

صحت‌سنجی مشخصات مکانیکی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی در روابط آیین‌نامه‌ها

مقاله پژوهشی

شقایق افشار*، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه غیرانتفاعی شهاب دانش، قم، ایران
مهدی آرزومندی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه غیرانتفاعی شهاب دانش، قم، ایران
مسعود سعادت خوش، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه غیرانتفاعی شهاب دانش، قم، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: shaghayeghafshar29@yahoo.com

دریافت: ۹۸/۰۴/۲۲ - پذیرش: ۹۸/۱۰/۰۵

صفحه ۱۳۲-۱۱۵

چکیده

محدود بودن منابع و حفظ کیفیت محیط زیست، لزوم بازیافت مواد و مصالح را اجتناب‌ناپذیر ساخته است. یکی از مصالح ساختمانی که پتانسیل خوبی برای بازیافت دارد بتن است. بتن ضایعاتی را می‌توان دوباره خرد نموده، به عنوان سنگدانه در ساخت بتن استفاده کرد. این مقاله، به مرور جامعی از کارهای گذشته در زمینه مشخصات مکانیکی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی شامل؛ مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته پرداخته است. علاوه بر این، با جمع‌آوری داده‌های پژوهش‌های گذشته و ایجاد بانک داده‌ها برای بتن با سنگدانه‌های بازیافتی، نتایج آن را با روابط آیین‌نامه‌های معتبر دنیا «آمریکا، اروپا، استرالیا، کانادا و ژاپن» و همچنین روابط پیشنهاد شده توسط محققین گذشته برای بتن معمولی مقایسه کرده است. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که روابط آیین‌نامه‌های موجود مقاومت کششی، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته برای حدود ۵۰ تا ۷۰ درصد داده‌های بتن با سنگدانه‌های بازیافتی، مقاومتی کمتر از روابط آیین‌نامه‌ها دارد. همچنین این مطالعه، بر اساس تحلیل‌های آماری (رگرسیون غیرخطی) روابطی را برای مشخصات مکانیکی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی پیشنهاد داده است.

واژه‌های کلیدی: بتن با سنگدانه بازیافتی، مشخصات مکانیکی، مقاومت کششی، مدول گسیختگی، مدول الاستیسیته

۱-مقدمه

می‌دهد که حجم نخاله‌های ساختمانی در میان سایر زباله‌ها ۱۳ تا ۲۹ درصد هستند (WBCSD,2017). در سال ۱۹۹۶، حدود ۱۳۶ میلیون تن ضایعات ساختمانی حاصل از تخریب و نوسازی مربوط به ساختمان سازی در ایالات متحده آمریکا تولید شده است (wagangluss,2010). با توجه به حجم بالای تولید پسماندهای ساختمانی در بخش‌های مسکونی و غیر مسکونی از یک سو و از طرف دیگر حجم بالای مصرف بتن به عنوان پر مصرف‌ترین محصول ساختمانی، بدیهی است که انجام فرآیند بازیافت این پسماند تا چه حد

استفاده از بتن‌های بازیافتی با تخریب بتن‌های فرسوده در دهه‌های گذشته منافی را برای انسان‌ها به دنبال داشته است که صرفه جویی اقتصادی یکی از آنهاست. به طور تقریبی هر ساله ۲۵ میلیارد تن بتن در جهان تولید می‌شود که سهم هر نفر در سال ۳/۸ تن بتن می‌شود. در ایران نیز با توجه به رشد روز افزون ساخت و ساز ساختمان‌های مختلف از یک طرف و الزام به بازسازی سازه‌های فرسوده از طرف دیگر موجب کاهش منابع سنگدانه‌های طبیعی و افزایش نخاله‌های ساختمانی می‌گردند. تحقیقات انجام شده در جهان نشان

بازیافتی بیشترین مقدار خود را داشته و حدود ۱۶ تا ۴۵ درصد نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است. (Ajdukiewicz, 2007).
با جایگزینی ۱۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی بتنی نشان دادند که مقاومت کششی در بتن با سنگدانه‌های بازیافتی نسبت به بتن معمولی حدود ۱۰ درصد بالاتر بوده است. در این بخش داده‌های مقاومت کششی مطالعات گذشته با روابط آیین‌نامه‌های آمریکا (معادله ۱)، آشتو (معادله ۲)، اروپا (معادله ۳)، استرالیا (معادله ۴)، CEB-FIP (معادله ۵) و ژاپن (معادله ۶) که در جدول ۱ نشان داده شده، مقایسه می‌شود. از آنجایی که طبق مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران (مقررات ملی ساختمان، چاپ نهم "طراحی و اجرای سازه‌های بتنی آرمه" نماینده مقررات ملی ساختمان، وزارت مسکن و شهرسازی) بتن‌هایی با مقاومت فشاری بالای ۵۰ مگاپاسکال، بتن پر مقاومت محسوب می‌گردند، این تحقیق به بررسی بتن‌هایی با مقاومت کمتر از ۵۰ مگا پاسکال پرداخته است.

۳- مشخصات مکانیکی

در این بخش نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه‌های بازیافتی را با روابط آیین نامه های معتبر دنیا و روابط پیشنهادی محققان گذشته مقایسه شده است.

