

عملکرد بتن الیافی سازگار با محیط زیست در روسازی بتنی

محسن احمدی^۱، ابوالفضل حسنی^{۲*}، محمدرضا سلیمانی کرمانی^۳، حسین یوسفی^۴

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه، مسکن و شهرسازی

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران

j_ahmadi@iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: [توسط مجله تکمیل میشود]

تاریخ دریافت: [توسط مجله تکمیل میشود]

چکیده- امروزه استفاده از مصالح بازیافتی در صنعت در حال افزایش است. نمونه‌ای از این صنعت تولید بتن سبز و سازگار با محیط زیست است. تاکنون پژوهش‌های گوناگونی در دنیا در زمینه استفاده از خرده بتن‌های ناشی از تخریب و ساخت و ساز به عنوان سنگدانه در بتن انجام شده است اما با بررسی نخاله‌های ساختمانی در کشور علاوه بر بتن، مواد دیگری همچون خرده آجر، خرده سرامیک خرده سنگ- های ساختمانی و دیگر مواد موجود است. در این پژوهش به بررسی استفاده از مصالح بازیافتی ناشی از نخاله‌های ساختمانی به عنوان سنگدانه در بتن پرداخته شده است. همچنین برای تقویت این نوع بتن و بتن معمولی از الیاف فلزی بازیافتی از لاستیک خودروهای فرسوده استفاده شده است. بدین منظور نمونه‌های بتنی با درصد‌های مختلف الیاف و سنگدانه‌های بازیافتی ساخته شده و تحت آزمون‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و طاقت خمشی قرار گرفتند. نتایج آزمون‌ها نشان داد که استفاده از این نوع بتن الیافی به عنوان بتن سازه‌ای قابل قبول است. سپس به منظور بررسی نقش الیاف و سنگدانه‌های بازیافتی در طراحی ضخامت دال روسازی بتنی از تئوری خطوط تسلیم استفاده شد و نتایج این روش طراحی حاکی از آن بود که افزودن الیاف تقریباً باعث کاهش ضخامت دال به میزان ۲۰٪ می‌شود.

واژگان کلیدی: نخاله‌های ساختمانی، بتن، الیاف فلزی بازیافتی

۱- مقدمه

آمارها نشان می‌دهد که بیشتر ساختمان‌های ساخته شده در دهه ۵۰ و قبل از آن در دست تخریب است، که بیشتر از نوع بنایی (آجری با سقف طاق ضربی)، و به ندرت با اسکلت بتنی است [۳]. بنابراین در نخاله‌های موجود در کشور علاوه بر بتن مواد دیگری همچون آجر، خرده سنگ و مواد دیگر نیز موجود است.

مقدار کاهش یا افزایش مقاومت بتن با سنگدانه‌های بازیافتی بسته به نسبت آب سیمان اختلاط، درصد جایگزینی سنگدانه- های بازیافتی، جنس سنگدانه‌ها و شرایط رطوبتی سنگدانه‌ها است [۴]. به شکل کلی با افزایش جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با سنگدانه‌های طبیعی خواص مکانیکی بتن کاهش می‌یابد [۵-۶]. همچنین در نسبت‌های پایین آب به سیمان

امروزه حجم دفن زباله‌های صنعتی و ساختمانی در حال گسترش است. یکی از راهکارها در مدیریت مصالح این گونه آوارها، بازیافت و استفاده دوباره از آنها است. نخاله‌ها را می‌توان بعد از جداسازی خرد، و بعد از سرند کردن به عنوان سنگدانه در بتن استفاده کرد. استفاده از نخاله‌های ساختمانی به عنوان سنگدانه در بتن ضمن کاهش آلودگی محیط‌زیست باعث حفظ معادن طبیعی شن و ماسه نیز می‌شود.

در کشورهای صنعتی ضایعات بتن بیشترین حجم را در میان زباله‌های ساختمانی دارد به گونه‌ای که در آمریکا ۶۷٪ از کل زباله‌های ساختمانی را بتن تشکیل می‌دهد [۱]. در اروپا سالانه حدود ۵۰ میلیون تن بتن تخریب می‌شود [۲]. اما در ایران

الیاف در بتن استفاده کرد، و پژوهش‌ها نشان داده‌اند که استفاده از آنها علاوه بر رفع مشکل زیست محیطی، باعث بهبود خواص مکانیکی بتن و افزایش مقاومت در برابر خستگی و ضربه می‌شود [۲۰-۲۲].

۲- اهداف پژوهش

در این پژوهش به منظور بررسی تاثیر سنگدانه‌های بازیافتی بر خواص مکانیکی بتن، از این سنگدانه‌ها به میزان ۰/۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ جایگزین درشت دانه‌های طبیعی شده است و همچنین از سیم‌های فلزی بازیافتی از لاستیک خودروهای فرسوده به عنوان الیاف در بتن معمولی و بتن با سنگدانه‌های بازیافتی با درصد حجمی ۰/۵٪ و ۱٪ استفاده شده است. به منظور بررسی اثر سنگدانه‌ها بر مقاومت بتن از دانه‌بندی یکسان برای مصالح طبیعی و بازیافتی استفاده شده است. پس از ساخت بتن و عمل آوری بعد از ۲۸ روز، آزمون‌های مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیر مستقیم و مقاومت خمشی بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. در پایان به بررسی نقش الیاف و سنگدانه‌های بازیافتی بر میزان ضخامت دال روسازی بتنی کف‌های صنعتی پرداخته شده است.

