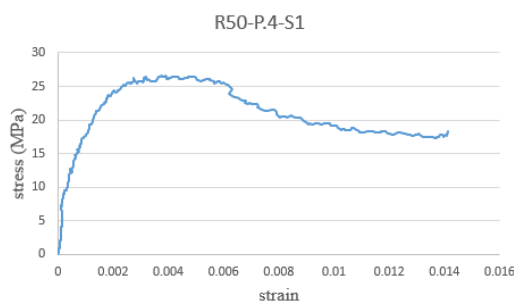


ب) نمونه دوم آزمایش

شکل پ-۱۱ نمودار تنش-کرنش نمونه R50-P.4-S.5



ب) نمونه دوم آزمایش

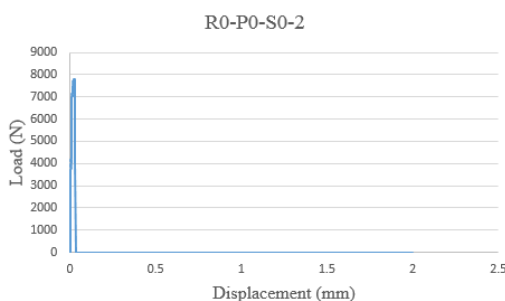


الف) نمونه اول آزمایش

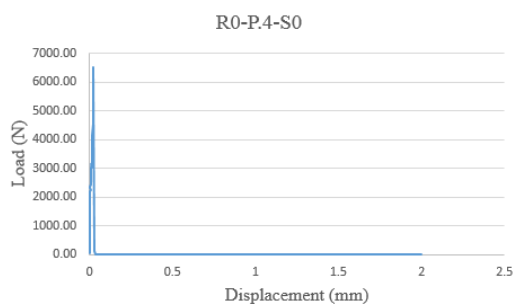
شکل پ-۱۲ نمودار تنش-کرنش نمونه R50-P.4-S1

پیوست - ب - نمودارهای نیرو-تغییر مکان

در این قسمت از پیوست نمودارهای نیرو-تغییر مکان آزمایش خمش چهار نقطه‌ای نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نمونه‌های قبل از بارگذاری، در هنگام تراز کردن فک دستگاه بر وجه بالایی نمونه، به علت نیروی ضربه‌ای فک دستگاه به نمونه، نمونه شکست شد. از این رو نمونه‌های که حاوی سنگدانه‌های بازیافتی هستند، عملکرد ضعیفی در برابر نیروی ضربه‌ای دارند. و نیاز به تحقیق‌های گسترده نمونه‌های بتنی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی در برابر نیروی ضربه‌ای می‌باشد.

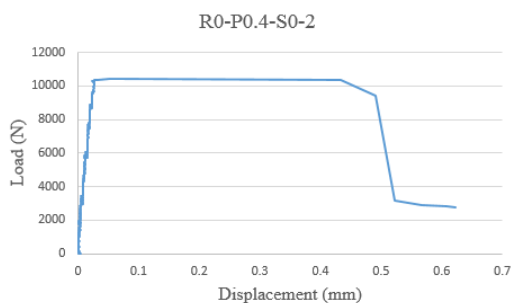


ب) نمونه دوم آزمایش

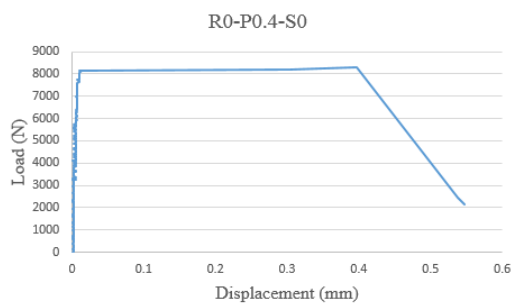


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۱۳ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه R0-P0-S0