۳-۱- مقاومت کششی

برای ارزیابی مقاومت کششی بتن به طور کلی از سه روش شناخته شده شامل: (۱) آزمایش کشش مستقیم (۲) آزمایش کشش دو نیم شدن (۳) آزمایش کشش حاصل از خمش (سه نقطه‌ای یا چهار نقطه‌ای) استفاده می‌شود. با توجه به سختی انجام آزمایش کشش مستقیم، نتایج این آزمون‌ها کمیاب هستند و بیشتر تحقیقات مقاومت کششی را از نتایج آزمایش‌های ناشی از آزمون کشش ناشی از خمش یا آزمایش کشش دو نیم شدن بدست آورده‌اند.

می‌تواند در حفظ منابع موجود و نیز حفظ محیط زیست لازم و ضروری باشد. با توجه به حجم زیاد دور ریز بتن، بازیافت بتن مزایایی همچون کاهش مصرف سنگدانه‌های جدید که از معدن استخراج شده‌اند، کاهش مساحت زمین‌های مختص به دفع بتن، کاهش تولید گاز دی اکسید کربن در مقایسه با بتن‌های معمولی و همچنین کاهش هزینه‌های حمل و نقل و دفن بتن دارد (sewing, 2006). استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی ناشی از تخریب روسازی‌ها به عنوان جایگزین سنگدانه در بتن از سال ۱۹۴۲ در آمریکا شروع شد. همچنین انجمن پیمانکاران ساختمان ژاپن، تحقیقات درباره استفاده از سنگدانه بتن بازیافتی را اولین بار پس از بحران نفت در سال ۱۹۷۳ شروع کردند (Buck, 1997).

۲- پیشینه تحقیق

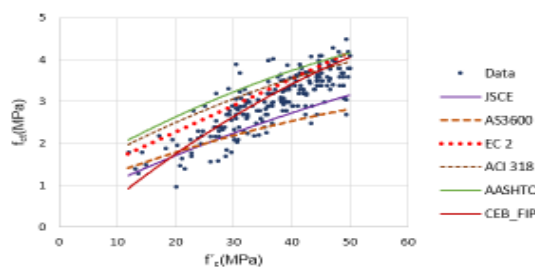
(Kutulmis, 2015) نمونه‌هایی با جایگزینی ۲۵، ۳۰ و ۵۵ درصد سنگدانه‌های بازیافتی را مورد آزمایش قرار دادند و نتایج نشان داد که مقاومت کششی حدود ۱۰ درصد نسبت به بتن معمولی کاهش یافته است. (Rajendra, 2015) نمونه‌هایی با جایگزینی ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی بتنی را مورد آزمایش قرار دادند و گزارش کردند که مقاومت کششی در بتن با سنگدانه‌های بازیافتی بتنی بین ۱۲ تا ۳۸ درصد نسبت به بتن معمولی کاهش یافته است. (Tabsh, 2009) کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی مقاومت کششی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی برای نمونه‌های با سنگدانه بازیافتی با درصد جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ را گزارش کردند. (Ignjatovic, 2013) با آزمایش نمونه‌هایی با جایگزینی ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی نتایج مشاهده کردند که مقاومت کششی با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی حدود ۱۵ درصد نسبت به بتن معمولی افزایش یافته است. (Kou.s.c, 2013) نمونه‌هایی با جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی را آزمایش کردند و نتایج نشان داد که مقاومت کششی در بتن با سنگدانه‌های بازیافتی در یک سال بیشتر از بتن معمولی بوده است و در ۵ سال مقاومت کششی در بتن با سنگدانه‌های

جدول ۱. روابط آیین نامه های موجود برای مقاومت کششی

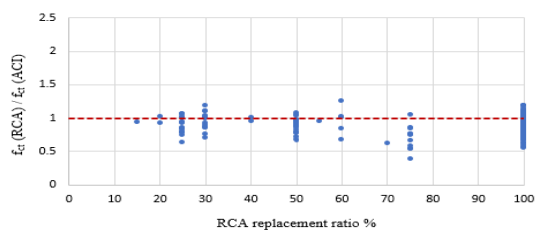
$f_{ct} = 0.56 (f'_c)^{0.5}$	ACI 318-07,2008	(۱)
$f_{ct} = 0.59 (f'_c)^{0.5}$	AASHTO-06,2006	(۲)
$f_{ct} = 0.4 (f'_c)^{0.5}$	EC 2-05,200 5]	(۳)
$f_{ct} = 0.3 (f'_c)^{\frac{2}{3}}$	AS 3600-09,2009	(۴)
$f_{ct} = 1.56 \left[\frac{f'_c - 8}{10} \right]^{\frac{2}{3}}$	CEB-FIP-90,1990	(۵)
$f_{ct} = 0.23 (f'_c)^{\frac{2}{3}}$	JSCE-05 ,2005	(۶)

برای بتن با سنگدانه‌های بازیافتی محافظه کارانه هستند (شکل ۱). اشکال ۲ تا ۷ نسبت داده‌های مقاومت کششی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به آیین نامه‌های مختلف با درصدهای جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی را نشان می‌دهد. (مقادیر بزرگتر از یک بدین معناست که داده‌های موجود، مقاومت کششی بیشتر از مقادیر بدست آمده از روابط آیین نامه‌ها دارد).