۳- مصالح مصرفی

۳-۱- سنگدانه‌های طبیعی

مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های مصرفی در جدول ۱ نشان داده شده است. برای انجام این پژوهش از دانه‌بندی شماره ۲ آیین-نامه عمومی راه (نشریه ۱۰۱) استفاده شده است. در شکل‌های ۱ و ۲ دانه‌بندی و محدوده مربوط به دانه‌بندی شماره ۲ نشریه ۱۰۱ نشان داده شده است. سایر مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها مصرفی در جدول ۱ نشان داده شده است.

۳-۲- سنگدانه‌های بازیافتی

سنگدانه‌های بازیافتی استفاده شده فقط درشت‌دانه بوده که ترکیبی از ۴۳/۲٪ خرده بتن، ۲۸/۶٪ خرده سنگ‌های ساختمانی، ۱۴/۲٪ خرده سرامیک و ۱۴/۰٪ خرده آجر است. دانه‌بندی این نوع سنگدانه‌ها مشابه با درشت‌دانه‌های طبیعی است. همچنین

کاهش مقاومت بتن با سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به بتن معمولی شدیدتر است [۷-۸]. طبق نتایج به دست آمده از یک پژوهش در صورتی که نسبت آب به سیمان بیشتر از ۰/۵۵ باشد مقاومت فشاری بتن با ۱۰۰٪ سنگدانه‌های بازیافتی تقریباً برابر با بتن معمولی است [۹]. استفاده از سنگدانه‌ها مرطوب با سطح خشک به علت خلل و فرج این‌گونه سنگدانه باعث نفوذ آب به درون آنها شده و باعث عمل‌آوری بهتر بتن می‌شود [۱۰].

راهکارهای گوناگونی برای جبران کاهش مقاومت بتن با سنگدانه‌های بازیافتی پیشنهاد شده است. افزودن خاکستر بادی، میکروسیلیس، افزایش مقدار سیمان و استفاده از انواع الیاف از جمله آنها است [۱۱-۱۴]. الیاف در روسازی‌های بتنی علاوه بر کاهش ضخامت دال و صرفه اقتصادی با کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی و کاهش تعداد درزهای عرضی باعث کاهش نفوذ آب به بستر روسازی و منجر به کاهش هزینه‌های مربوط به تعمیر و نگهداری می‌شود.

قابلیت الیاف در بهبود خواص بتن با سنگدانه‌های بازیافتی وابسته به نوع الیاف، درصد الیاف، نسبت ظاهری الیاف، اصطکاک سطحی و مقاومت کششی الیاف است [۱۵]. به تازگی در پژوهشی که از خرده نخاله‌های ساختمانی و خرده بتن به عنوان سنگدانه‌های بازیافتی به میزان ۵۰٪ و ۱۰۰٪ و همچنین از الیاف شیشه‌ای و پلی پروپیلن در بتن استفاده شد، نتایج نشان داد که با افزایش سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت بتن کاهش می‌یابد اما با افزودن الیاف این کاهش مقاومت جبران می‌شود. همچنین الیاف شیشه‌ای نسبت به الیاف پلی پروپیلن عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند [۱۶].

علاوه بر پژوهش‌های یاد شده، پژوهش‌های فراوان دیگر در خصوص استفاده از انواع الیاف‌های صنعتی با درصدهای گوناگون و نسبت‌های ظاهری مختلف روی خواص مکانیکی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی، انجام شده است و نتایج رضایت بخشی ناشی از افزودن الیاف گزارش شده است [۱۷-۱۹]، اما تاکنون پژوهشی در زمینه استفاده از الیاف بازیافتی در بتن با سنگدانه‌های بازیافتی انجام نشده است. از سیم‌های فلزی موجود در باقی مانده بازیافت لاستیک خودرو می‌توان به عنوان

در طرح اختلاطها از الیاف فولادی با قطر ۱ میلی‌متر و با طول بین ۳۰ تا ۷۰ میلی‌متر استفاده شده است. خصوصیات الیاف فلزی بازیافتی در جدول ۳ نشان داده شده است.

۴- طرح اختلاط

طرح اختلاط استفاده شده در این پژوهش براساس ACI211-89 و به روش حجمی و با در نظر گرفتن مقاومت فشاری استوانه-ای ۳۰ MPa است. نتایج طرح اختلاط در جدول ۴ آمده است. همچنین در جدول ۵ مقادیر مختلف مصالح در واحد حجم بتن برای نمونه‌های مختلف نشان داده شده است. در این پژوهش برای بررسی اثر سنگدانه‌های بازیافتی و الیاف مقدار نسبت آب به سیمان ثابت نگه داشته شده است.

