ارزیابی خواص مکانیکی بتن بازیافتی مسلح به الیاف: تأثیر ابعاد و میزان سنگدانه بازیافتی، نوع و میزان الیاف

مهران شیرانی بیدآبادی[1*]، محمود اکبری[2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران
۲- استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده

در این تحقیق از سنگدانه‌های بتنی بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی در بتن استفاده می‌شود و سپس بتن بازیافتی به وسیله الیاف تقویت می‌گردد. هدف از این مطالعه در ابتدا 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 است. نتایج 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. همچنین بتن تقویت شده با الیاف پس از شکسته شدن، خرد و از هم گسیخته نمی‌شود و الیاف در حفظ پیوستگی بتن و جلوگیری از گسترش ترک‌ها نقش مهمی ایفا می‌کند.

کلمات کلیدی: بتن بازیافتی، سنگدانه‌های بازیافتی بتنی، خواص مکانیکی، الیاف فولادی، الیاف پلی‌پروپیلن.

[*]نویسنده مسئول: مهران شیرانی بیدآبادی
پست الکترونیکی: mehran.sh.b@gmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۱۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۳

DOI: 10.22065/jsce.2017.44438
http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.44438
شناسه دیجیتال

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

امروزه بتن پرمصرف‌ترین مصالح در ساخت و ساز است. علت این امر ویژگی‌هایی مانند مقاومت فشاری بالا، دوام مناسب در مقابل عوامل محیطی، شکل‌پذیری بالای بتن تازه و مقاومت مناسب در برابر آتش‌سوزی است. در مقابل مزایای ذکر شده برای بتن، مقاومت کششی نقطه ضعف بتن محسوب می‌گردد. اندازه‌گیری مقاومت کششی بتن به صورت مستقیم دشوار است؛ از این رو معمولاً مقاومت کششی بتن را به صورت کشش غیر مستقیم بتن(آزمایش شکافت) و کشش در خمش اندازه‌گیری می‌کنند [۱].

اگرچه کاربرد الیاف در مصالح ساختمانی با عملکرد کششی ضعیف، به هزاران سال پیش برمی‌گردد (نظیر استفاده از کاه در کاه‌گل در مصالح سنتی ایرانی)، ولی قدمت به کار گرفتن الیاف در بتن به کمتر از نیم قرن پیش برمی‌گردد. اصولاً دو مشخصه‌ی بتن، یکی رفتار ترد آن و دیگری ضعف در کشش، کاربرد بتن را با مشکلاتی روبرو ساخته است. به کار گرفتن الیاف در بتن و تولید بتن الیافی(FRC)[1]، این امکان را فراهم آورده است که بتوان بتنی شکل‌پذیر و با قابلیت جذب انرژی بیش‌تر، و نیز بتنی با توسعه‌ی ترک خوردگی کمتر تحت بار و تنش‌های ناشی از انقباض و حرارت، تولید نمود. از مشخصات دیگر بتن الیافی افزایش مقاومت خمشی و به خصوص کنترل توسعه‌ی ترک خوردگی است [۲].

در قرن اخیر سرعت رشد تولید ضایعات، به خصوص نخاله‌های ساختمانی یکی از مشکلات اساسی در جوامع است. اگرچه ساخت و ساز از عوامل اصلی توسعه‌ی شهرها و گسترش امکانات است، اما تأثیرات نامطلوبی بر منابع طبیعی و محیط زیست دارد. کمبود مکان‌های انباشتن نخاله‌های ساختمانی، هدر رفتن وقت و انرژی، تولید گرد و خاک و تولید گازهای گلخانه‌ای از جمله پیامدهای منفی نخاله‌های ساختمانی هستند [۳].

طبق مطالعات انجام شده، ضایعات جامد شهری در کشورهای توسعه یافته ۳۵ درصد و در کشورهای در حال توسعه ۵۰ درصد از کل ضایعات را شامل می‌شوند [۴]. در کشور ایران ساخت و تخریب[2](C&D) نسبت به کشورهای توسعه‌یافته بسیار بالاتر است [۵]. از این رو به کارگیری بتن‌های ضایعاتی که بخش عمده‌ی ضایعات ساختمانی را تشکیل می‌دهند، در ساخت بتن‌های جدید بسیار پراهمیت است. برای این منظور ابتدا باید از خواص و ویژگی‌های سنگدانه‌های بازیافتی بتنی[3](RCA) آگاهی داشت.

مقاومت فشاری بتن بازیافتی تحت تأثیر مقدار RCA و خصوصیات آن‌ها است. نسبت آب به سیمان(W/C)، درصد RCA جایگزین سنگدانه‌های طبیعی[4](NA) و میزان چسبندگی ملات خشک شده‌ی RCA از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر مقاومت فشاری بتن بازیافتی هستند [۶]. طبق تحقیقاتی که در کشور نیوزلند صورت گرفته، مشخص شده است که به طور کلی مقاومت فشاری بتن بازیافتی از بتن با سنگدانه‌های طبیعی ۱۵ تا ۴۰ درصد کمتر است [۷].

تحقیقات کانگ و همکارانش(۲۰۱۲) نشان می‌دهد که مقاومت کششی بتن بازیافتی و بتن معمولی اختلاف زیادی ندارد [۸]. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که وجود الیاف پلی‌پروپیلن[5](PP) در بتن‌های بازیافتی تأثیر خاصی بر مقاومت فشاری بتن ندارد. اما اضافه کردن الیاف PP به بتن باعث افزایش قابل توجه مقاومت بتن در کشش و خمش می‌شود. اضافه کردن الیاف PP به بتن‌های بازیافتی باعث ناهمگن‌تر شدن بتن می‌شود. همچنین با افزایش میزان استفاده از این الیاف، کارایی و امکان قالب‌ریزی بتن کاهش می‌یابد [۹].