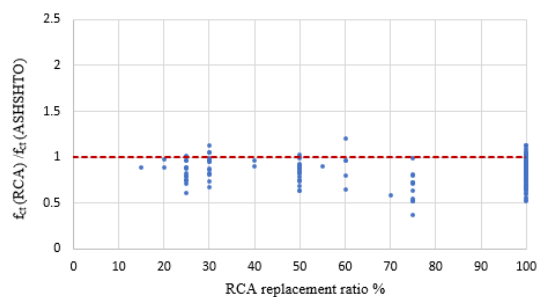
با مطالعه بر روی ۲۲۹ داده موجود در تحقیقات گذشته، میانگین مقاومت کششی نتایج آزمایشگاهی به روابط آیین نامه‌ای برای آیین‌نامه‌های آمریکا، آشتو، اروپا، استرالیا، CEB-FIP و ژاپن برای داده‌های بتن بازیافتی به ترتیب برابر با ۰/۸۹، ۰/۸۴، ۰/۹۰، ۱/۲۴، ۰/۹۸ و ۱/۱۸ است. همچنین روابط آیین نامه‌های آمریکا و آشتو به ترتیب برای ۲۰، ۹ درصد داده‌ها، اروپا و استرالیا برای ۲۲ و ۹۰ درصد داده‌ها و آیین نامه CEB-FIP و ژاپن برای ۴۰ و ۸۶ درصد داده‌های



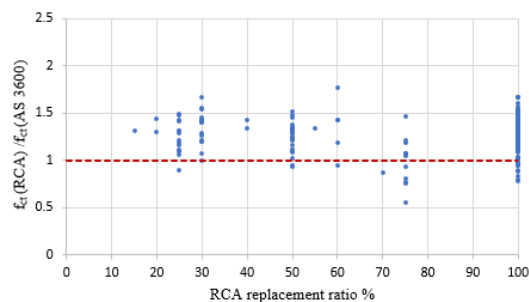
شکل ۱. مقایسه نتایج مقاومت کششی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی با روابط آیین نامه‌ها



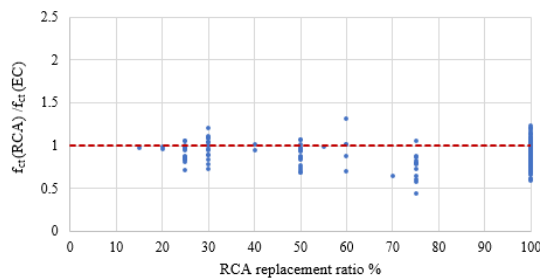
شکل ۲. نسبت مقاومت کششی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به مقاومت کششی آیین نامه آمریکا



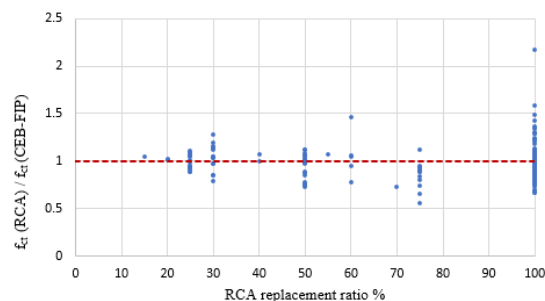
شکل ۳. نسبت مقاومت کششی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به مقاومت کششی آیین نامه آشتو



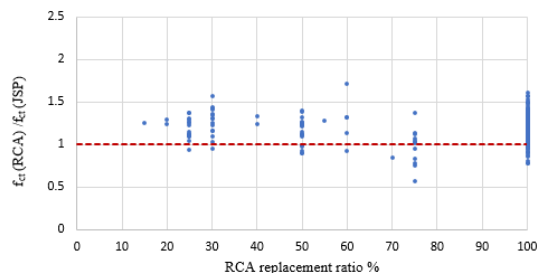
شکل ۴. نسبت مقاومت کششی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به مقاومت کششی آیین نامه استرالیا



شکل ۵. نسبت مقاومت کششی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به مقاومت کششی آیین نامه اروپا



شکل ۶. نسبت مقاومت کششی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به مقاومت کششی آیین نامه CEB-FIP



شکل ۷. نسبت مقاومت کششی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به مقاومت کششی آیین نامه ژاپن

۳-۲- مقایسه با روابط محققان گذشته

در این بخش نتایج با روابط محققان گذشته Akazawa (معادله ۷)، Ahmad and Shah (معادله ۸)، Carino and Lew (معادله ۹)، Carneiro and Barcellos (معادله ۱۰) و Raphael (معادله ۱۱) که در جدول ۲ آمده است مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۲. روابط محققین گذشته برای مقاومت کششی

$$f_{ct} = 0.209 (f'_c)^{0.73} \quad \text{Akazawa, 1953} \quad (7)$$

$$f_{ct} = 0.185 (f'_c)^{0.735} \quad \text{Ahmad and Shah, 1985} \quad (8)$$

$$f_{ct} = 0.272 (f'_c)^{0.71} \quad \text{Carino and Lew, 1982} \quad (9)$$

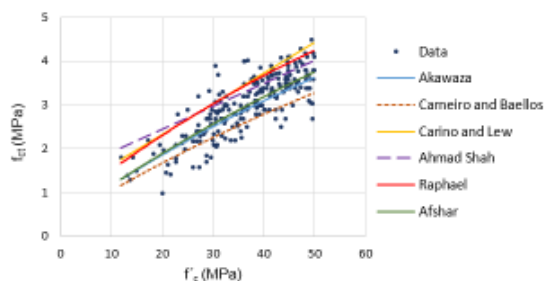
$$f_{ct} = 0.46 (f'_c)^{0.55} \quad \text{Carneiro and Barcellos, 1990} \quad (10)$$