مشخصات فیزیکی این نوع سنگدانه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

۳-۳- سیمان

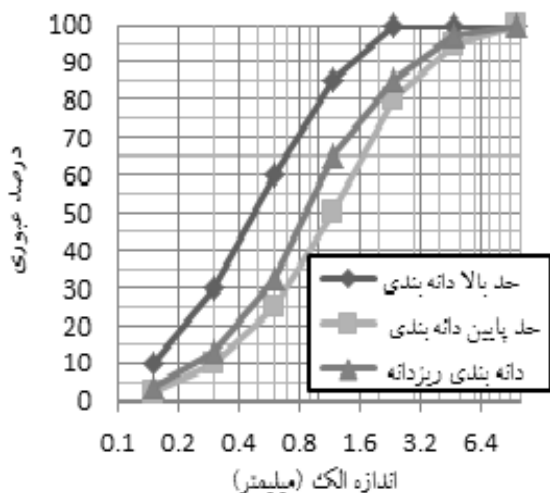
سیمان استفاده شده در این مطالعه از نوع پرتلند تیپ ۲، تولید کارخانه آبیگ، با توده ویژه $3/11 \text{ gr/cm}^3$ و سطح ویژه 3027 gr/cm^2 است. در جدول ۲ مشخصات شیمیایی این سیمان نشان داده شده است.

۳-۴- الیاف

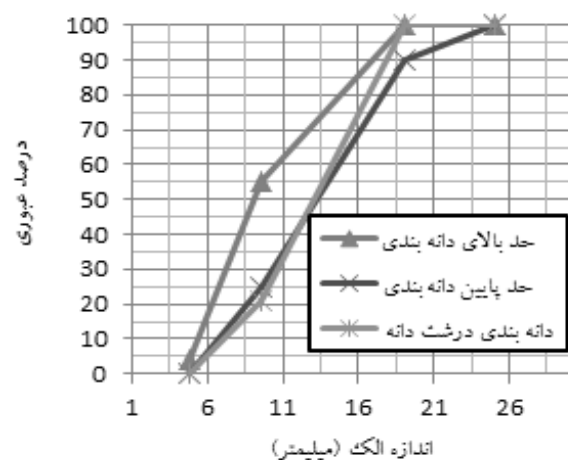
الیاف فلزی همراه دیگر مواد بازیافتی همچون ذرات لاستیک خودرو از یک کارگاه واقع در ساوه تهیه شده و سپس الیاف با قطر ۱ میلی‌متر از سایر مواد زائد تفکیک شده است. به منظور بررسی تاثیر الیاف فولادی بازیافتی روی خواص مکانیکی بتن

جدول ۱- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌های بازیافتی و طبیعی

نوع سنگدانه‌ها			استاندارد مربوطه	مشخصات سنگدانه‌ها
ریزدانه طبیعی	درشت دانه بازیافتی	درشت دانه طبیعی		
۲/۳۸	۱۹	۱۹	ASTM C136	حداکثر اندازه‌ی اسمی (mm)
۲۶۰۰	۲۵۸۰	۲۶۱۰	ASTM C127	جرم حجمی (Kg/m^3)
۲/۱	۶/۲۵	۱/۲۵	ASTM C127	درصد جذب آب در حالت اشباع با سطح خشک
۳/۰۳	-	-	ASTM C136	مدول نرمی
۸۴	-	-	ASTM D2419	درصد ارزش ماسه ای



شکل ۲- منحنی دانه بندی ریزدانه طبیعی



شکل ۱- منحنی دانه بندی درشت دانه‌های طبیعی و بازیافتی

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ ۲

SiO ₂	۲۱
CaO	۶۴
Al ₂ O ₃	۵/۴
Fe ₂ O ₃	۳/۹
MgO	۳/۴
SO ₃	۲/۳

۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر استفاده شده است. تمام نمونه‌ها یک روز پس از ساخت، قالب‌برداری شده و بعد از ۲۸ روز عمل-آوری تحت آزمایش مقاومت فشاری طبق استاندارد BS 1881-116 قرار گرفتند و مقادیر میانگین آن‌ها در جدول ۶ آورده شده است.

همان‌گونه که از جدول ۶ مشاهده می‌شود به طور کلی با افزایش جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد (حداکثر ۱۰٪ کاهش). این مقدار کاهش مشاهده شده در مقاومت فشاری به علت مقاومت کم سنگدانه‌های بازیافتی، به ویژه سرامیک و آجر نسبت به مصالح طبیعی است.

جدول ۴: طرح اختلاط بکاررفته در تحقیق

مقدار	مشخصات بتن
۳۰۰	مقاومت فشاری استوانه‌ای استاندارد (kg/cm^2)fc
۳۵۲	عیار سیمان (kg/m^3)
۰/۵۴	نسبت آب به سیمان (w/c)
۹۷۰	مقدار شن مصرفی (kg/m^3)
۸۳۱	مقدار ماسه مصرفی (kg/m^3)

جدول ۳- مشخصات الیاف فلزی بازیافتی

۱۸۰۰۰-۲۰۰۰۰	مقاومت نهایی گسیختگی (kg/cm^2)
۳۱۰ ^۶	مدول الاستیسیته (kg/cm^2)
۷۸۰۰	وزن مخصوص (kg/m^3)
۱۰	درصد افزایش طول هنگام پارگی
۱	قطر الیاف (mm)

۵- نتایج و بحث

۵-۱- آزمون مقاومت فشاری

به منظور بررسی تاثیر درصدهای متفاوت الیاف و سنگدانه‌های بازیافتی روی مقاومت فشاری بتن از نمونه‌های مکعبی با ابعاد

