

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی و انرژی شکست بتن حاوی سنگدانه‌های

بازیافتی مسلح به الیاف فولادی و پلی پروپیلن

نگارنده:

سینا حسینی

اساتید راهنما:

دکتر جلیل شفائی

دکتر فرشید جندقی علایی

تیر ۱۴۰۰

تقدیم به پدر و مادرم...

والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم تا در سایه
درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه
کسب علم و دانش تلاش نمایم. چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده
اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

تقدیم به خواهرم...

به پاس تمامی دلگرمی‌ها و تشویق‌هایی که بدون وجود او طی کردن این مسیر پرتلاطم
ممکن نبود.

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 فرشید جندقی علائی که ایشان نیز در مسیر تکامل این پایان‌نامه، بنده را یاری نموده، سپاسگزاری کنم.

در انتها از دوست عزیزم، جناب آقای مهندس آرش کیان‌آرا، که بنده را در پیشبرد این پژوهش یاری نموده‌اند قدردانی میکنم و سپاس از وجود پرمهرشان که همواره دلگرمی بنده در مسیر تحقیق و پژوهش بود.

تعهدنامه

اینجانب سینا حسینی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران- سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه امکان سنجی تولید بتن الیافی جهت استفاده در قطعات پیش‌ساخته با استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی تحت راهنمایی دکتر جلیل شفائی و دکتر فرشید جندقی علانی متعهد می‌شوم

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
 - در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
 - مطالب مندرج در پایان‌نامه 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 می‌باشد 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
 - در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، 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: ۱۴۰۰/۴/۱۲

امضای دانشجو:

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه‌ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود میباشد . 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:

امروزه استفاده از بتن‌های باز یافتی به دلایل اقتصادی و زیست محیطی افزایش چشمگیری داشته است و افزایش درصدهای جایگزینی سنگدانه باز یافتی، مشخصات بتن را تغییر می‌دهد. در این پژوهش، به بررسی آزمایشگاهی رفتار مکانیکی بتن حاوی سنگدانه‌های باز یافتی با درصدهای مختلف الیاف فولادی و پلی پروپیلن پرداخته شده است. در مجموع ۳۶ نمونه فشاری استوانه‌ای، ۳۶ نمونه کششی استوانه‌ای با ابعاد 20×10 سانتی متر و ۳۶ نمونه خمشی با ابعاد $10 \times 10 \times 35$ سانتی متر مورد آزمایش قرار گرفت. سنگدانه‌های باز یافتی (درشت دانه) با نسبت ۰، ۲۵ و ۵۰٪ (نسبت وزنی)، جایگزین مصالح طبیعی (درشت دانه) شد. همچنین الیاف‌های فولادی و پلی پروپیلن به ترتیب با نسبت‌های ۰، ۰، ۵٪، ۱٪ و ۰، ۴٪ به نمونه‌های بتنی باز یافتی اضافه گردید. نمونه‌های بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های باز یافتی تحت نیروی فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش سه نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته و عواملی همچون، مقاومت فشاری، مقاومت شکافت کششی، مدول الاستیسیته، مقاومت خمشی و انرژی شکست مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه باز یافتی مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. الیاف پلی پروپیلن در افزایش مقاومت فشاری تاثیر مثبتی دارد و ترکیب الیاف پلی پروپیلن با ۰، ۵ و ۱ درصد الیاف فولادی موجب افزایش ۶۸ و ۱۶۹ برابری جذب انرژی می‌شود. همچنین بیشینه مقاومت کششی با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه باز یافتی کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش مقاومت خمشی نشان می‌دهد که الیاف پلی پروپیلن در افزایش بار نهایی و جلوگیری از فروپاشی بتن، تاثیر مثبتی دارد و ترکیب این الیاف با الیاف فولادی موجب افزایش انرژی شکست در نتیجه افزایش شکل پذیری می‌شود.

کلمات کلیدی: بتن باز یافتی، بتن الیافی، الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن، انرژی شکست.

فهرست مطالب

۱- فصل اول - کلیات تحقیق.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- تعریف مسئله.....	۳
۳-۱- اهداف تحقیق.....	۳
۱-۳-۱- اهداف کلی.....	۳
۱-۳-۲- اهداف جزئی.....	۴
۴-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۴
۵-۱- روش تحقیق.....	۵
۶-۱- معرفی ساختار پایاننامه.....	۶
۲- فصل دوم - مروری بر ادبیات فنی.....	۷
۱-۲- مقدمه.....	۸
۲-۲- مروری بر تحقیقات پیشین.....	۹
۳-۲- ضرورت استفاده از مواد بازیافتی.....	۱۱
۴-۲- بتن بازیافتی.....	۱۳
۱-۴-۲- سنگدانه بازیافتی.....	۱۳
۲-۴-۲- سنگشکن ها.....	۱۶
۳-۴-۲- ریز ساختار سنگدانه بازیافتی.....	۱۸
۴-۴-۲- نقص در ریز ساختار بتن بازیافتی.....	۱۸
۵-۴-۲- خصوصیات سنگدانه بازیافتی.....	۱۹
۶-۴-۲- چگالی سنگدانه های بازیافتی.....	۲۰
۷-۴-۲- جذب آب سنگدانه های بازیافتی.....	۲۱
۸-۴-۲- خلل و فرج سنگدانه های بازیافتی.....	۲۱
۹-۴-۲- سطح رطوبت سنگدانه های بازیافتی.....	۲۱
۱۰-۴-۲- خصوصیات مکانیکی بتن بازیافتی.....	۲۳
۵-۲- بتن الیافی.....	۲۵
۱-۵-۲- تاثیر افزودن الیاف در بتن بازیافتی.....	۲۵
۲-۵-۲- انواع الیاف بر اساس اندازه.....	۲۶
۳-۵-۲- ویژگی های میکرو و ماکرو الیاف.....	۲۶
۴-۵-۲- الیاف طبیعی.....	۲۷

۲۸.....	۲-۵-۵- الیاف شیشه.....
۲۹.....	۲-۵-۶- الیاف آرامید (کولار).....
۲۹.....	۲-۵-۷- الیاف کربن.....
۳۰.....	۲-۵-۸- الیاف پلیپروپیلن.....
۳۱.....	۲-۵-۹- الیاف فولادی.....
۳۳.....	۲-۶- بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی.....
۳۳.....	۲-۶-۱- تاثیر ترکیب سنگدانه بازیافتی با الیاف.....
۳۵.....	۳- فصل سوم- برنامه آزمایشگاهی.....
۳۶.....	۳-۱- مقدمه.....
۳۶.....	۳-۲- مواد مصرفی.....
۳۶.....	۳-۲-۱- آب.....
۳۶.....	۳-۲-۲- سیمان.....
۳۷.....	۳-۲-۳- سنگدانه‌ها.....
۴۷.....	۳-۲-۴- الیاف.....
۴۸.....	۳-۲-۵- شرایط ساخت بتن و عمل آوری نمونه‌ها.....
۵۰.....	۳-۲-۶- طرح اختلاط.....
۵۲.....	۳-۲-۷- آزمایش‌های بتن.....
۶۹.....	۴- فصل چهارم.....
۷۰.....	۴-۱- مقدمه.....
۷۰.....	۴-۲- نتایج آزمایش‌های سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی.....
۷۱.....	۴-۳- نتایج آزمایش درصد رطوبت و جذب آب سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی.....
۷۲.....	۴-۴- نتایج آزمایش درصد سایش.....
۷۳.....	۴-۵- وزن مخصوص بتن تازه.....
۷۳.....	۴-۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی.....
۷۷.....	۴-۶-۱- نتایج مدول الاستیسیته نمونه‌های بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی.....
۷۸.....	۴-۷- نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی.....
۸۰.....	۴-۸- نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی.....
۸۸.....	۴-۹- مقاومت کششی ناشی از خمش سه نقطه‌ای.....
۹۰.....	۴-۱۰- بررسی میزان انرژی شکست در تیرهای خمشی.....
۹۵.....	۵- فصل پنجم.....
۹۴.....	۵-۱- مقدمه.....

۹۴.....۵-۲- جمع بندی و نتیجه گیری

۹۷.....مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲- نمودار توسعه پایدار..... ۱۲
- شکل ۲-۲- سنگ شکن مخروطی..... ۱۷
- شکل ۳-۲- سنگ شکن فکی..... ۱۷
- شکل ۴-۲- سنگ شکن ضربه ای..... ۱۷
- شکل ۵-۲- جزئیات ناحیه انتقال سطحی بتن حاوی سنگدانه طبیعی و بازیافتی..... ۱۸
- شکل ۶-۲- الف- سطح سنگدانه طبیعی، ب- سطح سنگدانه بازیافتی..... ۱۹
- شکل ۷-۲- الف- ناحیه انتقال سطحی قدیمی، ب- ناحیه انتقال سطحی جدید..... ۱۹
- شکل ۸-۲- جزئیات سنگدانه کاملاً خشک..... ۲۲
- شکل ۹-۲- جزئیات سنگدانه اشباع با سطح خشک..... ۲۲
- شکل ۱۰-۲- جزئیات سنگدانه کاملاً اشباع..... ۲۳
- شکل ۱۱-۱- پدیده پل زدگی توسط الیاف جهت جلوگیری از باز شدن عرض ترک..... ۲۶
- شکل ۱۲-۲- نمونه ای از الیاف شیشه..... ۲۸
- شکل ۱۳-۲- نمونه ای از الیاف آرامید..... ۲۹
- شکل ۱۴-۲- نمونه ای از الیاف کربن..... ۳۰
- شکل ۱۵-۲- نمونه ای از الیاف پلی پروپیلن..... ۳۱
- شکل ۱۶-۲- نمونه ای از الیاف فولادی..... ۳۲
- شکل ۱۷-۲- جزئیات منحنی تنش- کرنش نمونه‌های فشاری بتن معمولی و الیافی..... ۳۳
- شکل ۱۸-۲- جزئیات منحنی نیرو- تغییرمکان..... ۳۴
- شکل ۱-۳- سیمان تیپ دو شاهرود..... ۳۷
- شکل ۲-۳- الف- دانه بندی درشت دانه (شن)، ب- جزئیات دانه‌بندی ریزدانه (ماسه)..... ۳۸
- شکل ۳-۳- جزئیات فرآیند خرد و سرنند کردن سنگدانه‌های بازیافتی..... ۳۸
- شکل ۴-۳- سنگ شکن فکی..... ۳۹
- شکل ۵-۳- الف- الک استاندارد جهت دانه‌بندی سنگدانه‌ها، ب- لرزاننده مکانیکی (دورانی)..... ۴۰
- شکل ۶-۳- کوره جهت خشک کردن مصالح..... ۴۲
- شکل ۷-۳- ظرف نمونه، جهت قرارگیری در کوره..... ۴۲
- شکل ۸-۳- چگالی سنج جهت محاسبه چگالی ریزدانه..... ۴۵
- شکل ۹-۳- الف- گلوله فلزی جهت آزمایش لس انجلس، ب- دستگاه دوران جهت آزمایش لس انجلس..... ۴۷
- شکل ۱۰-۳- الف- الیاف فولادی، ب- الیاف پلی پروپیلن..... ۴۸
- شکل ۱۱-۳- الف- جزئیات فرآیند ساخت و اختلاط بتن، ب- حوضچه عمل‌آوری آب..... ۴۹

- شکل ۳-۱۲- جزییات آزمایش اسلامپ بتن شاهد..... ۵۴
- شکل ۳-۱۳- جزییات دستگاه جک فشاری..... ۵۵
- شکل ۳-۱۴- جزییات ابعاد نمونه استوانه فشاری..... ۵۵
- شکل ۳-۱۵- برپایش تغییرمکان سنجها جهت محاسبه مدول الاستیسیته..... ۵۶
- شکل ۳-۱۶- جزییات دستگاه ثبت تغییرمکان..... ۵۷
- شکل ۳-۱۷- تغییرمکانسنج با دقت ۰.۰۰۵ میلیمتر جهت محاسبه مدول الاستیسیته..... ۵۸
- شکل ۳-۱۸- جزییات آزمایش مقاومت شکافت کششی..... ۶۰
- شکل ۳-۱۹- الف- جزییات دستگاه خمش سه نقطه ای، ب- جزییات نمونه خمشی و تغییرمکان سنج ها... ۶۱
- شکل ۳-۲۰- جزییات تغییرمکانسنج و دستگاه ثبت تغییرمکان..... ۶۱
- شکل ۳-۲۱- جزییات شکل شماتیک تیرهای شیاردار..... ۶۲
- شکل ۳-۲۲- منحنی نیرو-تغییرمکان (روش پترسون) [۸۸]..... ۶۴
- شکل ۳-۲۳- منحنی نیرو- تغییرمکان (روش هیلبرگ) [۸۹]..... ۶۵
- شکل ۳-۲۴- منحنی نیرو-تغییرمکان (روش پلانز) [۹۱]..... ۶۶
- شکل ۳-۲۵- الف- جزییات ابعاد تیغه شیاری، ب- جزییات ابعاد قالب جهت ساخت نمونه خمشی ۶۷
- شکل ۴-۱- دانه بندی مصالح طبیعی..... ۷۰
- شکل ۴-۲- منحنی دانه بندی سنگدانه طبیعی و بازیافتی..... ۷۱
- شکل ۴-۳- وزن مخصوص تازه بتن الیافی حاوی سنگدانه های بازیافتی..... ۷۳
- شکل ۴-۴- جزییات مقاومت فشاری نمونه های بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی..... ۷۴
- شکل ۴-۵- الگوی ترک خوردگی بتن الیافی حاوی سنگدانه های بازیافتی..... ۷۵
- شکل ۴-۶- منحنی تنش- کرنش بتن بدون سنگدانه بازیافتی..... ۷۵
- شکل ۴-۷- منحنی تنش- کرنش بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی..... ۷۶
- شکل ۴-۸- منحنی تنش- کرنش بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی..... ۷۶
- شکل ۴-۹- جزییات مدول الاستیسیته نمونه های بتن الیافی حاوی سنگدانه های بازیافتی..... ۷۸
- شکل ۴-۱۰- برپایش تغییرمکان سنجها جهت محاسبه مدول الاستیسیته..... ۷۸
- شکل ۴-۱۱- جزییات مقاومت شکافت کششی نمونه های بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی..... ۷۹
- شکل ۴-۱۲- جزییات ترک خوردگی نمونه های کشش غیرمستقیم..... ۸۰
- شکل ۴-۱۳- منحنی نیرو- تغییرمکان مطابق با ASTM C1609..... ۸۱
- شکل ۴-۱۴- جزییات منحنی بار- تغییرمکان نمونه های خمشی مطابق با استاندارد ASTM C1609..... ۸۲
- شکل ۴-۱۵- منحنی نیرو-تغییرمکان بتن بدون سنگدانه بازیافتی..... ۸۳
- شکل ۴-۱۶- منحنی نیرو-تغییرمکان بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی..... ۸۴
- شکل ۴-۱۷- منحنی نیرو-تغییرمکان بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی..... ۸۵

- شکل ۴-۱۸- الگوی شکست نمونه‌های خمشی بدون سنگدانه بازیافتی..... ۸۶
- شکل ۴-۱۹- الگوی شکست نمونه‌های خمشی حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی..... ۸۷
- شکل ۴-۲۰- الگوی شکست نمونه‌های خمشی حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی..... ۸۸
- شکل ۴-۲۱- نمودار مقاومت کششی ناشی از خمش سه نقطه ای..... ۹۰
- شکل ۴-۲۲- پدیده گلوله‌ای شدن در نمونه بتن بازیافتی حاوی الیاف..... ۹۲
- شکل ۴-۲۳- جزییات الگوی ترک‌خوردگی بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی..... ۹۲

فهرست جدول

- جدول ۱-۲- مشخصات سنگدانه بازیافتی طبقه بندی شده در برخی کشورها..... ۱۵
- جدول ۲-۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی انواع الیاف..... ۲۷
- جدول ۱-۳- مشخصات شیمیایی سیمان مصرفی..... ۳۶
- جدول ۲-۳- آزمایش های مرتبط با مشخصات کلی سنگدانه..... ۳۷
- جدول ۳-۳- حداقل مقدار نمونه مطابق با ASTM C136..... ۳۹
- جدول ۴-۳- حداقل مقدار نمونه جهت تعیین درصد رطوبت مطابق با ASTM C566..... ۴۱
- جدول ۵-۰- مشخصات مکانیکی الیاف پلی پروپیلن..... ۴۸
- جدول ۳-۶- طرح اختلاط بتن الیافی حاوی سنگدانه های بازیافتی..... ۵۱
- جدول ۴-۱- جزئیات دانه بندی سنگدانه مصرفی..... ۷۱
- جدول ۴-۲- مقادیر درصد جذب آب سنگدانه های طبیعی و بازیافتی..... ۷۲
- جدول ۴-۳- مقادیر درصد رطوبت سنگدانه های طبیعی و بازیافتی..... ۷۲
- جدول ۴-۴- مقادیر درصد سایش سنگدانه های طبیعی و بازیافتی..... ۷۲
- جدول ۴-۵- جزئیات مقاومت فشاری بتن الیافی حاوی سنگدانه های بازیافتی..... ۷۴
- جدول ۴-۶- مقاومت کششی بتن الیافی حاوی سنگدانه های بازیافتی..... ۷۹
- جدول ۴-۷- مقاومت خمشی بتن الیافی حاوی سنگدانه های بازیافتی..... ۸۲
- جدول ۴-۸- مقاومت کششی ناشی از خمش..... ۸۹
- جدول ۴-۹- جزئیات انرژی شکست بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی..... ۹۱

فصل اول

کلیات تحقیق

۱- فصل اول - کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

امروزه بتن بعنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، در جهان شناخته شده است. علت این امر ویژگی‌هایی همچون مقاومت فشاری بالا، دوام مناسب و فرم‌پذیری بالای بتن است. اما در مقابل دارای معایبی همچون مقاومت کششی پایین و وزن مخصوص بالا است [۱]. در بیشتر کشورهای درحال توسعه، بهبود زیرساخت‌ها و بازسازی ساختمان‌های قدیمی، موجب تولید مقدار زیادی زباله ساختمانی شده است [۲].

در کشورهای اروپایی سالانه بیش از ۵۱۰ میلیون تن ضایعات ساختمانی تولید می‌شود، این مقدار در کشورهای همچون آمریکا، ژاپن، هند به ترتیب برابر است با ۳۲۵، ۷۷ و ۵۳۰ میلیون تن می‌باشد [۳، ۴]. به همین دلیل نیاز به فرآیند بازیافت بیشتر در سراسر جهان، به دلیل رشد جمعیت، نیاز مستمر به ساخت خانه‌های جدید و درنهایت تقاضا برای مواد اولیه افزایش یافته است. افزایش آگاهی از اهمیت مدیریت پسماند، به ویژه در صنعت ساختمان‌سازی بسیار مورد توجه جهان قرار گرفته است [۵].

علاوه بر آن بلایایی از جمله جنگ، سیل و زلزله، مانند آنچه در کرمانشاه رخ داد، مقدار زیادی ساختمان‌های ویران‌شده و زباله‌های ساختمانی برجای می‌گذارد که انتقال این مقدار از زباله‌های ساختمانی به محل دفن زباله، علاوه بر هزینه نگهداری بالا و تجزیه‌پذیری پایین، موجب تولید مقدار زیادی دی اکسید کربن می‌شود [۶]. لذا حفاظت از محیط زیست و منابع اولیه به دلیل کمبود محل دپو و بالا بودن هزینه نگهداری ضایعات ساختمانی از فاکتورهای مهم، جهت افزایش توجه کشورهای جهان در استفاده از ضایعات بتنی به عنوان مصالح مورد استفاده در تولید بتن است [۷].

طبق تحقیقات انجام شده، ضایعات جامد شهری در کشورهای توسعه‌یافته ۳۵ درصد و در کشورهای درحال توسعه ۵۰ درصد از کل ضایعات را شامل می‌شود [۸، ۹]. از این رو موضوع بازیافت ضایعات بتن از دیدگاه زیست‌محیطی امری مهم و ضروری محسوب می‌شود. با توجه به مشکلات مذکور و ضرورت

استفاده از بتن بازیافتی، مطالعه بر تغییرات خواص این ماده مصرفی با استفاده از انواع الیاف و افزودنی- های معدنی، ضروری خواهد بود. یک راه ممکن برای حل مشکل نگهداری زباله‌های ساختمانی جایگزینی کامل یا جزئی سنگدانه بازیافتی^۱ با سنگدانه طبیعی^۲ برای بتن است. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که بسیاری از خواص مکانیکی و فیزیکی مانند مقاومت، دوام و وزن مخصوص با افزایش محتوای سنگدانه بازیافتی کاهش می‌یابد [۱۰، ۱۱].

۱-۲- تعریف مسئله

به‌طور کلی یکی از مشکلات اساسی در جهان، سرعت رشد تولید ضایعات، به‌خصوص نخاله‌های ساختمانی است. اگرچه افزایش ساخت و ساز یکی از دلایل اصلی جهت توسعه کشور و گسترش امکانات است، اما باعث کاهش معادن طبیعی سنگدانه‌ها و ایجاد اثرات نامطلوب بر منابع طبیعی و محیط‌زیست می‌شود. همچنین کمبود مکان‌هایی جهت دپوی ضایعات بتن، تولید ریزگردهای شیمیایی و... از جمله پیامدهای منفی تولید این ماده پرمصرف است. لذا موضوع بازیافت ضایعات بتن از دیدگاه زیست‌محیطی امری مهم و ضروری محسوب می‌شود. در ایران نیز با توجه به رشد فزاینده ساخت و ساز، می‌توان به تولید ۱۲ میلیون تن نخاله ساختمانی تنها در شهر تهران اشاره کرد، لذا با توجه به مشکلات مذکور و ضرورت استفاده از بتن بازیافتی، مطالعه بر تغییرات خواص این ماده مصرفی با استفاده از انواع الیاف و جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی نیز ضروری خواهد بود.

۱-۳- اهداف تحقیق

۱-۳-۱- اهداف کلی

باگذشت زمان، بتن نیز مانند سایر مصالح ساختمانی در اثر عواملی همچون تغییرات اقلیمی، سیل، زلزله و جنگ تخریب شده و به ضایعات تبدیل گردد. با توجه به هزینه بالای نگهداری ضایعات ساختمانی، تجزیه‌پذیری پایین و تولید دی‌اکسید کربن، بازیافت این نوع ضایعات از ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی

¹ Recycled Aggregates

² Natural Aggregates

جلوگیری می‌کند. همچنین با استفاده از الیاف‌های مختلف و افزودنی‌های معدنی در بتن‌های بازیافتی، موجب بهبود خواص مکانیکی این نوع بتن شده و می‌توان در ساخت بتن جدید از آن استفاده کرد. در این پژوهش تولید بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی مورد بررسی قرار گرفته، سپس تأثیر افزودن الیاف فولادی بر مقاومت مکانیکی بتن از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کششی، خمش سه نقطه‌ای، مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از آن ارائه می‌شود. در این پژوهش سعی بر آن است گامی هر چند کوچک در راستای حفظ منابع مالی و محیط‌زیست برداشته شود.

۱-۳-۲- اهداف جزئی

این پایان‌نامه شامل سه بخش است که به ترتیب رفتار بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی تحت نیروی فشاری، کشش غیرمستقیم و خمش سه نقطه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. در هر بخش مولفه‌های مورد بررسی به شرح زیر ارائه می‌شود:

- بخش اول: مقاومت فشاری، مدول الاستیسته
- بخش دوم: مقاومت شکافت کششی
- بخش سوم: مقاومت خمشی، بیشینه بارنهایی، انرژی شکست

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

در این پژوهش، با جایگزینی سنگدانه بازیافتی با سنگدانه طبیعی، هزینه‌های ساخت بتن کاهش می‌یابد. باتوجه به تأثیر منفی افزایش جایگزینی سنگدانه بازیافتی بر مقاومت و سختی بتن بازیافتی، لذا با افزودن الیاف به بهبود رفتار مکانیکی بتن بازیافتی کمک زیادی خواهیم کرد. از ضرورت انجام این پژوهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی باعث حفظ ذخایر و منابع زیست-محیطی می‌شود.

- جایگزین کردن ماکرو الیاف با آرماتور فولادی در بتن باعث کاهش مصرفی ساختمان می‌شود، همچنین به کاهش وزن اجزا سازه‌ای کمک می‌کند.
- دپوی بتن ضایعاتی و تخریبی نیازمند هزینه و زمان زیادی می‌باشد که با ورود بتن ضایعاتی به چرخه بازیافت از ایجاد چشم اندازهای ناخوشایند و آلودگی‌های زیست‌محیطی جلوگیری می‌کند.
- استفاده از الیاف های ماکرو و میکرو باعث افزایش شکل پذیری و جذب انرژی و همچنین کاهش ترک در بتن می‌شود.
- جایگزینی ماسه بازیافتی تا میزان ۳۰ درصد تاثیرچندانی بر مقاومت بتن ندارد و می‌تواند به عنوان طرح اختلاط بهینه بتن بازیافتی مدنظر قرار گیرد.

۱-۵- روش تحقیق

در این مرحله جهت بررسی تأثیر ابعاد و درصد جایگزین کردن سنگدانه‌های بازیافتی بر مقاومت مکانیکی بتن، چندین طرح اختلاط بتن بازیافتی- الیافی با درصدهای ۰، ۲۵، ۵۰ درصد برای مقایسه‌ی تأثیر جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و افزودن الیاف‌های متنوع به روش وزنی آیین‌نامه بتن ایران ساخته می‌شود. سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی در هنگام اختلاط در سطح رطوبت کارگاهی بوده و در وضعیت اشباع با سطح خشک قرار ندارند، لذا در گام اول نسبت به بررسی درصد رطوبت سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی پرداخته می‌شود. از طرفی جذب آب سنگدانه بازیافتی به مراتب بالاتر از سنگدانه طبیعی است. از این رو جهت محاسبه میزان آب آزاد در طرح اختلاط، پس از محاسبه درصد جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی، درصد رطوبت سنگدانه‌ها را از درصد جذب آب کسر می‌کنیم. در نتیجه در ابتدای اختلاط، طرح‌های حاوی مصالح بازیافتی که میزان آب اولیه بالاتری دارند، از کارایی بالاتری برخوردار هستند. با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی وزن مخصوص بتن کاهش می‌یابد، علت این موضوع می‌تواند مربوط به چگالی پایین‌تر سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی باشد. همچنین جایگزینی بتن بازیافتی باعث کاهش بیشتر در وزن مخصوص بتن می‌گردد. در مرحله بعد تأثیر افزودن الیاف بر بتن بازیافتی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای این منظور طرح اختلاط

بهینه بتن بازیافتی به الیاف پلی پروپیلن و فولادی مسلح می‌شود. طرح اختلاط‌های مسلح شده شامل چند طرح اختلاط بتن است که در هر طرح اختلاط، یکی از انواع الیاف پلی پروپیلن یا فولادی استفاده می‌شود. بیشینه میزان الیاف پلی پروپیلن و فولادی در بتن برای هر نوع از الیاف بترتیب مقادیر ۰.۴٪- ۱٪ حجمی بتن است. در این پژوهش باتوجه به مقاومت هدف ۳۵ مگاپاسکال، نسبت آب به سیمان ۰.۴۳ و درصد نسبتا پایین الیاف فولادی و پلی پروپیلن، کارایی بتن چندان کاهش نیافته و از روان-کننده‌ها استفاده نشده است. نتایج نشان می‌دهد که افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن می‌شود. اما تأثیر افزودن الیاف فولادی نسبت به الیاف پلی پروپیلن به مراتب بالاتر است. علت این امر بالاتر بودن مقاومت کششی الیاف فولادی نسبت به الیاف پلی پروپیلن است. در بتن‌های بدون الیاف، پس از آزمایش، نمونه به طور کامل از هم جدا و گسیخته شده است. اما در بتن‌های الیافی پس از آزمایش بر روی نمونه‌های بتنی، تنها ترک‌های ریزی قابل مشاهده است و بتن انسجام خود را حفظ کرده و از هم گسیخته نمی‌شود. این مطلب بیانگر آن است که بتن الیافی در هنگام شکست، خرد و گسیخته نمی‌شود و الیاف نقش مهمی در کنترل ترک‌خوردگی بتن ایفا می‌کند. در واقع الیاف با پل زدن بر روی ترک‌ها از توسعه و گسترش آنها جلوگیری به عمل می‌آورد. از این رو افزودن الیاف موجب بهبود رفتار ترد بتن نیز می‌گردد.

۱-۶- معرفی ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه پیش رو مشتمل بر پنج فصل می‌باشد. فصل اول آن مقدمه، شامل معرفی اجمالی بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی است. فصل دوم مروری بر تحقیقات گذشته و مبانی تحقیق است و در فصل سوم شرح آزمایش‌ها و تجهیزات وسایل استفاده‌شده در آنها بیان می‌گردد. در فصل چهارم نتایج حاصل از آزمایش‌ها و تحلیل آنها ذکر شده است. در نهایت فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای پژوهش‌های آتی ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات گذشته

فصل ۲- مروری بر ادبیات فنی

۲-۱- مقدمه

امروزه بتن بعنوان یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی در جهان شناخته شده است و استفاده از آن در دنیا، توسعه بسیاری یافته است. یکی از علل توسعه زیاد بتن فراوانی مواد تشکیل دهنده آن بوده که تقریباً در سراسر مناطق دنیا به وفور یافت می‌شود. همچنین فرآیند تولید آسان، از دلایل توسعه زیاد بتن است. اما از سوی دیگر، این ماده دارای عیوب فراوانی است از جمله شکنندگی زیاد و مقاومت کششی پایین و مقاومت پایین در برابر انقباض و انبساط و همچنین انتشار ترک، از عیوب عمده‌ی بتن می‌باشد [۱۲].