دینگ و کاسترل (۲۰۰۰) تأثیر الیاف فولادی[6]بر مقاومت فشاری بتن و شاتکریت را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج به دست آمده، افزودن الیاف به صورت دو بعدی در شاتکریت و همچنین به صورت سه بعدی در بتن، موجب تقویت و بهبود خواص بتن سخت شده می‌شود. همچنین استفاده از الیاف فولادی در بتن تازه و سخت شده باعث افزایش جذب انرژی و مقاومت خمشی بتن می‌شود [۱۰].

1 Fiber reinforced concrete
2 Construction and demolition
3 Recycled concrete aggregates
4 Natural aggregates
5 Polypropylene fiber
6 Steel fiber

Archive of SID
www.SID.ir

هدف از این مطالعه ارزیابی خواص مکانیکی بتن بازیافتی مسلح به الیاف است. برای این منظور در ابتدا تأثیر ابعاد و میزان سنگدانه‌های بازیافتی در خواص مکانیکی بتن و سپس تأثیر نوع و میزان الیاف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه این مقاله، روش انجام تحقیق شامل مشخصات مصالح مصرفی، مراحل مختلف این پژوهش به همراه نتایج آزمایش‌های بتن تازه و بتن سخت شده ارائه می‌گردد. در انتها نیز جمع بندی و نتیجه گیری از این تحقیق بیان می‌شود.

۲- روش انجام تحقیق

این پژوهش شامل دو مرحله است: در مرحله اول تأثیر ابعاد و میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی بر مقاومت فشاری بتن بررسی می‌شود؛ در مرحله دوم بهبود خواص کششی و خمشی بتن بازیافتی به وسیله الیاف مورد توجه قرار می‌گیرد و در این مرحله تأثیر نوع و میزان الیاف بررسی می‌شود. برای بررسی خواص طرح اختلاط‌های مختلف بتن، آزمایش‌های بتن تازه از جمله آزمایش اسلامپ و وزن مخصوص و آزمایش‌های بتن سخت شده از جمله مقاومت فشاری، کششی و خمشی بتن انجام می‌شود. قبل از تشریح جزئیات مراحل انجام تحقیق، مشخصات مصالح مصرفی در ساخت طرح‌های مختلف اختلاط بتن ارائه می‌شود.

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

مصالح مصرفی در طرح‌های مختلف اختلاط بتن شامل آب، سیمان، سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی، فوق روان کننده، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن است که در ادامه مشخصات کلی آن‌ها بیان می‌شود.

۲-۱-۱-آب

آب مصرفی جهت ساخت نمونه‌های بتنی، آب شرب شهر کاشان است که دارای کیفیت مناسب برای ساخت بتن است. آب مورد استفاده در حوضچه‌ی عمل‌آوری نمونه‌ها از آب بدون سختی است که میزان ۴۰ گرم آهک در هر متر مکعب آن حل شده است.

۲-۱-۲- سیمان

برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از سیمان تیپ ۳۲۵-۱ کویر کاشان با خواص فیزیکی و شیمیایی مندرج در جدول۱ استفاده شده است. این سیمان برای مصارف عمومی در ساخت ملات یا بتن به کار می‌رود.

جدول۱: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مصرفی

مشخصات فیزیکی			ترکیبات شیمیایی(٪)					
سطح ویژه (gr/cm2)	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	گیرش اولیه(دقیقه)	SO3	MgO	Fe2O3	Al2O3	C3A	SiO2	CaO
۲۸۰۰-۳۰۰۰	۳۷۰-۳۲۵	۴۵	۲/۵-۳	۳-۵	۴/۵-۶	۵/۵-۶	۷/۵-۸	۲۰-۲۰/۵	۶۳-۶۴

۲-۱-۳-سنگدانه‌های مصرفی

با توجه به اینکه تقریباً ۷۵ درصد از حجم بتن را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند، برای تهیه طرح اختلاط بتن، بررسی مشخصات این مصالح لازم است. در این پژوهش از دو نوع سنگدانه در اندازه‌های ماسه (۰ تا ۴/۷۵ میلی‌متر) و شن در دو رده‌ی نخودی (۴/۷۵ تا ۹/۵ میلی‌متر) و بادامی (۹/۵ تا ۱۹ میلی‌متر) استفاده شده است. سنگدانه‌های طبیعی(NA) مورد استفاده در این پروژه آزمایشگاهی، از معادن مشهد اردهال کاشان تهیه شده است. سنگدانه‌های بازیافتی بتنی(RCA) مورد استفاده در این پروژه از خرد و سرند کردن بتن‌های قدیمی در اندازه ماسه، نخودی و بادامی تهیه شده است. بتن‌های قدیمی تشکیل دهنده RCA، نمونه‌های مکعبی ۱۵ سانتی‌متری با مقاومت ۲۸ روزه ۲۵ تا ۳۵ مگا پاسکال هستند. عملیات تهیه و سرند کردن سنگدانه‌های بازیافتی در سنگ‌شکن فولادشهر اصفهان صورت گرفته است. در

Archive of SID
www.SID.ir

شکل۱ مراحل مختلف این کار نمایش داده شده است. در شکل۲ انواع سنگدانه‌های مصرفی در این پروژه در ابعاد مختلف نشان داده شده است.

شکل۱ : مراحل تهیه و سرند شدن سنگدانه‌های بازیافتی.