جدول ۵: مقادیر مختلف مصالح در واحد حجم بتن

نام طرح اختلاط	سیمان (kg)	ریزدانه (kg)	درشت‌دانه طبیعی (kg)	درشت‌دانه بازیافتی (kg)	آب (lits)	الیاف بازیافتی (kg)
R0F0	۳۵۲	۸۳۱	۹۷۰	۰	۱۹۰	۰
R50F0	۳۵۲	۸۳۱	۴۸۵	۴۸۵	۱۹۰	۰
R100F0	۳۵۲	۸۳۱	۰	۹۷۰	۱۹۰	۰
R0F0/5	۳۵۲	۸۳۱	۹۷۰	۰	۱۹۰	۳۹
R50F0/5	۳۵۲	۸۳۱	۴۸۵	۴۸۵	۱۹۰	۳۹
R100F0/5	۳۵۲	۸۳۱	۰	۹۷۰	۱۹۰	۳۹
R0F1	۳۵۲	۸۳۱	۹۷۰	۰	۱۹۰	۷۸
R50F1	۳۵۲	۸۳۱	۴۸۵	۴۸۵	۱۹۰	۷۸
R100F1	۳۵۲	۸۳۱	۰	۹۷۰	۱۹۰	۷۸

مقایسه میان مقاومت فشاری نمونه‌ها در مقادیر مختلف الیاف نشان می‌دهد که افزودن الیاف به میزان ۰/۵٪ باعث افزایش مقاومت فشاری می‌شود اما افزودن الیاف به میزان ۱٪ باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود. عامل اصلی بر مقاومت فشاری بتن مقاومت سنگدانه‌ها، خمیر سیمان و اتصال بین این دو ناحیه است و افزودن الیاف در صورتی که نمونه‌ها به خوبی متراکم شده باشند تاثیر اندکی بر بهبود مقاومت فشاری دارد. همچنین کاهش مقاومت فشاری بتن در نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف به دلیل حفره‌های ایجاد شده ناشی از افزودن این مقدار الیاف است.

مقاله چسبیده قدیمی سطح سنگدانه‌ها است. سطح زیر و ناصاف سنگدانه‌ها باعث نفوذ خمیر سیمان به حفره‌های درشت‌دانه‌های باز یافتی می‌شود و درگیری بهتری بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها بوجود می‌آید. افزایش الیاف باعث افزایش مقاومت خمشی بتن می‌شود و این افزایش مقاومت در بتن با ۱٪ الیاف بیشتر از ۰/۵٪ الیاف است. اما مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی الیاف به درصد جایگزینی سنگدانه‌های باز یافتی وابسته نیست به طوری که در نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سنگدانه‌های باز یافتی به همراه ۰/۵٪ الیاف مقاومت خمشی تقریباً $3/9 \text{Mpa}$ است و در بتن با ۱٪ الیاف مقاومت خمشی $4/3 \text{Mpa}$ است.

جدول ۶: نتایج میانگین آزمایش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی (MPa)

نام طرح	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مقاومت خمشی
R0F0	۳۷/۱	۳/۲۹	۳/۰۵
R50F0	۳۴/۹	۳/۰۴	۳/۴۲
R100F0	۳۳/۵	۲/۸۸	۳/۵۱
R0F0/5	۳۸/۳	۴/۲۹	۳/۹۱
R50F0/5	۳۸/۵	۳/۹۱	۳/۹۰
R100F0/5	۳۴/۸	۳/۷۵	۳/۸۳
R0F1	۳۳/۱	۵/۳۵	۴/۲۴
R50F1	۳۳/۲	۴/۶۱	۴/۲۹
R100F1	۲۹/۵	۴/۰۳	۴/۳۲

۵-۴- طاق خمشی

یکی از خواص مهم بتن الیافی قابلیت انتقال تنش در مقطع

آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد $150 \times 300 \times 150$ میلی‌متر بعد از ۲۸ روز عمل‌آوری طبق استاندارد ASTM C496-96 انجام گرفت. میانگین نتایج در جدول ۶ آورده شده است. مطابق جدول ۶ مقاومت کششی مانند مقاومت فشاری با افزایش جایگزینی سنگدانه‌های باز یافتی کاهش می‌یابد.

۵-۲- آزمون مقاومت کششی غیر مستقیم

با افزودن الیاف به بتن با مقادیر مختلف سنگدانه‌های باز یافتی، مقاومت کششی بتن افزایش می‌یابد به طوری که بیشترین مقاومت مربوط به نمونه‌های حاوی ۱٪ الیاف است. افزودن الیاف به میزان ۱٪ در بتن با ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ سنگدانه‌های باز یافتی باعث می‌شود که مقاومت کششی بتن نسبت به حالت بدون الیاف به ترتیب به میزان ۶۸/۱٪، ۵۱/۶٪ و ۴۹/۳٪ افزایش یابد.