استفاده از الیاف برای مقاوم‌سازی مصالحی که درکشان ضعیف هستند، تاریخچه‌ی باستانی دارد. یکی از قدیمی‌ترین اسناد مکتوب در این زمینه، اشاره به استفاده از آجررسی مسلح شده با کاهگل در تورات است. در ۳۵۰۰ سال قبل، در نزدیکی بغداد از آجر تقویت شده با نی در ساخت بنای آکارکوف و از ترکیب خشت خام با کاه گل در ساخت بناهای مختلفی استفاده شده است که بقایای آن هنوز موجود است [۱۳].

بطورکلی هر سازه پس از پایان عمر مفید خود چه به صورت زودرس و چه طبق مشخصات تولیدی دو راه پیش‌رو دارد، یا به عنوان پسماند وارد طبیعت شود، یا در قالب بازیافت تمام یا بخشی از آن مجدداً وارد چرخه مصرف گردد. حجم قابل توجه ضایعات باقی مانده از زلزله بم و (کرمانشاه) مصداق خوبی برای درک میزان پسماندهای ساختمانی و هزینه‌های دفع نخاله‌ها است. عدم بازیافت مناسب ضایعات ساختمانی، اثرات مخرب زیادی بر محیط زیست و ایجاد پسماندهای مضاعف دارد [۱۴].

تحقیقات در زمینه استفاده مجدد از ضایعات بتن به پایان جنگ جهانی دوم باز می‌گردد [۱۵]. بعد از جنگ جهانی دوم و برای نخستین بار، بازیافت ضایعات بتنی در کشور آلمان توسط آقای خلف

و همکارانش انجام شد. از آن به بعد، در کشورهای توسعه‌یافته، پژوهش‌های زیادی در زمینه امکان استفاده مجدد از بتن‌های بازیافت‌شده صورت گرفته است [۱۶].

۲-۲- مروری بر تحقیقات پیشین

تحقیقات کانگ و همکارانش در سال (۲۰۱۲) نشان می‌دهد که مقاومت کششی بتن بازیافتی و بتن معمولی اختلاف زیادی ندارد [۱۷]. نتایج تحقیقات آکا و همکارانش نشان می‌دهد که وجود الیاف پلی‌پروپیلن در بتن‌های بازیافتی تأثیر زیادی بر مقاومت فشاری بتن ندارد. اما اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن باعث افزایش قابل توجه مقاومت بتن در کشش و خمش می‌شود. اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن به بتن‌های بازیافتی باعث ناهمگن‌تر شدن بتن می‌شود. همچنین با افزایش میزان استفاده از این الیاف، کارایی و امکان قالب‌ریزی بتن کاهش می‌یابد [۱۸].

مهران شیرآبادی و همکاران به بررسی تأثیر ابعاد و همچنین میزان جایگزینی سنگدانه‌های بتنی بازیافتی بر خواص مکانیکی بتن و سپس بررسی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی در بهبود خواص مکانیکی بتن بازیافتی پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی مصالح بازیافتی به جای مصالح طبیعی، مقاومت فشاری بتن کاسته می‌شود. همچنین جایگزینی ماسه بازیافتی تا میزان ۳۰ درصد، کاهش چندانی 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 [۱۹].

آقای جلیل‌فر و همکاران با افزودن درصدهای ۰، ۰.۵، ۱، ۱.۵ درصد الیاف فولادی به درصدهای ۰، ۳۰، ۵۰، ۱۰۰ درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی به بررسی میزان تأثیر افزودن الیاف فولادی به نمونه‌های الیافی پرداخت؛ آقای جلیل‌فر و همکاران نشان دادند افزایش درصد الیاف فولادی مقاومت فشاری، کششی و خمشی افزایش می‌یابد [۲۰].

برنجیان و همکاران (۱۳۹۳) تأثیر الیاف فولادی و PP را بر خواص بتن خود متراکم حاوی میکروسیلیس مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که الیاف فولادی نسبت به الیاف PP تأثیر بیشتری بر مشخصات مقاومتی بتن دارد. همچنین اثرگذاری بیشتر الیاف در مقاومت کششی نسبت به مقاومت فشاری مشهود است. استفاده هم زمان از الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، موجب بهبود مشخصه‌های بتن خود متراکم الیافی حاوی میکروسیلیس نسبت به استفاده مجزا از هر کدام از الیاف می‌گردد [۲۱].

دینگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ به بررسی رفتار و مقاومت خمشی بتن الیافی خود متراکم با عملکرد مناسب در دمای بالا پرداختند. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از الیاف می‌تواند در بهبود مقاومت و کاهش خرابی نمونه باقی مانده و استحکام بتن پس از قرارگرفتن در درجه حرارت بالا مؤثر باشد [۲۲].

خزش، یکی از پارامترهای مهم که در رفتار سازه‌های بتنی مؤثر است. مطالعات نشان می‌دهد با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی در بتن، ۳۰ تا ۶۰ درصد خزش بتن‌های بازیافتی نسبت به بتن‌های معمولی افزایش می‌یابد [۲۳]. نتایج تحقیقات آقای الیاسیان نشان می‌دهد با جایگزینی ۱۰۰٪ سنگدانه بازیافتی، میزان خزش تا ۳۰۰ برابر افزایش می‌یابد [۱۷، ۲۲، ۲۴-۲۸].

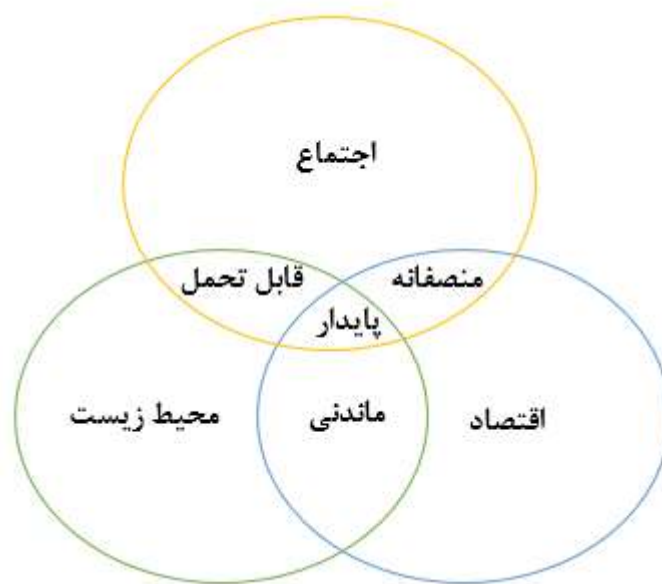
مکانیک شکست از سال ۱۹۲۱ توسط گریفیث پایه‌گذاری شد و سالها برای بتن قابل تعمیر نبود [۲۹]. کاپلن در سال ۱۹۶۱ به تعیین پارامترهای شکست بتن پرداخت. کاپلن از اصل مکانیک شکست الاستیک خطی کلاسیک (LEFM) برای تعیین پارامترهایی از جمله ضریب شدت تنش بحرانی و انرژی کرنشی بحرانی برای شکست بتن استفاده کرد [۳۰]. کیسلر و همکاران در ۱۹۷۱ نشان دادند که مکانیک شکست الاستیک خطی با تنها یک پارامتر شکست، انرژی G_f یا (چقرمگی شکست) برای بتن قابل اجرا نیست و حداقل دو پارامتر لازم است. هیلربرگ و همکاران مدل ترک مجازی را برای بتن معرفی کردند که در شیب اولیه منحنی تنش - بازشدگی یا مساحت زیر منحنی با پارامتر مقاومت کششی دلالت به دو پارامتر شکست اساسی مواد دارد [۲۹].

۲-۳- ضرورت استفاده از مواد بازیافتی

از زمان انقلاب صنعتی در قرن ۱۸ میلادی با رشد صنعت‌های مختلف، تولیدات انبوه موجب استفاده بی‌رویه از منابع طبیعی شد، این مسئله به تولید انواع آلاینده‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی منجر شد. به همین دلیل جهان با خطر اتمام سوخت‌های فسیلی، بحران انرژی و افزایش آلودگی‌های زیست‌محیطی روبرو شد. پس از آن 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 آن هدف توسعه پایدار است. دورنمای 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:

- پایداری در منابع طبیعی
- پایداری سیاسی
- پایداری اجتماعی
- 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 [۳۱].



شکل ۲-۱- نمودار توسعه پایدار

به طور کلی می توان در توسعه و پایداری بتن دو پارامتر مهم را مورد بررسی قرار داد:

- سنگدانه ها: باتوجه به اینکه حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد حجم بتن را سنگدانه تشکیل می دهد، می توان با هدف حفظ محیط زیست بجای استفاده از سنگدانه طبیعی از سنگدانه حاصل از بازیافت بتن های ضایعاتی استفاده کرد.
- سیمان: یکی از آلاینده ترین و پر هزینه ترین صنایع جهان تولید سیمان است (برای تولید هر تن سیمان نیاز به ۴ الی ۶ تن مواد خام است و ۲.۸ تن دی اکسید کربن تولید می شود)، اگر مواد پوزولانی (خاکستر پوسته ی برنج، متاکائولن، زئولیت و ...) یا مواد شبه سیمانی جایگزین سیمان های پرتلند معمولی گردد، می تواند به توسعه پایدار بتن کمک شایانی کرد.

۲-۴- بتن بازیافتی

۲-۴-۱- سنگدانه بازیافتی

سنگدانه‌های بازیافتی از جمع‌آوری، خرد و سپس غربال کردن بتن‌های تخریبی در ابعاد مورد نیاز حاصل می‌شود. براساس مطالعات صورت گرفته می‌توان ضایعات ساختمانی را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد:

- ضایعات بتنی
- ضایعات مصالح بنایی
- ضایعات ترکیبی

همچنین سنگدانه این ضایعات را بعد از فرایند خرد و غربال کردن نیز می‌توان به چهار دسته تقسیم کرد:

- سنگدانه‌های بتنی بازیافتی
- سنگدانه‌های مصالح بنایی بازیافتی
- سنگدانه‌های ترکیبی بازیافتی (حاصل ترکیبی از سنگدانه‌های بتنی بازیافتی و مصالح بنایی است).
- سنگدانه‌های بازیافتی ساختمانی (سنگدانه‌ها دارای مقدار زیادی از آسفالت، پلاستیک، شیشه، چوب و... هستند.) مطالعات زیادی در زمینه بازیافت ضایعات ساختمانی صورت گرفته است، لذا براساس مطالعات دانشمندان ضایعات بتنی پتانسیل زیادی را برای استفاده مجدد مخصوصا در زمینه ساخت المان‌های سازه‌ای دارا می‌باشند [۳۲]. مطالعات مختلف نشان می‌دهد که با افزایش سنگدانه بازیافتی، خواص فیزیکی و مکانیکی مانند مقاومت، دوام و چگالی کاهش می‌یابد [۱۰، ۳۳-۳۵].

۲-۴-۱-۱ ریزدانه بازیافتی

ریزدانه‌های بازیافتی اغلب در زمینه غیرسازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. اتحادیه بین المللی آزمایشگاه‌ها و کارشناسان مصالح ساختمانی^۳ و برخی از کشورهای توسعه‌یافته، استفاده از ریزدانه‌های بازیافتی را در زمینه سازه‌ای، محدود و حتی ممنوع کرده‌اند. مطابق جدول ۱-۲، برخی از کشورها از جمله سوئیس، برزیل و ژاپن، جایگزینی ۱۰۰٪ ریزدانه‌های بازیافتی، صرفاً برای مولفه‌های غیرسازه‌ای مجاز می‌دانند. همچنین براساس استانداردهای کشور سوئیس تولید بتن بازیافتی با مقاومت ۳۰ مگاپاسکال تنها با ۲۰٪ ریزدانه بازیافتی مجاز است [۳۶].

۲-۴-۱-۲ درشت‌دانه بازیافتی

به دلیل تاثیر اندک جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی بر مقاومت مکانیکی و دوام بتن، نسبت به ریزدانه‌های بازیافتی بیشتر مورد توجه جهان قرار گرفته است. در برخی از کشورهای توسعه‌یافته، استانداردهایی در زمینه میزان استفاده از درشت‌دانه بازیافتی وجود دارد که در جدول ۱-۲، نشان داده شده است [۳۶].

جدول ۱-۲- مشخصات سنگدانه بازیافتی طبقه بندی شده در برخی کشورها

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

۲-۴-۲- سنگ شکن‌ها

در گذشته از دستگاه‌های سنگ شکن برای خرد کردن زغال سنگ و سنگ‌های طبیعی استفاده می‌کردند، اما امروزه سنگ شکن‌ها علاوه بر خرد کردن سنگ‌های طبیعی، برای تولید سنگدانه‌های بازیافتی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین با اصلاحاتی که بر روی دستگاه‌های سنگ شکن انجام شده است موجب می‌شود تا تولید سنگدانه‌های بازیافتی به طور بهینه صورت گیرد. این اصلاحات، باعث کوچک شدن ابعاد سنگدانه‌های تولید شده و یکنواختی سنگدانه‌ها در انواع رده‌های مش بندی بوده و همچنین آلودگی صوتی و گرد و غبار کمتری تولید می‌کنند [۳۷].

به طور کلی سنگ شکن‌ها دارای انواع مختلفی هستند که برای تولید سنگدانه‌های بازیافتی به صورت کلی از سه نوع دستگاه سنگ شکن استفاده می‌شود که عبارتند از:

- سنگ شکن فکی
- سنگ شکن ضربه‌ای
- سنگ شکن مخروطی

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 [۳۷]. شکل ۲-۲، یک نمونه از دستگاه سنگ شکن مخروطی است.

سنگ شکن فکی از دو صفحه‌ای که نسبت به هم با زاویه قرار گرفته‌اند، تشکیل شده است. یکی از صفحات ثابت است و دیگری به عقب و جلو نوسان می‌کند. حداکثر بعد سنگدانه‌های تولیدی به اندازه‌ی شکافی که در پایین صفحات است، بستگی دارد [۳۷]. شکل ۲-۳، یک نمونه از دستگاه سنگ شکن فکی است.

سنگ شکن ضربه‌ای با وارد کردن نیروی برشی زیاد از ضربه‌هایی که توسط قسمت دوار دستگاه تأمین می‌شود، موجب خرد شدن سنگ‌ها می‌شود. سنگ شکن ضربه‌ای فاکتور کاهش بالایی دارد. به

نسبت اجزای ورودی به اجزای خروجی فاکتور کاهش گویند [۳۸]. به طور کلی سنگ شکن‌های ضربه‌ای مؤثرتر و کاربردی‌تر نسبت به سنگ شکن‌های فکی هستند اما هزینه‌های تعمیر و نگهداری آنها بالاتر است [۳۹]. سنگ شکن مخروطی به عنوان سنگ شکن ثانویه مورد استفاده قرار می‌گیرد. سنگ شکن مخروطی دارای محوری قائم است که با دوران و فشردن سنها به لبه‌های کناری موجب خردشدن سنگ‌ها می‌شود. شکل ۲-۴ یک نمونه از دستگاه سنگ شکن ضربه‌ای است.



شکل ۲-۳- سنگ شکن فکی



شکل ۲-۲- سنگ شکن مخروطی

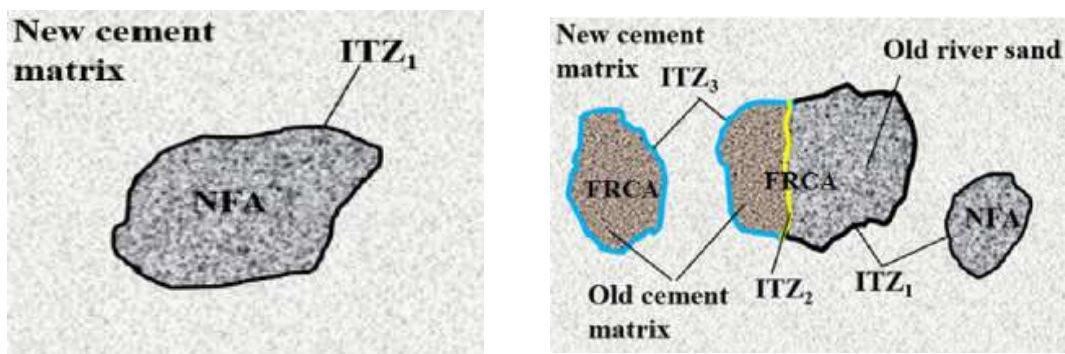


شکل ۲-۴- سنگ شکن ضربه‌ای

۲-۴-۳- ریز ساختار سنگدانه بازیافتی

بتن‌های معمولی (بدون سنگدانه بازیافتی) از ترکیب مصالحی از جمله سنگدانه طبیعی و خمیر سیمان است، در حالی که ناحیه انتقال سطحی^۴ بین خمیر سیمان و سنگدانه طبیعی است. بتن حاوی سنگدانه بازیافتی ماده کامپوزیتی است که جایگزین سنگدانه طبیعی به طور کامل یا جزئی می‌شود، با توجه به اینکه بتن بازیافتی از سنگدانه بازیافتی و ملات چسبنده تشکیل شده است. ناحیه انتقال سطحی در شکل ۲-۵ نشان داده شده است [۴۰].

- ناحیه انتقال سطحی بین سنگدانه طبیعی و خمیر سیمان قدیمی؛
- ناحیه انتقال سطحی بین سنگدانه طبیعی و خمیر سیمان جدید؛
- ناحیه انتقال سطحی بین خمیرهای سیمانی جدید و قدیمی.



شکل ۲-۵- جزئیات ناحیه انتقال سطحی بتن حاوی سنگدانه طبیعی و بازیافتی

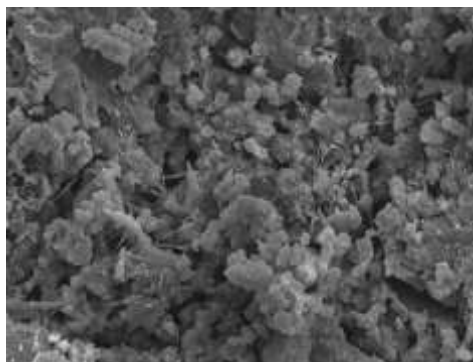
۲-۴-۴- نقص در ریز ساختار بتن بازیافتی

نقص ریزساختار بتن بازیافتی در پیوند ضعیف فیزیکی و شیمیایی بین سنگدانه بازیافتی و خمیر سیمان، وجود ترک و منافذ آشکار می‌شود، بدین ترتیب خواص مکانیکی و دوام بتن را تضعیف می‌کند، علاوه بر این، ملات چسبیده نیز بخش ضعیف در سنگدانه بازیافتی محسوب می‌شود. وجود ملات چسبیده موجب افزایش تخلخل سنگدانه بازیافتی به خصوص بتن حاوی ریزدانه بازیافتی می‌شود، افزایش نسبت جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و نسبت آب به سیمان موجب افزایش تخلخل در بتن

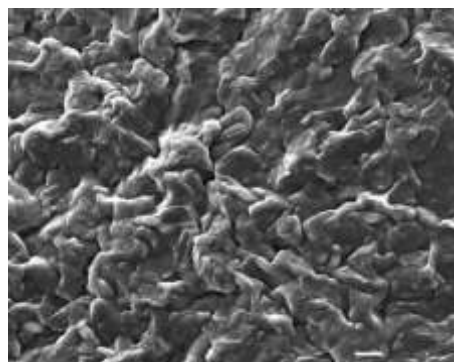
⁴ ITZ: Interfacial Transition Zone

بازیافتی می‌شود. تضعیف پیوند فیزیکی و شیمیایی بین سنگدانه بازیافتی و خمیرسیمان را می‌توان به دو عامل نسبت داد:

- وجود ذرات سست در سطح سنگدانه بازیافتی دارای ذرات سست است. شکل ۶-۲
- وجود یک لایه آب و یک لایه متخلخل از $\text{Ca}(\text{OH})_2$ بین سطح سنگدانه بازیافتی و خمیر سیمان به دلیل جذب آب زیاد. شکل ۷-۲

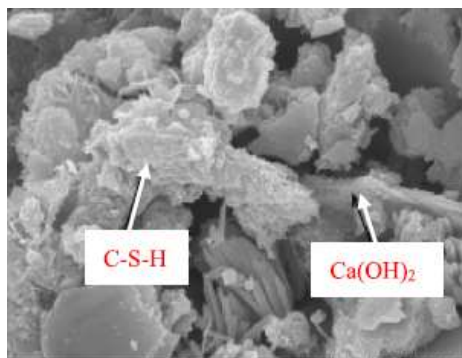


شکل ۶-۲-ب

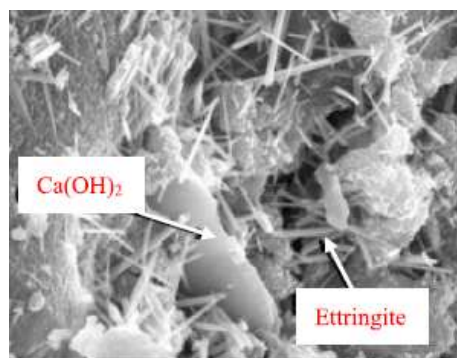


شکل ۶-۲-الف

شکل ۶-۲-الف - سطح سنگدانه طبیعی، ب - سطح سنگدانه بازیافتی



شکل ۷-۲-ب ناحیه انتقال سطحی جدید



شکل ۷-۲-الف ناحیه انتقال سطحی قدیمی

شکل ۷-۲-الف - ناحیه انتقال سطحی قدیمی، ب - ناحیه انتقال سطحی جدید

۵-۴-۲- خصوصیات سنگدانه بازیافتی

با توجه به اینکه سنگدانه بازیافتی از خرد و سرنده کردن بتن مادر ساخته می‌شود، ممکن است مقاومت فشاری، نسبت آب به سیمان و نوع کاربرد بتن مادر متفاوت باشد، در نتیجه سنگدانه بازیافتی

تولید شده از بتن مادر متفاوت خصوصیات متفاوتی دارند، در این قسمت نتایج بررسی تحقیقات گذشته بر روی خصوصیات سنگدانه بازیافتی نشان داده شده است.

۲-۴-۱- 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.

به طور کلی به سنگدانه‌هایی که ضخامت آن‌ها نسبت به دو بعد دیگر کمتر باشد، سنگدانه‌های پولکی شکل و به سنگدانه‌هایی که طول آن از ۱.۸ دو بعد دیگر سنگدانه بزرگتر باشد سنگدانه‌های سوزنی شکل می‌گویند. به میانگین اندازه سوراخ دو الک متوالی که سنگدانه از یکی رد شده و بر روی دیگری باقی مانده است، میانگین ابعاد سنگدانه گویند. مقاومت خمشی و دوام بتن با حضور دانه‌های پولکی و سوزنی در بتن کاهش می‌یابد، بررسی تحقیقات گذشته بیانگر این است که شاخص تورق و تطویل سنگدانه بازیافتی بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی است [۴۰].

۲-۴-۶- چگالی سنگدانه‌های بازیافتی

ملات قدیمی چسبیده^۵ به سنگدانه‌های بازیافتی مهمترین عامل در تعیین میزان چگالی، جذب آب و خلل و فرج بتن بازیافتی است. چگالی بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی کمتر از بتن حاوی سنگدانه‌های طبیعی است. مطالعات نشان می‌دهد که چگالی سنگدانه‌های بازیافتی اشباع با سطح خشک ۷ تا ۹ درصد از سنگدانه‌های طبیعی کمتر است [۴۱].

⁵ Cement Paste

۷-۴-۲- جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی

جذب آب^۶ در بتن بازیافتی به مقدار جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و ملات قدیمی چسبیده بستگی دارد. مطالعات اخیر نشان می‌دهد، که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی، به دلیل افزایش خلل و فرج، جذب آب نیز افزایش پیدا خواهد کرد؛ همچنین مطالعات نشان می‌دهد با کاهش بیشینه سائز سنگدانه بازیافتی، جذب آب افزایش بیشتری پیدا خواهد کرد [۴۵-۴۲].

سنگدانه‌های طبیعی خلل و فرج کمتری نسبت به سنگدانه‌های بازیافتی دارند از این رو جذب آب آنها کمتر است. مطالعات 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 [۴۶]. مطالعات دیگری نشان می‌دهد که جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی در محدوده‌ی ۴.۹ تا ۵.۲ درصد و جذب آب سنگدانه‌های طبیعی در محدوده‌ی ۱ تا ۲.۵ درصد است [۴۷, ۴۶, ۴۱].

۸-۴-۲- خلل و فرج سنگدانه‌های بازیافتی

تخلخل و اندازه منافذ، می‌تواند در سنگدانه‌ها با دامنه وسیعی تغییر نماید (منافذی که با چشم غیر مسلح دیده می‌شود تا منافذ میکرونی). اگرچه تاکنون رابطه‌ی واضحی بین مقاومت فشاری بتن و جذب آب سنگدانه‌های مصرفی وجود نداشته است 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 [۴۸].

۹-۴-۲- سطح رطوبت سنگدانه‌های بازیافتی

سطح رطوبت سنگدانه‌ها در سه حالت قابل بررسی است [۴۹]:

الف- وضعیت (OD) کاملاً خشک: برای دسترسی به این حالت ابتدا سنگدانه‌ها در دمای ۱۰۵ تا ۱۱۰ درجه سلسیوس قرار داده می‌شوند. زمانی که وزن سنگدانه‌ها به مقدار ثابتی رسید، کلیه حفرات

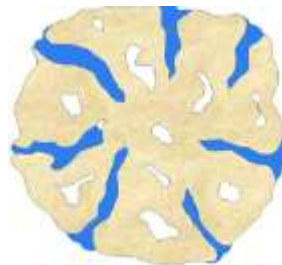
⁶ Water Absorption

سنگدانه‌ها کاملاً از آب تخلیه شده است و در حالت OD هستند. شکل ۲-۴ جزئیات سنگدانه کاملاً خشک را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸- جزئیات سنگدانه کاملاً خشک

ب- وضعیت (SSD) اشباع با سطح خشک: 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. شکل ۲-۵ جزئیات سنگدانه اشباع با سطح خشک را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۹- جزئیات سنگدانه اشباع با سطح خشک

ج- وضعیت (D) کاملاً اشباع: این سنگدانه‌ها، تمامی خلل و فرج داخلی این سنگدانه‌ها اشباع از آب بوده و از طرفی سطح آنها کاملاً خیس است. دانه‌هایی که پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری از آب بیرون آورده شوند، دانه‌های خیس محسوب می‌شوند، شکل ۲-۶ وضعیت سنگدانه در حالت کاملاً اشباع را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۰- جزئیات سنگدانه کاملاً اشباع

۲-۴-۱۰- خصوصیات مکانیکی بتن بازیافتی

۲-۴-۱۰-۱- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری برابر است با تحمل مقدار نیروی فشاری تک محوره، تا زمانی که المان وارد ناحیه تسلیم شود. مقاومت فشاری بتن به نسبت آب به سیمان، سنگدانه‌های درشت و ریز، آب و افزودنی‌های معدنی بستگی دارد. نسبت آب به سیمان مهمترین عامل در افزایش یا کاهش مقاومت فشاری بتن است.

مقاومت فشاری بتن بازیافتی تحت تأثیر مقدار جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، نسبت آب به سیمان، مقدار و کیفیت آب و سیمان، کیفیت سنگدانه‌های طبیعی، میزان ملات چسبیده است. به طور کلی درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و میزان ملات چسبیده به سنگدانه‌ها از جمله مهمترین عوامل تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن بازیافتی هستند. تحقیقات ابری و همکارانش نشان می‌دهد که جایگزین کردن ۲۵-۳۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی، تغییر محسوسی بر مقاومت فشاری بتن بازیافتی ایجاد نمی‌کند. همچنین نتایج تحقیقات ابری و همکارانش نشان می‌دهد که افزودن سنگدانه‌های بازیافتی تا مقدار ۳۰ درصد، با نسبت آب به سیمان بزرگتر از ۰.۲۵، مقاومت فشاری یکسانی را با نمونه بتنی معمولی در پی دارد. همانطور که مشخص است جایگزینی ۱۰۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی باعث کاهش مقاومت فشاری در حدود ۵ مگاپاسکال در این آزمایش شده است [۵۰].

رائو و همکاران نشان دادند که جایگزینی ۲۵-۳۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی بر مقاومت مکانیکی بتن تأثیر قابل توجهی نخواهد داشت [۵۱]. خائو و همکاران نشان دادند که جایگزینی ۱۰۰٪ سنگدانه

بازیافتی، موجب کاهش ۵۰٪ مقاومت فشاری خواهد شد [۵۲]. کو و همکاران نشان دادند، برای ساخت بتن پرمقاومت حاوی سنگدانه بازیافتی، باید مقاومت فشاری بتن مادر بالای ۶۰ مگا پاسکال باشد [۵۳]. یاگوشیتا و همکاران نشان دادند، با افزایش مقاومت مکانیکی بتن مادر، مقدار ملات چسبیده به سنگدانه کاهش پیدا خواهد کرد [۵۴].