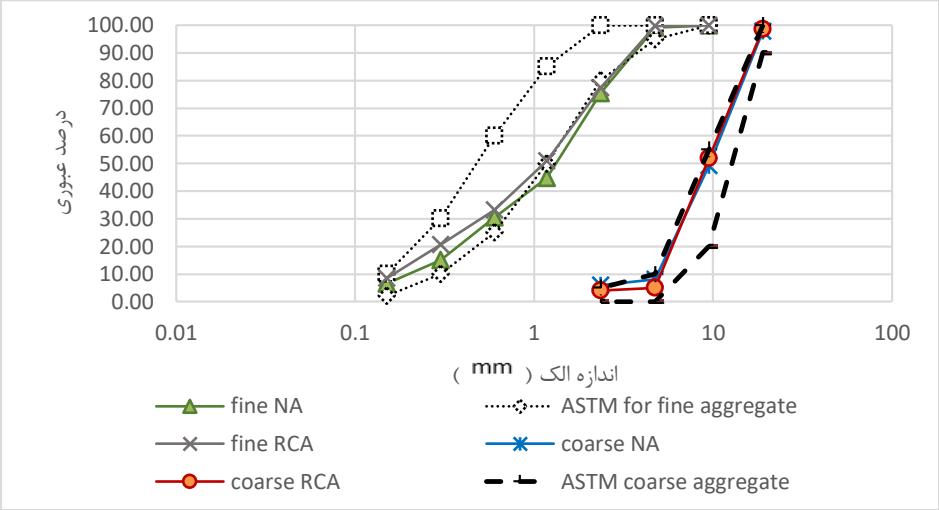
شکل۲ : سنگدانه‌های مصرفی در ابعاد و انواع مختلف.

در جدول۲ مشخصات اندازه‌گیری شده سنگدانه‌های مصرفی ذکر گردیده است. در شکل۳ منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی ترسیم شده است.

جدول۲ : مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی

ویژگی	استاندارد آزمایش انجام شده	سنگدانه طبیعی	سنگدانه بازیافتی
چگالی درشت دانه در حالت SSD(gr/cm3)	ASTM C127	۲/۵۸	۲/۵۰
چگالی ریز دانه در حالت SSD(gr/cm3)	ASTM C128	۲/۵۵	۲/۴۲
جذب آب درشت دانه	ASTM C127	۱/۷	۴/۹
جذب آب ریز دانه	ASTM C128	۴/۱۴	۷/۷۲
درصد سایش آزمایش لوس آنجلس	ASTM C131	۱۸/۲	۳۰/۴۴
شاخص تطویل سنگدانه‌ها	BS812	۱۵	۱۹/۲
شاخص تورق سنگدانه‌ها	BS812	۱۳/۸	۱۴/۲

www.SID.ir



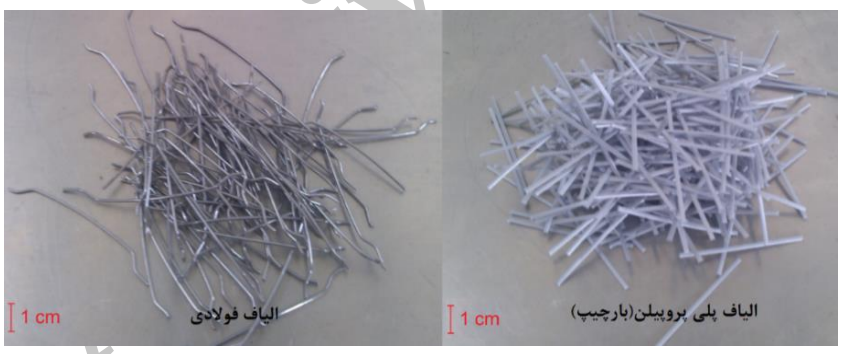
شکل۳ : منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی.

۲-۱-۴- فوق روان کننده

در این پروژه جهت تأمین کارایی بتن در حد مطلوب از فوق روان کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلات و به رنگ قهوه‌ای روشن استفاده می‌شود. طبق پیشنهاد شرکت سازنده‌ی آن، میزان مصرف این ماده در بتن ۰/۸ درصد وزنی سیمان است.

۲-۱-۵-الیاف مصرفی

الیاف مصرفی در این پروژه از جنس فولادی و پلی‌پروپیلن سوزنی (بارچیپ) هستند. در شکل۴ الیاف مصرفی نشان داده شده است. در جدول۳ مشخصات الیاف مصرفی درج شده است.



شکل۴ : الیاف مصرفی.

جدول۳ : مشخصات فنی الیاف مصرفی

مشخصات	الیاف پلی‌پروپیلن	الیاف فولادی
چگالی(gr/cm^3)	۰/۹۱	۷/۸
جذب آب(٪)	۰	۰
طول(mm)	۵۰	۵۰
ابعاد یا قطر(mm)	۲×۱	۱
شکل	سطح عاج دار با مقطع مستطیلی	انتهای نیم قلاب شکل با سطح مقطع دایره‌ای
مقاومت کششی(MPa)	۵۵۰-۶۰۰	۱۰۰۰-۱۲۰۰

www.SID.ir

۲-۲- مراحل ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها

برای اختلاط و ساخت تمامی نمونه‌های بتنی از میکسر استوانه‌ای کج شونده استفاده می‌شود. برای ساخت بتن‌های بدون الیاف، ابتدا مصالح درشت دانه و مقداری از مصالح ریز دانه به میکسر اضافه می‌شود و مقداری از آب طرح اختلاط به مصالح اضافه می‌شود تا سطح آن‌ها مرطوب شود. اختلاط مصالح دانه‌ای به مدت ۲دقیقه در میکسر انجام می‌گیرد و سپس سیمان و ریز دانه‌های باقی مانده به میکسر افزوده و همزمان آب باقی مانده به همراه روان کننده‌ی محلول در آن به مخلوط اضافه می‌شود و اختلاط بتن به مدت ۳ دقیقه دیگر صورت می‌گیرد. روند ساخت بتن‌های الیافی مشابه بتن‌های بدون الیاف است با این تفاوت که با توجه به اینکه اضافه کردن الیاف نیازمند صرف مقداری وقت است، ابتدا در مدت ۳ دقیقه سنگدانه‌ها به میکسر اضافه می‌شوند و الیاف به صورت دستی در حین کار میکسر به مخلوط افزوده و با تغییر در زاویه قرار گرفتن میکسر و نظارت بر مخلوط، سعی در توزیع یکنواخت الیاف در بتن می‌گردد.

