

مطالعه مشخصات مکانیکی بتن‌های حاوی سنگ‌دانه بتن بازیافتی و سبک‌دانه رس منبسط شده

سید علی هاشمی

گروه مهندسی عمران، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران.

ایمان صدری نژاد*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر، ایران.

چکیده

در این تحقیق به مطالعه خصوصیات مکانیکی بتن تحت تأثیر حضور مجزا و هم‌زمان سنگ‌دانه بتن بازیافتی و سبک‌دانه رس منبسط شده (لیکا) پرداخته شده است. به این منظور ابتدا سه مخلوط پایه با مقاومت‌های هدف ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال طراحی شدند. با جایگزینی شن طبیعی در هر مخلوط پایه با شن بازیافتی در نسبت‌های ۵۰٪ و ۱۰۰٪ و لیکا در نسبت‌های ۲۵٪ و ۵۰٪ سه گروه از مخلوط‌ها (در مجموع ۱۸ مخلوط) ساخته شدند. نمونه‌های آماده شده پس از عمل‌آوری تا سن ۲۸ روز تحت آزمایش تعیین مقاومت‌های فشاری، شکافت، برشی و مدول الاستیک قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که جایگزینی شن طبیعی با شن بازیافتی و لیکا بصورت مجزا بترتیب می‌تواند سبب کاهش مقاومت فشاری تا ۲۶،۲٪ و ۳۴،۱٪ نسبت به مخلوط پایه شود. همچنین افت مقاومت فشاری ناشی از استفاده هم‌زمان شن بازیافتی و لیکا بطور قابل توجهی از جایگزینی مجزای شن طبیعی با این مصالح بیشتر می‌باشد که این مورد در مخلوط‌های با مقاومت پایین بیشتر مشاهده می‌شود. نتایج مقاومت‌های شکافت، برشی و مدول الاستیک در مخلوط‌های مختلف روندی مشابه با مقاومت فشاری را نشان داد بطوریکه با افزایش جایگزینی شن طبیعی با شن بازیافتی و لیکا مقاومت‌های شکافت و برشی و مدول الاستیک بطور محسوسی کاهش می‌یابد اگرچه اثر کاهنده استفاده هم‌زمان شن بازیافتی و لیکا کم می‌باشد. همچنین برای مخلوط‌های مختلف همبستگی بالایی میان مقاومت‌های شکافت، برشی و مدول الاستیک با جذر مقاومت فشاری وجود دارد که روابطی برای آنها ارائه شدند.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌دانه بازیافتی، سبک‌دانه رس منبسط شده، بتن، خصوصیات مکانیکی.

* نویسنده مسئول: iman.sadrinejad@iau.ac.ir

۱- مقدمه

های باز یافتی تأثیر کاهشی داشته است که متفاوت از کاهش مقاومت فشاری بوده است [۱۱-۱۴].

سبک دانه های مصنوعی از جمله مصالحی هستند در دهه های اخیر بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است. سبک دانه رس منبسط شده (لیکا) از جمله سبک دانه های رایج است که در ساخت بتن و دیگر محصولات ساختمانی استفاده می شود. دارا بودن ویژگی های قابل قبولی مانند جذب صدا، مقاومت در برابر آتش و یخبندان، هیدراتاسیون مناسب بتن به دلیل عمل آوری داخلی، کاهش نیروهای لرزه ای و عایق حرارتی موجب توجه خاص محققین به بتن های حاوی لیکا شده است [۱۵-۱۸]. دانه های لیکا به دلیل ساختار متخلخلشان نسبت به سنگ دانه های طبیعی دارای مشخصات مکانیکی ضعیف تری می باشند. این ویژگی بر روی خصوصیات مکانیکی بتن های حاوی لیکا نیز تأثیر می گذارد. مطالعات در خصوص بتن های حاوی لیکا نشان داده است که جایگزینی سنگ دانه های طبیعی با لیکا در نسبت های مختلف سبب کاهش مقاومت فشاری، مقاومت شکافت و مقاومت کششی می شود که مقدار کاهش مقاومت به نسبت جایگزینی و اندازه دانه های لیکا وابسته است [۱۹]. گزارش شده است که جایگزینی سنگ دانه های طبیعی با لیکا می تواند تا ۳۷٪ کاهش در مدول الاستیک بتن شود [۲۰].

با توجه به مطالعات انجام شده جایگزینی سنگ دانه طبیعی با سنگ دانه باز یافتی و یا لیکا سبب افت قابل توجه در مشخصات مکانیکی بتن می شود که مقدار این کاهش برای استفاده مجزای سنگ دانه های باز یافتی یا لیکا در بتن مطالعه شده است. در حالیکه استفاده هم زمان این دو مصالح در بتن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا در این تحقیق به تأثیر هم زمان جایگزینی سنگ دانه طبیعی با سنگ دانه باز یافتی و لیکا پرداخته می شود. برای این منظور مخلوط های بتن با نسبت های مختلفی از جایگزینی سنگ دانه طبیعی با سنگ دانه باز یافتی و لیکا ساخته شده و تحت آزمون های مقاومت فشاری، مقاومت شکافت، مقاومت برشی مستقیم و مدول الاستیک قرار گرفتند.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مورد استفاده

در این مطالعه از سیمان پرتلند تیپ II با وزن مخصوص ۳۱۵۰

صنعت بتن سالانه ۱۲,۶ میلیارد تن مواد خام مصرف می کند و در نتیجه بزرگترین مصرف کننده منابع طبیعی در جهان است [۱]. در سال ۲۰۱۵، مصرف سنگ دانه (که ۸۰-۷۰٪ حجم بتن را تشکیل می دهد) در صنعت ساختمان در سراسر جهان به ۴۸,۳ میلیارد تن تخمین زده شد که انتظار می رود هر ساله ۵٪ به آن افزوده شده باشد [۲,۳]. لازم به ذکر است که تولید یک تن سنگ دانه های درشت طبیعی منجر به انتشار ۴۶۰۰ تن کربن می شود، در حالی که تولید یک تن سنگ دانه های درشت بتن باز یافتی ۲۴۰۰ تن کربن تولید می کند [۴]. استفاده از سنگ دانه های باز یافتی و یا سنگ دانه های مصنوعی در ساخت بتن یکی از راهکارهای کاهش مصرف سنگ دانه طبیعی است که می تواند به حفظ محیط زیست کمک نماید.

در مقایسه با سنگ دانه طبیعی، چگالی سنگ دانه باز یافتی کمتر است زیرا ملات چسبیده به آن نسبت به سنگ زیرین آن چگالی کمتری دارد. در سنگ دانه باز یافتی ملات چسبیده به سطح سنگ دانه اصلی می تواند تا ۵۰٪ حجم را شامل شود [۵]. همچنین جذب آب سنگ دانه باز یافتی می تواند ۲ تا ۱۰ برابر سنگ دانه طبیعی افزایش یابد [۶]. وجود تخلخل، ترکها و ریز ساختار کمتر متراکم در ناحیه انتقال (ITZ) در بخش ملات را می توان از علل تفاوت سنگ دانه های باز یافتی و طبیعی دانست. به همین دلیل عملکرد سنگ دانه باز یافتی در بتن در مقایسه با سنگ دانه طبیعی متفاوت است. با حفظ دیگر مصالح بتن و نسبت های آنها، جایگزینی سنگ دانه طبیعی با سنگ دانه باز یافتی سبب افت مشخصات مکانیکی بتن می شود. گزارش شده است که بتن ساخته شده با جایگزینی ۲۵٪ سنگ دانه طبیعی با سنگ دانه باز یافتی دارای خواص مکانیکی قابل مقایسه با بتن ساخته شده با ۱۰۰٪ سنگ دانه طبیعی در همان نسبت W/C است. اگرچه برای به دست آوردن همان مقاومت فشاری با جایگزینی ۱۰۰-۵۰٪ سنگ دانه طبیعی با سنگ دانه باز یافتی، باید نسبت آب به سیمان را ۱۰-۴٪ کاهش داد [۷]. گزارش شده است که مقاومت فشاری بتن ساخته شده با ۱۰۰٪ سنگ دانه باز یافتی در مقایسه با بتن ساخته شده با ۱۰۰٪ سنگ دانه طبیعی در بازه ۳۰-۱۵٪ نشان می دهد [۸-۱۰]. بر دیگر خصوصیات مکانیکی بتن نظیر مقاومت شکافت، مقاومت برشی و مدول الاستیک نیز جایگزینی سنگ دانه طبیعی با سنگ دانه