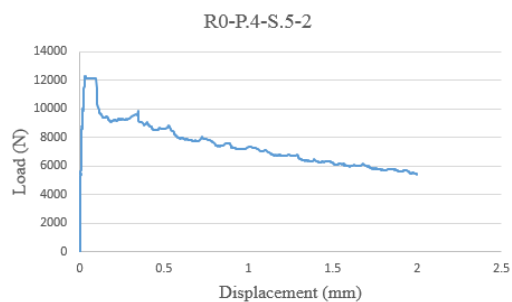


ب) نمونه دوم آزمایش

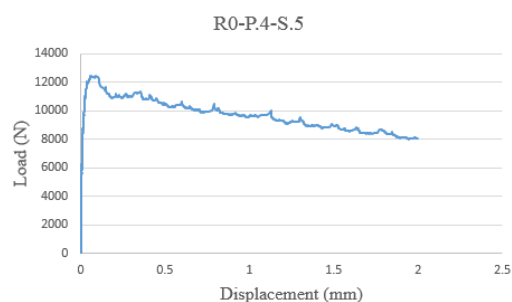


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۱۴ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه R0-P.4-S0

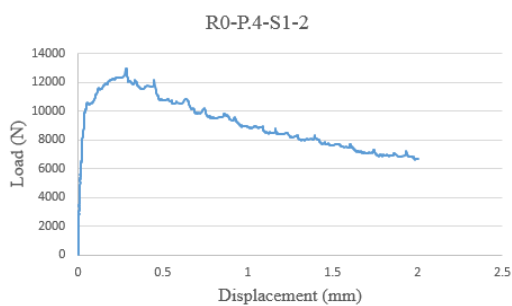


ب) نمونه دوم آزمایش

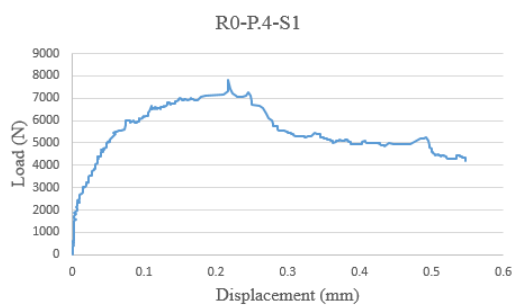


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۱۵ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه R0-P.4-S.5

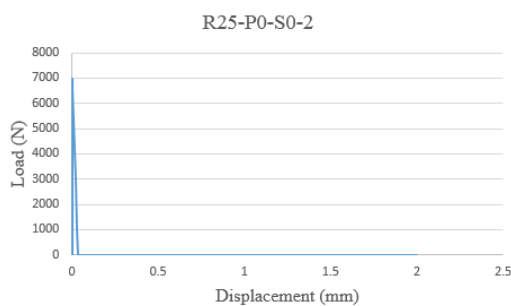


ب) نمونه دوم آزمایش

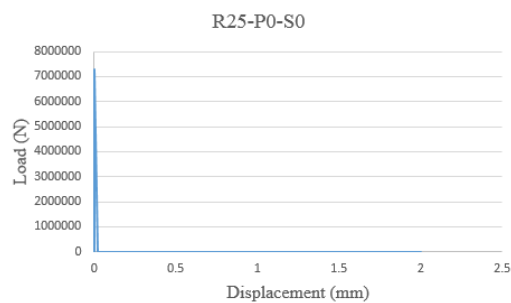


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۱۶ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه R0-P.4-S1

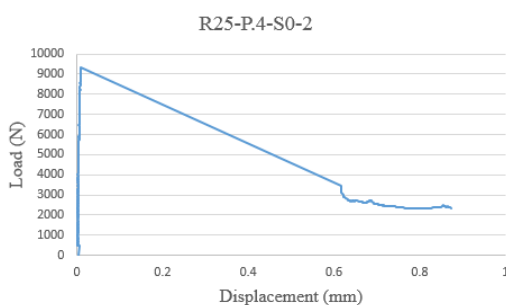


ب) نمونه دوم آزمایش



الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۱۷ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه R25-P.0-S0