در تمامی مراحل ساخت بتن با تغییر در زاویه دوران محور میکسر، بتن همگن و یکنواخت ساخته می‌شود. پس از تخلیه‌ی میکسر ابتدا با بیلچه بتن زیر و رو می‌شود و بلافاصله پس از آن آزمایش اسلامپ انجام می‌شود. طبق اندازه‌گیری‌های صورت گرفته دمای بتن تازه بین۲۷ تا ۲۹ درجه سلسیوس و دمای آب عمل آوری ۲۰ تا ۲۴ درجه سلسیوس است.

خواص مکانیکی مورد بررسی در این پژوهش در سن ۲۸ روزه بتن و از میانگین‌گیری سه نمونه بتنی حاصل می‌گردد. برای بررسی مقاومت فشاری بتن از نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متری، برای بررسی مقاومت کششی بتن از نمونه‌های استوانه‌ای با ارتفاع ۳۰ و قطر مقطع ۱۵ سانتی‌متری و برای بررسی مقاومت خمشی بتن از تیرهای با ابعاد ۱۵×۱۵×۷۵ سانتی‌متری استفاده می‌گردد.

قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای هرکدام در سه لایه بتن ریزی و هر لایه ۲۵ ضربه کوبیده می‌شود. سپس با چکش لاستیکی ضربه‌هایی به بدنه‌ی قالب زده می‌شود تا هوای موجود در بتن خارج گردد. تیرها هر کدام در دو لایه بتن ریزی شده و با کمک ویبراتور، هر لایه متراکم شده و هوای موجود در آن خارج می‌گردد. پس از اتمام قالب ریزی و تراکم، سطح نمونه‌های بتنی با گونی‌های مرطوب پوشانده می‌شود تا از تبخیر آب بتن جلوگیری به عمل آید. نمونه‌های بتنی پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و به حوضچه عمل آوری منتقل می‌شوند.

۲-۳-مرحله اول تحقیق: بررسی تأثیر ابعاد و میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی

در این مرحله جهت بررسی تأثیر ابعاد و درصد جایگزین کردن سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی بر مقاومت فشاری بتن، ۱ طرح اختلاط بتن شاهد و ۱۰ طرح اختلاط بتن بازیافتی ساخته می‌شود. بتن شاهد با سنگدانه‌های طبیعی و بتن‌های بازیافتی با درصدهای ۱۵، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با طبیعی ساخته می‌شود. برای مقایسه‌ی تأثیر ابعاد سنگدانه‌های بازیافتی، جایگزینی در محدوده ماسه و شن به طور مجزا انجام می‌شود. با استفاده از روش وزنی آیین‌نامه ACI طرح اختلاط بتن شاهد با سنگدانه‌های طبیعی با مقاومت فشاری طراحی ۴۰ مگا پاسکال ساخته می‌شود.

در جدول۴ مشخصات طرح اختلاط بتن شاهد و بتن‌های بازیافتی در این پروژه مشخص شده است. در این مقاله بتن شاهد با نماد CC، بتن بازیافتی با جایگزینی ماسه با نماد (عدد-RS) و بتن بازیافتی با جایگزینی شن با نماد (عدد-RG) مشخص شده است. در این نمادها هر عدد بیانگر درصد جایگزینی مصالح بازیافتی با مصالح طبیعی است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول۴ : طرح اختلاط‌های ساخته شده‌ی بتن شاهد و بتن‌های بازیافتی

طرح	آب (kg)	W/C	آب اضافی	سیمان (kg)	شن (Kg) (mm)۹-۴/۵	شن (Kg) (mm)۹-۱۹/۵	ماسه (kg)	روان کننده (kg)
CC	۱۸۵	۰/۴۵	۲۵	۴۱۰	۴۱۰	۴۱۰	۹۶۵	۳/۲۸
۱۵RS-	۱۸۵	۰/۴۵	۳۳	۴۱۰	۴۱۰	۴۱۰	NA :۸۲۰/۲ RCA: ۱۴۴/۸	۳/۲۸
۳۰RS-	۱۸۵	۰/۴۵	۴۱/۲	۴۱۰	۴۱۰	۴۱۰	NA: ۶۷۵/۵ RCA: ۲۸۹/۵	۳
۵۰RS-	۱۸۵	۰/۴۵	۵۱/۹	۴۱۰	۴۱۰	۴۱۰	NA: ۴۸۲/۵ RCA: ۴۸۲/۵	۲/۵
۷۰RS-	۱۸۵	۰/۴۵	۶۲/۷	۴۱۰	۴۱۰	۴۱۰	NA: ۲۸۹/۵ RCA: ۶۷۵/۵	۱/۶
۱۰۰RS-	۱۸۵	۰/۴۵	۷۸/۹	۴۱۰	۴۱۰	۴۱۰	NA: ۰ RCA: ۹۶۵	۱/۶
۱۵RG-	۱۸۵	۰/۴۵	۲۹/۳	۴۱۰	۲۸۷NA: ۱۲۳RCA:	۴۱۰NA: ۰RCA:	۹۶۵	۳/۲۸
۳۰RG-	۱۸۵	۰/۴۵	۳۳/۴۷	۴۱۰	۱۶۴NA: ۲۴۶RCA:	۴۱۰NA: ۰RCA:	۹۶۵	۳/۲۸
۵۰RG-	۱۸۵	۰/۴۵	۳۷/۲۴	۴۱۰	۰NA: ۴۱۰RCA:	۴۱۰NA: ۰RCA:	۹۶۵	۳
۷۰RG-	۱۸۵	۰/۴۵	۴۰/۷	۴۱۰	۰NA: ۴۱۰RCA:	۲۸۷NA: ۱۲۳RCA:	۹۶۵	۲/۵
۱۰۰RG-	۱۸۵	۰/۴۵	۴۷	۴۱۰	۰NA: ۴۱۰RCA:	۰NA: ۴۱۰RCA:	۹۶۵	۲/۵