$$f_{ct} = 0.313 (f'_c)^{0.667} \quad \text{Raphael, 1984} \quad (11)$$

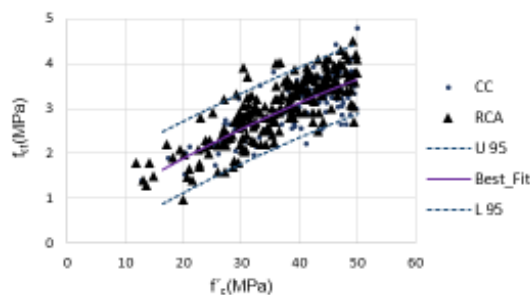
مقایسه با بانک داده‌های مطالعات گذشته

شکل ۹، بانک داده‌های مطالعات گذشته در زمینه مقاومت کششی را نشان می‌دهد. با کمک نرم افزار Minitab 17.1.0 (Statistical Software) و تحلیل‌های آماری (رگرسیون غیر خطی) بهترین خط به همراه محدوده ۹۵ درصد آماری داده‌ها ترسیم شده است. که فقط ۳ درصد داده‌ها خارج از محدوده ۹۵ درصد بهترین خط برازش شده معمولی (رگرسیون غیرخطی) داده‌های بتن (http://bme.t.utokyo.ac.jp/researches/detail/concreteDB/index.html.) قرار دارد.

میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی به روابط محققین گذشته داده‌های بتن بازیافتی Akazawa, Ahmad and Shah, Carino and Lew, Carino and Barcellos, Raphael به ترتیب برابر با ۰/۹۰، ۰/۸۶، ۰/۸۷ و ۰/۸۷ می‌باشد. همچنین روابط Akazawa, Ahmad and Shah, Carino and Lew, Carino and Barcellos, Raphael به ترتیب برای ۶۸، ۲۲، ۸۶ و ۱۳ درصد داده‌ها مقادیر بیشتری نسبت به روابط محققان گذشته دارند. شکل ۸، نتایج آزمایشگاهی را با روابط محققان گذشته، مقایسه می‌کند.



شکل ۸. مقایسه نتایج مقاومت کششی بتن با سنگدانه های بازیافتی با روابط محققین گذشته



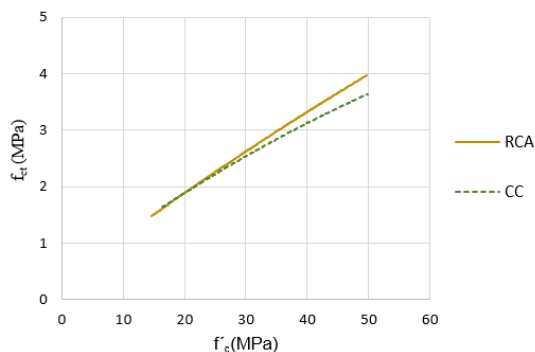
شکل ۹. نتایج تحلیل آماری مقاومت کششی بتن با سنگدانه های بازیافتی

۳-۳- تحلیل و آنالیز رابطه‌ی پیشنهادی

پاسکال شیب بتن با سنگدانه های بازیافتی کمی بیش از بتن معمولی است. این بدان معناست که در مقاومت های فشاری یکسان (بیشتر از ۳۰ مگاپاسکال) بتن با سنگدانه بازیافتی مقاومت کششی بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. بهترین خط برازش شده بر داده های مقاومت کششی بتن با سنگدانه های بازیافتی به صورت رابطه ی زیر است.

$$f_{ct} = 0.20 (f'_c)^{0.75} \quad (۱۲)$$

با تحلیل های آماری انجام شده بر روی بانک داده های مقاومت کششی بتن معمولی و بتن با سنگدانه های بازیافتی، بهترین خط برازش شده برای هر داده با استفاده از نرم افزار Minitab 17.1.0 رسم شده است (شکل ۱۰). شکل ۱۰ نشان می دهد که شیب خط بتن با سنگدانه های بازیافتی تا مقاومت فشاری حدود ۳۰ مگاپاسکال حدودا برابر با خط بتن معمولی است و برای مقاومت فشاری ۳۰ تا ۵۰ مگا



شکل ۱۰. مقایسه خط برازش شده مقاومت کششی بتن معمولی و بتن با سنگدانه های بازیافتی

۳-۴- مدول گسیختگی

تا ۳۳ در صدی مدول گسیختگی بتن بازیافتی را گزارش کردند. Andreu & Miren, 2014 افزایش ۱۰ درصدی مدول گسیختگی بتن بازیافتی با ۲۰ تا ۱۰۰ درصد جایگزینی سنگدانه های بازیافتی را گزارش کردند. Bulter et al, 2015. بتن با جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی را مورد آزمایش قرار دادند؛ آنها نشان دادند که مدول گسیختگی بتن با سنگدانه های بازیافتی ۱۰ درصد افزایش یافته است.

۳-۵- مقایسه با آیین نامه های معتبر

در این بخش نتایج آزمایش های مدول گسیختگی مطالعات گذشته با روابط آیین نامه های آمریکا (معادله ۱۳)، آشتو (معادله ۱۴)، استرالیا (معادله ۱۵) و اروپا (معادله ۱۶) همانطور که در جدول ۳ مشاهده می گردد، مقایسه می شود.