۵-۳- آزمون مقاومت خمشی

آزمون مقاومت خمشی بر نمونه‌های تیری شکل با ابعاد $100 \times 100 \times 500$ میلی‌متر بر اساس استاندارد ASTM C1018 انجام شد. نتایج میانگین آزمون مقاومت خمشی در جدول ۶ آورده شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود مقاومت خمشی بر خلاف مقاومت‌های فشاری و کششی با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های باز یافتی افزایش می‌یابد. عاملی که می‌تواند توجیهی بر این ادعا باشد، چسبندگی بهتر

۵-۵- مقاومت خمشی معادل

مقاومت خمشی معادل، f_c ، از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

$$f_c = \frac{T_b}{\delta_b} \cdot \frac{L}{bh^2} \quad (1)$$

در این رابطه f_c مقاومت خمشی معادل بر حسب MPa، T_b ،
طاقة خمشی بتن (N.mm)، δ_b و L به ترتیب مقدار خیز در
وسط تیر و طول دهانه تیر بر حسب (mm) می‌باشند. معمولاً δ_b
، $1/150$ دهانه تیر می‌باشد و برای یک تیر با دهانه ۴۵۰ میلی‌متر
این مقدار برابر با ۳ میلی‌متر است. بنابراین T_b برابر با طاقت
خمشی تا جابجایی ۳ میلی‌متر می‌باشد. $R_{e,3}$ نسبت مقاومت
خمشی معادل می‌باشد که از تقسیم مقاومت خمشی معادل به
مقاومت خمشی بتن در لحظه گسیختگی بدست می‌آید. در
جدول ۷ مقاومت خمشی معادل و نسبت مقاومت خمشی
معادل محاسبه شده است.

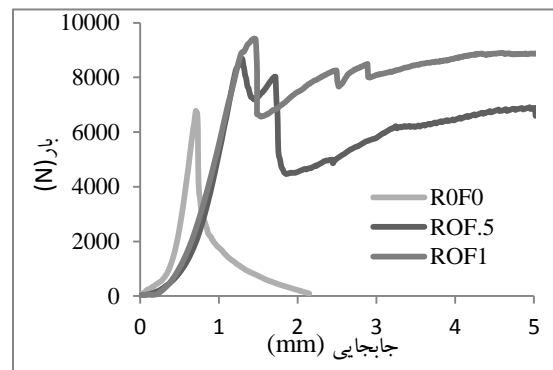
جدول ۷: نتایج طاقت خمشی، مقاومت خمشی معادل و نسبت مقاومت
خمشی معادل بتن بر حسب درصد های مختلف الیاف و سنگدانه

نام طرح	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	مقاومت خمشی
R0F0/5	۳۸/۳	۴/۲۹	۳/۹۱
R50F0/5	۳۸/۵	۳/۹۱	۳/۹۰
R100F0/5	۳۴/۸	۳/۷۵	۳/۸۳
R0F1	۳۳/۱	۵/۳۵	۴/۲۴
R50F1	۳۳/۲	۴/۶۱	۴/۲۹
R100F1	۲۹/۵	۴/۰۳	۴/۳۲

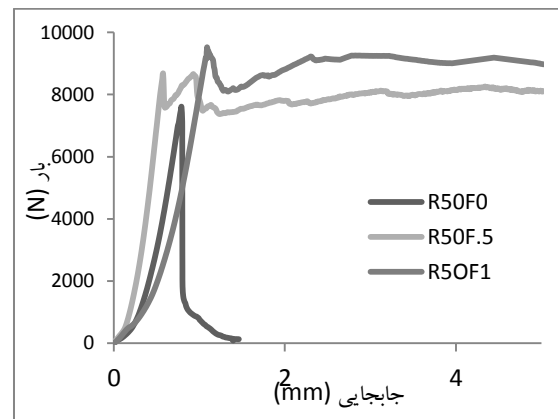
۵-۶- ضخامت دال روسازی بتنی

روش های کنونی طراحی روسازی بتنی بر اساس تحلیل
الاستیک خطی بر مبنای معادلات تنش و سترگارد است. در این
معادلات تنش مجاز در بتن به وسیله‌ی مدول گسیختگی بتن^۱
محدود شده است. اثر الیاف بر مدول گسیختگی بتن با نسبت-
های کمتر از ۱٪ ناچیز است. بنابراین طراحی روسازی بتنی
مسلح به الیاف با روش طراحی الاستیک خطی منجر به

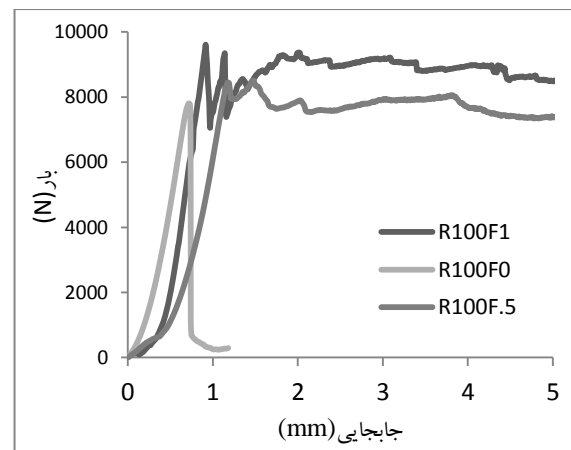
ترک خورده است، که عموماً با عنوان طاقت خمشی شناخته
می‌شود. طاقت خمشی از محاسبه‌ی سطح زیر نمودار بار-
جابجایی به دست می‌آید. در شکل های ۳ تا ۵ نمودار بار-
جابجایی بتن با درصد های مختلف الیاف و سنگدانه های
بازیافتی نشان داده شده است. در جدول ۷ سطح زیر نمودار
این شکل ها تا جابجایی ۳ میلی متر محاسبه شده است.