۲-۴-۱۰-۲- مقاومت کششی

به دلیل آسیب پذیری شدید اجزای سازه‌ای در برابر نیروهای کششی، افزایش مقاومت کششی بتن از اهمیت بالایی برخوردار است. مقاومت کششی بتن با آزمایش‌های کشش مستقیم و غیرمستقیم دست می‌آید. در آزمایش کشش غیرمستقیم (کشش برزیلی) نمونه‌ی استوانه‌ای در دستگاه قرار داده می‌شود و نیروی P به نمونه وارد می‌شود. مقاومت کششی بتن که با نماد f_{ct} مشخص می‌شود براساس رابطه ۱ قابل محاسبه است، در رابطه ۱، f_c مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال) است [۵۵].

$$f_{ct} = 0.55 \sqrt{f_c} \quad (1)$$

مطالعات نشان می‌دهد که مقاومت کششی بتن بازیافتی و بتن معمولی اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند. با وجود اینکه ملات خشک شده‌ی سنگدانه‌های بازیافتی باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می‌گردد اما حتی تا حدودی باعث بهبود مقاومت کششی بتن می‌شود. علت این امر انتقال هموارتر نیرو بین ملات خشک شده و سنگدانه‌های بازیافتی است [۵۵]. کاکسال و همکارانش نشان دادند، افزودن ۵-۱۰٪ میکروسیلیس و ۱٪ الیاف فولادی به بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی موجب بهبود مقاومت شکافت کششی می‌شود [۵۶]. آلبرت و همکارانش نشان دادند، استفاده از الیاف فولادی بعنوان یک راه موثر برای تقویت مقاومت شکافت کششی معرفی کردند [۵۷].

۲-۵- بتن الیافی

۲-۵-۱- تاثیر افزودن الیاف در بتن بازیافتی

باتوجه به مقاومت فشاری بالای بتن، فرم‌پذیری، ارزان بودن و دسترسی آسان به مصالح، بتن بعنوان یکی از پرکاربردترین ماده مصرفی در دنیا شناخته شده است. در مقابل این ماده مصرفی دارای نقاط ضعفی همچون رفتار ترد و دیگری مقاومت کششی پایین، کاربرد بتن را با مشکلاتی روبرو ساخته است. استفاده از الیاف‌های مختلف در بتن، موجب افزایش شکل‌پذیری با قابلیت جذب انرژی بیشتر و افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود. از مشخصات دیگر بتن الیافی افزایش کنترل توسعه‌ی ترک خوردگی و جلوگیری از فروپاشی بتن است. از الیاف‌های کاربردی که برای تولید بتن الیافی استفاده می‌شود می‌توان به الیاف فولادی، شیشه، کربن، آرامید(کولار)، پلی‌پروپیلن، آزبست، میکا و یا کنف اشاره کرد.

به طور کلی کیفیت بتن الیافی به نوع مصالح مصرفی، نسبت آب به سیمان، عمل‌آوری و همچنین نسبت طول به قطر الیاف (l/d)، مشخصات فیزیکی و جنس الیاف بستگی دارد. بتن الیافی، دوام، شکل‌پذیری، جذب انرژی و مقاومت کششی بیشتری نسبت به بتن‌های معمولی دارد، به علاوه بتن مسلح شده با الیاف جز مناسب‌ترین مصالح مورد استفاده در ساخت سازه‌های مقاوم در برابر زلزله به شمار می‌رود. به عنوان نمونه برای ساخت پناهگاه‌ها، انبارهای مهمات، دیوارهای مقاوم در برابر انفجار که نیازمند مصالحی با قابلیت جذب انرژی بالا هستند، از بتن الیافی استفاده می‌شود [۵۸]. بتن‌های الیافی کاربردهای فراوانی دارد، از سایر کاربردهای بتن‌های الیافی می‌توان در ساخت باندهای فرودگاه، کف سالن‌های صنعتی و ورزشی، پی ماشین‌آلات سنگین در کارخانه‌ها، پل‌ها، پارکینگ‌ها، پیاده‌روها، روسازی راه‌ها، سازه‌های دریایی، قطعات پیش‌ساخته ساختمانی و یا بتن پاششی (شاتکریت) روی سطوح منحنی شکل سازه‌ها و شیروانی‌ها اشاره کرد [۵۹، ۶۰].

۲-۵-۲- انواع الیاف بر اساس اندازه

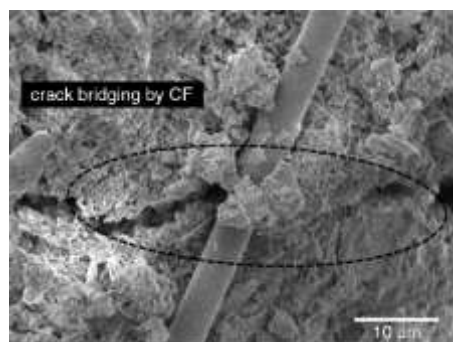
الیافها از لحاظ جنس، شکل و اندازه انواع مختلفی دارند. پارامتر مناسبی که برای تعریف هر نوع الیافی می‌توان به کار برد، نسبت ظاهری (L/D^7) الیاف می‌باشد که در آن، L^8 طول الیاف و D^9 قطر آن است. نسبت (L/D) از ۳۰ تا ۱۰۰ متغیر است. مطابق آیین‌نامه ASTM C1116 الیاف را می‌توان در چهار دسته‌ی الیاف طبیعی، مصنوعی، شیشه و فولادی طبقه‌بندی کرد، مشخصات فیزیکی و مکانیکی انواع الیاف در جدول (۲-۴) آمده است [۶۱].

به‌طور کلی الیافها به دو دسته میکرو الیاف و ماکرو الیاف تقسیم می‌شوند [۶۲].

- طول میکرو الیافها بین ۱۲-۳۸ میلی‌متر بوده و قطر آنها کمتر از ۰.۳ میلی‌متر است.
- طول ماکرو الیافها بین ۳۸-۵۰ میلی‌متر بوده و قطر آنها بیشتر از ۰.۳ میلی‌متر است.

۲-۵-۳- ویژگی‌های میکرو و ماکرو الیاف

میکرو الیافها با ایجاد پل زدگی از باز شدن عرض ریزترکها جلوگیری کرده و موجب افزایش بیشینه بار نهایی می‌شود. ماکرو الیافها نیز مشابه میکرو الیافها با ایجاد پدیده پل زدگی از باز شدن عرض درشت‌ترکها جلوگیری کرده و موجب افزایش ناحیه بعد از ترک خوردگی می‌شود. تمامی الیافها با ابعادهای مختلف، از فروپاشی ناگهانی بتن جلوگیری می‌کند [۶۲]. جزئیات پدیده پل زدگی در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۱- پدیده پل زدگی توسط الیاف جهت جلوگیری از باز شدن عرض ترک

⁷ Length/Diameter

⁸ Length

⁹ Diameter

جدول ۲-۲- مشخصات فیزیکی و مکانیکی انواع الیاف

نوع الیاف	قطر (μm)	وزن مخصوص (g/cm^3)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیک (MPa)
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(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

۲-۵-۴- الیاف طبیعی

الیاف طبیعی، به الیافی گفته می‌شود که از منابع طبیعی تولید شود، الیاف طبیعی که برای بهبود خواص بتن استفاده می‌شود می‌توان به الیاف‌های طبیعی همچون کاه، پنبه، کنف و بامبو، کتان، چتایی، سیسال، پوسته نارگیل و تفاله نیشکر اشاره کرد. 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.

۲-۵-۵- الیاف شیشه

به طور کلی استفاده از الیاف شیشه موجب افزایش مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بتن می‌شود [۶۳]. الیاف شیشه می‌تواند بر کاهش کارایی بتن تازه تأثیر منفی گذاشته و برای جبران کارایی بتن‌های مسلح به الیاف شیشه باید از روان کننده‌های مناسب، استفاده کرد. همچنین الیاف شیشه در بتن تازه به راحتی به یکدیگر چسبیده و گلوله می‌شوند که اصطلاحاً به این پدیده گلوله‌ای شدن^{۱۰} الیاف می‌گویند. واضح است که در صورت وقوع این پدیده، توزیع الیاف دیگر یکنواخت نیست و موجب کاهش مقاومت مکانیکی بتن می‌شود، بنابراین با استفاده از افزودن درصد‌های بهینه و اختلاط مناسب به راحتی می‌توان از وقوع این پدیده جلوگیری کرد [۶۴]. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که استفاده از الیاف شیشه بر مقاومت فشاری بتن تأثیر کمی دارد اما مقاومت فشاری اولیه بتن را در فرآیند گیرش مقاومت در سنین پایین، افزایش می‌دهد. جزئیات و اشکال مختلف الیاف شیشه در شکل ۲-۱۲، نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۲- نمونه ای از الیاف شیشه

¹⁰ Balling

۲-۵-۶- الیاف آرامید (کولار)

پلیمرهای آرامید (کولار) دارای خصوصیات فراوانی از جمله، بالا بودن نقطه ذوب، پایداری حرارتی عالی، مقاومت در برابر آتش سوزی است. این نوع از الیاف دارای شکل‌های مختلفی بوده و همانند الیاف شیشه می‌تواند در ساخت بتن مورد استفاده قرار گیرد. الیاف آرامید به دلیل وزن مخصوص پایین و سختی بالا، بسیار مورد توجه جهان قرار گرفته است. الیاف آرامید از زنجیرهای مولکولی طولانی پلی-پارافتیلن ترفنال آمید، ساخته شده است و کاربردهای فراوانی دارد. مقاومت کششی بالا، وزن مخصوص پایین و سختی زیاد از خصوصیات الیاف آرامید است [۲۳]. جزئیات و اشکال مختلف الیاف آرامید (کولار) در شکل ۲-۱۳، نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۳- نمونه ای از الیاف آرامید

۲-۵-۷- الیاف کربن

الیاف کربن دارای خصوصیات فراوانی از جمله استحکام بالا در مقابل خستگی، مقاومت در برابر خوردگی و ضریب انبساط حرارتی پایین اشاره کرد. اما با توجه به قیمت بالای الیاف کربن به وفور مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. یکی از پرکاربردترین الیاف در صنعت است؛ و در تولید انواع کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود. این الیاف ضریب الاستیک نسبتاً بالایی در مقایسه با الیاف شیشه و کولار دارند. ضریب انبساط گرمایی این نوع الیاف‌ها در دماهای متفاوت کم می‌باشد که این مسئله باعث پایداری طولی و اندازه

الیاف کربن در دماهای مختلف می‌گردد. جزئیات و اشکال مختلف الیاف کربن در شکل ۲-۱۴، نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴- نمونه ای از الیاف کربن

۲-۵-۸- الیاف پلی پروپیلن

الیاف پلی پروپیلن از طریق پلیمریزاسیون پروپیلن به صورت یک پلیمر خطی تهیه می‌گردند و به اختصار PP نامیده می‌شوند. این الیاف در سال ۱۹۶۰ در کشور ایتالیا به صورت صنعتی تولید شده و به بازار عرضه شد. خصوصیات الیاف PP باعث رشد سریع آن در سطح بین المللی گردید [۶۵].

تولید الیاف پلی پروپیلن به دلیل ارزان بودن استقبال زیادی را به همراه داشته و در انواع اشکال متنوع تولید می‌گردد. الیاف پلی پروپیلن از ترک خوردگی و جمع شدگی بتن به خصوص در سنین اولیه آن جلوگیری می‌کند. بتن ساخته شده از الیاف پلی پروپیلن دارای شکل پذیری بالایی است و هرگز خرد نمی‌شود. پلی پروپیلن در مقایسه با دیگر پلیمرها مشخصات متمایز و برجسته‌ای دارد که عبارتند از:

- قیمت پایین الیاف پلی پروپیلن در مقایسه با سایر الیاف‌ها

- وزن مخصوص پایین

- انعطاف پذیری بالا

- افزایش کاربرد پلی پروپیلن در وسایل تجهیزات پزشکی

جزئیات و اشکال مختلف الیاف پلی پروپیلن در شکل ۲-۱۵، نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۵- نمونه ای از الیاف پلی پروپیلن

۲-۵-۹- الیاف فولادی

الیاف فولادی از فولاد کم کربن سرد نورد شده، ساخته شده است. الیاف فولادی انواع مختلفی از جمله ساده، با انتهای قلاب شکل، موجدار، دم پهن و... دارند و در ابعاد متنوع تولید می‌شوند. طبق تحقیقات صورت گرفته، الیاف فولادی تاثیر کمی بر بهبود مقاومت فشاری بتن‌های الیافی می‌گذارد. در مقابل تاثیر زیادی بر مقاومت کششی بتن الیافی دارد. به عنوان مثال، الیاف فولادی به مقدار ۱.۵ درصد حجمی بتن، مقاومت فشاری را حداکثر تا ۱۵ درصد و مقاومت کششی را در حدود ۳۰-۴۰٪ افزایش می‌دهد [۶۶].

الیاف فولادی معمولاً برای کاهش تردشکنی بتن استفاده می‌شود. در طی چند دهه‌ی گذشته از بتن‌های مسلح به الیاف فولادی در روسازی راه‌ها، سازه‌های هیدرولیکی، سازه‌های دارای مقاطع جدار نازک و محصولات بتنی پیش ساخته استفاده شده است [۶۷]. استفاده از الیاف فولادی در ساخت بتن‌های بازیافتی موجب افزایش مقاومت خمشی و کششی و همچنین افزایش مقاومت در برابر خستگی و ضربه بتن می‌شود [۶۸]. شکل ۲-۱۶، انواع الیاف فولادی را نشان می‌دهد.



ب. الیاف صاف (راست)



الف. الیاف قلابدار



ت. الیاف دو سر پهن



پ. الیاف موجدار



ج. الیاف پیچ خورده



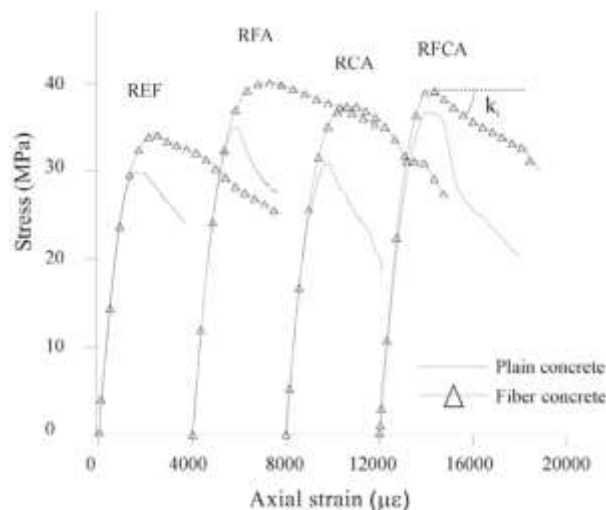
ث. الیاف اسلیت

شکل ۲-۱۶- نمونه ای از الیاف فولادی

۲-۶- بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

۲-۶-۱- تاثیر ترکیب سنگدانه بازیافتی با الیاف

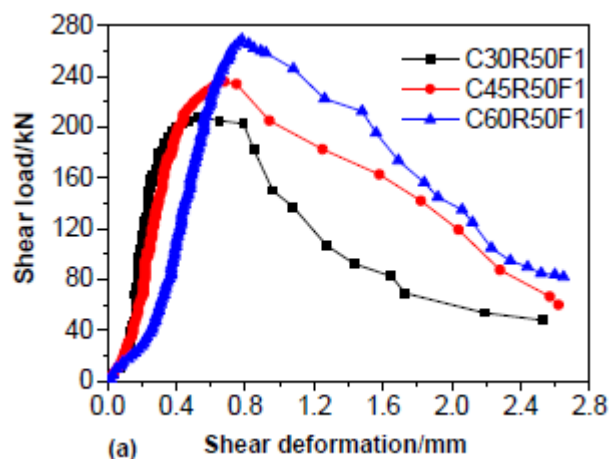
همانطور که در قسمت‌های قبلی اشاره شد، افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به دلیل ایجاد افزایش خلل و فرج و ناحیه انتقال ضعیف در بتن، موجب کاهش مقاومت و سختی بتن می‌شوند. لذا باتوجه ویژگی‌های مکانیکی الیاف‌ها، افزودن الیاف در جبران مقاومت و سختی از دست رفته بسیار موثر است. کارونیز و همکاران در سال (۲۰۱۴) 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 مقاومت مکانیکی بتن بازیافتی را نیز افزایش دهد [۶۷]. جزئیات منحنی تنش- کرنش نمونه‌های فشاری بتن معمولی و الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۷- جزئیات منحنی تنش- کرنش نمونه‌های فشاری بتن معمولی و الیافی

دانینگ ژاو و همکاران در سال (۲۰۱۷) 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 خصوصیات مکانیکی و نحوه خرابی بتن با حجم متفاوت الیاف فولادی با درصدهای ۰-۲٪

الیاف فولادی و با نسبت جایگزینی ۰-۱۰۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی تحت نیروی برشی قرار داده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن الیاف فولادی به طور موثری می‌تواند مقاومت و سختی برشی بتن بازیافتی را بهبود بخشد [۶۹]. جزئیات منحنی نیرو-تغییر مکان ناشی از برش در شکل ۱۸-۲ نشان داده شده است. در شکل ۱۸-۲، F درصد الیاف فولادی، R درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی و C مقاومت هدف بر حسب مگاپاسکال.



شکل ۱۸-۲- جزئیات منحنی نیرو - تغییر مکان

باتوجه به مطالعات صورت گرفته بر تاثیر الیاف بر بهبود رفتار مقاومت مکانیکی بتن بازیافتی، لذا جایگزینی سنگدانه بازیافتی در قطعات پیش ساخته، موجب کاهش هزینه ساخت شده و افزودن الیاف در قطعات پیش ساخته باعث بهبود مقاومت کششی و سختی خمشی می‌شود. لذا در هنگام جابجایی قطعات پیش ساخته از ایجاد ترک‌های کششی جلوگیری می‌شود.

فصل سوم

برنامه آزمایشگاهی

۳- فصل سوم- برنامه آزمایشگاهی

۳-۱- مقدمه

در این فصل به تشریح آزمایش‌های انجام شده، طرح اختلاط و مصالح مصرفی در بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی پرداخته شده است. مصالح مورد استفاده در ساخت بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی شامل شن طبیعی و بازیافتی، ماسه طبیعی، آب، سیمان و دو نوع الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی بوده که جزئیات آن در این فصل ارائه شده است. آزمایش‌های صورت گرفته بر سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی شامل آزمایش درصد رطوبت، جذب آب، سایش، دانه‌بندی و چگالی است. در ادامه به نحوه اختلاط و عمل‌آوری بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی پرداخته می‌شود. آزمایش‌های صورت گرفته بر نمونه‌های بتنی نیز شامل آزمایش مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم، خمش سه نقطه‌ای بوده که مراحل و جزئیات انجام آنها در این فصل ارائه شده است.

۳-۲- مواد مصرفی

۳-۲-۱- آب

آب مصرفی جهت ساخت و عمل‌آوری بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، آب شرب شهرستان شاهرود بوده که دارای مقدار ۴۰ گرم آهک در هر مترمکعب است.

۳-۲-۲- سیمان

جهت ساخت نمونه‌های بتنی از سیمان تیپ دو شاهرود، با مشخصات شیمیایی مندرج در جدول ۳-۱ استفاده شده است. این سیمان به‌عنوان سیمان اصلاح شده برای مصارف عمومی در ساخت ملات یا بتن به‌کار برده می‌شود. جزئیات سیمان تیپ دو شاهرود، در شکل ۳-۱ نشان داده شده 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٪



شکل ۳-۱- سیمان تیپ دو شاهرود

۳-۲-۳- سنگدانه‌ها

بطور کلی ۷۵٪ از سهم بتن را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند، برای طرح اختلاط بتن، بررسی ویژگی‌های سنگدانه امری ضروری است. در جدول ۳-۲ آزمایش‌های مرتبط در بررسی مشخصات کلی سنگدانه‌ها نشان داده شده است.

جدول ۳-۲- آزمایش‌های مرتبط با مشخصات کلی سنگدانه

ASTM C33	دانه‌بندی شن و ماسه
ASTM C27-C128	جذب آب
ASTM C29	چگالی توده‌ای
ASTM C70-C566	درصد رطوبت
ASTM C131	ضربه و سایش مصالح

۳-۲-۳-۱- سنگدانه‌های طبیعی

در این پژوهش، سنگدانه‌های طبیعی مصرفی از معادن سنگ شاهرود تهیه شده است، ماسه مصرفی از نوع ماسه رودخانه‌ای (۰-۴.۷۵ میلی‌متر) و شن مصرفی از نوع شن طبیعی با بیشینه سایز ۹.۵ میلی‌متر است. جزئیات سنگدانه طبیعی مصرفی در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳- الف - دانه بندی درشت دانه (شن)، ب- جزئیات دانه بندی ریزدانه (ماسه)

۲-۳-۲-۳- سنگدانه‌های بازیافتی

سنگدانه‌های بازیافتی مصرفی که از خرد و الک کردن نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای با ابعاد به ترتیب ۱۵۰*۱۵۰ و ۳۰۰*۱۵۰ میلی‌متری و مقاومت مشخصه ۳۵ تا ۴۵ مگاپاسکال در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. عملیات خرد و سرند کردن نمونه‌های بتنی مذکور توسط دستگاه سنگ شکن فکی صورت گرفته است. جزییات دستگاه سنگ شکن فکی در شکل ۴-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳- جزییات فرآیند خرد و سرند کردن سنگدانه‌های بازیافتی



شکل ۳-۴- سنگ شکن فکی

۳-۳-۲-۳- دانه‌بندی سنگدانه‌ها

این آزمایش نحوه توزیع اندازه دانه‌ها در مصالح ریزدانه و درشت دانه را به کمک الک تعیین می‌کند. مطابق استاندارد ASTM C136، حداقل مقدار ریزدانه جهت دانه‌بندی سنگدانه‌ها ۳۰۰ گرم است و حداقل مقدار درشت دانه مطابق جدول ۳-۳ است [۷۰].

جدول ۳-۳- حداقل مقدار نمونه مطابق با ASTM C136

حداقل مقدار نمونه (کیلوگرم)	بیشینه ابعاد سنگدانه (میلی- متر)
۱	۹.۵
۲	۱۲.۵
۵	۱۹
۱۰	۲۵
۱۵	۳۷.۵

وسایل آزمایش

- ترازو با دقت ۰.۱ گرم
- الک

- لرزاننده مکانیکی
- گرمکن^{۱۱} با دمای یکنواخت 110 ± 5 درجه سانتی گراد

روش انجام آزمایش

ابتدا نمونه‌برداری از سنگدانه‌ها مطابق استاندارد ASTM C136 صورت گرفته و سپس نمونه‌ها تا رسیدن به وزن ثابت، در یک گرمکن با دمای 110 ± 5 درجه سانتی گراد قرار داده می‌شود. الک‌ها را مطابق شکل ۳-۵-الف به ترتیب نمره الک، از بزرگ به کوچک و از بالا به پایین روی هم قرار می‌دهیم، نمونه‌ها بر روی الک ریخته شده و با لرزاننده مکانیکی مطابق شکل ۳-۵-ب به مدت ۱۵ دقیقه الک می‌شوند، سپس سنگدانه‌های باقی مانده بر روی هر الک، توزین شده و درصد مانده، درصد عبوری و مدول نرمی سنگدانه‌ها محاسبه و گزارش می‌شود.



شکل ۳-۵-ب



شکل ۳-۵-الف

شکل ۳-۵-الف- الک استاندارد جهت دانه‌بندی سنگدانه‌ها، ب- لرزاننده مکانیکی (دورانی)

۳-۲-۳-۴- تعیین درصد رطوبت کلی سنگدانه

این آزمایش برای تعیین درصد رطوبت قابل تبخیر در سنگدانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. حداقل وزن نمونه جهت آزمایش مطابق استاندارد ASTM C566 در جدول ۳-۴ است [۷۱].

¹¹ Oven

جدول ۳-۴ حداقل مقدار نمونه جهت تعیین درصد رطوبت مطابق با ASTM C566

حد اقل مقدار نمونه (کیلوگرم)	بیشینه ابعاد سنگدانه (میلی - متر)
۰.۵	۴.۷۵
۱.۵	۹.۵
۲	۱۲.۵
۳	۱۹
۴	۲۵
۶	۳۷.۵

وسایل آزمایش

- ترازو با دقت ۰.۱ درصد
- گرمکن^{۱۲} با دمای یکنواخت 110 ± 5 درجه سانتی گراد
- ظرف مدرج نمونه (ظرفی که تحت تاثیر دما قرار نگیرد)

روش انجام آزمایش

ابتدا نمونه برداری مطابق استاندارد ASTM C566 صورت می گیرد، بعد از اندازه گیری وزن نمونه ها، نمونه را در ظرف مناسب ریخته و به مدت ۲۴ ساعت در گرمکنی مطابق شکل ۳-۶، با دمای ثابت 110 ± 5 حرارت می دهیم تا کاملاً خشک شود، سپس نمونه خشک شده را بیرون آورده و وزن می کنیم، درصد کلی رطوبت با توجه به رابطه ۳-۱ به دست می آید:

$$P = \left(\frac{W-D}{D} \right) \times 100 \quad (3-1)$$

P = مقدار رطوبت کلی نمونه بر حسب درصد

¹² Oven

W = وزن اولیه نمونه بر حسب گرم

D = وزن نمونه خشک شده بر حسب گرم



شکل ۳-۶- کوره جهت خشک کردن مصالح



شکل ۳-۷- ظرف نمونه، جهت قرارگیری در کوره

۳-۲-۵- وزن مخصوص سنگدانه

این آزمایش برای تعیین وزن مخصوص مصالح سنگی متراکم و غیر متراکم بکار می‌رود. مطابق استاندارد ASTM C29، این روش برای مصالح سنگی با حداکثر اندازه اسمی ۱۵۰ میلی‌متر تجاوز کند، قابل استفاده نیست [۷۲].

وسایل آزمایش

- ترازو با دقت ۰.۱ گرم
- تخماق

- قالب فلزی

روش انجام آزمایش

ابتدا نمونه برداری مطابق آیین نامه ASTM C29 صورت می گیرد، سپس نمونه ها تا رسیدن به وزن ثابت در یک گرمکن با دمای 110 ± 5 خشک می شود. برای محاسبه وزن مخصوص سنگدانه ها از روش کوبیدن میله استفاده می شود. ابتدا به میزان یک سوم ظرف نمونه ها با سنگدانه پر می شود، سپس تمامی سطح نمونه به طور یکنواخت با ۲۵ ضربه توسط میله تخمناک کوبیده می شود؛ بار دیگر دو سوم ظرف نمونه ها با سنگدانه پر شده و مانند لایه اول متراکم می شود، در انتها ظرف نمونه بصورت کامل پر شده و بعد از تراکم یکنواخت، جرم ظرف حاوی مصالح وزن می شود. وزن مخصوص مصالح در حالت خشک از رابطه ۲-۳ قابل محاسبه است.

$$M = \frac{G-T}{V} \quad (2-3)$$

M= وزن مخصوص سنگدانه خشک؛ کیلوگرم بر مترمکعب

G= جرم سنگدانه با پیمان؛ کیلوگرم

T= جرم پیمان؛ کیلوگرم

V= حجم پیمان؛ مترمکعب

۳-۲-۳-۶- چگالی سنگدانه ها

۳-۲-۳-۶-۱- تعیین چگالی و جذب آب مصالح سنگی ریز

در این آزمایش روش تعیین چگالی فضایی، ظاهری و جذب آب مصالح سنگی ریزدانه مطابق آیین

نامه ASTM C128 مورد بررسی قرار می گیرد [۷۳].

وسایل مورد نیاز

- ترازو با دقت ۰.۱ گرم
- چگالی سنج (پیکنومتر) ظرفی با دقت قرائت حجم ± 1 سانتی متر مکعب

- گرمکن با دمای یکنواخت 110 ± 5 درجه سانتی‌گراد

روش انجام آزمایش

ابتدا نمونه برداری مطابق آیین نامه ASTM C128 به روش یک چهارم صورت می‌گیرد. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار داده می‌شود، سپس نمونه‌ها به صورت یکنواخت بر روی یک سطح صاف توزیع شده تا به حالت اشباع با سطح خشک برسد، حال قسمتی از چگالی سنج با آب پر شده و ۵۰۰ گرم ماسه اشباع با سطح خشک به آن اضافه می‌شود. سپس تا ۹۰٪ حجم چگالی سنج با آب پر شده و تا سطح مشخص بر پیکنومتر علامت‌گذاری می‌شود، برای خارج کردن حباب هوا، چگالی‌سنج به آرامی تکان داده می‌شود، بعد از اندازه‌گیری وزن کل چگالی‌سنج حاوی آب و مصالح ریزدانه، مصالح ریزدانه از چگالی‌سنج خارج شده و برای رسیدن به وزن ثابت در گرمکنی با دمای 110 ± 5 درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود؛ سپس مصالح خشک‌شده وزن می‌شود، بصورت مجدد چگالی‌سنج تا سطح علامت‌گذاری- شده از آب پر شده و وزن می‌شود. جزئیات چگالی‌سنج (پیکنومتر) در شکل ۳-۸، نشان داده شده است. همچنین چگالی فضایی خشک، چگالی فضای اشباع با سطح خشک، چگالی ظاهری و درصد جذب آب مصالح ریزدانه مطابق آیین نامه ASTM C128، از روابط ۳-۳ تا ۳-۷ قابل محاسبه است.

$$S_d = \frac{A}{(B+S-C)} \quad 3-3$$

$$S_{SSD} = \frac{S}{(B+S-C)} \quad 4-3$$

$$S_a = \frac{A}{B+A-C} \quad 5-3$$

$$k = \left[\frac{(S-A)}{A} \right] 100 \quad 6-3$$

در روابط فوق S_d چگالی فضایی خشک، A وزن نمونه خشک شده در کوره، B وزن چگالی‌سنج پر از آب، C وزن چگالی‌سنج 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.