نشان می دهد. دانه های رس منبسط شده (لیکا) بعنوان سبک دانه در ساخت مخلوطها استفاده شد. حداکثر اندازه سبک دانه های لیکا مصرفی در این تحقیق ۱۲ میلیمتر و چگالی حجمی آنها بطور متوسط ۷۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب بود (شکل ۱-ب). ماسه مصرفی به عنوان مصالح سنگی ریزدانه، از نوع رودخانه ای و گردگوشه بود. دانه بندی ماسه مصرفی منطبق بر الزامات ASTM C33 بوده و مدول نرمی، وزن مخصوص ظاهری و جذب آب ماسه مصرفی بترتیب برابر ۲/۹۰، ۲/۶۱ و ۲/۴٪ بودند.

در این پژوهش جهت ساخت و عمل آوری نمونه ها از آب شرب شهر رشت استفاده شد. برای دستیابی به بتنی با کارایی و روانی مطلوب و با هدف کمک به توزیع بهتر ذرات در مخلوط بتنی حاوی سبک دانه لیکا و سنگ دانه بازیافتی از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر با نام تجاری FARCO PLAST P10N محصول شرکت شیمی ساختمان استفاده شده است.

کیلوگرم بر مترمکعب و نرمی ۳۲۰ مترمکعب بر کیلوگرم در ساخت تمام مخلوطها استفاده شد. برای بهبود مقاومت بتن در برخی از مخلوط ها از میکروسیلیس استفاده شده است. دوده سیلیس مورد استفاده در این پژوهش از کارخانه فروسیلیس ایران تهیه شده است که دارای نرمی ۲۱۰۰۰ مترمربع بر کیلوگرم و وزن مخصوص ۲۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد. مشخصات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس مصرفی در جداول (۱) آورده شده است.

دانه بندی سنگ دانه های مورد استفاده منطبق بر استاندارد ASTM C33 می باشد. برای ساخت مخلوط ها از شن رودخانه ای شکسته با بزرگترین اندازه دانه ۱۹ میلیمتر، وزن مخصوص ظاهری ۲/۶۲ و جذب آب ۱/۱٪ بود. سنگ دانه بازیافتی مورد استفاده در ساخت مخلوطها در بازه اندازه شن و با بزرگترین دانه برابر ۱۹ میلیمتر بوده و از خرد کردن بتن های با رده های مختلف بدست آمده بود. شکل ۱-الف تصویر سنگ دانه های بازیافتی را

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی سیمان و دوده سیلیس مصرفی

ترکیبات شیمیایی									
LOI	TiO ₂	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
۲/۰۴	-	۲/۳۲	۰/۴۷	۰/۶۹	۱/۴۸	۶۲/۸۵	۳/۸۳	۴/۸۱	۲۱/۳۲
سیمان									
۳/۵۰	-	-	-	-	۲	۱/۵۰	۲	۱	۸۵
دوده سیلیس									



شکل ۱- مصالح مصرفی: الف) سنگ دانه های بازیافتی و ب) سبک دانه لیکا

۲-۲- نسبت های مخلوط و آماده سازی نمونه ها

در این تحقیق سه گروه از مخلوطها بر اساس سه مخلوط پایه با استفاده از سنگ دانه های طبیعی به نامهای C40، C70 و C100 بترتیب با مقاومت های هدف ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰ مگاپاسکال (بر روی نمونه های مکعب) طراحی شدند. در مخلوط های پایه C40، C70 و C100 نسبت آب به مواد چسباننده (سیمان+دوده سیلیس)

بترتیب ۰/۵، ۰/۳۵ و ۰/۲۶ و محتوای مواد چسباننده (سیمان+دوده سیلیس) بترتیب ۳۵۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شدند. در مخلوط پایه C100 وزن دوده سیلیس به اندازه ۱۰٪ کل محتوای مواد چسباننده می باشد. در هر گروه با جایگزینی شن طبیعی مصرفی در هر مخلوط پایه با سنگ دانه های بازیافتی با نسبت های ۵۰٪ و ۱۰۰٪ و یا سبک دانه لیکا با نسبت های ۲۵٪ و ۵۰٪

مخلوط‌های جدیدی ایجاد شدند بطوریکه در مجموع ۱۸ مخلوط مختلف مورد مطالعه قرار گرفتند. لازم به ذکر است مقدار فوق روان کننده به نحوی تنظیم شد که اسلامپ مخلوط‌ها در حدود ۵ الی ۱۰ سانتیمتر قرار گیرد. جزئیات مخلوط‌ها در جدول ۲ داده شده است.

جدول ۲- جزئیات مخلوط‌ها

شماره	نام مخلوط	سیمان	دوده سیلیس	آب	نسبت آب به چسب‌بسته	شن			فوق روان کننده	وزن مخصوص بتن خشک
						طبیعی	بازیافتی	لیکا		
		(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)		(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(%)	(kg/m ³)
۱	C40	۳۵۰	۰	۱۷۵	۰/۵	۹۳۷	۰	۰	۰	۲۴۱۹/۴
۲	C40R50	۳۵۰	۰	۱۷۵	۰/۵	۴۶۸/۵	۴۴۹/۸	۰	۰	۲۳۷۸/۲
۳	C40R100	۳۵۰	۰	۱۷۵	۰/۵	۰	۸۸۹/۵	۰	۰	۲۳۶۴/۵
۴	C40L50	۳۵۰	۰	۱۷۵	۰/۵	۴۶۸/۵	۰	۱۹۹/۵	۰	۱۹۲۰/۹
۵	C40L50R25	۳۵۰	۰	۱۷۵	۰/۵	۲۴۳/۳	۲۲۴/۹	۱۹۹/۵	۰	۱۹۱۴/۲
۶	C40L50R50	۳۵۰	۰	۱۷۵	۰/۵	۰	۴۴۹/۸	۱۹۹/۵	۰	۱۹۰۵/۱
۷	C70	۴۰۰	۰	۱۴۰	۰/۳۵	۱۰۰۲	۰	۰	۰/۳	۲۴۷۳/۱
۸	C70-R50	۴۰۰	۰	۱۴۰	۰/۳۵	۵۰۱	۴۸۱	۰	۰/۳	۲۴۳۲/۲
۹	C70R100	۴۰۰	۰	۱۴۰	۰/۳۵	۰	۹۶۱/۹	۰	۰/۳	۲۴۲۱/۶
۱۰	C70L50	۴۰۰	۰	۱۴۰	۰/۳۵	۵۰۱	۰	۲۱۳/۶	۰/۳	۱۹۵۰/۳
۱۱	C70L50R25	۴۰۰	۰	۱۴۰	۰/۳۵	۲۵۰/۵	۲۴۰/۵	۲۱۳/۶	۰/۳	۱۹۴۴/۲
۱۲	C70L50R50	۴۰۰	۰	۱۴۰	۰/۳۵	۰	۴۸۱	۲۱۳/۶	۰/۳	۱۹۰۹/۷
۱۳	C100	۴۵۰	۵۰	۱۳۵	۰/۲۶	۹۸۳	۰	۰	۰/۶	۲۵۱۱/۷
۱۴	C100R50	۴۵۰	۵۰	۱۳۵	۰/۲۶	۴۹۱	۴۷۱/۴	۰	۰/۶	۲۴۶۹/۵
۱۵	C100R100	۴۵۰	۵۰	۱۳۵	۰/۲۶	۰	۹۴۳/۷	۰	۰/۶	۲۴۴۳/۲
۱۶	C100L50	۴۵۰	۵۰	۱۳۵	۰/۲۶	۴۹۱/۵	۰	۲۰۹/۶	۰/۶	۲۰۲۱/۸
۱۷	C100L50R25	۴۵۰	۵۰	۱۳۵	۰/۲۶	۲۴۶	۲۳۶/۲	۲۰۹/۶	۰/۶	۱۹۸۹/۴
۱۸	C100L50R50	۴۵۰	۵۰	۱۳۵	۰/۲۶	۰	۴۷۱/۸	۲۰۹/۶	۰/۶	۱۹۳۸/۵