۲-۳-۱- ارائه نتایج مرحله اول تحقیق

نتایج حاصل شده از آزمایش‌های بتن تازه در جدول۵ مشخص شده است. مصالح در هنگام اختلاط در سطح رطوبت کارگاهی هستند و در وضعیت SSD قرار ندارند، از طرفی جذب آب مصالح بازیافتی به مراتب بالاتر است. از این رو برای یکسان در نظر گرفتن آب طرح‌های اختلاط باید آب اولیه‌ی طرح اختلاط‌های بازیافتی را با توجه به میزان مصرف مصالح بازیافتی، بالاتر در نظر گرفت. در نتیجه در ابتدای اختلاط، طرح‌های حاوی مصالح بازیافتی که میزان آب اولیه بالاتری دارند، از کارایی بالاتری برخوردار هستند. پس با توجه به این موضوع باید از مقادیر کمتر فوق روان کننده جهت طرح‌های بازیافتی استفاده کرد تا بتوان به کارایی تقریباً یکسان طرح‌های اختلاط دست یافت و از آب انداختگی بتن و جدا شدن ذرات بتن جلوگیری به عمل آورد.

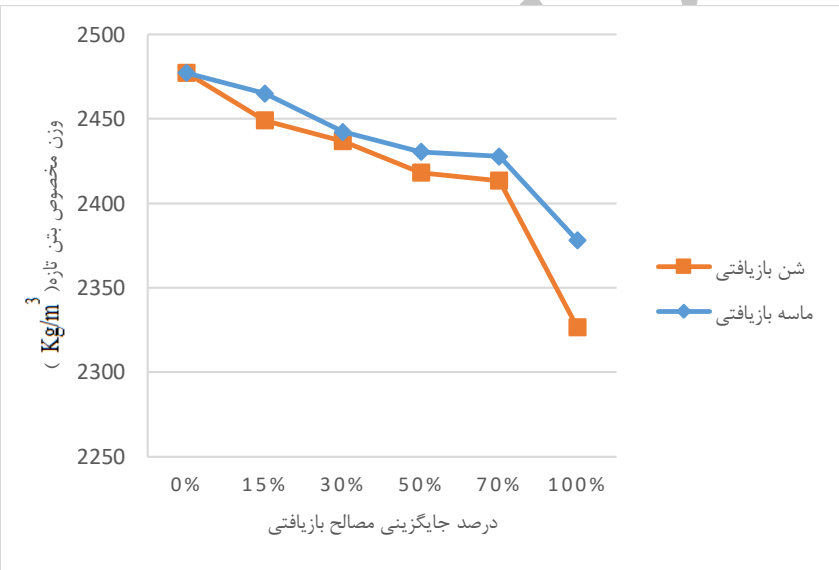
Archive of SID

www.SID.ir

جدول۵ : نتایج حاصل شده از آزمایش‌های بتن تازه برای طرح اختلاط بتن شاهد و بتن‌های بازیافتی

اسم طرح اختلاط	وزن مخصوص بتن تازه(Kg/m^3)	تغییرات وزن مخصوص نسبت به بتن شاهد(%)	اسلامپ (mm)
CC	۲۴۷۷/۲	۰	۳۸
۱۵RS-	۲۴۶۵/۰	-۰/۵	۴۱
-۳۰RS	۲۴۴۲/۳	-۱/۴	۴۸
-۵۰RS	۲۴۳۰/۵	-۱/۹	۴۵
-۷۰RS	۲۴۲۷/۷	-۲	۴۲
-۱۰۰RS	۲۳۷۸/۰	-۴	۴۰
-۱۵RG	۲۴۴۹/۱	-۱/۱۳	۴۳
-۳۰RG	۲۴۳۶/۸	-۱/۶	۴۵
-۵۰RG	۲۴۱۸/۲	-۲/۴	۴۶
-۷۰RG	۲۴۱۳/۴	-۲/۶	۴۸
-۱۰۰RG	۲۳۲۶/۶	-۶/۱	۵۰

همان‌طور که در شکل۵ مشخص است، با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی وزن مخصوص بتن تازه کاهش می‌یابد. علت این موضوع می تواند مربوط به چگالی پایین‌تر سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی باشد (جدول ۲). همچنین جایگزینی شن بازیافتی باعث کاهش بیشتر در وزن مخصوص بتن تازه و در نتیجه وزن مخصوص بتن سخت شده می‌گردد.



شکل۵ : مقایسه وزن مخصوص بتن بازیافتی با جایگزینی ماسه و شن بازیافتی.