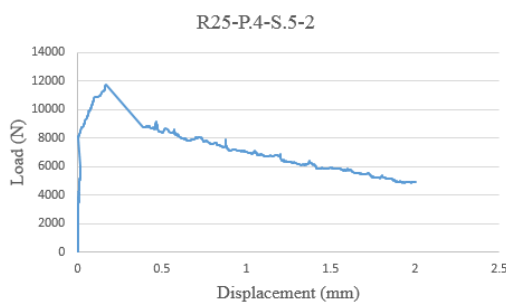


ب) نمونه دوم آزمایش

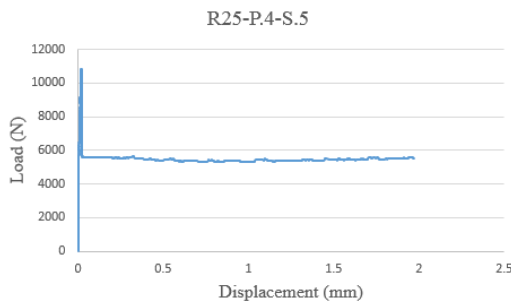
شکست به علت ضربه فک دستگاه به وج بالای نمونه در هنگام تراز کردن

الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۱۸ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه R25-P.4-S0

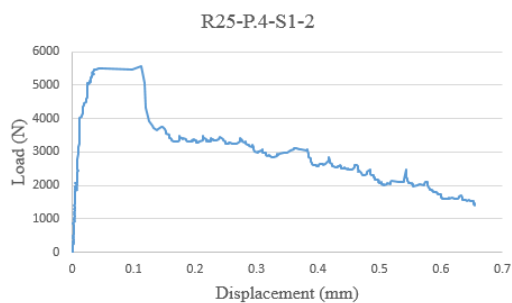


ب) نمونه دوم آزمایش

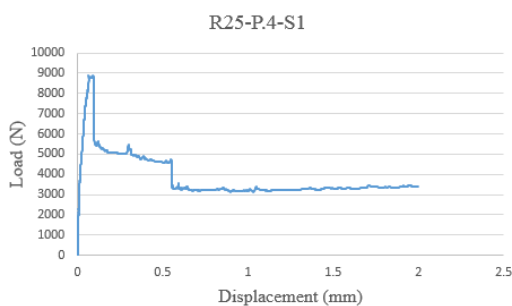


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۱۹ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه R25-P.4-S.5

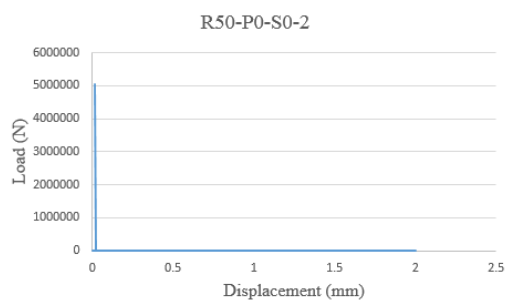


الف) نمونه اول آزمایش

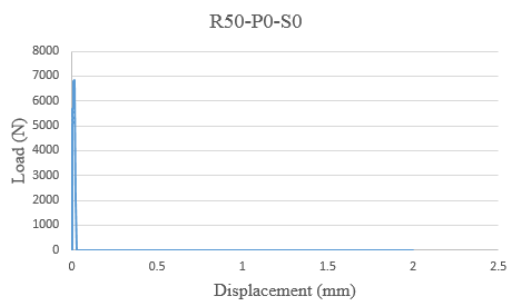


ب) نمونه دوم آزمایش

شکل پ-۲۰ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه R25-P.4-S1



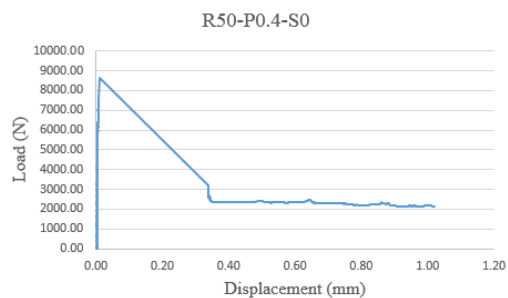
الف) نمونه اول آزمایش



ب) نمونه دوم آزمایش

شکل پ-۲۱ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه R50-P.0-S0

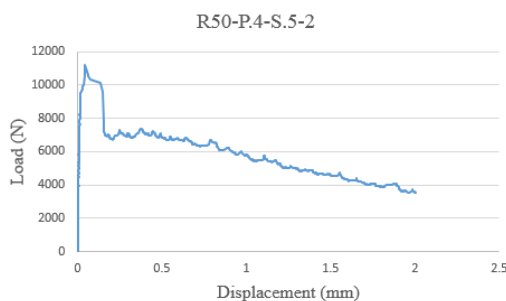
شکست به علت ضربه فک دستگاه به وج بالای نمونه در هنگام تراز کردن