جدول ۳. روابط آیین نامه های معتبر برای مدول گسیختگی

$$f_r = 0.62(f'_c)^{0.5} \quad \text{ACI 361} \quad (13)$$

$$f_r = 0.63(f'_c)^{0.5} \quad \text{AASHTO} \quad (14)$$

$$f_r = 0.6(f'_c)^{0.5} \quad \text{AS 3600} \quad (15)$$

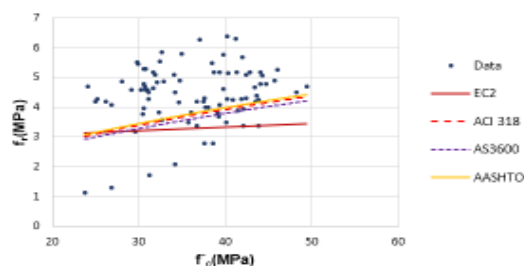
$$f_r = \text{Max} \left((1.6 - \frac{h}{200}) * f_{ct}, f_{ct} \right) \quad \text{EC 2} \quad (16)$$

۸۰، ۷۹ و ۸۴ درصد داده ها و استرالیا برای ۸۳ درصد داده ها مقاومت بیشتری نسبت به مقادیر آیین نامه ها را دارند. و همچنین اشکال ۱۲ تا ۱۵ نسبت مدول گسیختگی بتن با سنگدانه های بازیافتی به اساس آیین نامه های مختلف به درصد جایگزین سنگدانه های بازیافتی را نشان می دهد. (مقادیر بزرگتر از یک بدین معناست که داده های موجود، مدول گسیختگی بیشتر از مقادیر به دست آمده از روابط آیین نامه ها دارد).

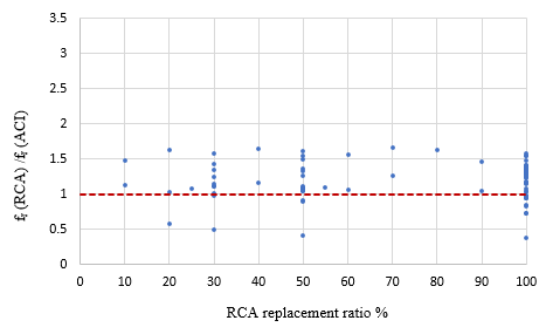
حداکثر تنش کششی تئوری ایجاد شده در لایه زیرین تیر با مقطع مربع (طبق آزمایش ASTM C78-10, 2010)، مدول گسیختگی نامیده می شود. C.Marthang et al, 2017. بتن با جایگزینی ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی را مورد آزمایش قرار دادند و نتایج نشان داد که مدول گسیختگی بتن با سنگدانه های بازیافتی به ترتیب حدود ۲۳ تا ۵۰ درصد کاهش یافته است. Sumit Arora et al, 2015. بتن با جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه های بازیافتی را ساختند و مورد آزمایش قرار دادند و نتایج نشان داد که مدول گسیختگی حدود ۸ درصد کاهش پیدا کرده است.

Kutulmis Recep Akcu et al, 2015. بتن با جایگزینی ۲۵، ۳۰ و ۵۵ درصد سنگدانه های بازیافتی در بتن، کاهش ۱۶

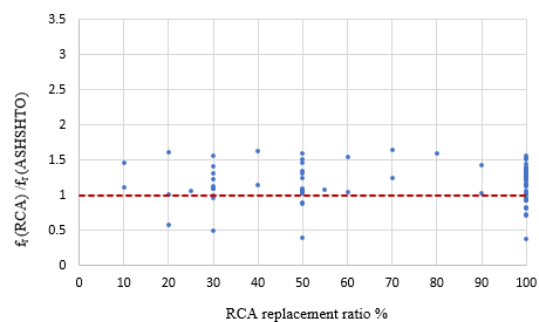
شکل ۱۱، نتایج آزمایشگاهی مدول گسیختگی را با روابط آیین نامه های آمریکا، آشتو، استرالیا و اروپا مقایسه می کند. با بررسی بر روی ۸۹ داده مربوط به مدول گسیختگی بتن بازیافتی در آیین نامه های معتبر دنیا (آمریکا، آشتو، استرالیا و اروپا) میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی به روابط آیین نامه ای برای آیین نامه های آمریکا، اروپا، استرالیا و آشتو به ترتیب برابر ۱/۱۹، ۱/۱۸، ۱/۲۳ و ۱/۳۸ هستند. همچنین روابط آیین نامه های آمریکا، آشتو و استرالیا به ترتیب برای



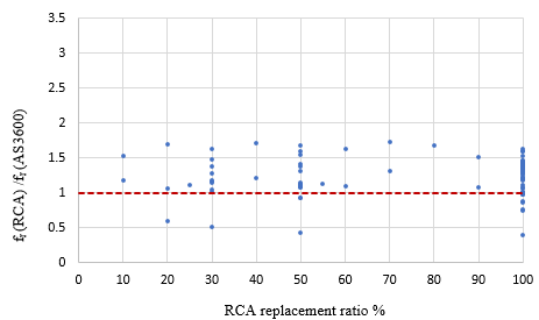
شکل ۱۱. مقایسه نتایج مدول گسیختگی بتن با سنگدانه های بازیافتی با روابط آیین نامه های آمریکا، اروپا، استرالیا و آشتو