شکل ۳: نمودار بار- جابجایی بتن با ۰٪ سنگدانه های بازیافتی



شکل ۴: نمودار بار- جابجایی بتن با ۵۰٪ سنگدانه های بازیافتی



شکل ۵: نمودار بار- جابجایی بتن با ۱۰۰٪ سنگدانه های بازیافتی

ظرفیت لنگر خمشی بالای دال (M_n) از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود.

$$M_n = \frac{f_{ctk,fl}}{\gamma_c} \left(\frac{h^2}{6} \right) \quad (3)$$

با جایگزینی روابط (۲) و (۳) در رابطه (۱)، بار نهایی متمرکز مجاز (P_u) از رابطه (۴) به دست می‌آید. برای یک بار متمرکز مشخص ضخامت مورد نیاز از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود.

$$P_u = 2\pi \left[\frac{f_{ctk,fl}}{\gamma_c} (R_{e,3}) \left(\frac{h^2}{6} \right) + \frac{f_{ctk,fl}}{\gamma_c} \left(\frac{h^2}{6} \right) \right] \quad (4)$$

$$h = \sqrt{\frac{3 \cdot P_u \cdot \gamma_c}{\pi \cdot f_{ctk,fl} \cdot (1 + R_{e,3})}} \quad (5)$$

در صورتی که دال فاقد الیاف و یا آرماتور باشد از آنجا که دیگر برای بتن غیر مسلح طاقت خمشی و مقاومت خمشی معادل کاربردی ندارد، بنابراین در محاسبه‌ی ضخامت دال ساده پارامتر $R_{e,3}$ وارد معادلات طراحی نمی‌شود و ضخامت مورد نیاز مانند رابطه‌ی (۵) ولی با چشم‌پوشی از پارامتر $R_{e,3}$ محاسبه می‌شود. فرم ساده شده این رابطه برای بتن غیر مسلح به شکل رابطه‌ی (۶) است.

$$h = \sqrt{\frac{3 \cdot P_u \cdot \gamma_c}{\pi \cdot f_{ctk,fl}}} \quad (6)$$

با در نظر گرفتن بار نهایی متمرکز ۱۴۴ KN و با فرض ۱/۵ برای ضریب جزئی ایمنی بتن، ضخامت دال روسازی با استفاده از رابطه‌های (۵) و (۶) محاسبه شده است و در جدول ۸ نشان داده شده است. همانطور که از جدول یاد شده مشخص است، افزودن ۰/۵٪ الیاف فولادی باعث کاهش ۲۰٪ در ضخامت دال بتنی با درصدهای مختلف سنگدانه بازیافتی می‌شود. همچنین افزودن الیاف به میزان ۱٪ نسبت به ۰/۵٪ باعث تغییر چندانی در کاهش ضخامت دال ندارد و تقریباً ضخامت‌ها برابر است.

ضخامتی تقریباً برابر با روسازی بتنی غیر مسلح می‌شود [۲۳]. مقاومت خمشی باقی مانده در ناحیه نرم‌شدگی بعد از ترک خوردگی معمولاً در طراحی بتن ساده در نظر گرفته نمی‌شود اما در بتن مسلح به الیاف فولادی، تنش کششی بعد از ترک خوردگی به طور قابل توجهی زیاد است و قابل چشم‌پوشی نیست. یکی از روش‌های طراحی روسازی بتنی برای منظور کردن مقاومت کششی بعد از ترک خوردگی بتن، تحلیل به روش خطوط تسلیم^۱ است که طراحی در این روش براساس تحلیل پلاستیک صورت می‌گیرد [۲۳]. معیار طراحی روسازی بتنی در این روش علاوه بر مدول گسیختگی بتن شامل طاقت خمشی نیز می‌شود. انجنر بتن^۲ روش تئوری خطوط تسلیم را برای طراحی روسازی بتنی کف‌های صنعتی قرار گرفته بر روی بستر خاک را پیشنهاد نموده است. اگرچه طراحی ضخامت دال‌های بتنی مسلح به الیاف برای بزرگراه‌ها و فرودگاه‌ها براساس تحلیل خطوط تسلیم امکان‌پذیر است اما استفاده از این روش مشکلاتی مانند وارد کردن پارامتر خستگی، تنش‌های حرارتی و نوع ترافیک است که در طراحی این نوع روسازی‌ها حائز اهمیت است [۲۴].

با استفاده از معادلات معمولی تئوری خطوط تسلیم و با فرض $\alpha = 0$ (بار کاملاً متمرکز) و با چشم‌پوشی از عکس‌العمل بستر، بار نهایی گسیختگی از رابطه (۱) محاسبه می‌شود. در این رابطه M_n و M_p به ترتیب لنگر مقاوم نهایی در پایین و بالای دال است.

$$P_u = 2\pi (M_p + M_n) \quad (1)$$

لنگر مقاوم نهایی در پایین دال (M_p) از رابطه‌ی (۲) به دست می‌آید. در این رابطه $f_{ctk,fl}$ مقاومت گسیختگی بتن ساده (N/mm^2)، γ_c ضریب ایمنی جزئی بتن، $R_{e,3}$ نسبت مقاومت خمشی معادل است که در بخش ۵-۵ محاسبه شد و h ضخامت دال بتنی (mm) است.

$$M_p = \frac{f_{ctk,fl}}{\gamma_c} (R_{e,3}) \left(\frac{h^2}{6} \right) \quad (2)$$