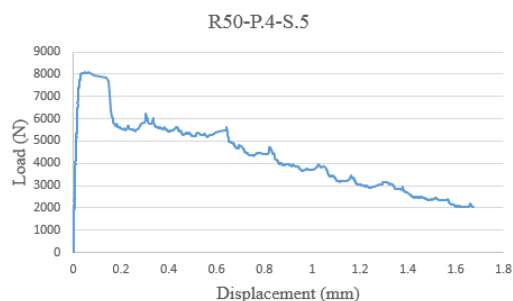
الف) نمونه اول آزمایش

ب) نمونه دوم آزمایش

شکل پ-۲۲ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه R50-P.4-S0

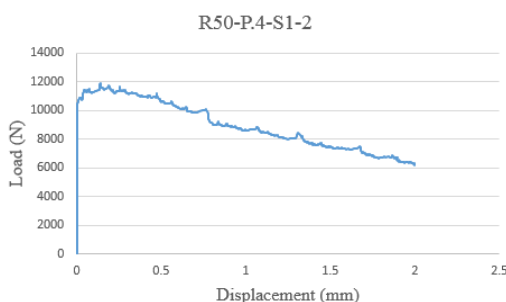


ب) نمونه دوم آزمایش

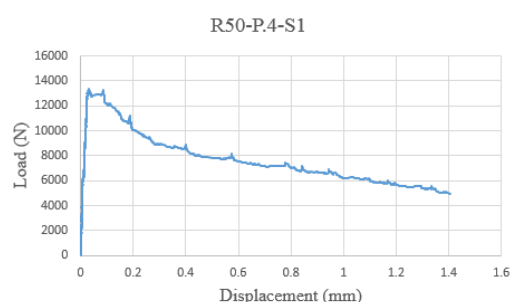


الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۲۳ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه R50-P.4-S.5



ب) نمونه دوم آزمایش



الف) نمونه اول آزمایش

شکل پ-۲۴ نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه R50-P.4-S1

پیوست - ج - الگوی ترک در نمونه‌های فشاری

در این بخش از پیوست، الگوی ترک بعضی از نمونه‌های فشاری نشان داده شده است. با توجه به اینکه کپینگ در این پژوهش از خمیر گچ استفاده شده است. احتمالاً در نوع ترک نمونه‌های فشاری تاثیر گذاشته است. که نیاز به بررسی بیشتر در تحقیق‌های آتی دارد.



شکل پ-۲۵ الگوی ترک نمونه بتنی فاقد الیاف در آزمایش فشاری



شکل پ-۲۶ الگوی ترک نمونه بتنی حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن در آزمایش فشاری



شکل پ-۲۷ الگوی ترک نمونه بتنی حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۰/۵٪ الیاف فولادی در آزمایش فشاری



شکل پ-۲۸ الگوی ترک نمونه بتنی حاوی ۰/۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۱٪ الیاف فولادی در آزمایش فشاری

پیوست د- الگوی ترک در آزمایش کششی

در این بخش از پیوست الگوی ترک بعد از آزمایش کشش برزیلی نمونه‌ها آمده است. همانطور که نشان داده شده نسبت جایگزینی در الگوی ترک تاثیری نداشته است.



ب) نمونه حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی



الف) نمونه فاقد سنگدانه‌های بازیافتی

شکل پ-۲۹ الگوی ترک نمونه بتنی فاقد الیاف در آزمایش کشش برزیلی



(ب) نمونه حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی



(الف) نمونه فاقد سنگدانه‌های بازیافتی

شکل پ-۳۰ الگوی ترک نمونه بتنی حاوی ۴٪ الیاف پلی پروپیلن در آزمایش کشش برزیلی



(ب) نمونه حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی



(الف) نمونه فاقد سنگدانه‌های بازیافتی

شکل پ-۳۱ الگوی ترک نمونه بتنی حاوی ۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۵٪ الیاف فولادی در آزمایش کشش برزیلی