شکل ۲- عمل آوری نمونه‌ها درون حوضچه آب

در ادامه سیمان و دوده سیلیس (در صورت وجود) به مخلوط اضافه شدند و با افزودن ۴۰٪ آب به مدت ۴ دقیقه مخلوط شدند. در نهایت ۱۰٪ آب باقیمانده به همراه فوق روان کننده به آرامی در

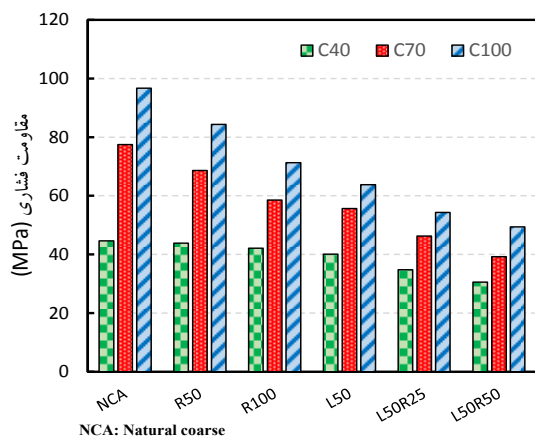
در نامگذاری اسامی مخلوط‌ها حروف R و L بترتیب نشان دهنده مصالح سنگی بازیافتی (شن) و سبک‌دانه لیکا می باشد و اعداد بعد از این حروف درصد جایگزینی مصالح سنگی درشت طبیعی با سنگ‌دانه بازیافتی و سبک‌دانه لیکا است. برای مثال مخلوط C40-L50-R25 نشان دهنده بتن ساخته شده بر مبنای مخلوط پایه C40 با جایگزینی ۵۰٪ سنگ‌دانه شن طبیعی با شن بازیافتی و ۲۵٪ سنگ‌دانه شن طبیعی با سبک‌دانه لیکا است.

در ساخت تمامی مخلوط‌ها از یک روش استفاده شد. ابتدا دانه های درشت شامل شن طبیعی را به همراه شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا (در صورت وجود) و ماسه مصرفی را به درون مخلوط کن ریخته و به مدت ۳۰ ثانیه با یکدیگر مخلوط شدند. سپس در حالیکه مخلوط کن روشن بود ۵۰٪ آب را به مصالح افزوده شد.

۳- نتایج و تحلیل آزمایش ها

۳-۱- مقاومت فشاری

شکل ۴ تغییرات مقاومت فشاری را برای مخلوط های مختلف آزمایش شده نشان می دهد. مطابق انتظار جایگزینی بخشی از مصالح سنگی درشتدانه (شن) با سنگ دانه بازیافتی و سبکدانه لیکا، باعث کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه شد. در حالت کلی مقدار کاهش مقاومت فشاری با رده مقاومتی مخلوط پایه رابطه ای مستقیم دارد. هرچه بتن پایه دارای رده مقاومتی بیشتری باشد، جایگزینی سنگ دانه طبیعی با سنگ دانه بازیافتی و سبکدانه، تأثیر بیشتری بر کاهش مقاومت فشاری دارد. با جایگزینی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ شن طبیعی با شن بازیافتی (مخلوط های R50 و R100) بترتیب ۱۲/۸٪-۱/۸٪ و ۲۶/۲٪-۵/۶٪ کاهش مقاومت فشاری نسبت به بتن پایه مشاهده می شود. افت مقاومت فشاری در اثر استفاده از سنگ دانه بازیافتی را میتوان به وجود ترکها و ریز ترکهای ناشی از فرآیند خرد کردن در سنگ دانه بازیافتی نسبت داد [۲۱]. این موضوع باعث کاهش مقاومت بافت کریستالی میان قطعات خرد شده بتن در مقایسه با مقاومت بافت کریستالی بین سنگ دانه های شکسته طبیعی، میشود و در نتیجه افت مقاومت فشاری را به همراه خواهد داشت. با توجه به مقاومت فشاری بدست آمده برای مخلوط های با جایگزینی ۵۰٪ سبک دانه لیکا (مخلوط های L50)، مشاهده میشود که مقاومت فشاری ۳۴/۱٪-۱۰/۲٪ نسبت به بتن های پایه کاهش داشته است و همچنین چگالی مخلوط ها نیز ۲۱/۱٪-۱۹/۵٪ کاهش یافته است. لازم به ذکر است علی رغم کاهش مقاومت فشاری این مخلوط ها همچنان در رده بتن سازه ای (با مقاومت مشخصه حداقل ۱۷ مگاپاسکال) قرار دارند.

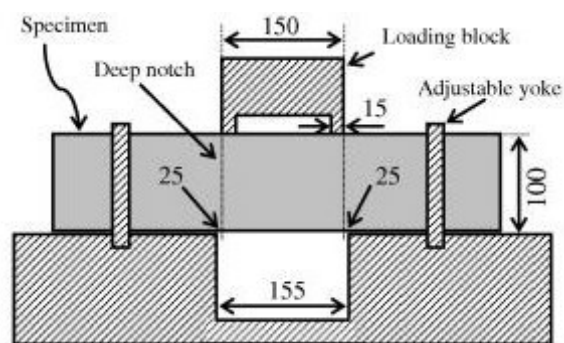


شکل ۴- مقاومت فشاری مخلوط ها

طول ۱ دقیقه به مخلوط اضافه شد و پس از آن عمل اختلاط به مدت ۳ دقیقه ادامه داشت. پس از اتمام فرآیند اختلاط، مخلوط آماده شده در قالب های مناسب ریخته شده و به مدت ۲۴ ساعت در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند. با گذشت ۲۴ ساعت نمونه ها از قالب ها خارج شدند و تا سن ۲۸ روز تحت شرایط مرطوب در دمای ۲۴ درجه سانتیگراد عمل آوری شدند. بخشی از نمونه های ساخته شده درون حوضچه عمل آوری شکل ۲ نشان داده شده است.