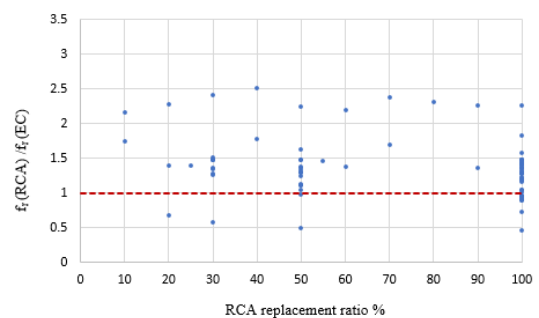
شکل ۱۲. نسبت مدول گسیختگی بتن با سنگدانه های بازیافتی به مدول گسیختگی آیین نامه آمریکا



شکل ۱۳. نسبت مدول گسیختگی بتن با سنگدانه های بازیافتی به مدول گسیختگی آیین نامه آشتو



شکل ۱۴. نسبت مدول گسیختگی بتن با سنگدانه های بازیافتی به مدول گسیختگی آیین نامه استرالیا

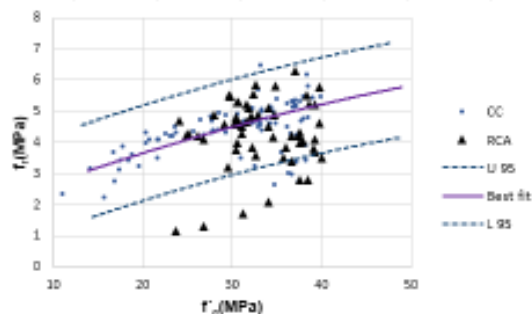


شکل ۱۵. نسبت مدول گسیختگی بتن با سنگدانه های بازیافتی به مدول گسیختگی آیین نامه اروپا

۳-۶- مقایسه با بانک داده‌های مطالعات گذشته

تقریباً ۹ درصد داده‌ها خارج از محدوده ۹۵ درصد بهترین خط برازش شده (رگرسیون غیرخطی) داده‌های بتن معمولی قرار دارد.

شکل ۱۶، بانک داده‌های مطالعات گذشته در زمینه مدول گسیختگی را نشان می‌دهد. نتایج تحلیل آماری (رگرسیون غیر خطی) با استفاده از نرم افزار Minitab 17.1.0 در رسم خط بهینه به همراه محدود ۹۵ درصد داده‌ها نشان می‌دهد که



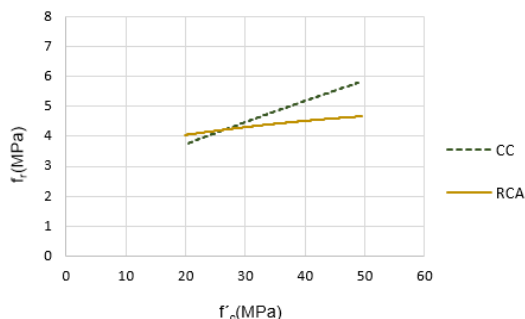
شکل ۱۶. مقایسه داده های مدول گسیختگی بتن با سنگدانه های بازیافتی و بتن معمولی

۳-۷- تحلیل و آنالیز و رابطه پیشنهادی

معمولی هست و برای مقاومت فشاری ۲۵ تا ۵۰ مگا پاسکال شیب بتن با سنگدانه های بازیافتی کمتر از بتن معمولی است. این بدان معناست که در مقاومت‌های فشاری یکسان (مقاومت فشاری ۲۵ تا ۵۰ مگاپاسکال) بتن با سنگدانه بازیافتی مدول گسیختگی کمتری نسبت به بتن معمولی دارد.

با تحلیل‌های آماری انجام شده بر روی بانک داده‌های مدول گسیختگی بتن معمولی و بتن با سنگدانه‌های بازیافتی، بهترین خط برازش شده برای هر داده با استفاده از نرم افزار Minitab 17.1.0 رسم شده است (شکل ۱۷). شکل ۱۷ نشان می‌دهد که شیب خط بتن با سنگدانه‌های بازیافتی تا مقاومت فشاری حدود ۲۵ مگاپاسکال کمی بیشتر از خط بتن

$$f_r = 1.67 (f'_c)^{0.27} \quad (17)$$



شکل ۱۷. مقایسه خط برازش شده مدول گسیختگی بتن معمولی و بتن با سنگدانه‌های بازیافتی

۴-مدول الاستیسیته

سنگدانه های بازیافتی نسبت به بتن معمولی کاهش یافته است. Arezoumandi et al, 2014, با جایگزینی ۱۰۰ در صد سنگدانه های بازیافتی در بتن نشان دادند که مدول الاستیسیته ۲۳ درصد نسبت به بتن معمولی کاهش یافته است. Bulter et al, 2013, نمونه ای با جایگزینی ۴۰ و ۶۰ در صد سنگدانه های بازیافتی را مورد آزمایش قرار دادند و نتایج نشان داد که مدول الاستیسیته ۱۹ درصد نسبت به بتن معمولی کاهش یافته است.

۴-۱-مقایسه با آیین نامه های معتبر

در این قسمت نتایج با روابط آیین نامه های آمریکا (معادله ۱۸)، آشتو (معادله ۱۹)، اروپا (معادله ۲۰)، برزیل (معادله ۲۱)، CEB-FIP (معادله ۲۲)، کانادا (معادله ۲۳)، نروژ (معادله ۲۴) و اسپانیا (معادله ۲۵) که در جدول ۴ آورده شده مقایسه می شود.