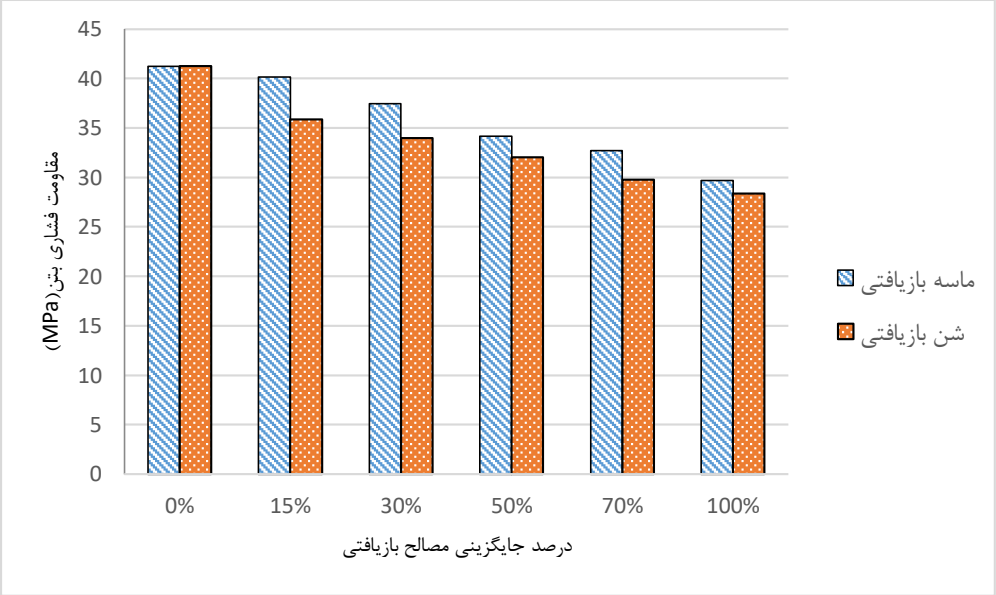
مقاومت فشاری طرح‌های اختلاط بتن بازیافتی در مقایسه با طرح اختلاط بتن شاهد در جدول ۶ مشخص شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است با افزایش درصد جایگزینی مصالح بازیافتی به جای مصالح طبیعی مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد. علت این امر ممکن است ساختار ناهمگن سنگدانه‌های بازیافتی و ضعف سنگدانه‌های بازیافتی در سطوح اتصال اجزای مختلف آن به همدیگر باشد. بیشترین کاهش مقاومت فشاری بتن در جایگزینی کامل مصالح بازیافتی به جای مصالح طبیعی صورت گرفته است، به طوری که با جایگزینی ۱۰۰ درصدی ماسه و شن بازیافتی به جای ماسه و شن طبیعی به ترتیب کاهش مقاومت ۲۸ و ۳۱/۲ درصدی در مقایسه به مقاومت فشاری بتن شاهد مشاهده می‌شود.

www.SID.ir

جدول۶ : نتایج آزمایش مقاومت فشاری طرح اختلاط بتن شاهد و بتن‌های بازیافتی

نماد طرح اختلاط	مقاومت فشاری(MPa)	تغییرات مقاومت نسبت به بتن شاهد(٪)
CC	۴۱/۲۳	۰
۱۵RS-	۴۰/۱۴	-۲/۶
-۳۰RS	۳۷/۴۵	-۹/۱
-۵۰RS	۳۴/۱۸	-۱۷
-۷۰RS	۳۲/۶۹	-۲۰/۷
-۱۰۰RS	۲۹/۶۹	-۲۸
-۱۵RG	۳۵/۸۴	-۱۳
-۳۰RG	۳۳/۹۵	-۱۷/۶
-۵۰RG	۳۲/۰۲	-۲۲/۳
-۷۰RG	۲۹/۷۸	-۲۷/۷
-۱۰۰RG	۲۸/۳۵	-۳۱/۲

شکل۶ تأثیر جایگزینی ماسه و شن بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن را در مقایسه با همدیگر نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، افزودن ماسه بازیافتی نسبت به شن بازیافتی تأثیر نامطلوب کمتری بر مقاومت فشاری بتن دارد.



شکل۶ : مقایسه تأثیر جایگزینی ماسه و شن بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن بازیافتی.

اگرچه در میزان جایگزینی ۱۵ درصد ماسه بازیافتی به جای ماسه طبیعی، کمترین تأثیر نامطلوب سنگدانه‌های بازیافتی بر مقاومت فشاری بتن بازیافتی مشاهده می‌گردد، اما باید توجه داشت که هدف اصلی از ساخت بتن بازیافتی بهره‌وری هرچه بیشتر از مصالح بازیافتی است، مشروط بر اینکه باعث کاهش شدید مقاومت فشاری بتن بازیافتی نسبت به بتن شاهد نگردد. از طرف دیگر جایگزینی ماسه بازیافتی در مقادیر بالای ۵۰ درصد باعث افت نسبتاً زیاد مقاومت فشاری بتن بازیافتی می‌گردد. با توجه به مطالب مذکور جایگزینی ۳۰ درصد مصالح بازیافتی می‌تواند انتخاب بهینه‌ای برای طرح اختلاط بتن بازیافتی باشد. از این رو طرح اختلاط با جایگزینی ۳۰ درصد ماسه بازیافتی (RS-۳۰) به عنوان طرح اختلاط بهینه بازیافتی برای مرحله بعدی تحقیق انتخاب می‌گردد.

۲-۴-مرحله دوم تحقیق: بررسی تأثیر نوع و میزان الیاف

در این مرحله از تحقیق، خواص کششی و خمشی بتن بازیافتی بهینه بررسی می‌شود و تأثیر افزودن الیاف بر آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای این منظور طرح اختلاط بهینه بازیافتی(RS-۳۰) به الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی مسلح می‌شود. طرح اختلاط‌های مسلح شده

www.SID.ir

شامل ۴ طرح اختلاط بتن است که در هر طرح اختلاط، یکی از انواع الیاف پلی‌پروپیلن یا فولادی استفاده می‌شود. میزان الیاف مورد استفاده برای هر نوع از الیاف مقادیر ۱ و ۱/۵ درصد حجمی از بتن است. با آگاهی از اینکه وجود الیاف در بتن باعث کاهش کارایی، مشکل در قالب‌ریزی و تراکم بتن می‌گردد، میزان روان کننده‌ی بتن الیافی تا حدودی بیشتر در نظر گرفته می‌شود.