۳-۲- آزمایش ها

آزمایش های مقاومت فشاری، مقاومت شکافت، مدول الاستیسیته و برش مستقیم بر روی نمونه های ساخته شده از مخلوط های مختلف در سن ۲۸ روزه انجام گرفت. آزمایش مقاومت فشاری بر روی سه نمونه مکعب ۱۰۰ میلیمتری ساخته شده از هر مخلوط بر اساس استاندارد EN 12390-3 انجام شد و میانگین آنها بعنوان مقاومت فشاری مخلوط گزارش شد. مقاومت شکافت (برزیلی) بعنوان رایج ترین آزمون مقاومت کششی بتن در این تحقیق استفاده شد. برای تعیین مقاومت شکافت هر مخلوط سه نمونه استوانه استاندارد با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلیمتر مطابق با ASTM C496 تحت آزمایش قرار گرفتند که میانگین آنها بعنوان مقاومت کششی مخلوط ارائه شد. آزمایش تعیین مدول الاستیسیته مطابق با ASTM C469 و بر روی سه نمونه استوانه استاندارد با ابعاد ۱۵۰×۳۰۰ میلیمتر برای هر مخلوط انجام شد. آزمایش مقاومت برشی برای هر مخلوط بر روی سه نمونه منشوری با ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۴۰۰ میلیمتر مطابق با استاندارد JSCE G553 انجام شد. در آزمایش برش مستقیم مطابق شکل ۳ بارگذاری به نحوی صورت می گیرد که در دو صفحه برش موازی هم تنش برشی خالص ایجاد شده و در نهایت با افزایش بار نمونه تحت برش خالص گسیخته می شود.



شکل ۳- تصویر شماتیک آزمون برش مستقیم

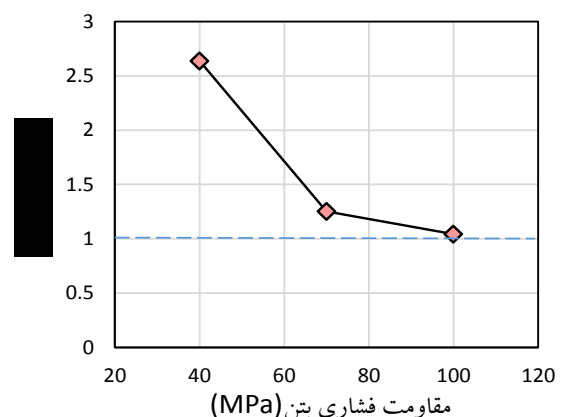
مقاومت فشاری ناشی از حضور سبک‌دانه لیکا می باشد. تفاوت مشاهده شده در رفتار بتن‌های با رده های مقاومتی مختلف را می توان ناشی از تفاوت در مقاومت بخش ملات و همچنین کیفیت ریزساختار ناحیه انتقال مشترک میان خمیر سیمان و سنگ‌دانه های بزرگ (فاز ITZ) دانست، بطوریکه در بتن‌های با رده مقاومتی بالاتر بعلا افزایش محتوای سیمان و کاهش نسبت آب به سیمان مقاومت بخش ملات و ریزساختار فاز ITZ بهبود قابل توجهی یافته، بنابراین علی رغم وجود نقص اعم از ترک ها، ریزترک ها و حفرات در بتن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا بتن توانایی بالاتری را در تحمل بار از خود نشان می دهد.

۳-۲- مقاومت شکافت

مقادیر مقاومت کششی بدست آمده از آزمایش شکافت استوانه برای مخلوط های مختلف در شکل ۶ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود در روندی مشابه با مقاومت فشاری، با جایگزینی شن طبیعی با شن بازیافتی و یا سبک‌دانه لیکا مقاومت کششی مخلوط ها کاهش می یابد. با جایگزینی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ شن طبیعی با شن بازیافتی بترتیب کاهشی برابر ۱۴/۶٪-۱۰/۱٪ و ۲۱/۷٪-۱۸/۷٪ در مقاومت کششی مخلوط ها نسبت به مقاومت کششی مخلوط پایه مشاهده می شود. همچنین با جایگزینی ۵۰٪ شن طبیعی با سبک‌دانه لیکا مقاومت کششی در حدود ۳۱٪-۲۲/۳٪ نسبت به مخلوط های پایه کاهش یافته است که نشان دهنده تأثیر کاهنده بیشتر سبک‌دانه لیکا نسبت به شن بازیافتی در زمینه مقاومت شکافت است. با استفاده هم‌زمان از سبک‌دانه لیکا و شن بازیافتی بجای شن طبیعی روند کاهشی مقاومت کششی افزایش می یابد. در مخلوط های L50R25 و L50R50، با جایگزینی ۵۰٪ شن مصرفی با سبک‌دانه لیکا و بطور هم‌زمان جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ شن طبیعی باقیمانده با شن بازیافتی بترتیب کاهش ۸/۵٪-۱۱/۹٪ و ۱۷٪-۱۳/۶٪ نسبت به مقاومت کششی مخلوط های L50 ثبت شد که نسبت به مخلوط های پایه کاهش مقاومت کششی بترتیب برابر ۳۵٪-۳۰/۲٪ و ۴۱/۱٪-۳۲/۹٪ را نشان می دهد.

با مقایسه مقاومت کششی مربوط به جایگزینی جداگانه و هم‌زمان ۵۰٪ از شن طبیعی با شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا با مقاومت کششی بتن پایه می توان دریافت که افت مقاومت کششی ناشی از جایگزینی هم‌زمان نزدیک به مجموع افت های ناشی از جایگزینی

استفاده هم‌زمان از شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا سبب کاهش قابل توجه در مقاومت فشاری مخلوط های L50R25 و L50R50 نسبت به مخلوط های پایه شده است. در مخلوط های با جایگزینی ۵۰٪ شن طبیعی با سبک‌دانه لیکا و قتیکه ۲۵٪ از شن طبیعی با شن بازیافتی جایگزین می شود (مخلوط های L50R25) افت مقاومت فشاری ۱۶/۹٪-۱۳/۳٪ نسبت به مخلوط های با جایگزینی ۵۰٪ سبک‌دانه لیکا ایجاد شده است که با افزایش نسبت جایگزینی شن طبیعی با شن بازیافتی از ۲۵٪ به ۵۰٪ (مخلوط های L50R50) افت مقاومت فشاری به ۲۴/۱٪-۲۲/۵٪ افزایش یافت.



شکل ۵- نسبت افت مقاومت فشاری ناشی از استفاده هم‌زمان شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا نسبت به مجموع افت های ناشی از استفاده جداگانه آنها

با مقایسه مقاومت فشاری مربوط به جایگزینی جداگانه و هم‌زمان ۵۰٪ از شن طبیعی با شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا با مقاومت فشاری بتن پایه می توان دریافت در برای بتن‌های با رده مقاومتی پایین (بعنوان مثال C40) افت مقاومت فشاری ناشی از جایگزینی هم‌زمان بطور قابل توجهی از مجموع افت های ناشی از جایگزینی جداگانه شن طبیعی با شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا بیشتر است، بطوریکه نسبت افت مقاومت فشاری ناشی از استفاده هم‌زمان از مصالح یاد شده نسبت به مجموع افت های ناشی از استفاده جداگانه آنها $(R_{drop,fc})$ در حدود ۶۴/۲٪ می باشد. مقدار این نسبت در بتن‌های با رده مقاومتی بالاتر C70 و C100 بترتیب برابر ۲۵/۱٪ و ۴۴/۱٪ است که نشان می دهد با افزایش مقاومت فشاری بتن پایه این نسبت به ۱ میل می کند (شکل ۵) و از اثر برهم نهی کاهشی این مصالح کاسته می شود. البته لازم به ذکر است در تمام مخلوط های حاوی شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا بخش عمده ای از افت

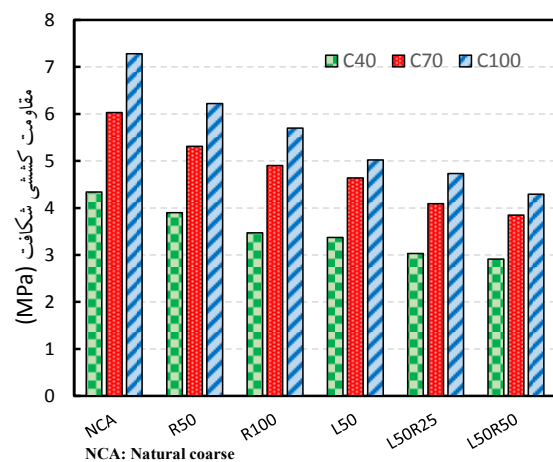
و همچنین کیفیت خوب فاز ITZ میان خمیر سیمان و لیکا می باشد. در بتن‌های حاوی سنگ‌دانه بازیافتی، به دلیل وجود ترک‌ها و نقص‌های موجود آمده در مراحل بازیافت بخشی از مسیر ترک می‌تواند از درون سنگ‌دانه بازیافتی عبور کند، اگرچه نسبت آب به سیمان بعنوان یکی از موثرترین عوامل بر کیفیت ریزساختار فاز ITZ می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در عبور ترک از ناحیه ITZ و یا از درون سنگ‌دانه بازیافتی داشته باشد.