جدول ۴. روابط آیین نامه های معتبر برای مدول الاستیسیته

$$E_c = 4700 (f'_c)^{0.5} \quad \text{ACI 318} \quad (18)$$

$$E_c = 0.043 * K_1 * \lambda^{1.5} (f'_c)^{0.5} \quad \text{AASHTO} \quad (19)$$

$$E_c = 22 * (0.1 * (f'_c + 8))^{0.3} \quad \text{EC 2} \quad (20)$$

$$E_c = 10000 (f'_c)^{0.33} \quad \text{EHE, 2003} \quad (21)$$

$$E_c = 10000 (f'_c + 8)^{\frac{1}{3}} \quad \text{CEB-Fip} \quad (22)$$

$$E_c = 4500 (f'_c)^{0.5} \quad \text{CSA, 2004} \quad (23)$$

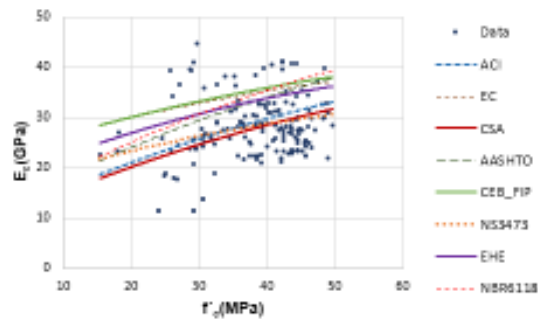
$$E_c = 9500 (f'_c)^{0.3} \quad \text{NS 3473, 1992} \quad (24)$$

$$E_c = 5600 (f'_c)^{0.5} \quad \text{NBR 6118, 1998} \quad (25)$$

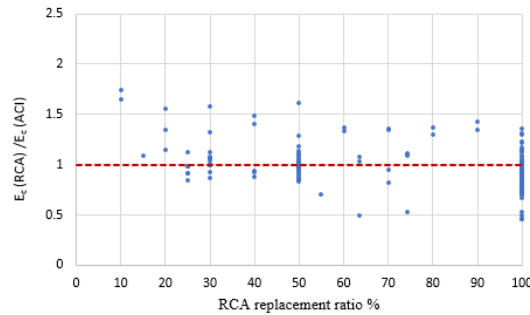
شیب رابطه تنش - کرنش، مدول الاستیسیته نامیده می شود. بخش های بعدی مدول الاستیسیته بتن بازیافتی را با روابط آیین نامه ها و مطالعات گذشته بتن معمولی مقایسه می کند. Chen & Zhou et al, 2016, نمونه هایی با جایگزینی ۱۰ تا ۱۰۰ در صد سنگدانه های بازیافتی را ساختند و مورد آزمایش قرار دادند و نتایج نشان داد که مدول الاستیسیته حدود ۱۰ درصد کاهش پیدا کرده است. Subhasis Pradhan et al, 2017, کاهش ۴۵ درصدی مدول الاستیسیته بتن با ۱۰۰ در صد سنگدانه بازیافتی را گزارش کردند. Kutulmis Recep Akcu et al, 2015, جایگزینی ۲۵، ۳۰ و ۵۵ در صد سنگدانه بازیافتی، کاهش ۱۶ تا ۳۱ درصدی مدول گسیختگی را نسبت به بتن معمولی گزارش کردند. Rajendra Kumar Choubey et al, 2015, نمونه هایی با جایگزینی ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ در صد سنگدانه های بازیافتی را مورد آزمایش قرار دادند و نتایج نشان داد که مدول الاستیسیته ۲۰ تا ۲۶ درصد در بتن با

را دارند. شکل ۱۸، نتایج آزمایشگاهی را با روابط آیین‌نامه‌های آمریکا، آشتو، اروپا، برزیل، CEB-FIP، کانادا، نروژ و اسپانیا مقایسه می‌کند و همچنین اشکال ۱۹ تا ۲۶ نسبت مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به آیین‌نامه‌های مختلف به در صد جایگزین سنگدانه‌های بازیافتی را نشان می‌دهد. (مقادیر بزرگتر از یک بدین معناست که داده‌های موجود، مدول الاستیسیته بیشتر از مقادیر به دست آمده از روابط آیین‌نامه‌ها دارد).

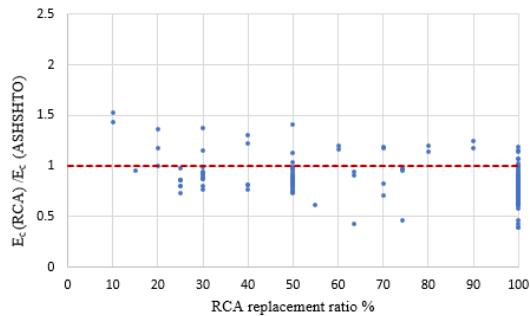
با مطالعه بر روی ۱۶۴ داده موجود در تحقیقات گذشته، میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی به روابط آیین‌نامه‌ای برای آیین‌نامه‌های آمریکا، آشتو، اروپا، برزیل و CEB-FIP به ترتیب ۰/۹۷، ۰/۸۵، ۰/۸۰، ۰/۸۴ و ۰/۷۹ و کانادا، نروژ و اسپانیا ۱/۰۱، ۰/۹۴ و ۰/۸۱ است. همچنین روابط آیین‌نامه‌های آمریکا برای ۴۰ درصد داده‌ها، آشتو و اروپا برای ۱۷ و ۳۰ درصد داده‌ها، برزیل و CEB-FIP برای ۱۶ و ۱۳ درصد داده‌ها، کانادا، نروژ و اسپانیا برای ۵۰، ۴۳ و ۱۴ درصد داده‌ها مقاومت بیشتری نسبت به مقادیر آیین‌نامه‌ها