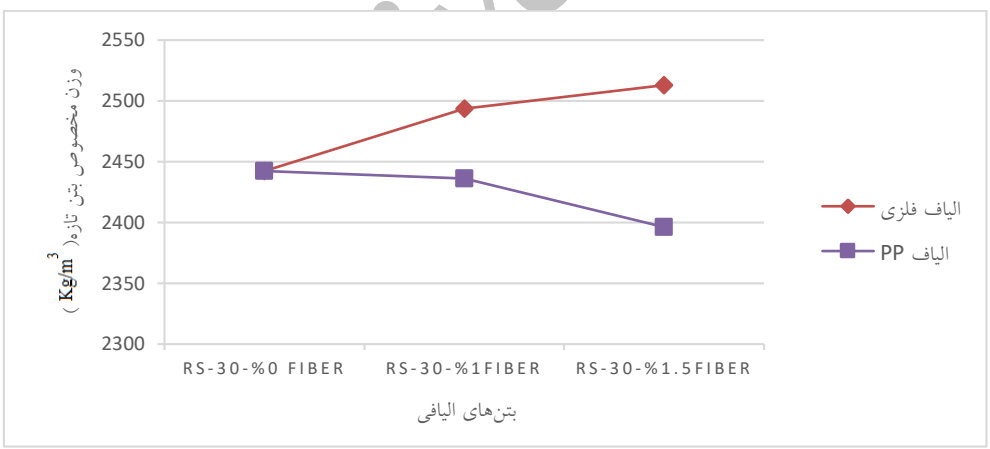
۲-۴-۱- ارائه نتایج مرحله دوم تحقیق

در جدول ۷ نتایج حاصل شده از آزمایش‌های بتن تازه الیافی مشخص است. در این جدول بتن بازیافتی الیافی با نماد (درصد حجمی-نوع الیاف-RS-۳۰) مشخص شده است. در این نمادها الیاف پلی‌پروپیلن با نماد PP و الیاف فولادی با نماد St و عدد آخر نمایانگر درصد الیاف مورد استفاده در بتن است. همان‌طور که قبلاً در جدول ۳ اشاره شد طول دو نوع الیاف، مشابه همدیگر است.

جدول۷: نتایج حاصل شده از آزمایش‌های بتن تازه برای بتن‌های بازیافتی الیافی در مقایسه با بتن شاهد و بتن بازیافتی غیرمسلح

اسم طرح اختلاط	وزن مخصوص بتن تازه(Kg/m^3)	تغییرات وزن مخصوص نسبت به بتن شاهد(%)	اسلامپ (mm)
CC	۲۴۷۷/۲	۰	۳۸
۳۰RS-	۲۴۴۲/۳	-۱/۴	۴۸
RS-۳۰-St-۱	۲۴۹۳/۶	۰/۶	۳۸
RS-۳۰-St-۱/۵	۲۵۱۲/۹	۱/۴	۳۳
RS-۳۰-PP-۱	۲۴۳۶/۰۵	-۱/۶	۴۱
RS-۳۰-PP-۱/۵	۲۳۹۶/۳۴	-۳/۲	۳۷

با توجه به شکل۷ افزودن الیاف به بتن موجب تغییر در وزن مخصوص بتن بازیافتی می‌گردد. به این صورت که الیاف پلی‌پروپیلن که چگالی کمتری نسبت به دیگر اجزای بتن دارند باعث کاهش وزن مخصوص و الیاف فولادی که وزن مخصوص بالاتری نسبت به اجزای دیگر بتن دارند موجب افزایش وزن مخصوص بتن بازیافتی می‌گردند (جدول ۲ و جدول ۳).



شکل۷ : مقایسه وزن مخصوص بتن بازیافتی با درصدهای مختلف الیاف.

مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های بتنی در جدول۸ مشخص شده است. با توجه به نتایج مقاومت کششی و خمشی بتن بازیافتی بهینه نسبت به بتن شاهد به ترتیب به مقدار ۴/۵ و ۴/۷ درصد کمتر است. همان‌طور که مشخص است افزودن الیاف باعث افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن می‌شود. اما تأثیر افزودن الیاف فولادی نسبت به الیافPP به مراتب بالاتر است. علت این امر بالاتر بودن مقاومت کششی الیاف فولادی نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن است (جدول ۳).

www.SID.ir

جدول۸ : نتایج مقاومت کششی و خمشی بتن‌های بازیافتی الیافی در مقایسه با بتن شاهد و بتن بازیافتی غیرمسلح

نماد طرح اختلاط	مقاومت کششی(MPa)	مقاومت خمشی(MPa)	تغییرات مقاومت کششی نسبت به بتن شاهد(%)	تغییرات مقاومت خمشی نسبت به بتن شاهد(%)
CC	۲/۹۲	۵/۱۶	۰	۰
۳۰-RS	۲/۷۹	۴/۹۲	-۴/۵	-۴/۷
RS-۳۰-PP-۱	۳/۲۳	۵/۴۳	۱۰/۴	۵/۳
RS-۳۰- PP-۱/۵	۳/۶۶	۵/۶۳	۲۵/۱	۹/۲
RS-۳۰- St-۱	۳/۹۸	۶/۰۱	۳۶/۱	۱۶/۵
RS-۳۰- St-۱/۵	۴/۵۸	۶/۶۸	۵۶/۶	۲۹/۶

نمونه‌های بتن الیافی و بتن بدون الیاف پس از انجام آزمایش مقاومت کششی و خمشی در شکل۸ مشخص شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص 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 ترک خوردگی بتن ایفا می‌کنند. 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.

شکل۸ : مقایسه بتن بازیافتی الیافی(سمت راست) و بدون الیاف(سمت چپ) از لحاظ ترک خوردگی و شکست.