۳-۳- مقاومت برشی

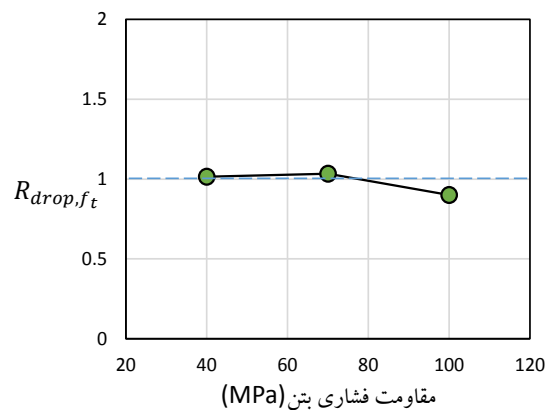
مقادیر مقاومت برشی بدست آمده از آزمایش برش خالص برای مخلوط‌های مختلف در شکل ۸ ارائه شده است. بر اساس نتایج با جایگزینی شن طبیعی با شن بازیافتی و یا سبک‌دانه لیکا مقاومت برشی مخلوط‌ها کاهش می‌یابد. با جایگزینی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ شن طبیعی با شن بازیافتی بترتیب ۹/۱٪-۴/۶٪ و ۹/۳٪-۱۴/۷٪ کاهش در مقاومت برشی مخلوط‌ها نسبت به مقاومت برشی مخلوط پایه مشاهده می‌شود. همچنین با جایگزینی ۵۰٪ شن طبیعی با سبک‌دانه لیکا مقاومت برشی در حدود ۳۱/۷٪-۲۵/۲٪ نسبت به مخلوط‌های پایه کاهش یافته است که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر سبک‌دانه لیکا نسبت به شن بازیافتی در کاهش مقاومت برشی است. استفاده هم‌زمان از سبک‌دانه لیکا و شن بازیافتی بجای شن طبیعی سبب کاهش بیشتر مقاومت برشی می‌شود. در مخلوط‌های L50R25 و L50R50، با جایگزینی ۵۰٪ شن مصرفی با سبک‌دانه لیکا و بطور هم‌زمان جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ شن طبیعی باقی‌مانده با شن بازیافتی بترتیب کاهش ۱۳/۵٪-۵/۲٪ و ۱۷/۶٪-۹/۵٪ نسبت به مقاومت برشی مخلوط‌های L50 بدست آمد که نسبت به مخلوط‌های پایه کاهش مقاومت برشی بترتیب برابر ۳۵/۲٪-۳۳/۴٪ و ۳۸/۳٪-۳۵/۷٪ را نشان می‌دهد.

با مقایسه مقاومت برشی مربوط به جایگزینی جداگانه و هم‌زمان ۵۰٪ از شن طبیعی با شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا با مقاومت برشی بتن پایه می‌توان دریافت که افت مقاومت برشی ناشی از جایگزینی هم‌زمان نزدیک به مجموع افت‌های ناشی از جایگزینی جداگانه شن طبیعی با شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا است، بطوریکه نسبت افت مقاومت برشی ناشی از استفاده هم‌زمان از مصالح یاد شده نسبت به مجموع افت‌های ناشی از استفاده جداگانه آنها (R_{drop,f_s}) برای تمام رده‌های مقاومتی بتن پایه در حدود ۱/۱۲-

جداگانه شن طبیعی با شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا است، بطوریکه نسبت افت مقاومت کششی ناشی از استفاده هم‌زمان از مصالح یاد شده نسبت به مجموع افت‌های ناشی از استفاده جداگانه آنها (R_{drop,f_t}) برای تمام رده‌های مقاومتی بتن پایه در حدود ۱/۰۳-۱/۰۹۰ می‌باشد و اثر بر هم نهی کاهنده مشخصی مشاهده نمی‌شود (شکل ۷). البته لازم به ذکر است مشابه روند مقاومت فشاری در تمام مخلوط‌های حاوی شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا بخش عمده‌ای از افت مقاومت کششی ناشی از حضور سبک‌دانه لیکا می‌باشد و بطور متوسط افت ۲ برابری را ایجاد می‌نماید.



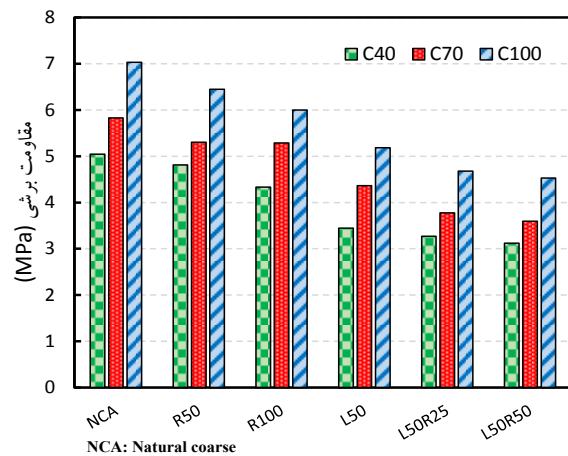
شکل ۶- مقاومت شکافت مخلوط‌ها



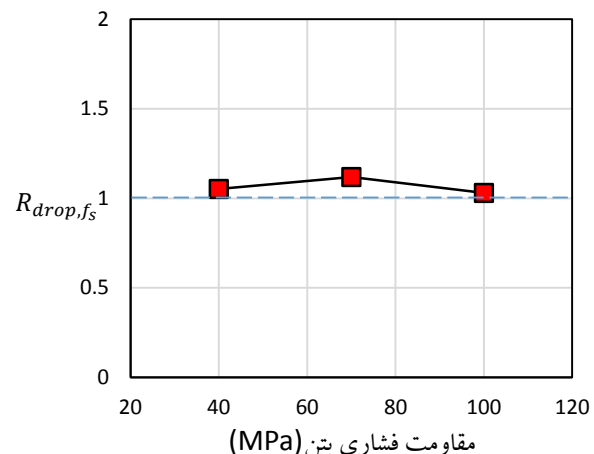
شکل ۷- نسبت افت مقاومت کششی ناشی از استفاده هم‌زمان از شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا نسبت به مجموع افت‌های ناشی از استفاده جداگانه آنها

در خصوص کاهش مقاومت کششی بعلت حضور سبک‌دانه لیکا در اختلاط می‌توان به این مورد اشاره نمود که در شکست نمونه‌های حاوی لیکا مسیر ترک عموماً از درون سبک‌دانه‌های لیکا عبور کرده که این امر ناشی از ضعف مقاومتی سبک‌دانه لیکا

۱/۰۳ می باشد و اثر بر هم نهی کاهنده ناچیزی را نشان می دهد (شکل ۹).