شکل ۳-۸- چگالی سنج جهت محاسبه چگالی ریزدانه

۳-۲-۳-۶-۲- تعیین چگالی و جذب آب مصالح سنگی درشت دانه

در این آزمایش برای تعیین چگالی و جذب آب مصالح سنگی درشت دانه مطابق با استاندارد

ASTM C127 به کار می رود، این روش آزمایش برای دانه‌های ریز طراحی نشده است [۷۴].

وسایل مورد نیاز

- ترازو با دقت ۰.۰۵ درصد وزن نمونه
- ظرف مخصوص نمونه جهت جلوگیری از حبس هوای بین سنگدانه
- مخزن آب برای وزن ظرف حاوی نمونه
- الک

روش انجام آزمایش

ابتدا نمونه برداری مطابق آیین نامه ASTM C127 به روش یک چهارم صورت می‌گیرد. مصالح

سنگی درشت‌دانه بعد از عبور از الک ۴ و شستشو جهت پاکسازی گل و لای به مدت ۲۴ ساعت در آب

قرار داده می‌شود، سپس نمونه‌ها به صورت یکنواخت بر روی یک سطح صاف توزیع شده تا به حالت

اشباع با سطح خشک برسد، پس از توزین مصالح اشباع با سطح خشک بلافاصله مصالح را در ظرف

نمونه حاوی آب ریخته و نمونه‌ها به همراه آب وزن می‌شود و برای رسیدن به وزن ثابت در گرمکنی با دمای 110 ± 5 درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. چگالی فضایی خشک، چگالی فضای اشباع با سطح خشک، چگالی ظاهری و درصد جذب آب مصالح درشت مطابق آیین نامه ASTM C128، از روابط ۳-۸ تا ۳-۱۱ قابل محاسبه است.

$$S_D = \frac{A}{B-C} \quad ۳-۸$$

$$S_S = \frac{B}{B-C} \quad ۳-۹$$

$$S_A = \frac{A}{A-C} \quad ۳-۱۰$$

$$K = \left[\frac{B-A}{A} \right] 100 \quad ۳-۱۱$$

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.

۳-۲-۳-۷- ضربه و درصد سایش سنگدانه‌ها

این آزمایش روش تعیین مقاومت سائیدگی درشت دانه کوچکتر از ۳۷.۵ میلی‌متر به وسیله دستگاه لوس آنجلس را مطابق با استاندارد ASTM C131 شرح می‌دهد [۷۵].

وسایل مورد نیاز

- دستگاه لس آنجلس
- الک
- ترازو با دقت ۰.۱ درصد وزن نمونه آزمایش
- گلوله فولادی با قطر متوسط ۴۶.۸ میلی‌متر و وزن ۳۹۰ تا ۴۴۵ گرم

روش انجام آزمایش

ابتدا نمونه برداری مطابق استاندارد ASTM C131 صورت می‌گیرد. پس از شستشو، نمونه‌ها برای رسیدن به وزن ثابت در گرمکنی با دمای 110 ± 5 درجه سانتی‌گراد قرار داده می‌شود. با توجه به نوع دانه‌بندی سنگدانه تعداد گلوله‌ها را مشخص می‌شود. جزئیات گلوله فولادی و دستگاه لس‌انجلس در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. نمونه‌ها و گلوله‌ها در داخل دستگاه لس‌انجلس ریخته شده به‌طور متوسط ۵۰۰ دور می‌چرخد. بعد از خروج نمونه‌ها، از الک ۱.۷ میلی‌متر عبور داده می‌شود. مصالح سنگی بزرگتر از ۱.۷ میلی‌متر را شسته و در داخل کوره در دمای ثابت 110 ± 5 درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت خشک می‌شود. پس از توزین مصالح خشک‌شده درصد مصالح از دست رفته مطابق استاندارد ASTM C131، از رابطه ۳-۱۲ قابل محاسبه است.

$$L = \left[\frac{W-D}{W} \right] 100 \quad ۳-۱۲$$



شکل ۳-۹-ب



شکل ۳-۹-الف

شکل ۳-۹-الف- گلوله فلزی جهت آزمایش لس‌انجلس، ب- دستگاه دوران جهت آزمایش لس‌انجلس

۳-۲-۴- الیاف

در این پژوهش الیاف مصرفی شامل دو نوع الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بوده که مشخصات فیزیکی و مکانیکی آن در جدول ۳-۵ نشان داده شده است. الیاف فولادی مصرفی از نوع دو سر قلاب و الیاف

پلی پروپیلن از نوع ساده است. شکل ۳-۱۰-الف و ب، به ترتیب الیاف فولادی و پلی پروپیلن را نشان می دهد.



شکل ۳-۱۰-ب



شکل ۳-۱۰-الف

شکل ۳-۱۰-الف-الیاف فولادی، ب-الیاف پلی پروپیلن

جدول ۵-۰- مشخصات مکانیکی الیاف پلی پروپیلن

الیاف فولادی	الیاف پلی پروپیلن	مشخصات
۷.۸۵	۰.۹۱	چگالی (g/cm ³)
۳۵	۱۸	طول (mm)
۰.۸	۰.۲	قطر (mm)
۴۳.۷۵	۹۰	نسبت طول به قطر (L/D)
۲۱۰۰	۲۰	تنش تسلیم (MPa)
۲۰۵	۱۱۴۰	مدول الاستیسیته (MPa)

۳-۲-۵- شرایط ساخت بتن و عمل آوری نمونه ها

در این پژوهش، برای عمل آوری نمونه های بتنی از حوضچه آب بدون سختی استفاده گردید و همچنین برای ساخت نمونه از وسایلی همچون ترازو با دقت ۰.۵ گرم، میکسر کج شونده با حجم ۵۰ لیتر، تخماق، بیلچه، سطل و ... استفاده شده است. جزئیات حوضچه آب و وسایل ساخت بتن در شکل ۱۱-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۱-ب



شکل ۳-۱۱-الف

شکل ۳-۱۱-الف- جزئیات فرآیند ساخت و اختلاط بتن، ب- حوضچه عمل‌آوری آب

۳-۲-۵-۱- ساخت نمونه‌های بتنی بدون الیاف

برای ساخت بتن بدون الیاف، بدین منظور ابتدا مصالح درشت‌دانه و ریزدانه را در میکسر اضافه کرده و به مدت دو دقیقه مخلوط می‌شود، سپس سیمان را به مخلوط سنگدانه اضافه کرده و به مدت دو دقیقه به صورت خشک مخلوط می‌شود، آب را به آرامی به مخلوط اضافه کرده و عمل اختلاط به مدت ۸ دقیقه درون میکسر صورت می‌گیرد.

۳-۲-۵-۲- ساخت نمونه‌های بتنی حاوی الیاف

برای ساخت نمونه‌های بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی، ابتدا مصالح درشت‌دانه و ریزدانه را درون میکسر استوانه‌ای ریخته و به مدت دو دقیقه مخلوط می‌شود. سپس سیمان را به آرامی به مخلوط اضافه نموده و به مدت دو الی سه دقیقه مخلوط می‌شود. مقدار آب موجود را به دو قسمت تقسیم کرده و نیمه اول آن را به آرامی به مخلوط اضافه می‌کنیم و به مدت یک دقیقه مخلوط می‌گردد. سپس الیاف پلی‌پروپیلن و الیاف فولادی را به آرامی (به صورت دستی) اضافه کرده و نیمه دوم آب را بلافاصله به مخلوط اضافه می‌شود، اختلاط به مدت سه تا پنج دقیقه صورت می‌گیرد.

با تغییر زاویه دوران محور میکسر، سعی بر آن شد که بتن یکنواخت ساخته شود. بعد از تخلیه بتن ساخته شده، ابتدا با بیلچه بتن تازه را زیر و رو کرده، سپس آزمایش اسلامپ صورت می‌گیرد، مقدار

اسلامپ بتن تازه برابر با ۱۵۰ میلی‌متر است. دمای بتن تازه بین ۲۶ تا ۲۸ درجه سلسیوس و دمای آب عمل‌آوری ۲۵ تا ۲۸ درجه سلسیوس است. برای ساخت نمونه‌های فشاری و کششی از قالب‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۰۰ * ۲۰۰ میلی‌متر و برای ساخت نمونه‌های خمشی از قالب‌هایی با ابعاد ۱۰۰ * ۱۰۰ میلی‌متر استفاده گردید. برای ایجاد شکاف در نمونه‌های خمشی از تیغه شیاری با ارتفاع ۳۰ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر استفاده شد.

قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای را هریک در سه لایه بتن ریزی و هرلایه، ۲۵ ضربه با میله مدور کوبیده می‌شود، سپس در هرلایه با چکش لاستیکی به بدنه قالب ضربه زده می‌شود تا حباب هوای موجود در بتن خارج گردد. بعد از اتمام عملیات تراکم و قالب‌ریزی، سطح نمونه‌های بتنی را برای جلوگیری از تبخیر آب نمونه‌های بتنی، قالب‌ها با گونی مرطوب پوشانده می‌شود، نمونه‌های بتنی بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج می‌شود و در حوضچه عمل‌آوری آب قرار می‌گیرد.

۳-۲-۶- طرح اختلاط

در این پژوهش، طرح اختلاط بتن به روش وزنی و بر اساس طرح ملی بتن ایران ساخته شد، بتن شاهد اولیه به طور کامل با مصالح طبیعی ساخته می‌شود، و پس از تعدیل طرح اختلاط طبق شرایط کارگاهی، طرح اختلاط نهایی حاصل می‌گردد. همچنین میزان آب آزاد در طرح اختلاط برابر ۱۷۲ کیلوگرم بر مترمکعب است. طرح اختلاط مندرج در جدول ۳-۶ به عنوان طرح اختلاط نهایی بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی، مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش سنگدانه‌های بازیافتی (درشت‌دانه) با نسبت ۰، ۲۵ و ۵۰٪ (نسبت وزنی)، جایگزین سنگدانه طبیعی (درشت‌دانه) شده است؛ از ماسه بازیافتی جهت جایگزینی سنگدانه بازیافتی استفاده نگردید.

جدول ۳-۶- طرح اختلاط بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

طرح اختلاط	آب (Kg)	سیمان (kg)	w/c	ریزدانه (kg)	درشت دانه (kg)	الیاف PP (Kg)	الیاف فولادی (kg)
R0-P0-S0	179.89	400	0.43	698.64	468.45	0	0
R0-P4-S0	179.89	400	0.43	698.64	468.45	3.64	0
R0-P4-S0.5	179.89	400	0.43	698.64	468.45	3.64	39.25
R0-P4-S1	179.89	400	0.43	698.64	468.45	3.64	78.5
R25-P0-S0	189.2	400	0.43	690	460	0	0
R25-P4-S0	189.2	400	0.43	690	460	3.64	0
R25-P4-S0.5	189.2	400	0.43	690	460	3.64	39.25
R25-P4-S1	189.2	400	0.43	690	460	3.64	78.5
R50-P0-S0	193.1	400	0.43	690	456	0	0
R50-P4-S0	193.1	400	0.43	690	456	3.64	0
R50-P4-S0.5	193.1	400	0.43	690	456	3.64	39.2
R50-P4-S1	193.1	400	0.43	690	456	3.64	78.50

مشخصات طرح اختلاط بتن شاهد (R0)، بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی (R25) و بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی (R50) مشخص شده است. در این مقاله R سنگدانه بازیافتی، S الیاف فولادی، P الیاف پلی پروپیلن است. بطور مثال نماد R50-P4-S1، نشان دهنده بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی، ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۱٪ الیاف فولادی است.

باتوجه به درصدهای بهینه الیاف فولادی و پلی پروپیلن [۷۶، ۷۷] در این پژوهش، با استفاده از نسبت‌های ۰، ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی در بتن و همچنین افزودن و ترکیب الیاف‌های فولادی و پلی پروپیلن بترتیب با نسبت‌های ۰٪، ۰.۵٪، ۱٪ و ۰.۴٪ به بررسی رفتار فشاری، شکافت کششی و خمشی نمونه‌های بتنی پرداخته شده است.

۳-۲-۷- آزمایش های بتن

در هر آزمایش سه نمونه بتنی ساخته شده و نتایج حاصل از میانگین هر سه نمونه گزارش شده است. همچنین نمونه های بتنی پس از خارج کردن از حوضچه عمل آوری، به مدت یک ساعت در هوای آزاد قرار گرفته است و سپس مورد آزمایش قرار گرفته است.

۳-۲-۷-۱- آزمایش وزن مخصوص بتن تازه

معرفی

وزن مخصوص بتن تازه بعنوان یکی از پارامترهای مهم، برای کنترل صحت طرح اختلاط و یکنواختی بتن مورد بررسی قرار می گیرد. در این آزمایش، نحوه تعیین وزن مخصوص بتن تازه شرح داده می شود.

وسایل مورد نیاز

- ترازو با دقت ۰.۱ گرم
- میله مدور با طول حداقل ۶۰ سانتی متر و قطر ۱.۶ سانتی متر
- قالب استوانه ای با ارتفاع ۳۰ سانتی متر و قطر ۱۵ سانتی متر

روش انجام آزمایش

ابتدا وزن قالب استوانه ای را اندازه گیری کرده و ثبت می کنیم، سپس بتن تازه را در سه لایه ریخته و هر لایه با میله مدور (تخماق) ۲۵ ضربه کوبیده می شود، سپس با چکش لاستیکی برای خروج حباب هوای بتن تازه به ۴ وجه قالب ضربه می زنیم، بعد از صاف کردن و پرداختن سطح نمونه، قالب استوانه ای مملو از بتن تازه را وزن کرده و از تفاضل وزن استوانه حاوی بتن و وزن قالب، وزن بتن تازه بدست می آید، سپس از تقسیم وزن بتن تازه به حجم ظرف، وزن مخصوص بتن تازه بدست می آید. با توجه به اینکه وزن مخصوص بتن های الیافی تا ۲٪ حجمی مشابه وزن مخصوص بتن معمولی است [۷۸]. مطابق با استاندارد ASTM C138، برای محاسبه وزن مخصوص بتن تازه می توان از رابطه ۳-۱۳ استفاده کرد

[۷۹]. T وزن مخصوص، M جرم اندازه‌گیری شده بتن و V حجم اندازه‌گیری شده نمونه بتنی الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی است.

$$T = \frac{M}{V} \quad ۱۳-۳$$

۳-۲-۷-۲- آزمایش اسلامپ

معرفی

این آزمایش برای تعیین میزان روانی و کارایی بتن تازه با بیشینه بعد سنگدانه ۳۷ میلی‌متر انجام می‌شود.

وسایل مورد نیاز

- مخروط ناقص اسلامپ
- میله مدور تراکم
- بیلچه و ماله
- خط‌کش

روش انجام آزمایش

ابتدا سطح داخلی مخروط استوانه اسلامپ را مرطوب کرده، پس از قرار گرفتن مخروط اسلامپ بر سطح صاف و نفوذناپذیر، بتن تازه را در سه لایه ریخته و هر لایه با ۲۵ ضربه توسط میله مدور کوبیده می‌شود. بعد از پرشدن مخروط و پرداختن سطح قالب در مدت حدوداً ۵ ثانیه به آرامی به صورت قائم به سمت بالا کشیده شود، سپس مطابق شکل ۳-۱۲ ارتفاع اسلامپ را اندازه‌گیری کرد.



شکل ۳-۱۲- جزییات آزمایش اسلامپ بتن شاهد

۳-۲-۷-۳- آزمایش مقاومت فشاری

معرفی

یکی از مرسوم‌ترین و مهم‌ترین معیارها برای بررسی کیفیت بتن، آزمایش مقاومت فشاری است. همچنین عواملی همچون نسبت آب به سیمان، مشخصات و کیفیت سنگدانه، کیفیت سیمان و... در افزایش مقاومت فشاری بتن تاثیر بسزایی دارد.

وسایل مورد نیاز

مطابق با استاندارد ASTM C39 برای آزمایش مقاومت فشاری بتن از دستگاه جک فشاری استفاده می‌شود، دستگاه جک فشاری باید طوری انتخاب شود که محدوده اندازه‌گیری نیرو از ده برابر بار نهایی لازم جهت شکستن نمونه‌ها کمتر باشد، همچنین دقت اندازه‌گیری دستگاه باید به گونه‌ای باشد که بار نهایی لازم جهت شکستن نمونه‌ها با تقریب ۱٪ اندازه‌گیری شود، لازم به ذکر است که رواداری دقت اندازه‌گیری دستگاه تا ۳٪ باشد [۸۰]. سطح صفحات بارگذاری باید بزرگتر یا مساوی سطح مقطع نمونه‌ها باشد. همچنین یکی از صفحات بارگذاری باید دارای اتصال کروی باشد، تا در اثر اعمال بار، تغییرشکل صفحه مذکور از حد مجاز عبور نکند. جزییات دستگاه جک فشاری در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است.

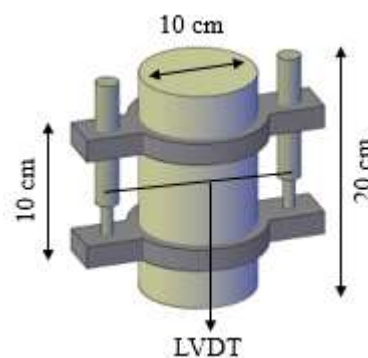


شکل ۳-۱۳- جزئیات دستگاه جک فشاری

روش انجام آزمایش

ابتدا باید سطح صفحات بارگذاری را کاملاً تمیز شود، سپس نمونه‌ها را در مرکز صفحات بارگذاری به گونه‌ای جاگذاری کرد تا نمونه‌ها با سطح صفحات بارگذاری تماس کامل داشته باشد، همچنین مرکز صفحه بارگذاری دستگاه نباید بیش از $1/100$ بعد نمونه‌ها اختلاف داشته باشد.

در این پژوهش، سرعت بارگذاری دستگاه حدود 0.24 مگاپاسکال بر ثانیه است، جزئیات ابعاد نمونه استوانه فشاری در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۴- جزئیات ابعاد نمونه استوانه فشاری

مقاومت فشاری بتن از رابطه ۳-۱۴ تعیین می‌شود، همچنین مقاومت فشاری دستگاه بایستی با دقت

0.5 مگاپاسکال اندازه‌گیری شود.

$$f_c = \frac{F}{A}$$

۱۴-۳

مقاومت فشاری بتن بر حسب کیلوگرم بر سانتی متر مربع

F : بیشینه نیروی گسیختگی بر حسب کیلوگرم

A : سطح باربر بر حسب سانتی متر مربع

۳-۲-۷-۴- بررسی مدول الاستیسیته

معرفی

مدول الاستیسیته معیاری برای صلبیت مصالح است، مقدار مدول الاستیسیته باتوجه به نوع مصالح مصرفی مورد بررسی قرار می گیرد. این مدول رابطه بین تنش و کرنش مصالح مصرفی را نشان می دهد.

وسایل مورد نیاز

مطابق ASTM C469، جک فشاری با توانایی اعمال نیرو 250 ± 50 کیلوپاسکال بر ثانیه، دو تغییرمکان سنج با دقت 0.001 میلی متر جهت محاسبه تغییرمکان، همچنین نصب و تراز کردن ابزار ثابت جهت قرار گرفتن تغییرمکان سنج بر روی نمونه بتنی، شکل ۳-۱۵ نمایانگر قطعات مذکور بر نمونه بتنی است [۸۱].



شکل ۳-۱۵- برپایش تغییرمکان سنجها جهت محاسبه مدول الاستیسیته

روش انجام آزمایش

ابتدا ابزار ثابت را بر روی نمونه‌های بتنی نصب و سپس تراز می‌شود، فاصله خط اندازه‌گیری (شکل ۱۵-۳- A) نباید کمتر از ۳ برابر بیشینه سائز سنگدانه موجود در بتن و نباید بیشتر از دو سوم (۲/۳) ارتفاع نمونه استوانه‌ای باشد.

فاصله پیشنهادی ASTM C469 برابر با نصف ارتفاع نمونه استوانه‌ای است. بعد از جاگذاری تغییرمکان سنج بر نمونه بتنی، نمونه‌ها به صورت نیرو-کنترل تحت اثر نیروی ثابت و پیوسته (بدون اعمال ضربه) 50 ± 250 کیلوپاسکال بر ثانیه یا بصورت تغییرمکان-کنترل با نرخ سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه، تحت نیروی فشاری قرار داده می‌شود. تغییرمکان‌های اندازه‌گیری شده توسط دستگاه ثبت تغییرمکان^{۱۳}، ذخیره می‌شود، در شکل ۳-۱۶ و ۳-۱۷، دستگاه ثبت تغییرمکان و جزئیات تغییرمکان-سنج‌ها نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۶- جزئیات دستگاه ثبت تغییرمکان



شکل ۳-۱۷- تغییر مکان سنج با دقت ۰.۰۰۵ میلی متر جهت محاسبه مدول الاستیسیته

مطابق با استاندارد ASTM C469 بیشینه بار برای محاسبه مدول الاستیسیته برابر با ۴۰٪ بار نهایی اعمال شده بر نمونه بتنی است. مطابق ASTM C469، مدول الاستیسیته از رابطه ۳-۱۵ قابل محاسبه است [۸۱]. (S_2 : تنش متناظر با ۴۰٪ بار نهایی، S_1 : تنش اولیه، ϵ_2 : کرنش متناظر با تنش S_2)

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.00005} \quad ۳-۱۵$$

۳-۲-۷-۵- آزمایش مقاومت کششی

معرفی

این آزمایش با نام مقاومت کششی بتن به روش دو نیم کردن یا آزمایش کشش برزیلی شناخته می شود. در این آزمایش با اعمال نیروی فشاری قطری بر روی نمونه استوانه ای که به صورت افقی بین صفحات بارگذاری دستگاه قرار گرفته است، مقاومت کششی نمونه تعیین می گردد.

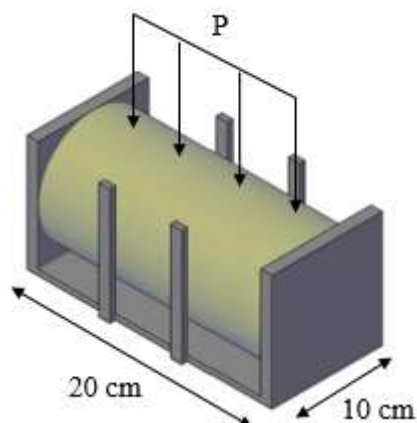
وسایل مورد نیاز

برای آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم باید از دستگاه جک فشاری استاندارد مطابق استاندارد ASTM C496 استفاده کرد، مشروط بر آن که ظرفیت دستگاه، سرعت بارگذاری لازم را تامین کند. دو نوار تسمه تکیه‌گاهی از جنس تخته چندلا با ضخامت ۳.۲ میلی‌متر، عرض ۲۵ میلی‌متر و طولی بیشتر یا مساوی نمونه استوانه‌ای استفاده می‌شود.

مطابق شکل ۳-۱۴، 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 [۸۲].

روش انجام آزمایش

مطابق شکل ۳-۱۵، با استفاده از یک وسیله‌ی مناسب در هر انتهای نمونه خطوط قطری رسم می‌شود طوری که خطوط در صفحه‌های که از محور نمونه عبور می‌کند رسم می‌گردند. سه قطر که در نزدیکی دو انتها و وسط آزمونه، در امتداد صفحه‌ی دو قطر نشانه‌گذاری شده در دو انتها، اندازه‌گیری شده‌اند، تعیین می‌گردد. با دوبار اندازه‌گیری و با دقت ۰.۲۵ میلی‌متر طول آزمونه در صفحه‌های نشانه‌گذاری شده در دو انتها و میانگین‌گیری از آنها، طول آزمونه محاسبه می‌گردد. مرکز یکی از نوارهای چوبی چند لایه بر مرکز رکاب پایین منطبق می‌شود، آزمونه روی نوار چوبی چند لایه طوری قرار می‌گیرد که خطوط قطری در انتهای آزمونه در امتداد عمود بر محور نوار چوبی و در وسط نوار چوبی باشند. وسط نوار چوبی دوم نیز با توجه به خطوط قطری دو انتهای آزمونه روی آن قرار می‌گیرد [۸۲].



شکل ۳-۱۸- جزییات آزمایش مقاومت شکافت کششی

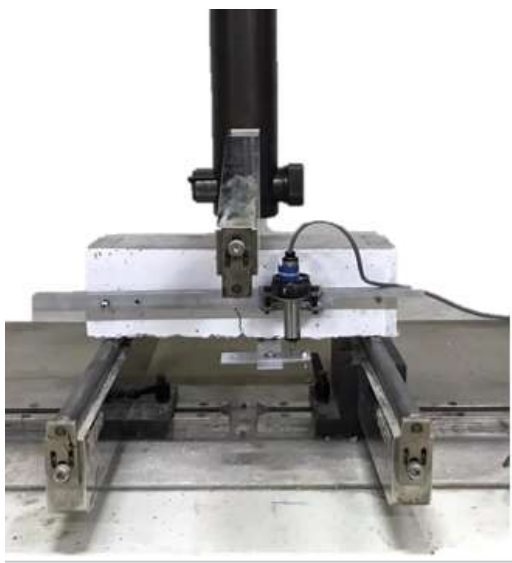
۳-۲-۷-۶- آزمایش مقاومت خمشی

معرفی

آزمایش مقاومت خمشی بتن به صورت غیر مستقیم مقاومت کششی بتن را ارزیابی می کند. این آزمایش هم به صورت سه نقطه‌ای و هم بصورت چهار نقطه‌ای انجام می گیرد. مطابق با ASTM C1609، طول نمونه‌های خمشی باید پنجاه میلی‌متر بیشتر از سه برابر ارتفاع نمونه خمشی بوده یا حداقل برابر با ۳۵۰ میلی‌متر باشد. همچنین ارتفاع و عرض نمونه‌های خمشی باید بیش از سه برابر بیشینه الیاف مصرفی باشد [۸۳].

وسایل مورد نیاز

مطابق استاندارد ASTM C1609، دستگاه آزمایش مقاومت خمشی باید دارای پمپ روغن هیدرولیک با ظرفیت مناسب بوده و توانایی بارگیری بصورت یکنواخت را دارا باشد. دستگاه آزمایش مقاومت خمشی دارای پمپ هیدرولیک و نمونه بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی جهت آزمایش خمشی سه نقطه‌ای در شکل ۳-۱۹، ۲۰ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۹- ب



شکل ۳-۱۹- الف

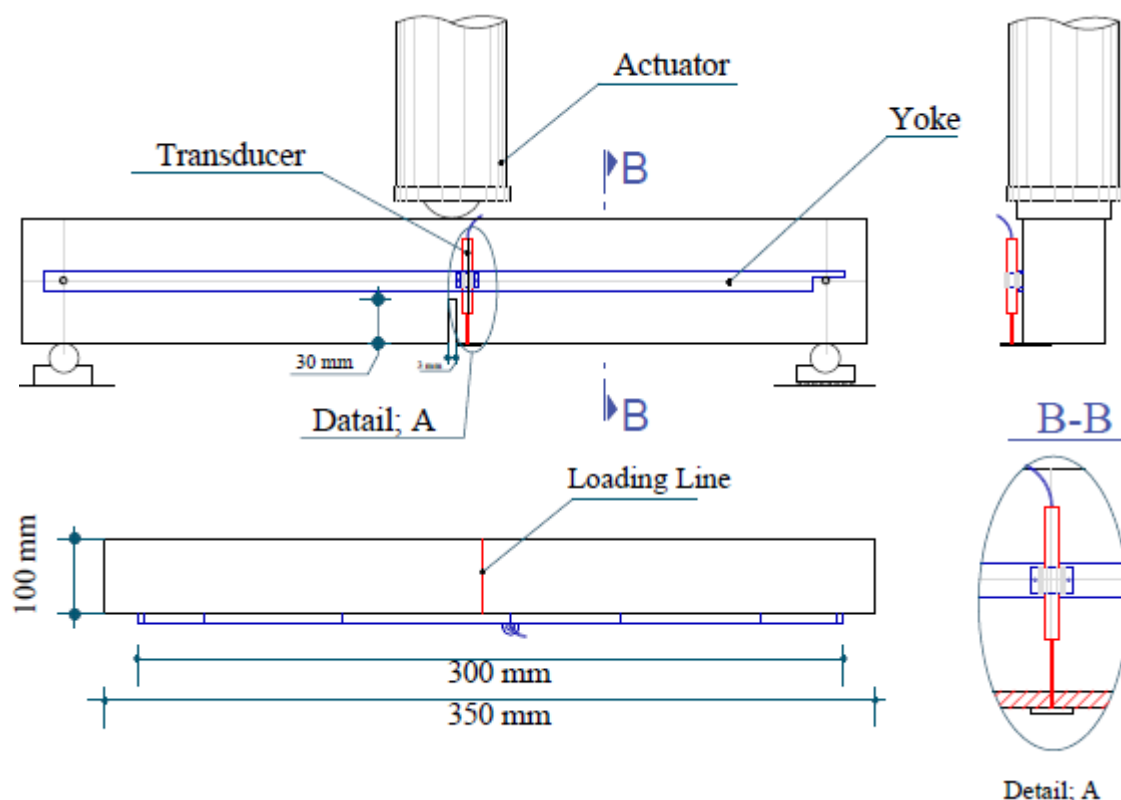
شکل ۳-۱۹- الف- جزئیات دستگاه خمش سه نقطه ای، ب- جزئیات نمونه خمشی و تغییرمکان سنج ها



شکل ۳-۲۰- جزئیات تغییرمکان سنج و دستگاه ثبت تغییرمکان

روش انجام آزمایش

ابتدا فاصله تکیه‌گاه‌ها را به طوری که نیروی متمرکز در مرکز تیر اعمال شود، به اندازه ۳۰ سانتی‌متر (طول موثر تیر) از یکدیگر فاصله می‌دهیم. با توجه به اینکه تیرهای خمشی دارای شکافی در مرکز تیر، با ارتفاع ۳۰ و ضخامت ۳ میلی‌متر است، لذا برای محاسبه مقدار تغییرمکان، گیره نگهدارنده مبدل حرکتی تغییرمکان سنج با مقدار کمی فاصله از مرکز تیر قرار گرفته است. سپس با اعمال نیرو توسط جک هیدرولیکی منحنی‌های نیرو-تغییرمکان قابل ترسیم است [۸۳]. جزئیات نمونه‌های شیاردار در شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۱- جزئیات شکل شماتیک تیرهای شیاردار

۳-۲-۷-۶-۱- محاسبه انرژی شکست

مکانسیم خرابی بتن به دلیل عیب های ذاتی و ماهیت رفتاری آن دارای فرایندی نسبتاً پیچیده در تشکیل و گسترش ترک است [۸۴]. ترک ها در شرایط مختلف تشکیل شده و گسترش می یابند. استفاده از مکانیک شکست راه حلی مناسب برای درک بهتر نحوه شکل گیری و انتشار ترک است [۸۵]. بتن ها به دلیل مواردی از قبیل شرایط عمل آوری، روش تولید، تخلخل، نسبت آب به سیمان، وجود افزودنی، حداکثر اندازه سنگدانه و غیره دارای ویژگی های متفاوتی هستند و به همین دلیل میزان بار وارده و زمان مورد نیاز برای گسترش ترک در آنها متفاوت است. مشخصه های مختلفی در قالب مکانیک شکست قابل بررسی است. از جمله مهمترین آنها میتوان به انرژی شکست و طول مشخصه اشاره نمود [۸۶]. به منظور محاسبه انرژی شکست نمونه های بتنی می توان از آزمایش های زیر استفاده کرد:

- خمش سه نقطه ای (3PBT)

- خمش چهار نقطه‌ای (4PBT).