۳- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق در دو فاز جداگانه اثر ابعاد و میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی به جای سنگدانه‌های طبیعی در بتن و سپس تأثیر نوع و میزان الیاف بر خواص مکانیکی بتن تازه و سخت شده بررسی شد و نتایج زیر به دست آمد:

چگالی سنگدانه‌های بازیافتی بتنی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی کمتر است؛ از این رو با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، وزن بتن کاهش می‌یابد. وزن مخصوص بتن تازه بازیافتی در صورت جایگزینی کامل ماسه بازیافتی به جای ماسه طبیعی ۴ درصد، و در صورت جایگزینی کامل شن بازیافتی به جای شن طبیعی ۶/۱ درصد نسبت به بتن شاهد کمتر است. در واقع بتن بازیافتی نسبت به بتن معمولی سبک‌تر است. افزودن ۱ و ۱/۵ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن به بتن بازیافتی به ترتیب باعث کاهش ۱/۶ و ۳/۲ درصدی وزن مخصوص بتن می‌گردد. افزودن ۱ و ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی به بتن بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۰/۶ و ۱/۴ درصدی وزن مخصوص بتن می‌گردد. علت این امر چگالی بیشتر الیاف فولادی نسبت به دیگر اجزای بتن و در مقابل چگالی کمتر الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به دیگر اجزای بتن است.

www.SID.ir

نتایج آزمایش‌های صورت گرفته بر روی بتن بازیافتی نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بتن بازیافتی با درصد افزودن RCA به بتن نسبت معکوس دارد. به طوری که جایگزینی کامل ماسه بازیافتی به جای ماسه طبیعی کاهش مقاومت ۲۸ درصدی، و جایگزینی کامل شن بازیافتی به جای شن طبیعی کاهش مقاومت ۳۱/۲ درصدی در پی دارد. علت این امر ممکن است ساختار ناهمگن سنگدانه‌های بازیافتی و ضعف سنگدانه‌های بازیافتی در سطوح اتصال اجزای مختلف آن به همدیگر باشد. از این رو متناسب با مقاومت مدنظر باید از درصد RCA مناسب در ساخت بتن استفاده نمود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقاومت کششی و خمشی بتن بازیافتی نیز تحت تأثیر افزودن RCA تا حدودی کاهش می‌یابد. البته باید توجه داشت تأثیرات نامطلوب RCA بر روی مقاومت فشاری بتن نسبت به مقاومت کششی و خمشی بتن، به مراتب بیشتر است.

در صورت استفاده از الیاف در بتن‌های بازیافتی می‌توان به مقاومت کششی بالاتری نسبت به بتن شاهد دست یافت. افزودن ۱ و ۱/۵ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن به بتن بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۱۰/۴ و ۲۵/۱ درصدی مقاومت کششی حاصل از آزمایش شکافت بتن نسبت به بتن شاهد می‌گردد. افزودن ۱ و ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی به بتن بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۳۶/۱ و ۵۶/۶ درصدی مقاومت کششی حاصل از آزمایش شکافت بتن نسبت به بتن شاهد می‌گردد. در صورت استفاده از الیاف در بتن‌های بازیافتی می‌توان به مقاومت خمشی بالاتری نسبت به بتن شاهد دست یافت. افزودن ۱ و ۱/۵ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن به بتن بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۵/۳ و ۹/۲ درصدی مقاومت خمشی بتن نسبت به بتن شاهد می‌گردد. افزودن ۱ و ۱/۵ درصد حجمی الیاف فولادی به بتن بازیافتی به ترتیب باعث افزایش ۱۶/۵و ۲۹/۶ درصدی مقاومت خمشی بتن نسبت به بتن شاهد می‌گردد. لذا تأثیر الیاف فولادی نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن در افزایش مقاومت کششی و خمشی بتن به مراتب بیشتر است. علت این امر می‌تواند مربوط به بالاتر بودن مقاومت کششی الیاف فولادی نسبت به الیاف پلی‌پروپیلن باشد.

مشاهدات مربوط به شکست نمونه‌های بتنی نشان می‌دهد که وجود الیاف در بتن باعث ایجاد تأخیر در ترک‌های اولیه می‌شود و از خرد شدگی بتن که ذاتاً یک ماده ترد است جلوگیری می‌نماید. در واقع الیاف بتن بر روی ترک‌های ایجاد شده پل می‌زنند و از گسترش ترک‌خوردگی جلوگیری می‌کنند.

با عنایت به نتایج این تحقیق، از بتن بازیافتی الیافی می‌توان در کاربردهایی که مقاومت کششی و خمشی و کنترل ترک خوردگی بتن حائز اهمیت است، بهره برد. از جمله این موارد می‌توان به روسازی راه‌ها، باند فرودگاه‌ها، کف سازی‌های صنعتی، ساخت قطعات پیش ساخته ساختمانی از جمله پانل‌های سایبان، بتن سطوح انحنادار همچون تونل‌ها اشاره کرد.

مراجع

[1] Tahouni, Shapoor. (2010). *Design of reinforced concrete structures (ABA-3th-edition)*. 15th edition. Tehran: University of Tehran press, 2-3, 36-37.
[2] Mostofinejad, Davood. (2008). *Reinforced concrete structures (volume1)*, 10th edition, Esfahan: Arkan danesh press, 75
[3] Lu W, Yuan H. (2011). A framework for understanding waste management studies in construction. *Waste Management*, 31(6), 1252-60.
[4] Lu W, Yuan H, Li J, Hao JJ, Mi X, Ding Z. (2011). An empirical investigation of construction and demolition waste generation rates in Shenzhen city, South China. *Waste Management*, 31(4), 680-7.
[5] Saghafi MD, Teshnizi ZAH. (2011). Building deconstruction and material recovery in Iran: An analysis of major determinants. *Procedia Engineering*. 21(0), 853-63.
[6] Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 33, 574–580.
[7] Government agency of New Zealand, (2011). *Best Practice Guide for the use of Recycled Aggregates in New Concrete, Cement & Concrete Association of New Zealand*, 978-0-908956-23-4.
[8] Kang, T. H.-K., Kim, W., Kwak, Y.-K., & Hong, S.-G. (2012). The choice of recycled concrete aggregates for flexural members. *In Proceedings of 18th international association for bridge and structural engineering congress on innovative infrastructures*, 6,726-731.
[9] Kutalmıs_ Recep Akça, Özgür Çakýr, Metin _Ipek. (2015). Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 98, 620–630.

Archive of SID
www.SID.ir

[10] Y. Ding and W. Kusterle. (2000). Compressive stress-strain relationship of steel fibre reinforced concrete at early age. *Cement Concrete Research*, 30, 1573-1579.

Archive of SID

www.SID.ir