شکل ۸- مقاومت برشی مخلوط‌ها



شکل ۹- نسبت افت مقاومت برشی ناشی از استفاده هم‌زمان از سبک‌دانه و سبک‌دانه لیکا نسبت به مجموع افت ناشی از استفاده جداگانه آنها

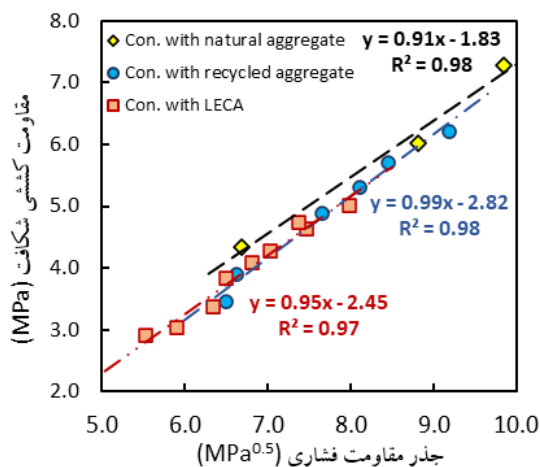
در تمام مخلوط‌های حاوی شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا بخش عمده‌ای از افت مقاومت برشی ناشی از حضور سبک‌دانه لیکا می باشد و افت ۶/۹-۲/۸ برابری را ایجاد می نماید. علت این امر را می توان به ضعف مقاومتی لیکا نسبت داد، بطوریکه ساختار متخلخل درونی لیکا مقاومت کمتری را نسبت به ملات پیرامونی تامین می کند بنابراین انتشار ترک از درون دانه های لیکا با مصرف انرژی پایین تری همراه می باشد. با توجه به مسیر شکست تحمیلی در تست برشی، انتشار ترک در بتن حاوی سنگ‌دانه های طبیعی می تواند از درون ملات، درون سنگ‌دانه و یا از ناحیه ITZ باشد که با کاهش نسبت آب به سیمان مقاومت ملات و ناحیه ITZ افزایش

یافته و گسترش ترک از درون آنها نیازمند انرژی بیشتری می باشد. بنابراین در بتن‌های حاوی سنگ‌دانه های طبیعی مقاومت برشی بیشتری را نسبت به بتن‌های حاوی سبک‌دانه لیکا مشاهده می شود. با مقایسه نتایج مقاومت برشی و کششی، می توان دریافت که حضور سبک‌دانه لیکا نسبت به شن بازیافتی سبب افت بیشتری در مقاومت برشی شده است و از این نظر تغییرات مقاومت برشی به تغییرات مقاومت فشاری مخلوط‌ها نزدیکی بیشتری دارد که علت این امر را می توان به تفاوت مودهای شکست نمونه‌های تحت آزمایش شکافت (مود ۱ شکست) و برش مستقیم (مود ۲ شکست) دانست.

۳-۴-مدول الاستیک

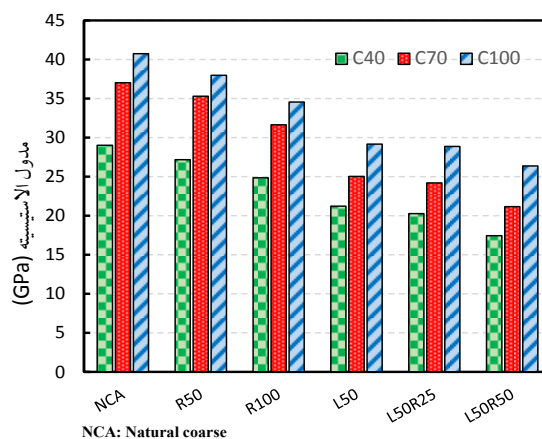
مقادیر مدول الاستیک مخلوط‌های مختلف در شکل ۱۰ ارائه شده است. با جایگزینی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ شن طبیعی با شن بازیافتی بترتیب ۶/۷-۴/۶ و ۱۵/۲-۱۴/۴ کاهش در مدول الاستیک مخلوط‌ها نسبت به مخلوط‌های پایه مشاهده می شود. همچنین با جایگزینی ۵۰٪ شن طبیعی با سبک‌دانه لیکا مقاومت برشی در حدود ۳۲/۴-۲۶/۸ نسبت به مخلوط‌های پایه کاهش یافته است که نشان دهنده تأثیر بیشتر سبک‌دانه لیکا نسبت به شن بازیافتی در کاهش مدول الاستیک بتن است. استفاده هم‌زمان از سبک‌دانه لیکا و شن بازیافتی بجای شن طبیعی سبب کاهش بیشتر مدول الاستیک می شود. برای مخلوط‌های L50R25 و L50R50، با جایگزینی ۵۰٪ مصرفی با سبک‌دانه لیکا و بطور هم‌زمان جایگزینی ۲۵٪ و ۵۰٪ شن طبیعی باقیمانده با شن بازیافتی بترتیب کاهش ۴/۶-۱/۱ و ۱۷/۹-۹/۸ نسبت به مدول الاستیک مخلوط‌های L50 بدست آمد که نسبت به مخلوط‌های پایه کاهش مدول الاستیک بترتیب برابر ۳۴/۷-۲۹/۲ و ۴۲/۸-۳۵/۳ را نشان می دهد. همچنین نسبت افت مدول الاستیک ناشی از استفاده هم‌زمان از شن بازیافتی و سبک‌دانه لیکا نسبت به مجموع افت ناشی از استفاده جداگانه آنها ($R_{drop,fs}$) برای تمام رده های مقاومتی بتن پایه در حدود ۱/۲۰-۱/۰۰ می باشد و اثر بر هم نهی کاهنده ناچیزی را نشان می دهد (شکل ۱۱). البته باید توجه داشت که بر اساس نتایج سبک‌دانه لیکا نسبت به شن بازیافتی تأثیر کاهنده ۷/۰-۴/۲ برابری دارد که تایید کننده تأثیر مهم خصوصیات مصالح درشت دانه در مدول الاستیک بتن است.

طبیعی و بازیافتی در یک گروه دوم و مخلوط های حاوی سبک دانه لیکا در گروه سوم جای داده شده اند. بر اساس نتایج بدست آمده از هر گروه رابطه برآزش میان مقاومت کششی شکافت و جذر مقاومت فشاری برقرار شد که به همراه ضریب همبستگی (R^2) در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود هر سه رابطه برآزش دارای ضرایب همبستگی بالایی می باشند که نشان دهنده همبستگی بالا میان مقاومت کششی شکافت و جذر مقاومت فشاری مخلوط ها می باشند. روابط برآزش ارائه شده برای مخلوط های حاوی سنگ دانه بازیافتی و مخلوط های حاوی لیکا بسیار نزدیک به همدیگر بوده و روند نسبتاً مشابهی را نشان می دهند. در مقابل رابطه برآزش مخلوط های ساخته شده از سنگ دانه طبیعی دارای شیب تغییرات مشابهی با دو رابطه دیگر نشان می دهد اما مقادیر بیشتری را برای مقاومت کششی تخمین می زند. علت این تفاوت را می توان به وجود نواقص موجود مانند تخلخل، ترک و ریزترکها در سبک دانه های لیکا و یا سنگ دانه های بازیافتی دانست که سبب تمرکز تنش و شروع خرابی از آن مناطق و در نتیجه کاهش مقاومت کششی مخلوط های حاوی آنها را می شود.