- کشش تک محوره (UTT).

- کشش فشرده (CTT).

- کشش فشرده اصلاح شده (MCTT) ،

- تقسیم قوه (WST)

اشاره نمود. در روش آزمایش خمش سه نقطه‌ای که نسبت به روش‌های آزمایشگاهی دیگر متداول تر است [۸۷]. مدل‌های مختلفی جهت محاسبه انرژی شکست در آزمایش خمش سه نقطه‌ای استفاده می‌شود که عبارت است از:

- روش پترسون

- روش هیلبرگ

- روش پلانز

۳-۲-۷-۶-۱-۱- روش پترسون

پترسون نشان داد که مقدار انرژی مورد نیاز در واحد سطح ترک و اصول اندازه گیری GF هنگامی صحیح است که مسیر انتشار ترک صحیح باشد و انرژی مصرف شده توسط انتشار ترک در مسیر صحیح باشد. برای به دست آوردن مقدار مناسب انرژی شکست با استفاده از آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر روی تیرهای شیاردار، مقدار انرژی ورودی از طریق نیروی اعمال شده و وزن تیر باید برابر با مقدار انرژی مصرف شده توسط انتشار ترک باشد. برای محاسبه انرژی شکست در آزمایش خمش سه نقطه‌ای، انرژی مصرف شده برابر با نیروی اعمال شده و وزن تیر است. هنگامی که طول تیر، دو برابر طول بین دو تکیه‌گاه باشد می‌توان وزن تیر را نادیده گرفت [۸۸].

از مشکلات استفاده از تیرها، جهت محاسبه انرژی شکست می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- تیرهای بلند می‌توانند باعث ایجاد مشکلاتی در عملکرد آزمایش شوند؛

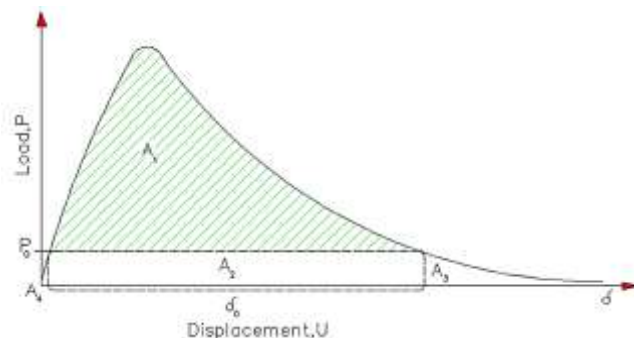
- ایجاد خطا در محاسبه انرژی شکست در انتهای منحنی‌هایی که طول آنها به بی‌نهایت نزدیک می‌شود.

با این حال ، با در نظر گرفتن تأثیر وزن می‌توان مسئله طول بی‌نهایت را از بین برد. در تیرهای فاقد وزن ، شکستگی علاوه بر نیروی بارگیری ، به دلیل گشتاور میانه فاصله تیر نیز ایجاد می‌شود. انرژی شکست مطابق روابط ۱۶-۳ و ۱۷-۳ و شکل ۲۲-۳ است [۸۸].

$$\frac{P_0 l}{4} = \frac{mgl^2}{8} \rightarrow P_0 = \frac{mgl}{2} = \frac{Mg}{2} \quad ۱۶-۳$$

$$G_f = \frac{A_1 + Mg\delta_0}{b(d-a)} \quad ۱۷-۳$$

P_0 مساحت سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی، m وزن تیر بین دو تکیه‌گاه، g گرانش زمین برابر با ۱۰ متر بر مجذورثانیه، δ_0 بیشینه جابجایی متناظر با نیروی P_1 ، G_f انرژی شکست، b عرض تیر، d ارتفاع تیر و a عمق ترک است.



شکل ۲۲-۳- منحنی نیرو-تغییر مکان (روش پترسون) [۸۸]

۲-۳-۷-۶-۱-۲-روش هیلبرگ

برای فلزات و بسیاری مصالح دیگر، خطر خرابی ناشی از رشد ترک در ادبیات فنی به عنوان "مکانیک شکست" شناخته شده است. مکانیک شکست می‌تواند مناسب‌ترین روش برای تجزیه و تحلیل سختی

کششی بتن باشد [۸۹]. هیلبرگ جهت محاسبه انرژی شکست در آزمایش خمشی سه نقطه‌ای الزاماتی را تعیین می‌کند:

- عمق و عرض ناحیه شکستگی نباید کمتر ۳ برابر حداکثر اندازه سنگدانه باشد.
- اثر جذب انرژی از ناحیه خارج از ناحیه شکستگی باید به حداقل برسد.

انرژی شکست پیشنهادی هیلبرگ مطابق با رابطه ۱۸-۳ و ۱۹-۳ و ۲۰-۳ و شکل ۲۳-۳ است.

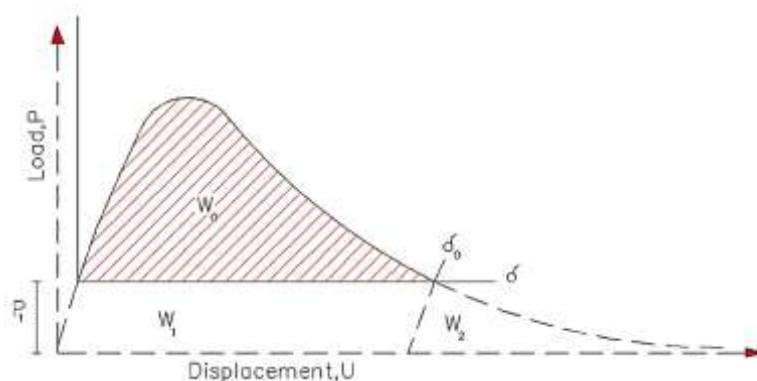
$$w = w_0 + w_1 + w_2 \quad 18-3$$

$$w_1 = P_1 \delta_0 \rightarrow w_1 = w_2$$

$$w = w_0 + 2P_1 \delta_0 \quad 19-3$$

$$G_f = \frac{w}{b(d-a)} \quad 20-3$$

w مساحت سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی، m وزن تیر بین دو تکیه‌گاه، g گرانش زمین برابر با ۱۰ متر بر مجذورثانیه، δ_0 بیشینه جابجایی متناظر با نیروی P_1 ، G_f انرژی شکست، b عرض تیر، d ارتفاع تیر و a عمق ترک است. طبق نظر هیلبرگ، عمق ترک نباید از یک سوم عمق نمونه کمتر باشد. به همین ترتیب عرض ترک ۱۰ میلی متر و عمق ترک حداکثر برابر با نصف ارتفاع نمونه است [۹۰].



شکل ۲۳-۳- منحنی نیرو- تغییر مکان (روش هیلبرگ) [۸۹]

۳-۲-۷-۶-۱-۳- روش پلانز

در سال ۱۹۹۲، گینه، پلانانس و الیسس اظهار داشتند که مهمترین عوامل خطای اندازه گیری

انرژی شکست عبارتند از:

- استفاده از تکیه گاه های غلتکی به جای تکیه گاه های ثابت برای کاهش اصطکاک؛
- افزایش ۵۰٪ انرژی شکست با سه برابر شدن اندازه تیر؛
- تأثیر وزن بر انرژی شکست و انتهای منحنی بار-جابجایی [۹۱].

آنها همچنین اظهار داشتند که در روشهای حذف گشتاور وسط تیر، نیروی باقیمانده P'_0 هنوز

بر انتهای منحنی تأثیر دارد. در این رابطه، هنگامی که نقطه B به عنوان نقطه پایان بارگیری در

نظر گرفته می شود [۹۱]، مطابق شکل ۳-۲۴، مساحت سطح زیر نمودار از طریق رابطه ۳-۲۱ و

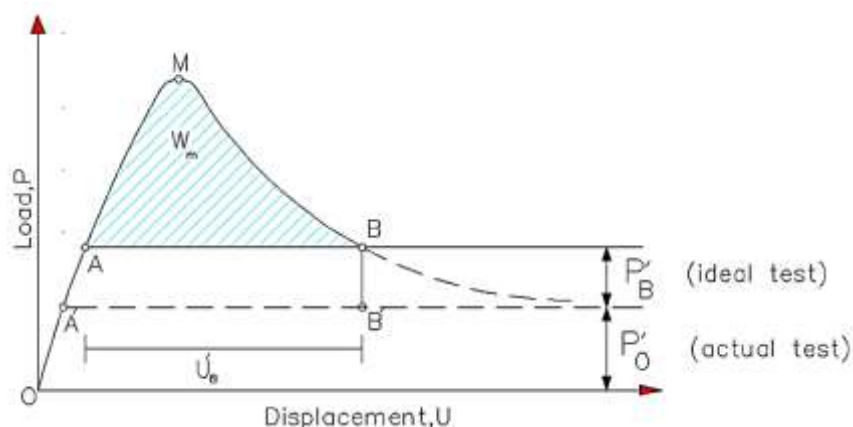
۳-۲۲ محاسبه می شود:

$$W_f = w_m + 2 \frac{A}{U_B - U_A} \quad ۲۱-۳$$

$$P - P_B = A \left[\frac{1}{(U - U_A)^2} - \frac{1}{(U_B - U_A)^2} \right] \quad ۲۲-۳$$

W_m مساحت سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی AMBA، A یک ثابت مشتق شده از رابطه ۳-۲۲

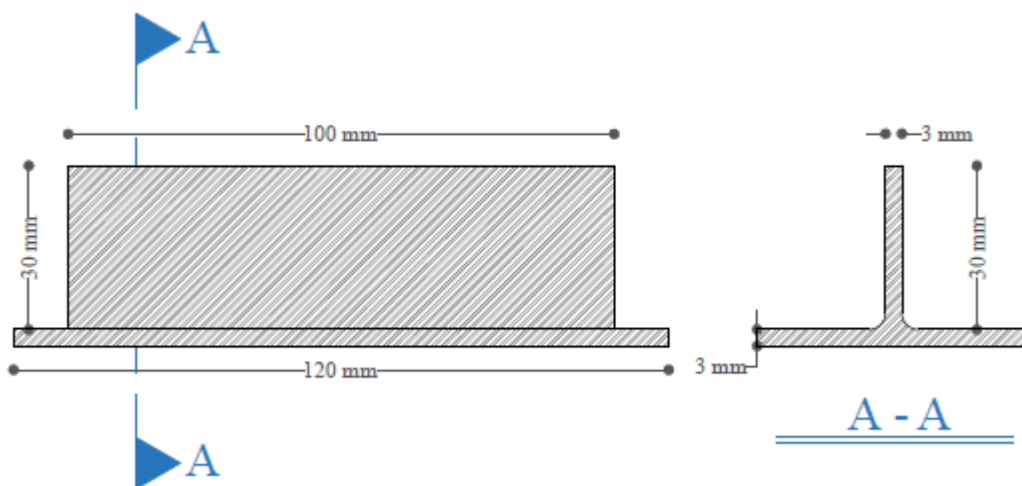
پیشنهاد شده توسط الیسس، U_A و U_B جابجایی متناظر با نقطه A و B است.



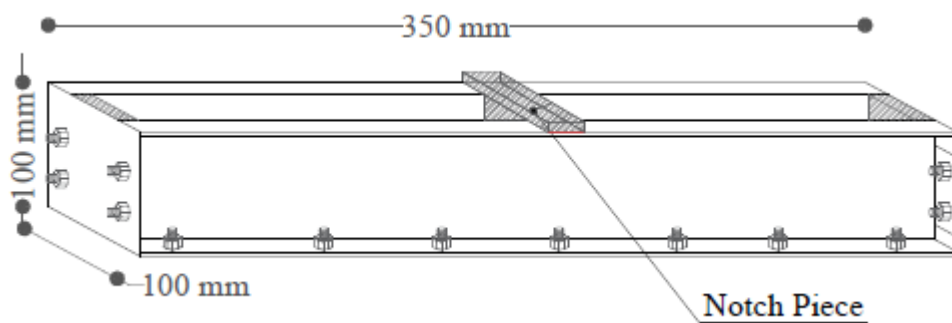
شکل ۳-۲۴- منحنی نیرو-تغییر مکان (روش پلانز) [۹۱]

۳-۲-۷-۶-۳- قطعه شیاری

قطعه شیاری از جنس آهن، با ارتفاع ۳۰، عرض ۱۰۰ و ضخامت ۳ میلی‌متر برای ایجاد شکاف در قسمت تحتانی تیر خمشی در نظر گرفته شد. جزئیات ابعاد تیغه و قالب‌های فلزی ساخت نمونه‌های خمشی در شکل ۳-۲۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲۵- الف



شکل ۳-۲۵- ب

شکل ۳-۲۵- الف- جزئیات ابعاد تیغه شیاری، ب- جزئیات ابعاد قالب جهت ساخت نمونه خمشی

فصل چهارم

بررسی و تحلیل نتایج

آزمایشگاهی

۴- فصل چهارم

۴-۱- مقدمه

در این فصل ابتدا نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بر سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی مانند درصد رطوبت، درصد جذب آب، درصد سایش مورد بررسی قرار می‌گیرد؛ سپس به بررسی نتایج آزمایش‌های فشاری، کشش غیرمستقیم، خمش سه نقطه‌ای پرداخته و پارامترهایی نظیر مقاومت فشاری، مدول-الاستیسیته، مقاومت شکافت کششی، بیشینه تنش کششی ناشی از خمش و انرژی شکست مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲- نتایج آزمایش‌های سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

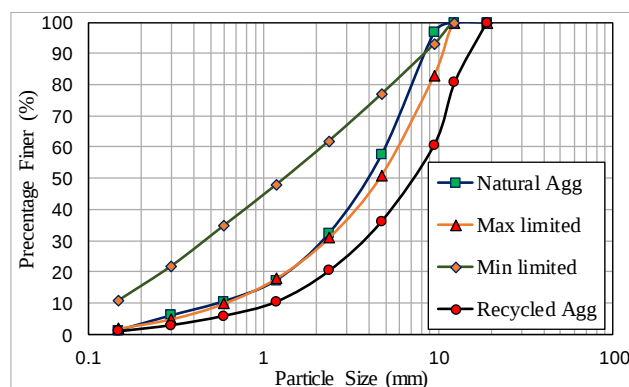
این آزمایش نحوه توزیع اندازه دانه‌ها در مصالح ریزدانه و درشت دانه را به کمک الک تعیین می‌کند. مطابق شکل ۴-۲ و جدول ۴-۱، منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های طبیعی در داخل محدوده و منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های بازیافتی خارج از محدوده استاندارد ASTM C33 است. در این پژوهش، مدول نرمی ماسه مصرفی ۳.۹ است، باتوجه به اینکه مدول نرمی ماسه مطابق استاندارد بین ۲.۳ تا ۳.۱ قرار دارد. لذا ماسه مصرفی دارای بافتی خشن بوده و به دنبال آن نمونه‌های بتنی ساخته‌شده نیز بافت درشت و زبری دارند [۹۲]. جزئیات دانه‌بندی سنگدانه طبیعی در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱- دانه بندی مصالح طبیعی

جدول ۴-۱- جزئیات دانه بندی سنگدانه مصرفی

سنگدانه	نمره الک							
	۰.۱۵	۰.۳	۰.۶	۱.۱۹	۲.۳۸	۴.۷۵	۹.۵	۱۲.۵
سنگدانه مصرفی	۱.۲۸	۶.۰۵	۱۰.۵۹	۱۷.۳۴	۳۲.۴۳	۵۷.۶۶	۹۶.۸۴	۱۰۰
محدوده درشت دانه	۲	۵	۱۰	۱۸	۳۱	۵۱	۸۳	۱۰۰
محدوده ریزدانه	۱۱	۲۲	۳۵	۴۸	۶۲	۷۷	۹۳	۱۰۰
سنگدانه بازیافتی	۱	۳	۶	۱۰.۴۹	۲۰.۴	۳۶.۲۳	۶۰.۷۴	۸۱.۰۴



شکل ۴-۲- منحنی دانه بندی سنگدانه طبیعی و بازیافتی

۴-۳- نتایج آزمایش درصد رطوبت و جذب آب سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

به طور کلی درصد جذب آب سنگدانه‌های بازیافتی، از سنگدانه‌های طبیعی بیشتر است. علت این امر، جذب آب بالای ملات چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی است. همانطور که در جدول ۴-۲ نشان داده شده است، درصد جذب آب شن بازیافتی، طبیعی و ماسه طبیعی به ترتیب ۴.۵٪، ۰.۹۵٪ و ۶.۷۶٪ است.

جدول ۴-۲- مقادیر درصد جذب آب سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

شرح	ماسه طبیعی	شن طبیعی	شن بازیافتی
جرم مصالح خشک در هوا (Kg)	۱.۱۱۰	۵.۲۱۹	۴.۵۱۹
وزن مخصوص مصالح خشک (Kg/m^3)	۱۶۸۱.۱۱	۱۵۴۶.۳۷	۱۳۳۸.۹۸
وزن مخصوص مصالح اشباع با سطح خشک (Kg/m^3)	۱۷۹۴.۷۵	۱۵۶۱.۰۶	۱۴۰۰
درصد جذب آب	۳.۳٪	۰.۹۵٪	۴.۵٪

به طور کلی برای محاسبه دقیق آب آزاد در طرح اختلاط، محاسبه درصد رطوبت سنگدانه‌هایی که در شرایط متغیر جوی قرار گرفته‌اند، ضروری است. درصد رطوبت سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی در جدول ۴-۳، نشان داده شده است.

جدول ۴-۳- مقادیر درصد رطوبت سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

سنگدانه	وزن خالص مرطوب	وزن خالص خشک	درصد رطوبت
ماسه طبیعی	۲.۰۹۷	۱.۹۸۱	۵.۸۵٪
شن طبیعی	۴.۱۹۴	۴.۱۶۸	۰.۶۲٪
شن بازیافتی	۴.۱۰۰	۴.۱۰۰	۰٪

۴-۴- نتایج آزمایش درصد سایش

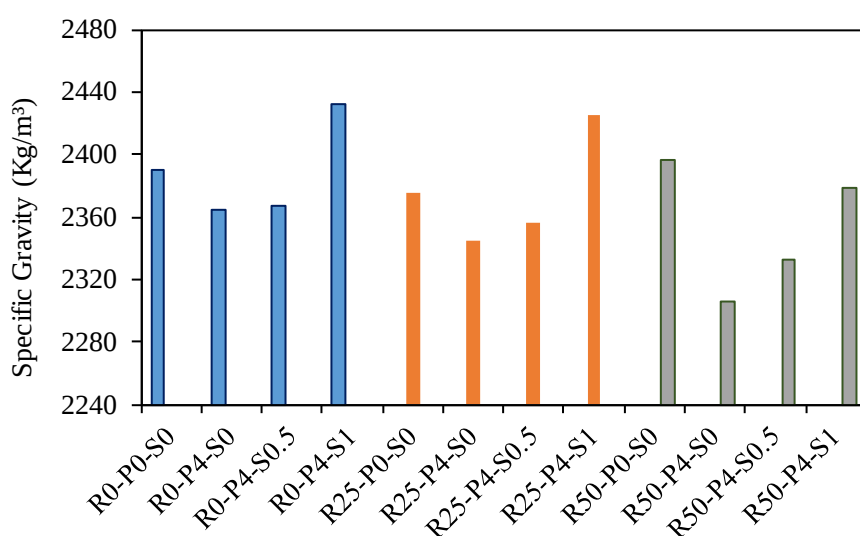
به طور کلی آزمایش لس آنجلس، یک معیار برای نشان دادن میزان چقرمگی و درصد سایش سنگدانه‌ها است. درصد سایش سنگدانه‌های بازیافتی به دلیل ناحیه انتقالی ضعیف، بیشتر از سنگدانه‌های طبیعی است. همچنین آزمایش لس آنجلس، امکان دستیابی به سنگدانه‌های قدیمی بازیافتی را فراهم می‌کند. جزئیات درصد سایش سنگدانه‌ها در جدول ۴-۴، نشان داده شده است.

جدول ۴-۴- مقادیر درصد سایش سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی

سنگدانه	درصد سایش
شن طبیعی	۲۴.۱۸٪
شن بازیافتی	۲۷.۵۴٪
ماسه	۰

۴-۵- وزن مخصوص بتن تازه

وزن مخصوص بتن تازه بعنوان یکی از پارامترهای مهم، برای کنترل صحت طرح اختلاط و یکنواختی بتن مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه وزن مخصوص بتن‌های الیافی تا ۲٪ حجمی مشابه وزن مخصوص بتن معمولی است [۷۸]. با توجه به شکل ۴-۳، افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی موجب افزایش خلل و فرج در بتن می‌شود که این افزایش، کاهش وزن مخصوص بتن بازیافتی به دنبال دارد.



شکل ۴-۳- وزن مخصوص تازه بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

همانطور که در شکل ۴-۳ نشان داده شده است، افزایش ترکیب ۱٪ الیاف فولادی با الیاف پلی‌پروپیلن بدون حضور سنگدانه بازیافتی در افزایش وزن مخصوص بتن نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن (به تنهایی) تاثیر بیشتری دارد. شکل ۴-۳ نشان می‌دهد با افزایش ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی، به ترتیب ۰.۸ و ۲.۵ درصد از وزن مخصوص بتن کاهش می‌یابد. یکی از دلایل اصلی کاهش وزن مخصوص ناشی از افزایش جایگزینی سنگدانه بازیافتی، افزایش خلل فرج است.

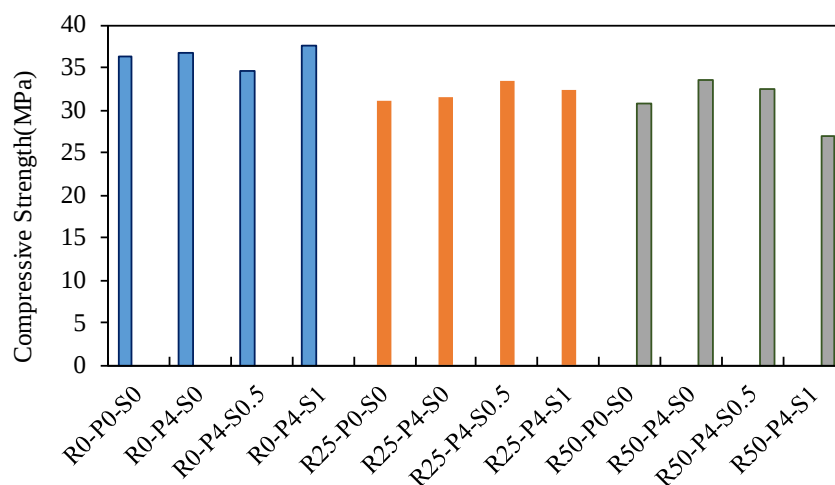
۴-۶- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

مقاومت فشاری یکی از مهمترین پارامترهای سنجش رفتار بتن است. از گذشته تاکنون دانشمندان زیادی با اضافه کردن افزودنی‌ها و الیاف‌های مختلف موجب بهبود مقاومت فشاری بتن شده‌اند. جزئیات

مقاومت فشاری بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی در جدول ۴-۵ و شکل ۴-۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، مقاومت فشاری کاهش یافته، همچنین افزودن الیاف در افزایش مقاومت فشاری تاثیر کمی داشته و موجب تقویت ناحیه بعد از ترک‌خوردگی می‌شود. جزئیات الگوی ترک‌خوردگی نمونه‌های فشاری در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. از خمیر گچ جهت تسطیح سطوح تمامی نمونه‌های فشاری در عملیات کپینگ استفاده گردید.

جدول ۴-۵- جزئیات مقاومت فشاری بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

نام نمونه	نیرو (kN)	مقاومت فشاری (MPa)	تغییرات نسبت به بتن شاهد
R0-P0-S0	285	36.29	
R0-P4-S0	289.3	36.84	1.52%
R0-P4-S0.5	272.6	34.71	-4.35%
R0-P4-S1	295.3	37.6	3.61%
R25-P0-S0	243.6	31.02	-14.52%
R25-P4-S0	247.3	31.5	-13.20%
R25-P4-S0.5	262.7	33.45	-7.83%
R25-P4-S1	254.2	32.37	-7.69%
R50-P0-S0	241.8	30.8	-15.13%
R50-P4-S0	245	33.55	-14.03%
R50-P4-S0.5	255.4	32.53	-10.36%
R50-P4-S1	211.1	26.88	-25.93%

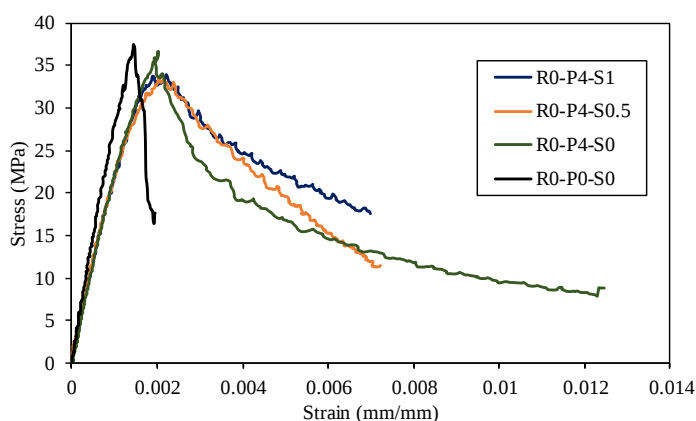


شکل ۴-۴- جزئیات مقاومت فشاری نمونه های بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی



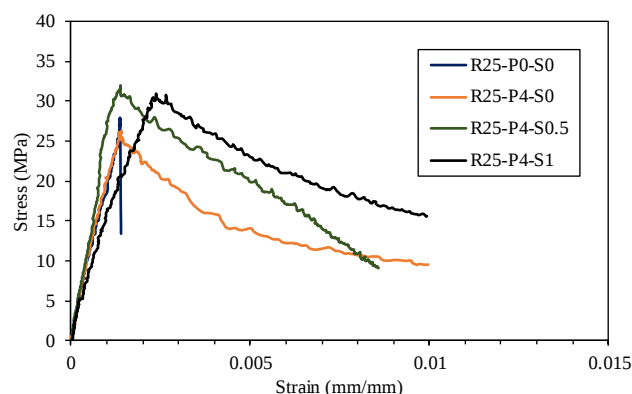
شکل ۴-۵- الگوی ترک خوردگی بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های فشاری بتن الیافی با و بدون سنگدانه بازیافتی در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۴-۶ استفاده از الیاف فولادی در ترکیب با الیاف پلی‌پروپیلن نقش موثرتری در بهبود ناحیه بعد از ترک خوردگی نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن، ایفا می‌کنند.