جدول ۸: ضخامت دال بتنی برحسب درصد‌های مختلف الیاف و سنگدانه‌های بازیافتی

نام طرح	ضخامت دال بتنی (mm)
R0F0	۲۶۰/۱
R50F0	۲۴۵/۶
R100F0	۲۴۲/۵
R0F0/5	۲۱۱/۶
R50F0/5	۱۸۳/۲
R100F0/5	۱۸۶/۸
R0F1	۲۰۵/۱
R50F1	۱۸۷/۷
R100F1	۱۸۳/۶

ندارد. بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به علت مقاومت خمشی بیشتر نسبت به بتن معمولی نیازمند ضخامت روسازی کمتری است. افزودن الیاف به میزان ۰/۵٪ و ۱٪ به بتن با درصد‌های مختلف سنگدانه‌های بازیافتی باعث کاهش ضخامت دال روسازی به میزان ۲۰٪ می‌شود.

۷- مراجع

[1].Frondition, K. and Yannas, S. "Economics of Concrete Recycling in United States", Advanced Research institute problems in the recycling concrete, France, Nov.25-28, 1980, pp. 163-168.

[2].Hanse, T.C. "Editor Recycling of demolished concrete and Masonry", RILEM (The international union of testing and Research laboratories for materials and structures), Reports, 1992.

[۳]. ماجدی، محمد حسن و تابش، حسن "مطالعات مقدماتی بازیافت آوارهای ساختمانی (ایستگاه آبعلی)"، مرکز تحقیقات راه مسکن و شهرسازی، ۱۳۸۶.

[4].Wagih, A.M., El-Karmoty, H.Z., Ebid, M. and Okba, S.H. "Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete", Housing and Building National Research Center, Vol. 9, 2013, pp. 193-200.

[۵]. مقیمی، محمود، شفیق، پیام، برنجیان، جواد، نعمتی، کامران "بررسی تجربی تاثیر استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده بر بعضی خواص مکانیکی بتن بازیافتی ساخته شده از خرده بتن"، نشریه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، سال بیست و یکم، شماره دو، ۱۳۸۹.

[6].Choi, W.C. and Yun, W.C. "Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading", Engineering Structure, Vol. 41, 2012, pp. 285-293.

[7].Rao akash [et al.] "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete", Resources Conservation and Recycling, Vol. 50, 2007. pp. 71-78.

[8].Katz A. "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete". Cement Concrete Research, Vol. 33, 2003. pp. 703-711.

[9].Richardson, A., Coventry, k., Bacon, J. "Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete", Cleaner Production, Vol. 19, 2011. pp. 272-277.

[10]. Radonjanin, V., Malešev, M., Marinkovic, S., Al Maly, A.E.S. "Green recycled aggregate concrete", Construction and Building Materials, Vol. 47, 2013. pp. 1503-1511.

۶- نتیجه گیری

پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل آن نتایج زیر به عنوان یافته‌های پژوهش ارائه می‌شود:

مقدار کاهش یا افزایش مقاومت بتن با سنگدانه‌های بازیافتی بسته به نسبت آب سیمان اختلاط، درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، جنس سنگدانه‌ها و شرایط رطوبتی سنگدانه‌ها است. به‌طور کلی با کاهش نسبت آب به سیمان، افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی و کاهش مقاومت سنگدانه‌ها، کاهش مقاومت بتن با سنگدانه‌های بازیافتی محسوس‌تر است. نمونه‌های بتنی با سنگدانه‌های بازیافتی رفتار متفاوتی در مقاومت‌های فشاری، کششی غیر مستقیم و خمشی از خود نشان می‌دهد به گونه‌ای که با افزایش درصد جایگزینی مصالح بازیافتی مقاومت‌های فشاری و کششی غیر مستقیم کاهش، اما مقاومت خمشی افزایش می‌یابد.

با افزایش الیاف مقاومت‌های کششی، خمشی و همچنین طاق خمشی بتن افزایش می‌یابد به طوری که بیشترین مقاومت با افزودن ۱٪ الیاف به بتن حاصل شد. اما با افزودن الیاف به میزان ۰/۵٪ و ۱٪ مقاومت فشاری ابتدا افزایش و سپس کاهش یافت. در نمونه‌های حاوی الیاف مقاومت خمشی تنها به مقدار الیاف مصرفی وابسته است و افزایش یا کاهش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی تاثیر بر مقاومت خمشی بتن