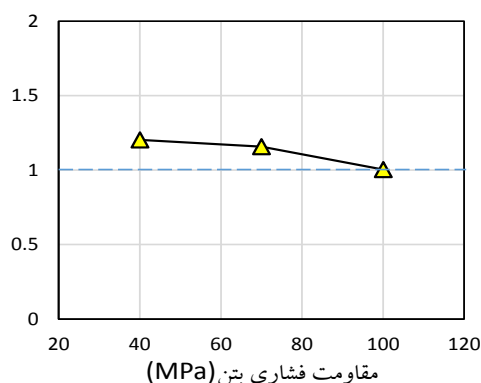


شکل ۱۲- رابطه میان مقاومت کششی شکافت و جذر مقاومت فشاری

شکل ۱۳ روابط برآزش شده میان مقاومت برشی و جذر مقاومت فشاری را برای مخلوط های مختلف نشان می دهد. ضرایب همبستگی روابط برآزش شده همبستگی خوب میان مقاومت برشی و جذر مقاومت فشاری را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود روند کلی حاکم بر رفتار سه گروه مخلوط ها متفاوت بوده بطوریکه با جایگزینی سنگ دانه های طبیعی با سنگ دانه بازیافتی



شکل ۱۰- مدول الاستیک مخلوط ها



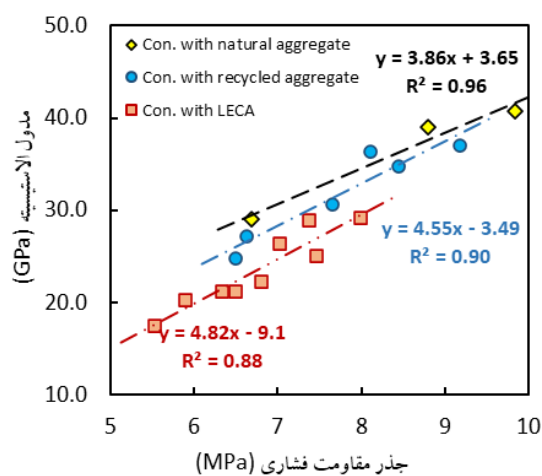
شکل ۱۱- نسبت افت مدول الاستیک ناشی از استفاده هم زمان از شن بازیافتی و سبک دانه لیکا نسبت به مجموع افت های ناشی از استفاده جداگانه آنها

۳-۵- همبستگی میان نتایج آزمایش ها

بررسی ارتباط میان مقاومت فشاری و دیگر خصوصیات مکانیکی بتن نظیر مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و مقاومت برشی از مواردی است که از دیرباز مورد توجه محققین بوده است و آیین نامه ها نیز روابط مختلفی را در این زمینه ارائه کرده اند. با توجه به اینکه مقاومت فشاری بعنوان اصلی ترین مشخصه مکانیکی بتن همواره مورد ارزیابی قرار می گیرد، روابط اشاره شده می توانند برای تخمین مناسب دیگر خصوصیات مکانیکی بتن بر اساس مقاومت فشاری استفاده شوند.

شکل ۱۲ رابطه میان مقاومت کششی شکافت و جذر مقاومت فشاری را برای مخلوط های مختلف نشان می دهد. لازم به ذکر است مخلوط ها بر اساس ضعیف ترین درشت دانه موجود در اختلاط دسته بندی شده اند بنابراین مخلوط های فاقد سنگ دانه بازیافتی و سبک دانه لیکا در گروه، مخلوط های حاوی سنگ دانه

و یا سبک‌دانه لیکا شیب تغییرات مقاومت برشی نسبت به جذر مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. با کاهش مقاومت سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در مخلوط به ازای کاهش مقاومت فشاری کاهش بیشتری نیز در مقاومت برشی مشاهده می‌شود. این تفاوت روند را می‌توان ناشی از تغییر در مقاومت درشت دانه مورد استفاده در مخلوط‌ها دانست. بطور کلی مقاومت برشی مخلوط‌ها ناشی از مجموع مقاومت برشی بخش ترک نخورده بتن و نیروی تبادلی شده ناشی از درگیری درشت دانه‌ها در محل بروز ترک دانست [۲۲]. با کاهش مقاومت مصالح درشت دانه مخلوط‌ها بخشی از مقاومت برشی که ناشی از قفل و بست درشت دانه‌ها در محل ترک است کاهش می‌یابد. بدیهی است با افزایش حجم مشارکت درشت دانه‌های با مقاومت کمتر در مخلوط از مقاومت برشی مخلوط‌ها کاسته می‌شود.



شکل ۱۴- رابطه میان مدول الاستیسیته و جذر مقاومت فشاری

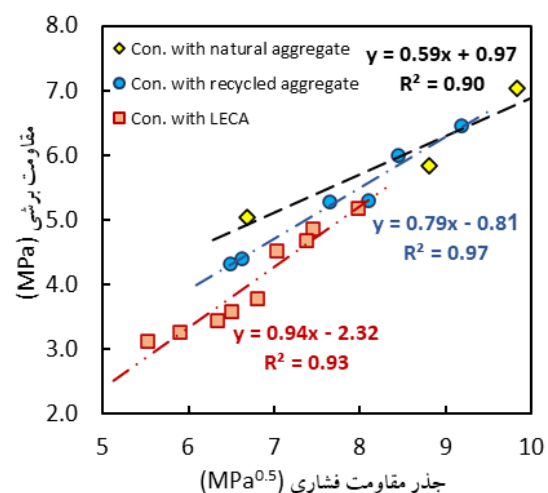
۴- نتیجه گیری

- جایگزینی شن طبیعی با هر کدام از شن بازیافتی و لیکا مقاومت فشاری افت می‌نماید و با افزایش رده مقاومتی مخلوط پایه افت مقاومت فشاری افزایش می‌یابد.

- جایگزینی شن طبیعی بطور هم‌زمان با شن‌های بازیافتی و لیکا در مخلوط افت مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به مجموع افت‌های ناشی از جایگزینی مجزای این مصالح ایجاد می‌کند که این مورد در بتن‌های با رده مقاومتی پایین شدیدتر است و با افزایش رده مقاومتی بتن پایه از مقدار آن به نحو چشمگیری کاسته می‌شود.

- در هر سه رده مقاومتی، روند تغییرات مقاومت شکافت و برشی مخلوط‌ها نسبت به جایگزینی شن طبیعی با شن بازیافتی و لیکا مشابه با تغییرات مقاومت فشاری می‌باشد، اگرچه افت ناشی از

مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. با کاهش مقاومت سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در مخلوط به ازای کاهش مقاومت فشاری کاهش بیشتری نیز در مقاومت برشی مشاهده می‌شود. این تفاوت روند را می‌توان ناشی از تغییر در مقاومت درشت دانه مورد استفاده در مخلوط‌ها دانست. بطور کلی مقاومت برشی مخلوط‌ها ناشی از مجموع مقاومت برشی بخش ترک نخورده بتن و نیروی تبادلی شده ناشی از درگیری درشت دانه‌ها در محل بروز ترک دانست [۲۲]. با کاهش مقاومت مصالح درشت دانه مخلوط‌ها بخشی از مقاومت برشی که ناشی از قفل و بست درشت دانه‌ها در محل ترک است کاهش می‌یابد. بدیهی است با افزایش حجم مشارکت درشت دانه‌های با مقاومت کمتر در مخلوط از مقاومت برشی مخلوط‌ها کاسته می‌شود.



شکل ۱۳- رابطه میان مقاومت برشی و جذر مقاومت فشاری

شکل ۱۴ روابط برآزش شده میان مدول الاستیک و جذر مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ضرایب همبستگی روابط برآزش شده رابطه خوب میان مدول الاستیسیته و جذر مقاومت فشاری را برای مخلوط‌های مختلف نشان می‌دهد. بمانند آنچه برای مقاومت برشی مشاهده شد، با تغییر درشت دانه شیب تغییرات مدول الاستیسیته نسبت به جذر مقاومت فشاری تغییر می‌کند. با جایگزینی بخشی از شن طبیعی با شن بازیافتی به ازای کاهش مقاومت فشاری افت بیشتری را در مدول الاستیسیته بتن‌های حاوی شن بازیافتی نسبت به بتن نرمال ایجاد شد و در مخلوط‌های حاوی سبک‌دانه لیکا مقدار افت مدول الاستیسیته نسبت به

with non-destructive assessment, *Advances in Civil Engineering: Select Proceedings of ICACE 2020*, Springer 2021, pp. 223-233.