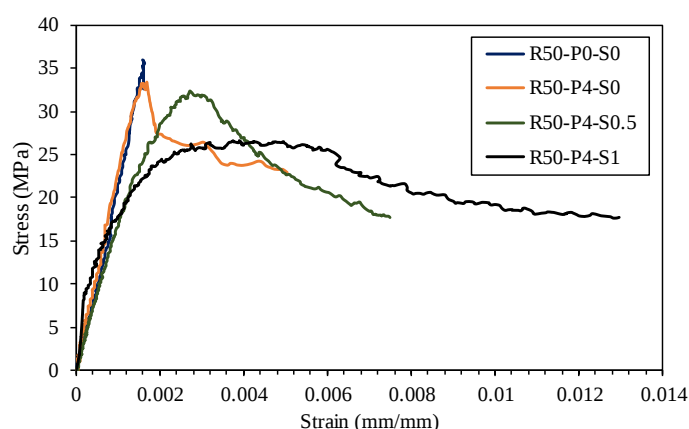
شکل ۴-۶- منحنی تنش-کرنش بتن بدون سنگدانه بازیافتی

نمونه‌های فشاری فاقد سنگدانه بازیافتی در شکل ۴-۶ نشان داده شده است؛ مطابق این شکل، با افزودن ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های فشاری، مقاومت فشاری تنها ۱.۵٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد. ترکیب ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی بترتیب موجب کاهش ۰.۴٪ و افزایش ۳.۶۱٪ مقاومت فشاری می‌شود. همچنین کرنش نمونه‌های فشاری حاوی الیاف ۲.۵ برابر نمونه‌های بدون الیاف است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، افزودن الیاف‌ها تاثیر چندانی بر بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های طبیعی ندارند و الیاف‌ها موجب افزایش ناحیه بعد از ترک خوردگی می‌شوند.



شکل ۷-۴- منحنی تنش- کرنش بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی

نمونه‌های فشاری حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی در شکل ۷-۴ نشان داده شده است؛ مطابق این شکل، با افزودن ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های فشاری، مقاومت فشاری نسبت به نمونه ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی فاقد الیاف تغییر چندانی حاصل نشد. ترکیب ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی بترتیب موجب افزایش ۶.۶۹٪ و ۶.۸۳٪ مقاومت فشاری می‌شود. همچنین جایگزینی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی به طور متوسط موجب کاهش ۱۰.۸٪ مقاومت فشاری می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد، افزودن الیاف‌ها تاثیر چندانی بر بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی ندارند و الیاف‌ها موجب افزایش ناحیه بعد از ترک خوردگی می‌شوند.



شکل ۸-۴- منحنی تنش- کرنش بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی

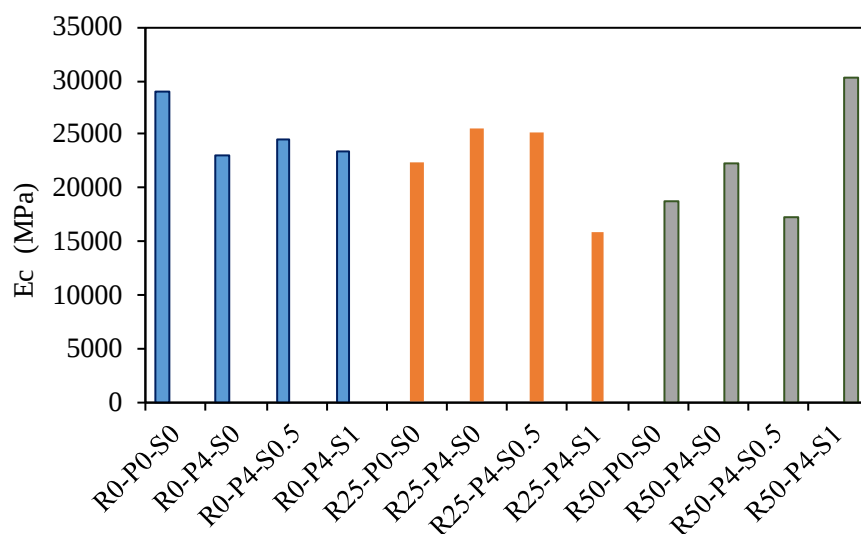
نمونه‌های فشاری حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی در شکل ۸-۴ نشان داده شده است؛ مطابق این شکل، با افزودن ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های فشاری، نسبت به نمونه ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی فاقد الیاف تغییر چندانی در مقاومت فشاری ایجاد نمی‌شود. ترکیب ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵٪ و

۱٪ الیاف فولادی بترتیب موجب افزایش ۴.۷۷٪ و کاهش ۴۲٪ مقاومت فشاری می‌شود. کاهش ۴۲٪ مقاومت فشاری در نمونه‌های R50-P4-S1 ناشی از پدیده گلوله‌ای شدن الیاف‌ها است. همچنین جایگزینی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی به طور متوسط موجب کاهش ۱۳.۱۷٪ مقاومت فشاری شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، افزودن الیاف‌ها تاثیر چندانی بر بهبود مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی ندارند و الیاف‌ها موجب افزایش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی می‌شوند.

۴-۶-۱- نتایج مدول الاستیسیته نمونه‌های بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی

مدول الاستیسیته بتن بعنوان یکی از پارامترهای اساسی در طراحی سازه‌های بتنی است. برخلاف فولاد، مدول الاستیسیته بتن ثابت نبوده و پارامترهایی از جمله مقاومت فشاری، مشخصات سنگدانه‌ها و سرعت بارگذاری در افزایش یا کاهش آن موثر است. به طور کلی هنگامی که درصد حجمی الیاف در بتن‌های الیافی کمتر از ۲ درصد باشد، مدول الاستیسیته بتن‌های الیافی با معیارهای بتن‌های غیر الیافی مشابه است [۶۲]. در این پژوهش برای محاسبه مدول الاستیسیته از استاندارد ASTM C469 استفاده می‌شود. مطابق شکل ۴-۹، با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد، به‌طوری که مدول الاستیسیته نمونه‌های R50-P0-S0 و R25-P0-S0 نسبت به نمونه‌های شاهد بترتیب ۳۶.۱۷٪ و ۲۴٪ کاهش یافته است.

الیاف پلی‌پروپیلن در کاهش مدول الاستیسیته نسبت به نمونه‌های ترکیبی با الیاف فولادی تاثیر کمتری دارد، به طوری که مدول الاستیسیته نمونه‌های R50-P4-S0 و R25-P4-S0، نسبت به نمونه‌های بدون الیاف خود مقدار ناچیزی کاهش یافته است، اما مدول الاستیسیته نمونه‌های R50-P4-S1 و R25-P4-S1 نسبت به نمونه‌های بدون الیاف خود بترتیب ۲۸٪ و ۲۶٪ کاهش یافته است. جزئیات نمونه‌های فشاری جهت محاسبه مدول الاستیسیته در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۹- جزییات مدول الاستیسیته نمونه‌های بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی



شکل ۴-۱۰- برپایش تغییرمکان سنج‌ها جهت محاسبه مدول الاستیسیته

۴-۷- نتایج آزمایش مقاومت کششی بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی

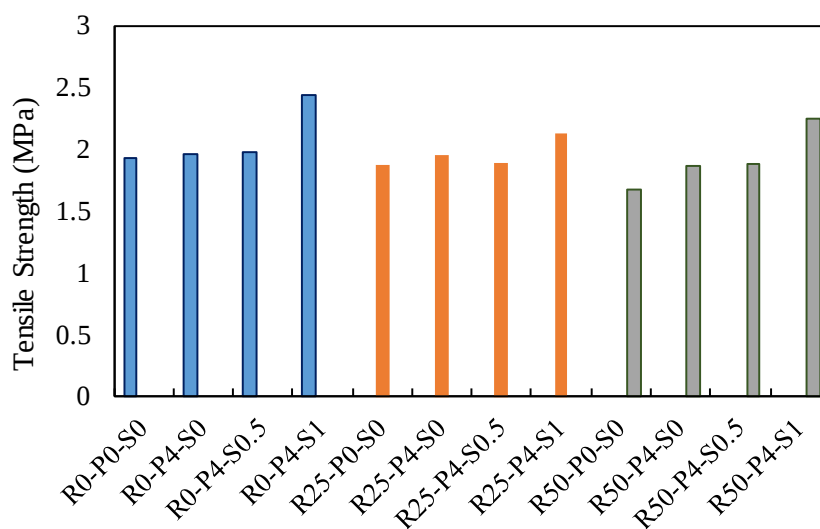
مقاومت کششی بتن، یکی از مهمترین پارامترهایی است که بر میزان ترک‌خوردگی بتن موثر است. شکل ۴-۱۱ و جدول ۴-۶ نشان می‌دهد که با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت کششی کاهش می‌یابد به طوری که با افزایش ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب ۳٪ و ۱۳٪ مقاومت شکافت کششی نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش می‌یابد. همچنین با استفاده از ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت کششی در حدود ۴٪ افزایش می‌یابد. در این راستا با ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن و ۰.۵٪ الیاف فولادی در نسبت جایگزینی ۲۵٪ احتمال بوجود آمدن پدیده بالینگ، موجب

کاهش مقاومت کششی شده است. جزئیات ترک خوردگی نمونه‌های کشش غیرمستقیم در شکل ۴-۴-

۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۶- مقاومت کششی بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

نام نمونه	نیرو (kN)	مقاومت کششی (MPa)	تغییرات نسبت به بتن شاهد
R0-P0-S0	137	1.94	
R0-P4-S0	139	1.97	1.46%
R0-P4-S0.5	140	1.98	2.19%
R0-P4-S1	173.2	2.45	26.43%
R25-P0-S0	132	1.87	-3.65%
R25-P4-S0	138	1.95	0.73%
R25-P4-S0.5	134	1.90	-2.14%
R25-P4-S1	150.6	2.13	9.93%
R50-P0-S0	118	1.67	-13.81%
R50-P4-S0	132	1.87	-3.65%
R50-P4-S0.5	133	1.88	-2.92%
R50-P4-S1	159	2.25	16.12%



شکل ۴-۱۱- جزئیات مقاومت شکافت کششی نمونه‌های بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی

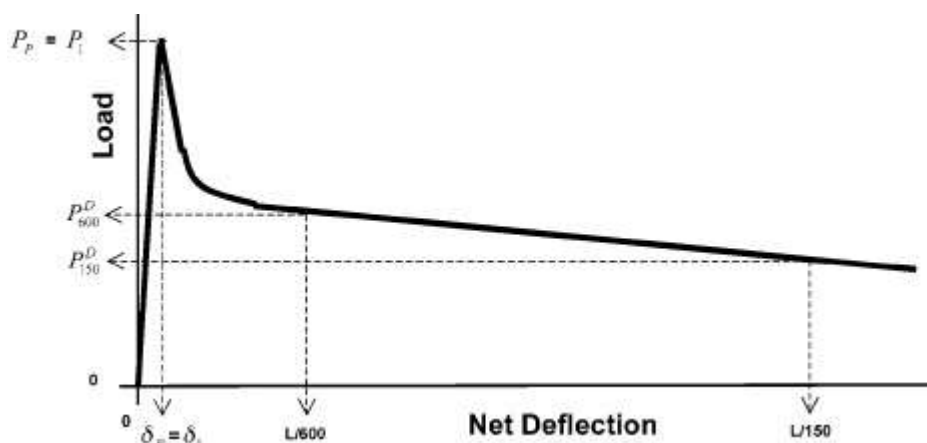


شکل ۴-۱۲- جزئیات ترک خوردگی نمونه‌های کشش غیرمستقیم

۴-۸- نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی

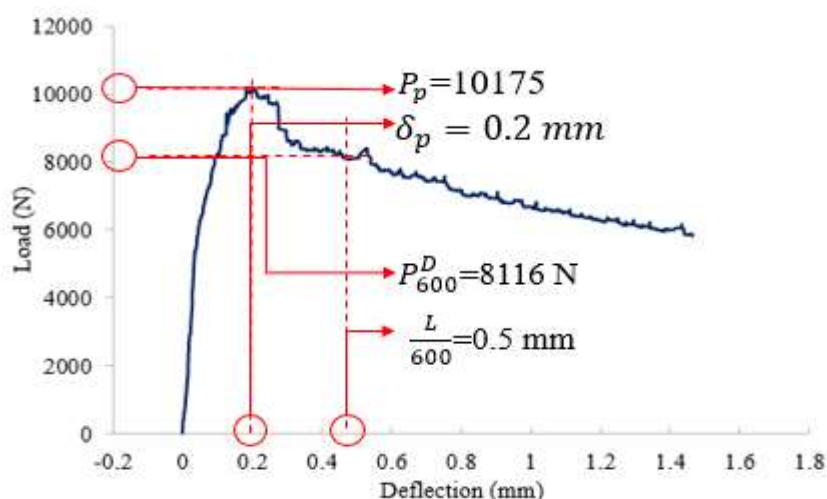
آزمایش مقاومت خمشی بتن به صورت غیر مستقیم مقاومت کششی بتن را ارزیابی می کند. این آزمایش هم به صورت سه نقطه‌ای و هم بصورت چهار نقطه‌ای انجام می گیرد. مطابق با ASTM C1609، طول نمونه‌های خمشی باید پنجاه میلی‌متر بیشتر از سه برابر ارتفاع نمونه خمشی بوده یا حداقل برابر با ۳۵۰ میلی‌متر باشد. همچنین ارتفاع و عرض نمونه‌های خمشی باید بیش از سه برابر بیشینه الیاف مصرفی باشد [۸۳]. نمونه‌های خمشی با ابعاد ۳۵۰*۱۰۰*۱۰۰ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM C1609 با هدف بررسی رفتار مکانیکی بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی تحت بارگذاری خمش سه نقطه قرار گرفته شد. یک شیار با عمق و ضخامت به ترتیب ۳۰ و ۳ میلی‌متر در وسط دهانه ایجاد شد. هدف از ایجاد این شیار، جلوگیری از تشکیل ترک خوردگی در ناحیه کششی تیر بود. نمونه‌های خمشی با سرعت ۰.۰۷۵ میلی‌متر بر دقیقه، تا محدوده $L/150$ (۲ میلی‌متر) تحت بارگذاری قرار گرفت.

در این پژوهش مطابق با شکل ۴-۱۳، طول موثر نمونه L ، مقدار بار نهایی اول P_1 ، بار نهایی P_p و بارهای P_{600}^D ، P_{150}^D بترتیب بارهای متناظر با تغییرمکان‌های $L/600$ و $L/150$ در جدول ۶ ارائه شده است. منحنی نیرو-تغییرمکان مطابق با استاندارد ASTM C1609 در شکل ۴-۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۳- منحنی نیرو-تغییرمکان مطابق با ASTM C1609

جزئیات بیشینه بار نهایی و بار متناظر با تغییرمکان $L/600$ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که الیاف پلی‌پروپیلن به تنهایی تاثیر چندانی در افزایش بار نهایی در نمونه‌های خمشی نداشته است، اما ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با الیاف فولادی می‌تواند موجب افزایش بار نهایی در نمونه‌های بتنی بدون سنگدانه بازیافتی شود. افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی در کاهش میزان بار نهایی تاثیر منفی گذاشته و موجب کاهش بار نهایی و ناحیه بعد از ترک‌خوردگی در نمونه‌های خمشی می‌شود. به علاوه موجب کاهش انرژی شکست و شکل‌پذیری نمونه‌های خمشی می‌شود.

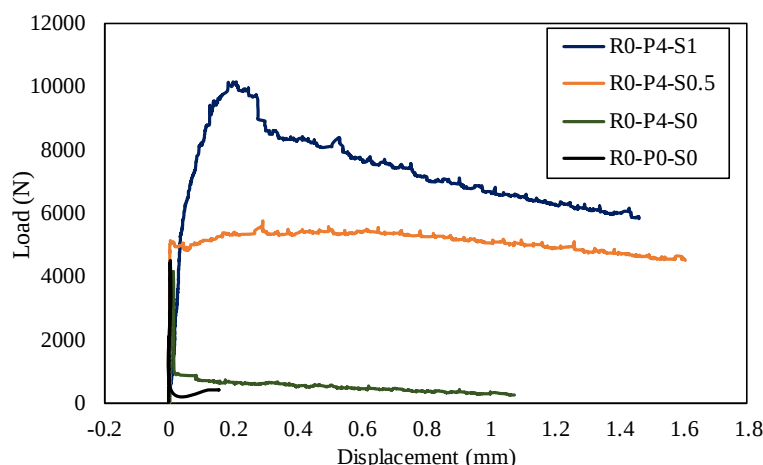


شکل ۴-۱۴- جزئیات منحنی بار- تغییرمکان نمونه های خمشی مطابق با استاندارد ASTM C1609

جدول ۴-۷- مقاومت خمشی بتن الیافی حاوی سنگدانه های بازیافتی

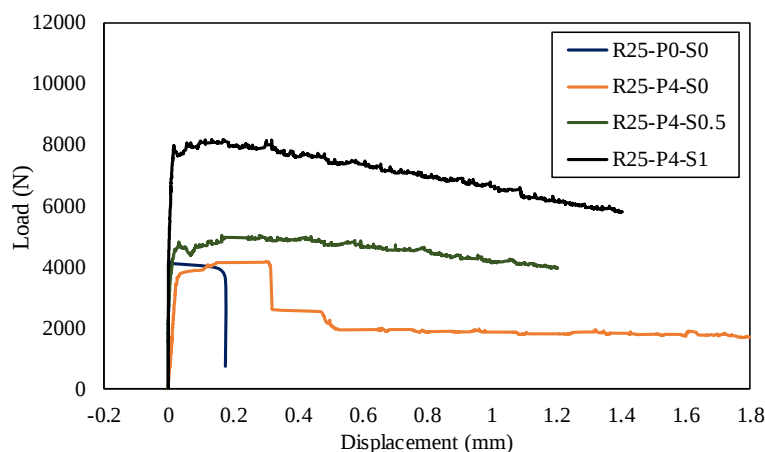
نام نمونه	P_1 (N)	P_p (N)	P_{600}^D (N)
R0-P0-S0	۴۴۷۸	۴۴۷۸	۰
R0-P4-S0	۴۲۰۰	۴۲۰۰	۵۱۸.۵۱
R0-P4-S0.5	۵۵۹۱	۵۷۷۳	۵۴۲۲
R0-P4-S1	۱۰۱۷۵	۱۰۱۷۵	۸۱۱۶
R25-P0-S0	۴۱۶۳	۴۱۶۳	۰
R25-P4-S0	۳۹۰۰	۴۲۰۵	۲۱۹۳
R25-P4-S0.5	۴۹۹۰	۵۰۲۲	۴۷۳۳
R25-P4-S1	۷۹۰۰	۸۱۴۴	۷۳۹۰
R50-P0-S0	۴۷۰۱	۴۷۰۱	۰
R50-P4-S0	۴۵۳۷	۴۵۳۷	۱۴۳۸
R50-P4-S0.5	۵۶۳۰	۵۶۳۰	۳۷۷۸
R50-P4-S1	۵۶۸۰	۵۷۲۴	۰

منحنی های نیرو-تغییرمکان نمونه های خمشی بتن الیافی با و بدون سنگدانه بازیافتی در شکل ۴-۱۵، ۱۶، ۱۷ نشان داده شده است. بطور کلی نمونه های بتنی حاوی الیاف، جذب انرژی بیشتری نسبت به نمونه های بدون الیاف دارند، همچنین استفاده از الیاف فولادی در ترکیب با الیاف پلی پروپیلن نقش موثرتری در بهبود ناحیه بعد از ترک خوردگی نسبت به الیاف پلی پروپیلن، ایفا می کنند.



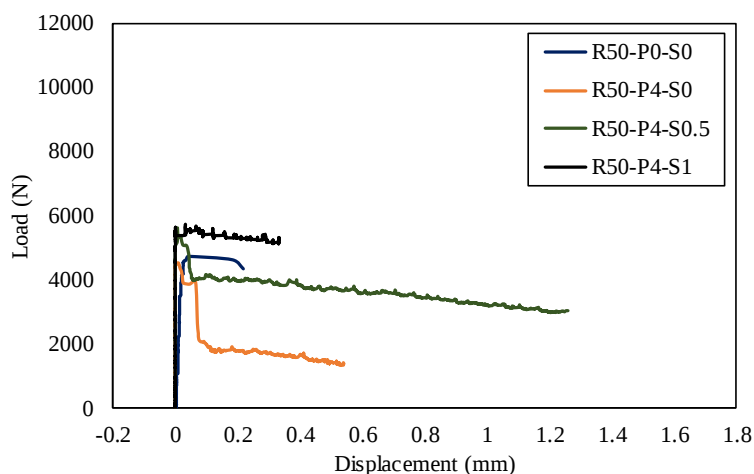
شکل ۴-۱۵- منحنی نیرو-تغییر مکان بتن بدون سنگدانه بازیافتی

نمونه‌های خمشی فاقد سنگدانه بازیافتی در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است؛ مطابق این شکل، با افزودن ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های خمشی، بیشینه بارنهایی نسبت به نمونه شاهد ۶.۲٪ کاهش یافته است. ترکیب ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی بترتیب موجب افزایش ۲۰.۶٪ و ۹۵.۶٪ بیشینه بار نهایی می‌شود. با افزودن ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های خمشی، میزان جذب انرژی نسبت به نمونه بدون الیاف خود ۱۴.۴۹ برابر افزایش می‌یابد؛ ترکیب ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف خود بترتیب افزایش ۴۱.۳ و ۹۴.۸ برابر افزایش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد، الیاف پلی‌پروپیلن تاثیر چندانی در بهبود بیشینه بارنهایی نداشته و در افزایش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی میزان جذب انرژی تاثیر مثبتی دارد، به علاوه از فروپاشی بتن جلوگیری می‌کند. الیاف فولادی در بهبود ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و افزایش میزان جذب انرژی تاثیر زیادی داشته و در ترکیب با الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و بیشینه بارنهایی تاثیر چشمگیری دارد.



شکل ۴-۱۶- منحنی نیرو-تغییر مکان بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی

نمونه‌های خمشی حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است؛ مطابق این شکل، با افزودن ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های خمشی، بیشینه بارنهایی نسبت به نمونه بدون الیاف خود ۱٪ افزایش یافته است. ترکیب ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی بترتیب موجب افزایش ۲۸.۹٪ و ۱۲۷٪ بیشینه بار نهایی می‌شود. با افزودن ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های خمشی، میزان جذب انرژی نسبت به نمونه بدون الیاف خود ۵.۲ برابر افزایش می‌یابد؛ ترکیب ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف خود بترتیب افزایش ۷.۶۴ و ۱۲.۳۶ برابر افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ۲۵٪ جایگزینی سنگدانه بازیافتی به طور متوسط موجب کاهش ۱۳.۳٪ بیشینه بار نهایی نسبت به نمونه‌های بدون سنگدانه‌های بازیافتی می‌شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد، الیاف پلی‌پروپیلن تاثیر چندانی در بهبود بیشینه بارنهایی نداشته و در افزایش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و میزان جذب انرژی تاثیر مثبتی دارد، به علاوه از فروپاشی بتن نیز جلوگیری می‌کند. الیاف فولادی در بهبود ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و افزایش میزان جذب انرژی تاثیر زیادی داشته و در ترکیب با الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و بیشینه بارنهایی تاثیر چشمگیری دارد. همچنین افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی موجب کاهش بیشینه بارنهایی می‌شود.



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

نمونه‌های خمشی حاوی سنگدانه بازیافتی در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است؛ مطابق این شکل، با افزودن ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های خمشی، بیشینه بارنهایی نسبت به نمونه بدون الیاف خود ۳.۴٪ کاهش یافته است. ترکیب ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی بترتیب موجب افزایش ۱۹.۷٪ و ۲۰.۸٪ بیشینه بار نهایی می‌شود. با افزودن ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن به نمونه‌های خمشی، میزان جذب انرژی نسبت به نمونه بدون الیاف خود ۴۷.۷٪ افزایش می‌یابد؛ ترکیب ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵٪ و ۱٪ الیاف فولادی نسبت به نمونه‌های فاقد الیاف بترتیب افزایش ۳.۹ و ۱.۵ برابر افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ۵۰٪ جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی تغییر چندانی نسبت به نمونه‌های بدون سنگدانه بازیافتی نداشته، مقاومت بالای بتن مادر می‌تواند در عدم افت مقاومت در نمونه‌های حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی موثر باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد، الیاف پلی‌پروپیلن تاثیر چندانی در بهبود بیشینه بارنهایی نداشته و در افزایش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و میزان جذب انرژی تاثیر مثبتی دارد، به علاوه از فروپاشی بتن نیز جلوگیری می‌کند. الیاف فولادی در بهبود ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و افزایش میزان جذب انرژی تاثیر زیادی داشته و در ترکیب با الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش ناحیه بعد از ترک‌خوردگی و بیشینه بارنهایی تاثیر چشمگیری دارد. همچنین افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی موجب کاهش بیشینه بارنهایی می‌شود. جزئیات شکست نمونه‌های خمشی در شکل ۴-۱۸ و ۱۹ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۸-الف



شکل ۴-۱۸-ب



شکل ۴-۱۸-ج



شکل ۴-۱۸-د

شکل ۴-۱۸-الگوی شکست نمونه‌های خمشی بدون سنگدانه بازیافتی، الف- نمونه‌های شاهد، ب- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن، ج- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ پلی‌پروپیلن و ۰.۵٪ الیاف فولادی، د- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۱٪ فولادی



شکل ۴-۱۹-الف



شکل ۴-۱۹-ب



شکل ۴-۱۹-ج



شکل ۴-۱۹-د

شکل ۴-۱۹ - الگوی شکست نمونه‌های خمشی حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی، الف- نمونه‌های بدون الیاف، ب-

نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن، ج- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ پلی‌پروپیلن و ۰.۵٪ الیاف فولادی، د- نمونه‌های

حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۱٪ فولادی



شکل ۴-۲۰-الف



شکل ۴-۲۰-ب



شکل ۴-۲۰-ج



شکل ۴-۲۰-د

شکل ۴-۲۰-الگوی شکست نمونه‌های خمشی حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی، الف- نمونه‌های بدون الیاف، ب- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن، ج- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ پلی‌پروپیلن و ۰.۵٪ الیاف فولادی، د- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۱٪ فولادی

۴-۹- مقاومت کششی ناشی از خمش سه نقطه‌ای

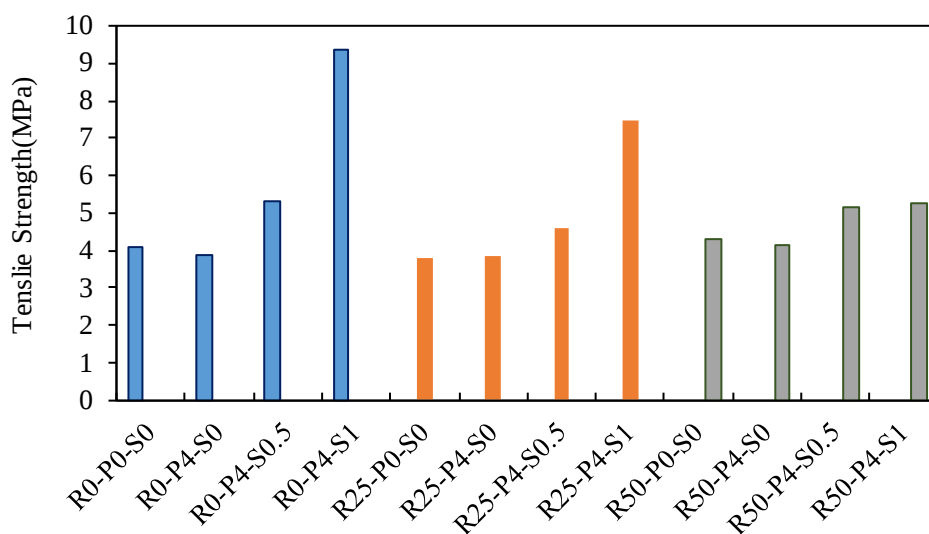
جزئیات مقاومت کششی ناشی از خمش بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی در جدول ۴-۸ و شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. الیاف پلی‌پروپیلن به تنهایی تاثیر چندانی در افزایش مقاومت کششی ناشی از خمش ندارد، اما ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵ و ۱٪ الیاف فولادی بترتیب موجب افزایش

۲۸٪ و ۱۲٪ مقاومت کششی در نمونه‌های بتنی بدون سنگدانه بازیافتی شده است. همچنین ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵ و ۱٪ الیاف فولادی بترتیب موجب افزایش ۲۰٪ و ۹۵٪ بار نهایی در ۲۵٪ جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و افزایش ۱۹٪ و ۲۲٪ مقاومت کششی در ۵۰٪ جایگزینی سنگدانه بازیافتی شده است. افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی در کاهش میزان مقاومت کششی تاثیر منفی گذاشته و موجب کاهش مقاومت کششی در نمونه‌های خمشی شده است. باتوجه به بیشینه انرژی کششی ناشی از خمش در نمونه‌های خمشی شیاردار از طریق رابطه ۴-۱ قابل محاسبه است.

$$f_t = \frac{3P_{max}L}{2b(d-a)^2} \quad ۱-۴$$

جدول ۴-۸- مقاومت کششی ناشی از خمش

نام نمونه	$P_p(N)$	$f_t (MPa)$
R0-P0-S0	۴۴۷۸	۴.۱۱
R0-P4-S0	۴۲۰۰	۳.۸۵
R0-P4-S0.5	۵۷۷۳	۵.۳۰
R0-P4-S1	۱۰۱۷۵	۹.۳۴
R25-P0-S0	۴۱۶۳	۳.۸۲
R25-P4-S0	۴۲۰۵	۳.۸۶
R25-P4-S0.5	۵۰۲۲	۴.۶۱
R25-P4-S1	۸۱۴۴	۷.۴۷
R50-P0-S0	۴۷۰۱	۴.۳۱
R50-P4-S0	۴۵۳۷	۴.۱۶
R50-P4-S0.5	۵۶۳۰	۵.۱۷
R50-P4-S1	۵۷۲۴	۵.۲۵



شکل ۴-۲۱- نمودار مقاومت کششی ناشی از خمش سه نقطه ای

باتوجه به رفتار مشابه قطعات پیش ساخته به نمونه های بتنی، لذا افزودن الیاف به قطعات پیش ساخته نیز موجب افزایش بیشینه تنش کششی می شود. به دلیل تاثیر بیشتر الیاف فولادی در افزایش مقاومت کششی نسبت به الیاف پلی پروپیلن، لذا افزودن الیاف فولادی به قطعات پیش ساخته موجب افزایش بیشتر مقاومت کششی نسبت به الیاف پلی پروپیلن می شود.