- [۱۱]. نیلی، محمود و نظری منفرد، ابراهیم "تاثیر مقاومت بتن مادر، دوده سیلیسی والیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی بتن های بازیافتی"، چهارمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، تهران، ۱۳۹۱.
- [12]. Gonza'lez-Fonteboa B, Mart'inez-Abella F. "Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. materials and mechanical properties", Building and Environment, Vol.43, 2008, pp.3357-3363.
- [13]. Umadevi, C.V, Gowda, M.R. "Study on Strength Characteristics of Recycled Aggregate Concrete using Polypropylene Fiber", Civil Engineering Technology and Research, Vol. 2, No. 1, 2014, pp. 259-266.
- [14]. Heeralal, M., Rathish Kumar, P. and Roa, Y.V. "Flexural Fatigue characterization of Steel Fiber Reinforced Recycled Concrete (SFRRAC)", Architecture and Civil Engineering, Vol. 7, 2009, pp. 19-33.
- [15]. Prasad, M.L.V., Kumar, R. "Mechanical Propertis of fiber Reinforced Concretes Produced from Building Demolished Waste", Environmental Research And Development, Vol. 2 No. 2, 2007, pp.180-187
- [16]. Awchat, G.D. and Kanhe, N.M. "Experimental Studies on Polymer Modified Steel Fibre Reinforced Recycled Aggregate Concrete", International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, Vol. 2, 2013, pp.126-134.
- [17]. Vytlacilova, V. "Behaviour of the Sustainable Fiber Reinforced Concrete with Recycled Aggregate after Loading", Mathematical Methods and Techniques in Engineering and Environmental Science, Vol. 2 No. 2, 2010, pp.299-304.
- [۱۸]. صدرممتازی، علی، طهمورثی، محمد هادی و نصرتی، حسن "ارزیابی خصوصیات بتن الیافی حاوی سنگدانه های بازیافتی بتنی با استفاده از روش های غیر مخرب"، مجله تحقیقات بتن، سال ششم، شماره اول، ۱۳۹۳، ص ۸۵-۷۴.
- [19]. Jagannadha Rao, K., Ahmed Khan, T. "Suitability of Glass Fibers in High Strength Recycled Aggregate Concrete-an Experimental Investigation", Civil Engineering (Building and Housing), Vol .10, No.6, 2009, pp .681-689.
- [20]. Aiello, M.A., Leuzzi, F., Centonze, G. Maffezzoli, A. "Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength", Waste Management, Vol.29, 2009, pp.1960-1970.
- [21]. Papakonstantinou, C.G., Tobolski, M.C. "Use of waste tire steel beads in Portland cement concrete", Cement and Concrete Research, Vol.36, 2006, pp.1686-1691.
- [۲۲]. صفرنیا کپته، تقی "تاثیر الیاف فلزی بازیافت شده از لاستیک خودرو بر خواص مکانیکی بتن غلتکی"، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران، پایان نامه کارشناسی ارشد، زمستان ۱۳۹۱.
- [23]. Altoubat, S.A., Roesler, J.R., Lange, D.A., Rieder, K.A. "Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers", Construction and Building Materials, Vol.22, 2008, pp.384-393.
- [24]. Soutsos, M.N [et al.]. "Flexural performance of fibre reinforced concrete made with steel and synthetic fibres", Construction and Building Materials, Vol.36, 2012, pp.704-710

Research Note:

Performance of Green Fibrous Concrete Pavement

A Hassani*¹, M. Ahmadi², M.R Soleymani Kermani³, and H. Yousefi⁴

- 1- Professor of Tarbiat Modares University, Faculty of Civil and Environmental Engineering
- 2- Graduate, M.Sc, Tarbiat Modares University, Faculty of Civil and Environmental Engineering
- 3- Assistant Professor, Transportation Research Institute, Ministry of Road and Urban Development
- 4- H. Yousefi, M.Sc, Student, Faculty of Environmental, Tehran University

hassani@modares.ac.ir

Abstract:

Nowadays the use of recycled materials in the industry is increasing. An example of this is production of environmentally friendly green concrete. So far, various studies regarding the use of concrete debris from demolished concrete as aggregate in concrete have been utilized. Fibers in concrete pavements not only reduce the thickness of slab but also are useful economically as controls the shrinkage cracks and reduces the latitude saturates which ends in reduction of water penetration to the base of the pavement, which means the reduction of repair and maintenance costs. Fiber ability to improve the characteristics of concrete with recycled aggregates depends on the fiber type, its percentage, fiber aspect ratio, surface friction, and tensile strength of fibers. The recycle materials are composed of crushed concrete, brick and other materials such as, small ceramic rubble and other debris. In this study recycled aggregate are used in a range of 0, 50 and 100 percent to replace natural aggregate. Recycled steel fibers from worn-out tire of vehicles also are used in two type of concrete, the ordinary one and the concrete containing recycled aggregates with volume percentage of 0.5 and 1 percent of the concrete. To investigate the effect of aggregate on concrete strength similar grading for both natural and recycled aggregate were used. After 28 days curing of the concrete, compressive strength, indirect tensile strength and bending strength tests were carried out. Evaluation of the role of fibers and recycled aggregate in slab thickness of concrete pavement of industrial floors was conducted. The amount of increase or reduction of concrete strengths with recycled aggregates are depend on the water/cement ratio, the percentage of recycled aggregates, aggregate characteristics and humidity condition. The loss of concrete strength containing recycled aggregates is remarkable by reduction of water/cement ratio, increasing the percentage of recycled aggregates and reduction of aggregates strength. Test results showed that the use of this type of fiber concrete as a structural concrete is acceptable. Concrete samples containing recycled aggregates represent different behavior under compressive strength, indirect tensile and bending test in a way that by increasing the percentage of recycled aggregates, bending strength would be increased on the contrary of the two other test. Yield line theory was used to investigate the role of steel recycled fiber and recycled aggregate to determine slab thickness Concrete containing recycled aggregates would result in a thinner slab thickness due to higher bending strength compare to ordinary concrete. Adding fibers in order of 0.5% or 1% would not have meaningfull effect on the reduction of slab thickness. The calculation based on Yield line theory showed that the addition of recycled steel fibers to the concrete reduces the slab thickness approximately by 20%.

Keywords: construction debris, concrete, recycled steel fiber