(ب) نمونه حاوی ۲۵٪ سنگدانه‌های بازیافتی



(الف) نمونه فاقد سنگدانه‌های بازیافتی

شکل پ-۳۲ الگوی ترک نمونه بتنی حاوی ۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۱٪ الیاف فولادی در آزمایش کشش برزیلی

پیوست - ه - تصاویری از انجام این پروژه تحقیقاتی

طرح اختلاط نهایی در این بررسی آزمایشگاهی ۳ دفعه بهینه شد. که نمونه‌های ساخته شده برای بهینه طرح اختلاط تحت آزمایش ۷ روزه جک فشاری قرار گرفتند. نتایج مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های تعدیل برای بار اول ۲۳ مگاپاسکال، و برای بار دوم و سوم به ترتیب ۲۶ و ۳۱ مگاپاسکال به دست آمد. الگوی ترک نمونه‌های تعدیل طرح اختلاط در شکل (۲۴-۷) نشان داده شده است.



الف) الگوی ترک نمونه تعدیل اول



ب) الگوی ترک نمونه دوم



ج) الگوی ترک نمونه سوم

شکل پ-۳۳ الگوی ترک نمونه‌های تعدیل طرح اختلاط

در شکل (پ-۳۴) وضعیت دانه بندی و شرایط استفاده سنگدانه‌ها نشان داده شده است. در شکل (پ-۳۵) نمونه‌های ساخته شده جهت بررسی خواص مکانیکی بتن مسلح به الیاف هیبریدی و حاوی سنگدانه‌های بازیافتی نشان داده شده است.



دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی



شرایط سنگدانه‌های استفاده شده (کارگاهی)

شکل پ-۳۴ وضعیت سنگدانه‌ها



شکل پ-۳۵ نمونه‌های ساخته شده

Abstract

Concrete is known as the second most used material in the world after water due to its benefits and advantages. As the consumption of concrete increases, of the mines natural aggregates decrease. This highlights the need to replace recycled aggregates with natural aggregates. In this study, recycled aggregates have been replaced by natural aggregates in proportions of 25% and 50% by weight. Replacing recycled aggregates with natural aggregates cause to reduces the mechanical properties of concrete. To compensate for the reduction of mechanical properties of concrete due to the replacement of aggregates by the simultaneous addition of steel fibers of 0.5 % and 1% by volume fraction and 0.4 % by volume fraction of polypropylene fibers in the sample Concrete. Has been used. A total of 12 mixing designs were tested for compression strength, Brazilian tension strength and flexural strength by four-point bending. In this Experimental study, factors such as wear percentage of natural and recycled aggregates, moisture content and water absorption of recycled and natural aggregates, aggregate density, specific gravity of fresh concrete, compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, peak loads, fracture modulus, flexural stiffness and equivalent flexural strength were investigated. The results show that the replacement of 25% and 50% of recycled aggregates with natural aggregates cause to reduces 14% and 15% of compressive strength, 3% and 13% Brazilian tensile strength and 10% and 12% modulus of rupture are observed compared to concrete, respectively. Also, adding 0.4 % of polypropylene fibers to the control concrete increases 1.52% of the compressive strength, 1.46% of the tensile strength and 33% of the rupture modulus. In case of simultaneous addition of 0.4 % polypropylene fibers with 1% steel fibers to concrete without recycled aggregates, it increases the compressive strength by 3%, the Brazilian tensile strength by 26% and the modulus by 66%, respectively. Rupture is observed in relation to concrete. Which shows that steel fibers are more efficient in improving the tensile and flexural strength of concrete than polypropylene fibers. Also, reinforced concrete with hybrid fibers does not break after breaking, and the fibers play an important role in maintaining the cohesion of the concrete.

Keywords: Recycled aggregates concrete, Fiber reinforced concrete, Steel fibers, Polypropylene fibers, Four-point bending.



Faculty of civil engineering

M.S.c Thesis in structural engineering

**Experimental investigation of the effect simultaneously addition
of steel macro fibers and polypropylene micro fibers on the
mechanical propertis of concrete containing recycled aggregates**

By: Sadegh Ghasemi

Supervisor:

Dr. Jalil Shafaei

Dr. Meysam Jalali

October 2021