۴-۱۰- بررسی میزان انرژی شکست در تیرهای خمشی

به طور کلی برای محاسبه انرژی شکست مواد پایه سیمانی از دو روش اصلی، آزمایش خمش سه نقطه و آزمایش کشش مستقیم استفاده می شود [۹۳]. در آزمایش خمش سه نقطه ای، محاسبه مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک واحد از ترک، در صورتی که مسیر انتشار ترک صحیح باشد و انرژی مصرف شده توسط انتشار ترک در مسیر صحیح قرار گرفته باشد، وجود دارد.

در این روش مقدار انرژی شکست برابر با نسبت میزان انرژی جذب شده به مساحت سطح ترک-خوردگی است. مقدار انرژی ورودی از طریق نیروی اعمالی باید برابر با مقدار انرژی مصرف شده توسط انتشار ترک باشد؛ یعنی انرژی مصرف شده در خارج از ناحیه شکستگی نوک ترک باید به حداقل برسد. برای محاسبه انرژی شکستگی در آزمایش خمش سه نقطه ای نمونه های خمشی باید دارای شکاف

باشد [۹۳]. باتوجه به عدم شکست کامل نمونه‌های الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی، لذا مساحت سطح زیر منحنی نیرو-تغییر مکان تا ۱ میلی‌متر محاسبه گردید.

همانطور که در جدول ۴-۹ نشان داده شده است، با افزایش درصد الیاف انرژی شکست واحد نیز افزایش می‌یابد، الیاف فولادی در افزایش انرژی شکست نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن موثرتر بوده به‌طوری که در نمونه‌های بدون سنگدانه‌های بازیافتی با افزایش ۰.۵٪ و ۱٪ (حجمی بتن) الیاف فولادی، انرژی شکست به‌ترتیب به میزان ۲۸ و ۶۳ برابر نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌یابد.

انرژی شکست نمونه‌های حاوی ۵۰٪ جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به‌ترتیب با ۰.۵٪ و ۰.۴٪ الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن (R50-P4-S0.5) نسبت به نمونه‌های فاقد سنگدانه بازیافتی (R0-P4-S0.5) ۴درصد کاهش یافته است، نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی با همان درصد الیاف (R25-P4-S0.5) نسبت به نمونه‌های فاقد سنگدانه بازیافتی (R0-P4-S0.5)، در حدود ۳۰٪ افزایش یافته است.

جدول ۴-۹- جزییات انرژی شکست بتن الیافی حاوی سنگدانه بازیافتی

نام نمونه	A (mm ²)	P (N)	δ_0 (mm)	W_0 (N.mm)	W_a (N.mm)	G_f (N/mm)
R0-P0-S0	۷۰۰۰	۸۷.۵۱	۰.۱۵	۱۲۳.۴	۱۴۹.۸	۰.۰۲۱
R0-P4-S0	۷۰۰۰	۸۷.۱۳	۰.۸	۱۲۵۲	۱۳۹۱.۴۰	۰.۱۹۸
R0-P4-S0.5	۷۰۰۰	۸۷.۱۶	۱.۶	۳۶۵۴	۳۹۳۲.۹۱	۰.۵۶۱
R0-P4-S1	۷۰۰۰	۸۸.۱۷	۱.۴۶	۸۲۷۳	۸۵۳۰.۴۵	۱.۲۱۸
R25-P0-S0	۷۰۰۰	۸۷.۲۸	۰.۲۱	۷۸۹.۵	۸۲۶.۱۵	۰.۱۱۸
R25-P4-S0	۷۰۰۰	۸۶.۸۱	۲.۲۳	۳۴۵۲.۱	۳۸۳۹.۱۷	۰.۵۴۸
R25-P4-S0.5	۷۰۰۰	۸۶.۹۸	۱.۴۴	۴۷۷۶	۵۰۲۶.۵	۰.۷۱۸
R25-P4-S1	۷۰۰۰	۸۸.۰۷	۱.۴	۷۳۸۴	۷۶۳۰.۵۹	۱.۰۹
R50-P0-S0	۷۰۰۰	۸۷.۶۳	۰.۲۱	۱۰۲۸.۵	۱۰۶۵.۳	۰.۱۵۲
R50-P4-S0	۷۰۰۰	۸۶.۱۹	۰.۵۳	۱۰۶۳.۷	۱۱۵۵.۰۶۱	۰.۱۶۵
R50-P4-S0.5	۷۰۰۰	۸۶.۶۳	۱.۲۵	۳۵۳۶.۴	۳۷۵۲.۹۷	۰.۵۳۶
R50-P4-S1	۷۰۰۰	۸۷.۳۴	۰.۵	۱۸۰۰.۴۷	۱۸۸۷.۸۱	۰.۲۶۹

باتوجه به جدول ۴-۹، نمونه‌های حاوی ۲۵٪ جایگزینی سنگدانه بازیافتی نه تنها موجب کاهش انرژی شکست نشده است، بلکه باعث افزایش انرژی شکست می‌شود، با افزایش ۵۰٪ جایگزینی سنگدانه

بازیافتی، انرژی شکست با کاهش بسیار اندکی روبرو است. پس می‌توان نتیجه گرفت، جایگزینی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی تأثیری بر مقدار کاهش انرژی شکست ندارد. باتوجه به شکل ۴-۱۶ در نمونه‌های بتنی (R25-P4-S0.5)، دچار پدیده گلوله شدن الیاف شده (بالینگ) است و همین پدیده منجر به کاهش ۷۸٪ انرژی شکست نسبت به نمونه‌های بتنی (R0-P4-S1)، شده است. جزئیات ترک خوردگی نمونه‌های بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۲- پدیده گلوله‌ای شدن^{۱۴} در نمونه بتن بازیافتی حاوی الیاف



شکل ۴-۲۳- جزئیات الگوی ترک خوردگی بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵- فصل پنجم

۵-۱- مقدمه

باتوجه به افزایش جمعیت و کاهش منابع طبیعی، بازیافت مصالح ساختمانی می‌توان کمک شایانی به حفظ محیط زیست و منابع طبیعی کرد. در این پایان نامه نیز با ساخت بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی قصد داشتیم کمکی هرچند کوچک به حفظ منابع طبیعی و محیط زیست کشور عزیزمان ایران کرده باشیم. در این فصل ابتدا مروری بر نتایج حاصل از این پایان نامه صورت می‌گیرد، سپس به نتایج کلی و پیشنهادات لازم جهت ادامه این مطالعه پرداخته می‌شود.

۵-۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- افزایش درصد تخلخل در بتن بازیافتی متأثر از افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی بوده و موجب کاهش وزن مخصوص بتن می‌شود. افزایش ترکیب ۱٪ الیاف فولادی با الیاف پلی‌پروپیلن بدون حضور سنگدانه بازیافتی در افزایش وزن مخصوص بتن نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن (به تنهایی) تاثیر بیشتری دارد. با افزایش ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی، بترتیب ۰.۸ و ۲.۵ درصد از وزن مخصوص بتن کاهش می‌یابد.
- نتایج آزمایش لس‌آنجلس بر سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی نشان می‌دهد که مقاومت در برابر سایش و ضربه سنگدانه‌های بازیافتی، نسبت به سنگدانه‌های طبیعی در حدود ۳٪ کمتر است.
- با افزایش ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب ۱۴.۵٪ و ۱۵.۱۳٪ مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. همچنین با استفاده از ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن، در مقاومت فشاری تغییری حاصل نشد. در این راستا با ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن و ۰.۵٪ الیاف فولادی، مقاومت فشاری ۴٪ افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد، استفاده از ۱٪ الیاف فولادی به دلیل پدیده گلوله‌شدن باعث کاهش مقاومت فشاری شده است.

- منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد که استفاده از الیاف فولادی در ترکیب با الیاف پلی‌پروپیلن نقش موثرتری در بهبود ناحیه بعد از ترک خوردگی نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن، ایفا می‌کند. به‌طوری که جذب انرژی نمونه‌های R0-P4-S1، نسبت به نمونه‌های بدون الیاف R0-P0-S0 تا چهاربرابر بیشتر می‌شود، اما در نمونه‌های R0-P4-S0 میزان جذب انرژی نسبت به نمونه‌های بدون الیاف R0-P0-S0 تا سه برابر افزایش می‌یابد.
- الیاف پلی‌پروپیلن در کاهش مدول الاستیسیته نسبت به نمونه‌های ترکیبی با الیاف فولادی تاثیر کمتری دارد، به طوری که مدول الاستیسیته نمونه‌های R50-P4-S0 و R25-P4-S0، نسبت به نمونه‌های بدون الیاف خود مقدار ناچیزی کاهش یافته است، اما مدول الاستیسیته نمونه‌های R50-P4-S1 و R25-P4-S1 نسبت به نمونه‌های بدون الیاف خود به ترتیب ۲۸٪ و ۲۶٪ کاهش یافته است.
- نتایج نشان می‌دهد با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد. مدول الاستیسیته نمونه‌های R50-P0-S0 و R25-P0-S0 نسبت به نمونه‌های شاهد به ترتیب ۳۶.۱۷٪ و ۲۴٪ کاهش یافته است.
- نتایج آزمایش شکاف کششی نشان می‌دهد با افزایش ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به ترتیب ۳٪ و ۱۳٪ مقاومت شکافت کششی نسبت به نمونه‌های شاهد کاهش می‌یابد.
- در آزمایش مقاومت شکافت کششی، با افزودن ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن، مقاومت کششی در حدود ۴٪ افزایش می‌یابد. ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵٪ الیاف فولادی تغییر چندانی نسبت به نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن در مقاومت کششی ایجاد نکرده است، اما ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۱٪ الیاف فولادی موجب افزایش ۲۵٪ مقاومت شکافت کششی نسبت به نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن شده است.
- در آزمایش بررسی مقاومت کششی ناشی از خمش، الیاف پلی‌پروپیلن به تنهایی تاثیر چندانی در افزایش مقاومت کششی ناشی از خمش ندارد، اما ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵ و ۱٪ الیاف

فولادی بترتیب موجب افزایش ۲۸٪ و ۱۲۷٪ مقاومت کششی در نمونه‌های بتنی بدون سنگدانه بازیافتی شده است.

- مقایسه نتایج آزمایش شکافت کششی و کشش ناشی از خمش، نشان می‌دهد که تاثیر افزایش مقاومت کششی با افزودن الیاف، در آزمایش‌های کشش غیرمستقیم نشان داده نمی‌شود و برای بررسی تاثیر افزودن الیاف در مقاومت کششی، آزمایش‌های کشش مستقیم و کشش ناشی از خمش پیشنهاد می‌شود.

- منحنی‌های نیرو-تغییر مکان حاصل از آزمایش خمش سه نقطه‌ای نشان می‌دهد، الیاف پلی‌پروپیلن به تنهایی تاثیر چندانی در افزایش بار نهایی در نمونه‌های خمشی نداشته است، اما ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵ و ۱٪ الیاف فولادی بترتیب موجب افزایش ۳۰٪ و ۱۲۷٪ بار نهایی در نمونه‌های بتنی بدون سنگدانه بازیافتی شده است. همچنین ترکیب الیاف پلی‌پروپیلن با ۰.۵ و ۱٪ الیاف فولادی بترتیب موجب افزایش ۲۰٪ و ۹۵٪ بار نهایی در ۲۵٪ جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و افزایش ۱۹٪ و ۲۱٪ بار نهایی در ۵۰٪ جایگزینی سنگدانه بازیافتی شده است. افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی در کاهش میزان بار نهایی تاثیر منفی گذاشته و موجب کاهش بار نهایی در نمونه‌های خمشی شده است.

- با افزایش درصد الیاف انرژی شکست واحد افزایش می‌یابد، الیاف فولادی در افزایش انرژی شکست نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن موثرتر است. به‌طوری که در نمونه‌های بدون سنگدانه بازیافتی با افزایش ۰.۵٪ و ۱٪ (حجمی بتن) الیاف فولادی، انرژی شکست به ترتیب ۶۹ و ۱۶۸ برابر افزایش می‌یابد. انرژی شکست نمونه‌های حاوی ۵۰٪ جایگزینی سنگدانه بازیافتی به ترتیب با ۰.۵٪ و ۰.۴٪ الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن R50-P4-S0.5 نسبت به نمونه‌های فاقد سنگدانه بازیافتی R0-P4-S0.5 ۳٪ کاهش یافته است، نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی با همان درصد الیاف R25-P4-S0.5 نسبت به نمونه‌های فاقد سنگدانه بازیافتی R0-P4-S0.5، در حدود ۳۰٪ افزایش یافته است.

۳-۵- پیشنهاد تحقیقات آتی

در این پژوهش پارامترهای مختلفی از جمله مقاومت فشاری، مقاومت کشش غیرمستقیم، ظرفیت تنش کششی ناشی از خمش، بیشینه بارنهایی و انرژی شکست مورد بررسی قرار گرفت. باتوجه عدم تاثیر الیافها در کشش غیرمستقیم، لذا بررسی مقاومت کششی بتن بازیافتی حاوی الیاف مختلف با آزمایش کشش مستقیم پیشنهاد می شود. همچنین بررسی مقاومت برشی بتن بازیافتی حاوی الیاف مختلف جهت تکمیل فرآیند تحقیق نیز پیشنهاد می شود.

مراجع

- [1] "ACI 318-14, Building Code Requirements for structural Concrete and Commentary," *American Concrete Institute*, 2014.
- [2] V. W. Tam, M. Soomro, and A. C. J. Evangelista, "A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)," *Construction and Building Materials*, vol. 172, pp. 272-292, 2018.
- [3] CSI, "Cement Sustainability Initiative," *Recycling Concrete Report* 2015.
- [4] S. Mondal, A. Kar, A. Guharay, and N. James, "Characterization of Building Derived Materials for Ground Improvement of Contaminated Soils," *CONSTRUCTION MATERIALS AND SYSTEMS*, p. 65, 2017.
- [5] Y. E. Ibrahim, "Durability and Structural Performance of Recycled Aggregate Concrete: a Review," 2019.
- [6] S. Caijun, L. Yake, Z. Jiake, L. Wengui, C. Linlin, and X. Zhaobin, "Performance enhancement of recycled concrete aggregate," *A Review Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 466-472, 2016.
- [7] M. Alves, R. Cremonini, and D. Dal Molin, "A comparison of mix proportioning methods for high-strength concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 26, no. 6, pp. 613-621, 2004.
- [8] W. Lu, H. Yuan, J. Li, J. J. Hao, X. Mi, and Z. Ding, "An empirical investigation of construction and demolition waste generation rates in Shenzhen city, South China," *Waste management*, vol. 31, no. 4, pp. 680-687, 2011.
- [9] M. D. Saghafi and Z. A. H. Teshnizi, "Building deconstruction and material recovery in Iran: an analysis of major determinants," *Procedia Engineering*, vol. 21, pp. 853-863, 2011.
- [10] H. Guo *et al.*, "Durability of recycled aggregate concrete—a review," *Cement and Concrete Composites*, vol. 89, pp. 251-259, 2018.
- [11] R. S. Zidan, T. W. Ahmed, and A. A. M. Ali, "The combined effect of using recycled coarse aggregate and well water on normal concrete," *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 8, pp. 1-8, 2019.
- [12] A. M. Brandt, "Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering," *Composite structures*, vol. 86, no. 1-3, pp. 3-9, 2008.
- [13] A. Bentur and S. Mindess, *Fibre reinforced cementitious composites*. Crc Press, 2006.
- [14] ف. سرتیپی پور, "امکان سنجی بازیافت مصالح در بازسازی پس از سانحه" نشریه مسکن و محیط و روستا, ۱۳۹۴.
- [15] ع. اسماعیل نیا, "رابطه مقاومت فشاری با مقاومت کششی در بتن خودتراکم حاوی سنگدانه بازیافتی و ژئولیت طبیعی," فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات بتن, ۱۳۹۳.
- [16] صدر ممتازی و همکاران, "ارزیابی خصوصیات بتن الیافی حاوی سنگدانه های بازیافتی بتنی با استفاده از روش های غیرمخرب," فصلنامه ی علمی-پژوهشی تحقیقات بتن, دانشگاه گیلان, ۱۳۹۲.
- [17] 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: International Association for Bridge and Structural Engineering.
- [18] K. R. Akça, Ö. Çakır, and M. İpek, "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 98, pp. 620-630, 2015.
- [19] ش. بیدآبادی, مهران اکبری, "ارزیابی خواص مکانیکی بتن بازیافتی مسلح به الیاف؛ تأثیر ابعاد و میزان سنگدانه بازیافتی, نوع و میزان الیاف," مهندسی سازه و ساخت
- [20] H. Jalilifar, F. Sajedi, and S. Kazemi, "RETRACTED: Investigation on the Mechanical Properties of Fiber Reinforced Recycled Concrete," *Civil Engineering Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 13-22, 2016.

- [21] م. قاسمی، "بررسی تأثیر الیاف فولادی و پلی پروپیلن بر خواص سخت شده بتن خود متراکم حاوی میکروسدیلیس،" اولین کنگره ملی مهندسی ساخت و ارزیابی پروژه های عمرانی.
- [22] Y. Ding, C. Azevedo, J. Aguiar, and S. Jalali, "Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self compacting high performance concrete after exposure to high temperature," *Construction and Building Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 21-31, 2012.
- [23] مهران لطفی و همکاران، "بررسی خواص بتن الیافی،" اولین کنفرانس بین المللی بتن های ناتراوا مخازن ذخیره آب شرب، ۱۳۸۹.
- [24] N. Bairagi, K. Ravande, and V. Pareek, "Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates," *Resources, conservation and recycling*, vol. 9, no. 1-2, pp. 109-126, 1993.
- [25] V. Corinaldesi, F. Tittarelli, L. Coppola, and G. Moriconi, "Feasibility and performance of recycled aggregate in concrete containing fly ash for sustainable buildings," *ACI SPECIAL PUBLICATIONS*, vol. 202, pp. 161-180, 2001.
- [26] J. M. V. Gómez Soberón, L. Agulló Fité, and E. Vázquez Ramonich, "Repercussions on concrete permeability due to recycled concrete aggregate," in *CANMET/ACI International Symposium on Sustainable development of cement and concrete*, 2001: VM Malhotra.
- [27] T. C. Hansen, *Recycling of demolished concrete and masonry*. CRC Press, 1992.
- [28] T. C. Hansen and E. Boegh, "Elasticity and drying shrinkage concrete of recycled-aggregate," in *Journal Proceedings*, 1985, vol. 82, no. 5, pp. 648-652.
- [29] Z. P. Bažant and E. Becq-Giraudon, "Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard," *Cement and concrete research*, vol. 32, no. 4, pp. 529-556, 2002.
- [30] R. Ince, "Prediction of fracture parameters of concrete by artificial neural networks," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 71, no. 15, pp. 2143-2159, 2004.
- [31] A. Rezaei, "Investigation of the effect of polypropylene fibers of different sizes on the mechanical properties of concrete containing recycled aggregate," *Concrete Research of guilan*, 2015.
- [32] R. Silva, J. De Brito, and R. Dhir, "Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review," *Journal of Cleaner Production*, vol. 143, pp. 598-614, 2017.
- [33] M. Al-Qatan, E. Kasim, and H. Al-Khatib, "Use of construction waste in concrete mixes," *Al-Taqani J.*, vol. 25, pp. A20-A27, 2012.
- [34] S.-C. Kou, C.-S. Poon, and M. Etcheberria, "Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 2, pp. 286-291, 2011.
- [35] R. S. Zidan, T. W. Ahmed, and A. A. M. Ali, "The combined effect of using recycled coarse aggregate and well water on normal concrete," *SN Applied Sciences*, vol. 1, no. 8, p. 927, 2019.
- [36] 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," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 30, no. 12, p. 04018324, 2018.
- [37] B. Boesman, "Crushing and separating techniques for demolition material," *Re-Use of Concrete and Brick Materials*, vol. 2, 1985.
- [38] M. M. Salman and J. S. Abdul-Ameer, "Effect of recycled aggregates and steel fibers on flexural and shear behavior of reinforced normal concrete beams," *Journal of Engineering and Sustainable Development*, vol. 20, no. 1, pp. 178-193, 2016.
- [39] M. M. O'Mahony, "Recycling of materials in civil engineering," Oxford University, UK, 1990.

- [40] R. Wang, N. Yu, and Y. Li, "Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 242, p. 118164, 2020.
- [41] M. Limbachiya, T. Leelawat, and R. Dhir, "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete," *Materials and structures*, vol. 33, no. 9, p. 574, 2000.
- [42] Z. J. Grdic, G. A. Toplicic-Curcic, I. M. Despotovic, and N. S. Ristic, "Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 7, pp. 1129-1133, 2010.
- [43] S.-c. Kou, B.-j. Zhan, and C.-s. Poon, "Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 28, no. 1, pp. 549-556, 2012.
- [44] S. F. U. Ahmed, "Properties of concrete containing construction and demolition wastes and fly ash," *Journal of materials in civil engineering*, vol. 25, no. 12, pp. 1864-1870, 2013.
- [45] M. Bravo, J. De Brito, J. Pontes, and L. Evangelista, "Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants," *Construction and Building Materials*, vol. 77, pp. 357-369, 2015.
- [46] A. Shayan and A. Xu, "Performance and properties of structural concrete made with recycled concrete aggregate," *Materials Journal*, vol. 100, no. 5, pp. 371-380, 2003.
- [47] K. K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, and A. H. Taylor, "Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate," *Cement and concrete research*, vol. 31, no. 5, pp. 707-712, 2001.
- [48] م. ایراندوست، "تکنولوژی بتن و آزمایشگاه همراه با طرح اختلاط بتن"، چاپ چهارم، ویرایش دوم.
- [49] T. Ji, C.-Y. Chen, Y.-Y. Chen, Y.-Z. Zhuang, J.-F. Chen, and X.-j. Lin, "Effect of moisture state of recycled fine aggregate on the cracking resistibility of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 44, pp. 726-733, 2013.
- [50] M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, and M. Barra, "Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete," *Cement and concrete research*, vol. 37, no. 5, pp. 735-742, 2007.
- [51] M. C. Rao, S. Bhattacharyya, and S. Barai, "Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 1, pp. 69-80, 2011.
- [52] S. Yehia, K. Helal, A. Abusharkh, A. Zaher, and H. Istaitiyeh, "Strength and durability evaluation of recycled aggregate concrete," *International journal of concrete structures and materials*, vol. 9, no. 2, pp. 219-239, 2015.
- [53] S.-c. Kou and C.-s. Poon, "Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 77, pp. 501-508, 2015.
- [54] F. Yagishita, "Behavior of reinforced concrete beams containing recycled coarse aggregate," *Demolition and Reuse of Concrete and Masonry*, pp. 331-342, 1994.
- [55] "ACI 318-14, Building Code Requirements for structural Concrete and Commentary."
- [56] F. Köksal, F. Altun, İ. Yiğit, and Y. Şahin, "Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes," *Construction and building materials*, vol. 22, no. 8, pp. 1874-1880, 2008.
- [57] M. Alberti, A. Enfedaque, and J. Gálvez, "Fibre reinforced concrete with a combination of polyolefin and steel-hooked fibres," *Composite Structures*, vol. 171, pp. 317-325, 2017.
- [58] M. Nili and V. Afroughsabet, "The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 6, pp. 927-933, 2010.
- [59] C. Qian and P. Stroeven, "Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete," *Cement and concrete research*, vol. 30, no. 1, pp. 63-69, 2000.

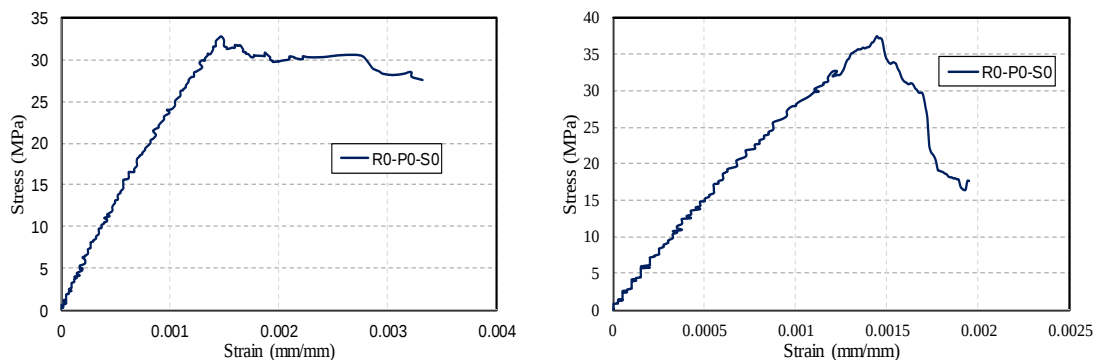
- [60] H. Y. Aruntaş, S. Cemalgil, O. Şimşek, G. Durmuş, and M. Erdal, "Effects of super plasticizer and curing conditions on properties of concrete with and without fiber," *Materials letters*, vol. 62, no. 19, pp. 3441-3443, 2008.
- [61] "ASTM C1116, Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete."
- [62] "(ACI 544.1R-96) Report on Fiber Reinforced Concrete, (Reported by ACI Committee 544)."
- [63] ه. فامیلی و همکاران, "بررسی خواص مکانیکی و الکتریکی بتن حاوی الیاف شیشه," دومین کنفرانس ملی بتن ایران, ۱۳۸۹.
- [64] د. مستوفی نژاد, "بررسی تجربی خواص بتن مسلح به الیاف شیشه," ۱۳۸۰.
- [65] "الیاف پلی پروپیلن چیست و چگونه تولید می شود, دسترسی آنلاین از لینک:
http://sepahanhilda.com/news/news_item.asp?NewsID=49."
- [66] P. Soroushian, "Secondary Reinforcement--Adding Cellulose Fibers," *Concrete International*, vol. 19, no. 6, pp. 28-34, 1997.
- [67] 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," *Cement and concrete composites*, vol. 46, pp. 65-72, 2014.
- [68] K. V. Subramaniam, J. S. Popovics, and S. P. Shah, "Fatigue fracture of concrete subjected to biaxial stresses in the tensile C-T Region," *Journal of engineering mechanics*, vol. 128, no. 6, pp. 668-676, 2002.
- [69] D. Gao, L. Zhang, and M. Nokken, "Mechanical behavior of recycled coarse aggregate concrete reinforced with steel fibers under direct shear," *Cement and Concrete Composites*, vol. 79, pp. 1-8, 2017.
- [70] "(ASTM C136) Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates."
- [71] "(ASTM C566) Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying."
- [72] "(ASTM C29) Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate."
- [73] "(ASTM C128) Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate."
- [74] "(ASTM C127) Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate."
- [75] "(ASTM C131) Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine."
- [76] T. W. Ahmed, "Properties of high strength polypropylene fiber concrete containing recycled aggregate," *Construction and Building Materials*, 2020.
- [77] M. A. Mohammad Jamshidi Avanaki, Abdollah Hoseini, Mohammad Sadegh Maerefat1, "Stress-Strain Constitutive Material Models for Hybrid Steel Fiber Reinforced Concrete," *Journal of Civil Engineering and Construction*, 2020.
- [78] "(ACI 544.3R-08) Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete."
- [79] "(ASTM C138) Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete."
- [80] "(ASTM C39) Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens."
- [81] "(ASTM C469) Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression."
- [82] "(ASTM C496) Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens."
- [83] "ASTM C1609, Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)."

- [84] Y.-S. Jenq and S. P. Shah, "Features of mechanics of quasi-brittle crack propagation in concrete," in *Current trends in concrete fracture research*: Springer, 1991, pp. 103-120.
- [85] M. Guo, F. Grondin, and A. Loukili, "Numerical analysis of the failure of recycled aggregate concrete by considering the random composition of old attached mortar," *Journal of Building Engineering*, vol. 28, p. 101040, 2020.
- [86] J. S. K. Rama, M. Sivakumar, A. Vasan, C. Garg, and S. Walia, "A review on studies of fracture parameters of self-compacting concrete," in *Advances in Structural Engineering*: Springer, 2015, pp. 1705-1716.
- [87] S. Khalilpour, E. BaniAsad, and M. Dehestani, "A review on concrete fracture energy and effective parameters," *Cement and Concrete research*, vol. 120, pp. 294-321, 2019.
- [88] P.-E. Petersson, "Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials," Lund University, 1981.
- [89] A. Hillerborg, "The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete," *Materials and structures*, vol. 18, no. 4, pp. 291-296, 1985.
- [90] R. D. Recommendation, "Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams," *Materials and structures*, vol. 18, no. 106, pp. 285-290, 1985.
- [91] J. Planas, M. Elices, and G. Guinea, "Measurement of the fracture energy using three-point bend tests: Part 2—Influence of bulk energy dissipation," *Materials and Structures*, vol. 25, no. 5, pp. 305-312, 1992.
- [92] "(ASTM C33) Standard Specification for Concrete Aggregates."
- [93] P.-E. Petersson, "Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials," 1981.