[10] Kumutha, R., Vijai, K., Strength of concrete incorporating aggregates recycled from demolition waste, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences* 5(5) 64-71 (2010).

[11] Ali, A.A.M., Zidan, R.S., Ahmed, T.W., Evaluation of high-strength concrete made with recycled aggregate under effect of well water, *Case studies in construction materials* 12 e00338 (2020).

[12] Silva, R.V., De Brito, J., Dhir, R., Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials* 83 108-118 (2015).

[13] Thomas, J., Thaickavil, N.N., Wilson, P., Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates, *Journal of Building Engineering* 19 349-365 (2018).

[14] Trindade, J., Garcia, S., Fonseca, G., Experimental study of direct shear in concrete with recycled aggregate, *ACI Struct. J* 117(5) 233-243 (2020).

[15] Dabbaghi, F., Nasrollahpour, S., Dehestani, M., Yousefpour, H., Optimization of Concrete Mixtures Containing Lightweight Expanded Clay Aggregates Based on Mechanical, Economical, Fire-Resistance, and Environmental Considerations, *Journal of Materials in Civil Engineering* 34(2) 04021445 (2022).

[16] Mao, J., Ayuta, K., Freeze-thaw resistance of lightweight concrete and aggregate at different freezing rates, *Journal of Materials in Civil Engineering* 20(1) 78-84 (2008).

[17] Pourahmadi sefat arabani, H., Sadrmomtazi, A., Mirgozar Langaroudi, M.A., Kohani Khoshkbijari, R., Amooei Sarajari, M., Durability of self-Compacting lightweight aggregate concretes (LWSCC) as repair overlays, rehabilitation in civil engineering 5(2) 101-113 (2017). DOI: 10.22075/JRCE.2017.11415.1187

[18] Pourahmadi sefat arabani, H., Sadrmomtazi, A., Mirgozar Langaroudi, M.A., Amooei Sarajari, M., Kohani Khoshkbijari, R., Practical Evaluation of Using Lightweight Self-Compacting Concrete in Reinforced Concrete Constructions, *Structural and Construction Engineering* 6(3) 193-204 (2019). DOI: 10.22065/jsce.2018.104048.1376

[19] Sadrinejad, I., Miar Naimi, M.A., Saradar, A., Mansouri Sarvandani, M., Karakouzian, M., Experimental and numerical investigation of the tensile strength of lightweight concrete including expanded clay aggregate with emphasis on the double punch test, *Materials and Structures* 57(3)

جایگزینی هم‌زمان شن طبیعی با شن بازیافتی و لیکا بطور ناچیزی از مجموع افت‌های ناشی از استفاده مجزای این مصالح بیشتر است.

- جایگزینی شن طبیعی بطور هم‌زمان با شن‌های بازیافتی و لیکا در مخلوط افت‌مدول الاستیک بیشتری را نسبت به مجموع افت‌های ناشی از جایگزینی مجزای آنها بوجود می‌آورد که با افزایش رده مقاومتی بتن پایه از مقدار آن کاسته می‌شود.

- برای مخلوط‌های حاوی شن بازیافتی و یا لیکا همبستگی میان نتایج مقاومت‌های شکافت، برشی و مدول الاستیک با جذر مقاومت فشاری بررسی شد که نتایج همبستگی قوی میان این پارامترها را نشان داد و روابط مناسب برای هر کدام استخراج شدند.

۵- مراجع

[1] Mehta, K.P., Reducing the environmental impact of concrete, *Concrete international* 23(10) 61-66 (2001).

[2] Yehia, S., Helal, K., Abusharkh, A., Zaher, A., Istaitiyeh, H., Strength and durability evaluation of recycled aggregate concrete, *International journal of concrete structures and materials* 9 219-239 (2015).

[3] Hasheminezhad, A., King, D., Ceylan, H., Kim, S., Comparative life cycle assessment of natural and recycled aggregate concrete: A review, *Science of The Total Environment* 175310 (2024).

[4] Sonawane, T.R., Pimplikar, S.S., Use of recycled aggregate concrete, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering* 52(59) (2013).

[5] Mazhoud, B., Sedran, T., Cazacliu, B., Cothenet, A., Torrenti, J.-M., Influence of residual mortar volume on the properties of recycled concrete aggregates, *Journal of Building Engineering* 57 104945 (2022).

[6] Silva, R., de Brito, J., Dhir, R., The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 19(7) 825-849 (2015).

[7] Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M., Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and concrete research* 37(5) 735-742 (2007).

[8] Duan, Z.H., Poon, C.S., Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars, *Materials & Design* 58 19-29 (2014).

[9] Sobuz, M., Datta, S., Rahman, M., Evaluating the properties of demolished aggregate concrete

41 (2024).

[20] Bogas, J.A., Gomes, A., Static and dynamic modulus of elasticity of structural lightweight and modified density concrete with and without nanosilica–characterization and normalization (2014).

[21] Yang, K.-H., Chung, H.-S., Ashour, A.F., Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties, Materials Journal 105(3) 289-296 (2008).

[22] Rahal, K., Alrefaei, Y., Shear strength of recycled aggregate concrete beams containing stirrups, Construction and Building Materials 191 866-876 (2018).

[23] Malešev, M., Radonjanin, V., Lukić, I., Bulatović, V., The effect of aggregate, type and quantity of cement on modulus of elasticity of lightweight aggregate concrete, Arabian Journal for Science and Engineering 39 705-711 (2014).

A study on the mechanical properties of concrete containing recycled aggregate and lightweight expanded clay aggregate

Seyed Ali Hashemi

Department of Civil Engineering, Ram.C., Islamic Azad University, Ramsar, Iran.

Iman Sadrinejad *

Department of Civil Engineering, Ram.C., Islamic Azad University, Ramsar, Iran.

Abstract

This study studied both the separate and combined effects of lightweight expanded clay aggregate (LECA) and recycled aggregate on the mechanical properties of concrete. For this purpose, three basic mixtures with target strengths of 40, 70 and 100 MPa were designed. At each base mixture, natural coarse aggregate was substituted with recycled coarse aggregate in proportions of 50% and 100% and LECA in proportions of 25% and 50% to develop three groups of mixtures, totaling 18 mixtures. The prepared samples were tested to determine compressive, splitting, shear strengths and elastic modulus after curing for 28 days. The results showed that replacing natural coarse aggregate with recycled coarse aggregate and LECA separately reduced the compressive strength by 26.2% and 34.1% compared to the base mix, respectively. Also, the decrease in compressive strength resulting from the simultaneous use of recycled coarse aggregate and LECA was significantly greater than the separate replacement of natural coarse aggregate with these materials, which was more observed in low-strength mixtures. Splitting strength, shear strength, and elastic modulus results in various mixtures showed a similar trend to compressive strength, meaning that these characteristics significantly decrease as natural coarse aggregate was replaced by recycled coarse aggregate and LECA, although the reducing effect of simultaneous use of recycled coarse aggregate and LECA was small. Furthermore, relationships were established between the square root of the compressive strength and the splitting strength, shear strength, and elastic modulus for different mixtures.

Keywords: Recycled aggregate, Lightweight expanded clay aggregate, Concrete, Mechanical properties.

* Corresponding Author: iman.sadrinejad@iau.ac.ir