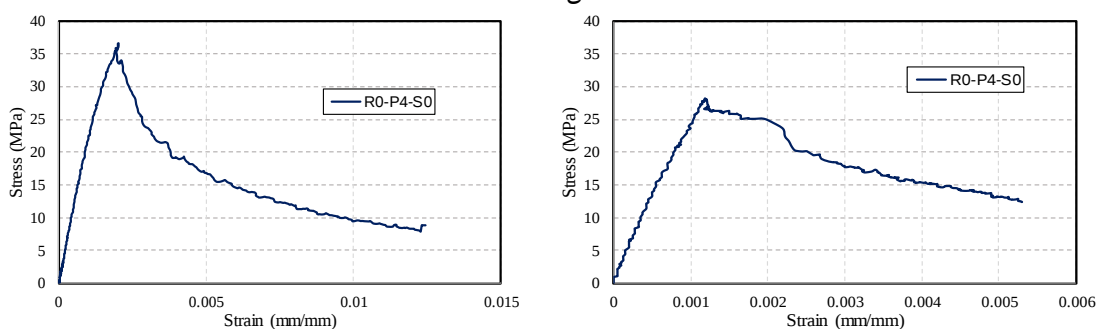
پیوست

۷-۱- پیوست - الف

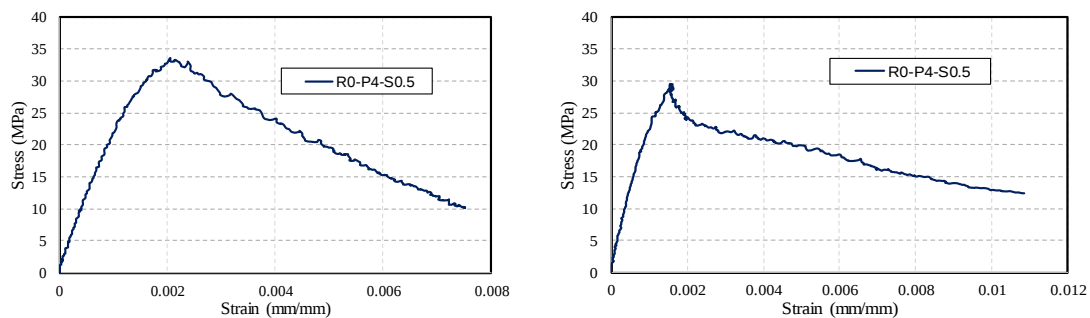
در این پیوست نمودارهای مربوط به نمونه های مقاومت فشاری قرار گرفته شده است.



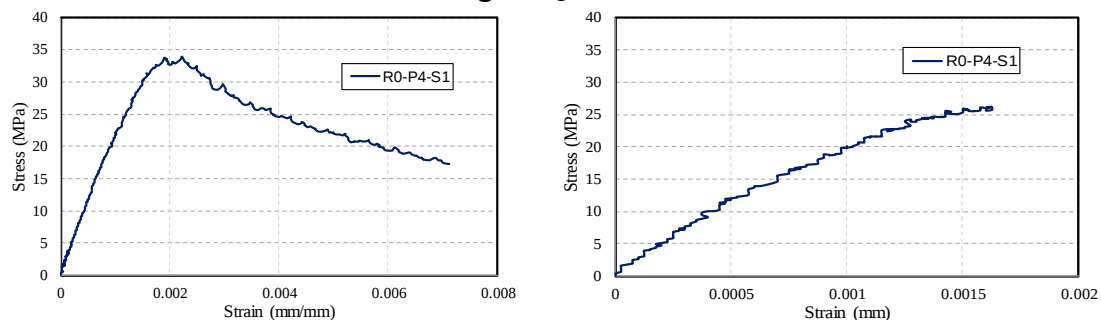
شکل ۱-۷ الف



شکل ۱-۷ ب

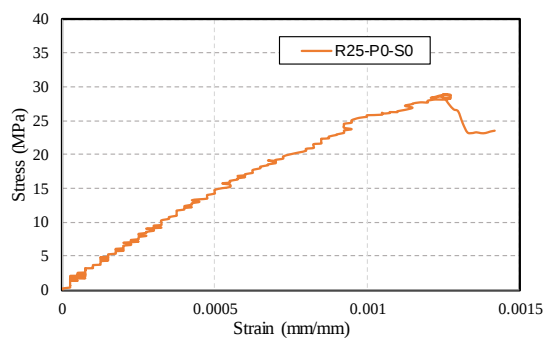
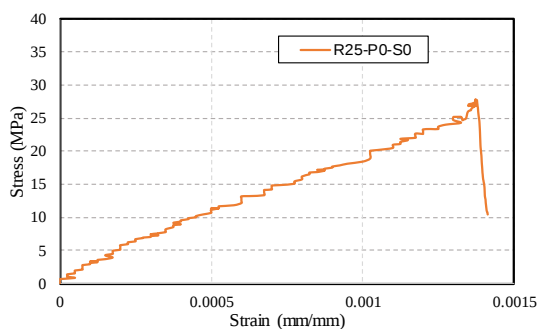


شکل ۱-۷ ج

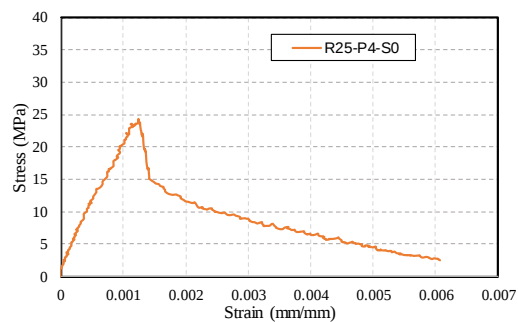
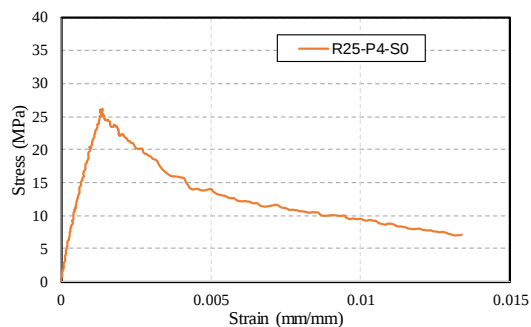


شکل ۱-۷ د

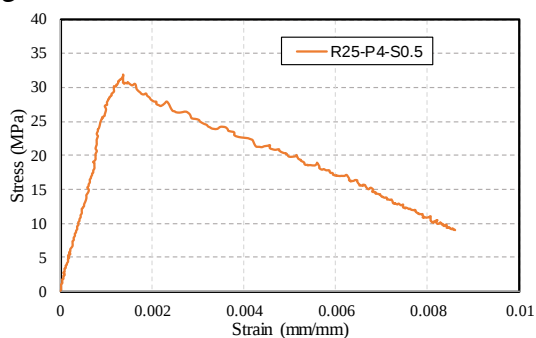
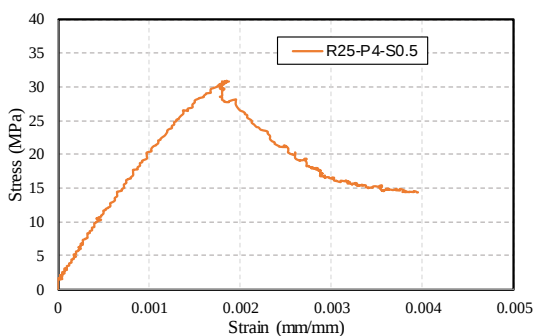
شکل ۱-۷- منحنی تنش- کرنش بتن طبیعی، الف- نمونه های شاهد، ب- نمونه های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن، ج- نمونه های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۰.۵٪ الیاف فولادی، د- نمونه های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۱٪ الیاف فولادی



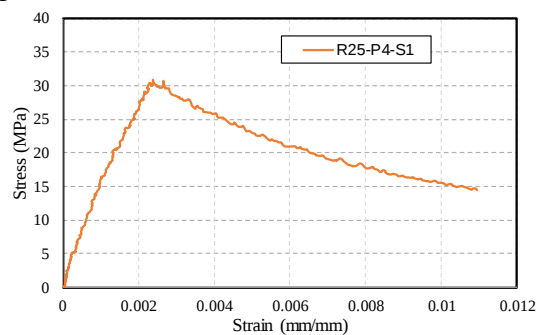
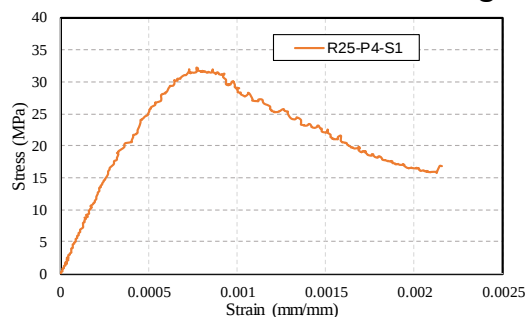
شکل ۲-۷-الف



شکل ۲-۷-ب

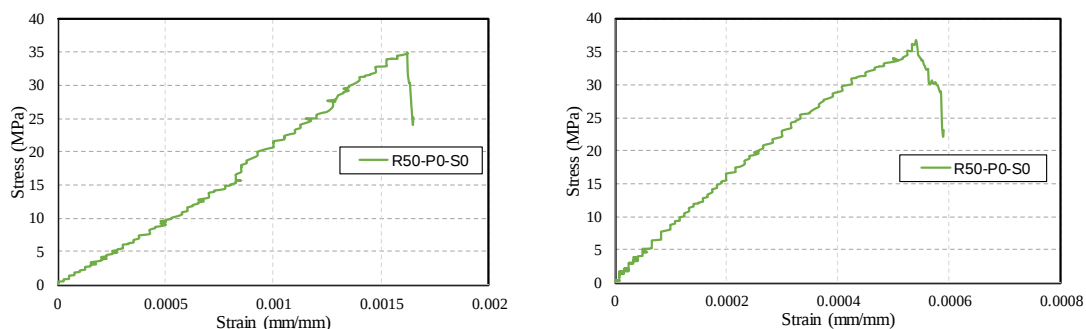


شکل ۲-۷-ج

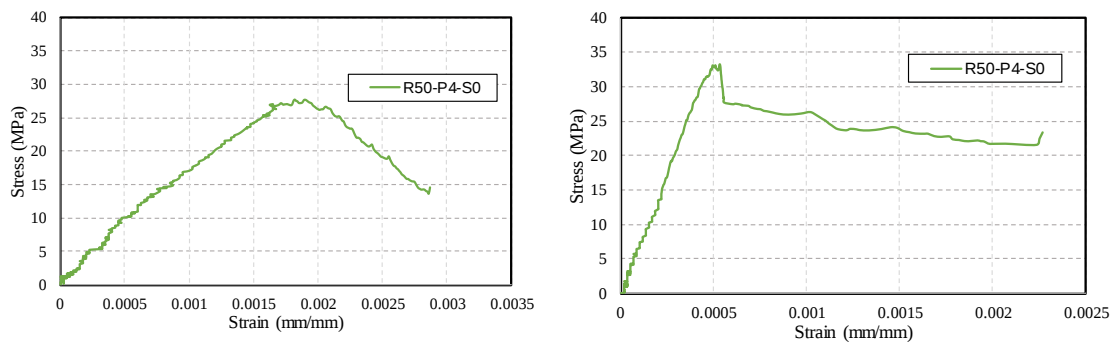


شکل ۲-۷-د

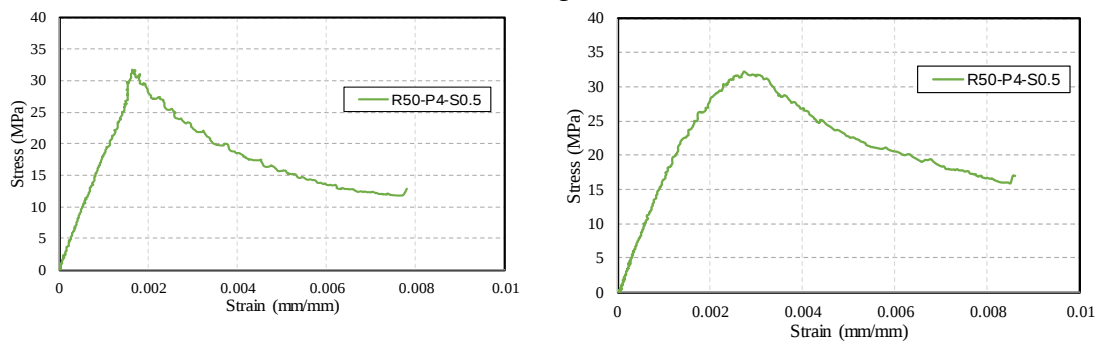
شکل ۲-۷- منحنی تنش - کرنش بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی، الف- نمونه‌های شاهد، ب- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن، ج- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۰.۵٪ الیاف فولادی، د- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۱٪ الیاف فولادی



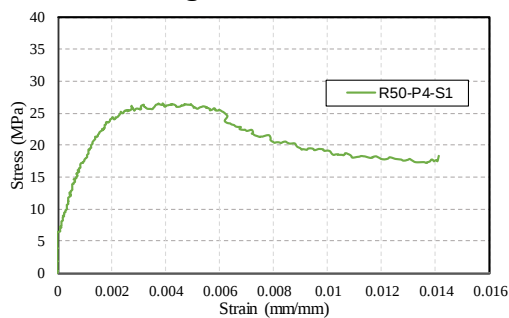
شکل ۷-۳-الف



شکل ۷-۳-ب

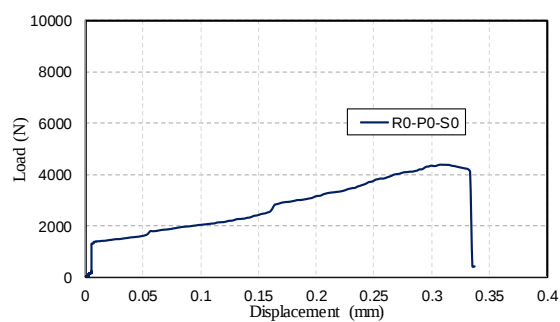
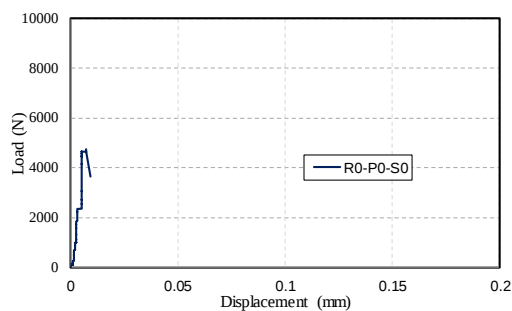


شکل ۷-۳-ج

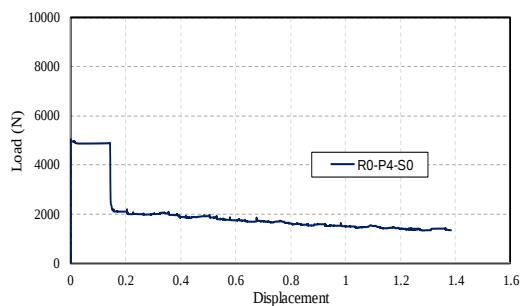
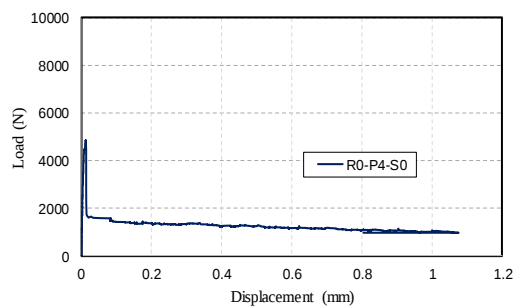


شکل ۷-۳-د

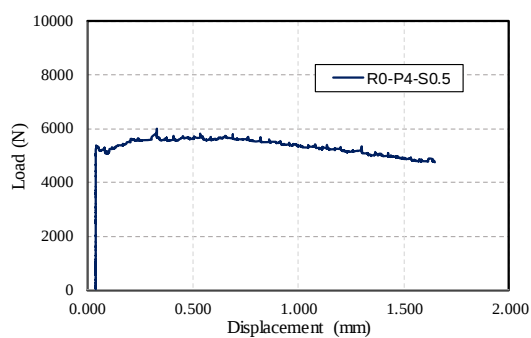
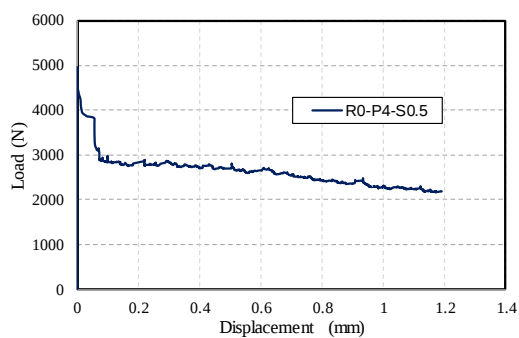
شکل ۷-۳- منحنی تنش- کرنش بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی، الف- نمونه‌های شاهد، ب- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن، ج- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۰.۵٪ الیاف فولادی، د- نمونه‌های حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی‌پروپیلن و ۱٪ الیاف فولادی.



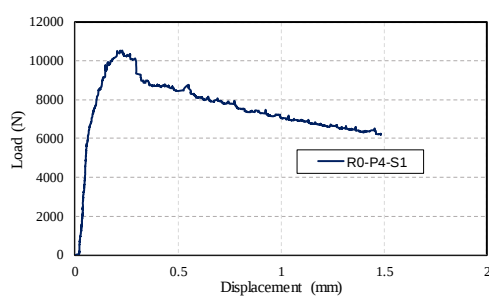
شکل ۴-۷ الف



شکل ۴-۷ ب



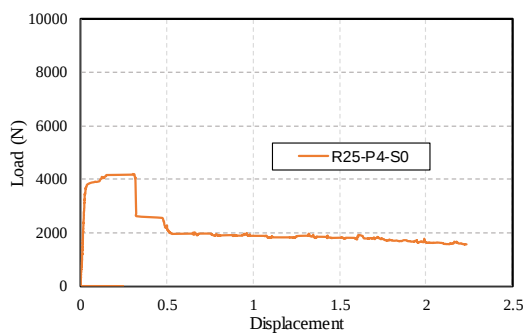
شکل ۴-۷ ج



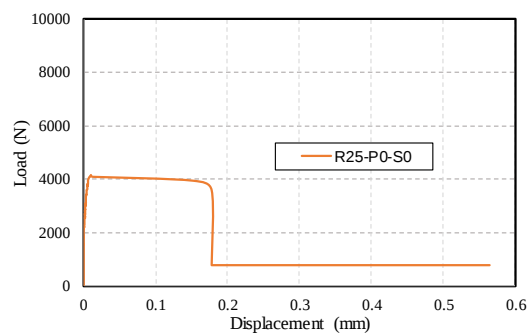
شکل ۴-۷ د

شکل ۴-۷ - منحنی نیرو-تغییر مکان بتن طبیعی، الف - فاقد الیاف، ب - حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن، ج - حاوی

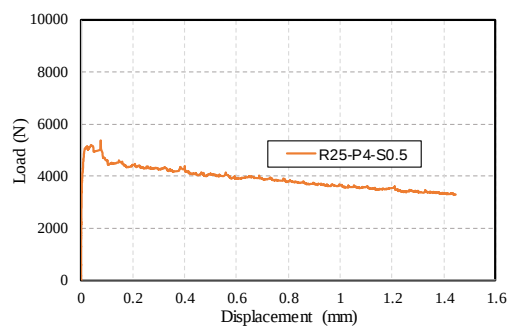
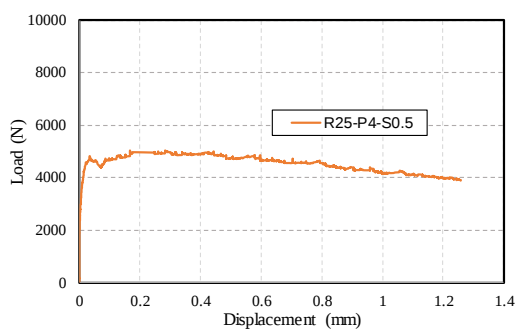
۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۰.۵٪ الیاف فولادی، د - حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۱٪ الیاف فولادی



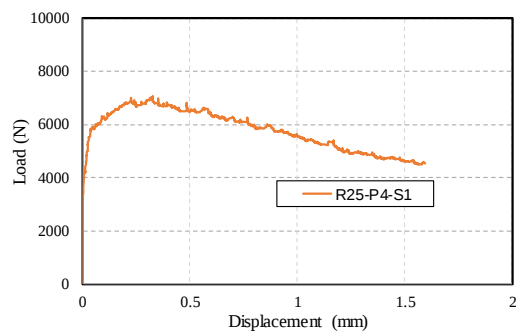
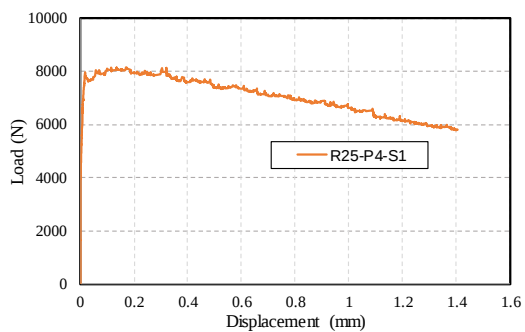
شکل ۵-۷- ب



شکل ۵-۷- الف



شکل ۵-۷- ج

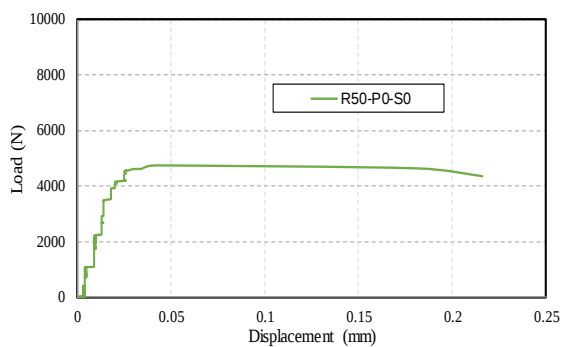
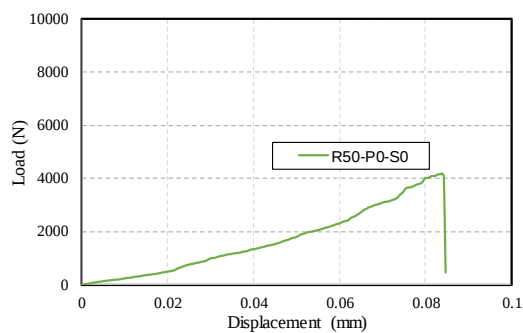


شکل ۵-۷- د

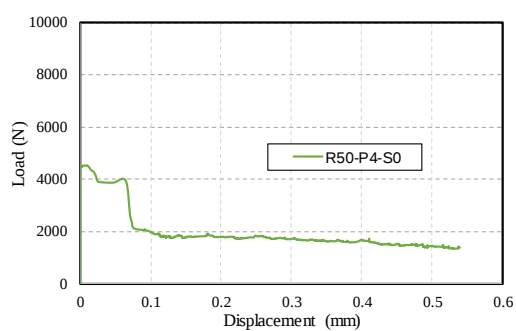
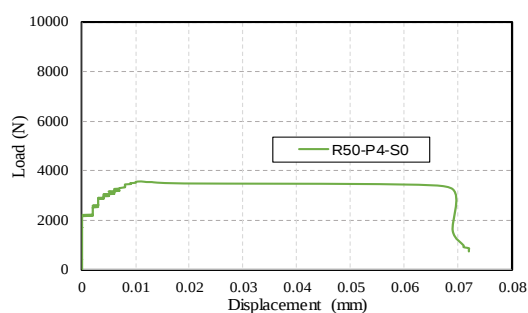
شکل ۵-۷- منحنی نیرو-تغییر مکان بتن حاوی ۲۵٪ سنگدانه بازیافتی، الف- فاقد الیاف، ب- حاوی ۰.۴٪ الیاف

پلی پروپیلن، ج- حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۰.۵٪ الیاف فولادی، د- حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۱٪ الیاف

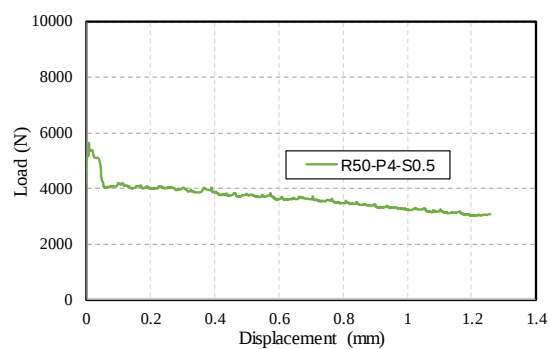
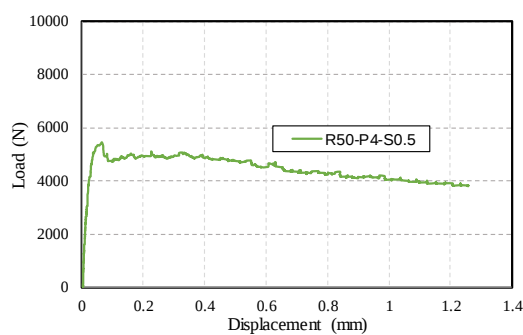
فولادی



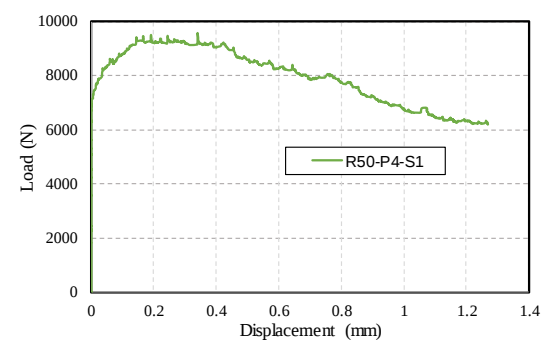
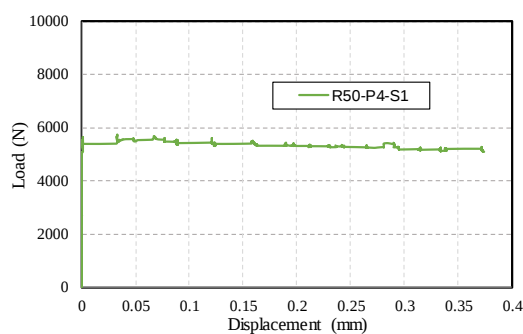
شکل ۶-۷ الف



شکل ۶-۷ ب



شکل ۶-۷ ج



شکل ۶-۷ د

شکل ۶-۷ منحنی نیرو-تغییر مکان بتن حاوی ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی، الف- فاقد الیاف، ب- حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن، ج- حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۰.۵٪ الیاف فولادی، د- حاوی ۰.۴٪ الیاف پلی پروپیلن و ۱٪ الیاف فولادی

Abstract:

Nowadays, the use of recycled concrete for economic and environmental reasons has increased significantly and increasing the replacement of recycled aggregates change the properties of mechanical behavior of concrete. In this study, the mechanical behavior of concrete containing recycled aggregates with different percentages of steel and polypropylene fibers have been investigated in the laboratory. overall 36 cylindrical compression specimens, 36 cylindrical tensile specimens with dimensions of 200* 100 mm and 36 flexural specimens with dimensions of 100 * 100 * 350 mm were tested. Recycled aggregates (coarse aggregates) in ratios of 0, 25 and 50% (weight ratio) replaced natural materials. Also, steel and polypropylene fibers were added to recycled concrete specimens in ratios of 0%, 0.5%, 1% and 0%, 0.4%, respectively. Fiber reinforced concrete specimens containing recycled aggregates under compressive load, indirect tension and three-point bending are tested and factors such as compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity, flexural strength and fracture energy are investigated. The results show that compressive strength decreases with the content increase of recycled aggregate. Polypropylene fibers have a positive effect on increasing compressive strength and combination of polypropylene fibers with 0.5 and 1% steel fibers increases energy absorption by 68 and 169 times. Also, the maximum splitting tensile strength decreases with the content increase of recycled aggregate. The results of flexural strength test show that polypropylene fibers have a positive effect on increasing pick loads and preventing the collapse of concrete, and combination of these fibers with steel fibers increases the fracture energy, thus increasing the ductility.

Kyword: Recycled concrete, Fiber reinforced concrete, Steel fibers, Fracture energy, Polypropylene fibers



Faculty of civil engineering
M.S.c Thesis in structural engineering

**Experimental study of mechanical behavior and fracture
energy of concrete containing recycled aggregates reinforced
with steel and polypropylene fibers**

By: Sina Hosseini

Supervisors:

Dr. Jalil Shafaei

Dr. Farshid Jandaghi Alaei

June 2021