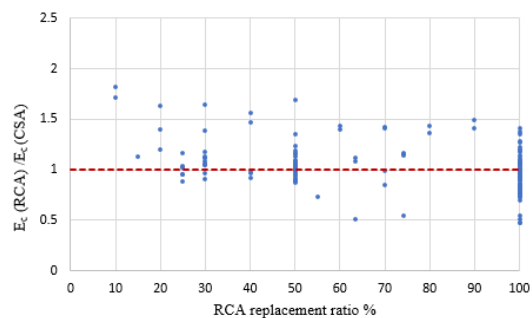
شکل ۱۸. مقایسه نتایج مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه‌های بازیافتی با روابط آیین‌نامه‌های دنیا



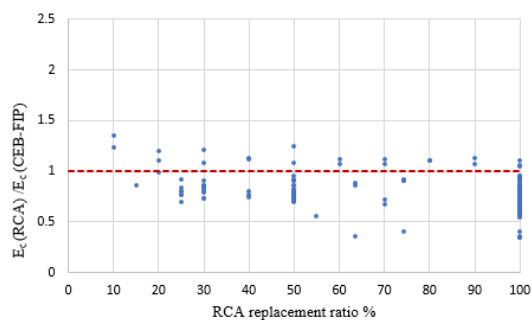
شکل ۱۹. نسبت مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به مدول الاستیسیته آیین‌نامه آمریکا



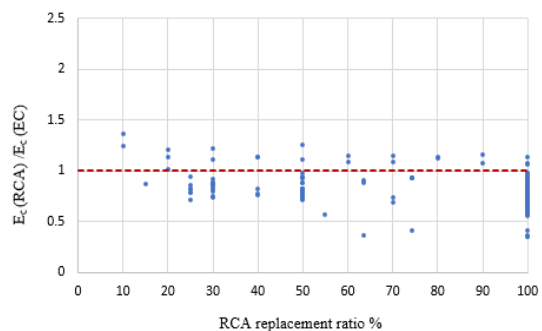
شکل ۲۰. نسبت مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به مدول الاستیسیته آیین‌نامه آشتو



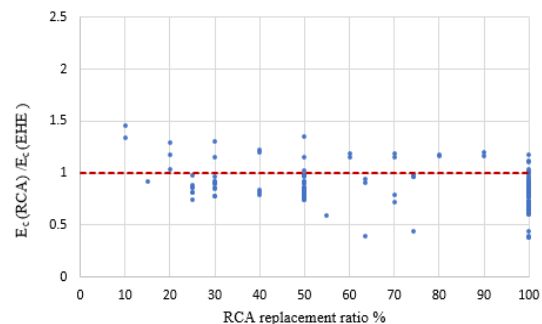
شکل ۲۱. نسبت مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به مدول الاستیسیته آیین نامه کانادا



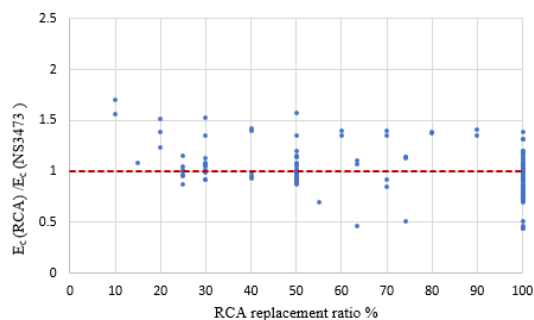
شکل ۲۲. نسبت مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به مدول الاستیسیته آیین نامه CEB-FIP



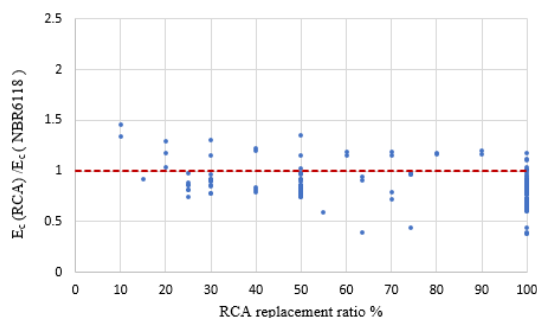
شکل ۲۳. نسبت مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به مدول الاستیسیته آیین نامه اروپا



شکل ۲۴. نسبت مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه‌های بازیافتی به مدول الاستیسیته آیین نامه برزیل



شکل ۲۵. نسبت مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه های بازیافتی به مدول الاستیسیته آیین نامه نوژ



شکل ۲۶. نسبت مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه های بازیافتی به مدول الاستیسیته آیین نامه اسپانیا

مقایسه با روابط محققان گذشته

در این بخش نیز نتایج با روابط به دست آمده توسط محققان گذشته نظیر: Dinakar et al. (معادله ۲۶)، Gutierrez and Canovos (معادله ۲۷) و Leemann and Hoffman (معادله ۲۸) مقایسه می شود.

جدول ۵. روابط محققین گذشته برای مدول الاستیسیته

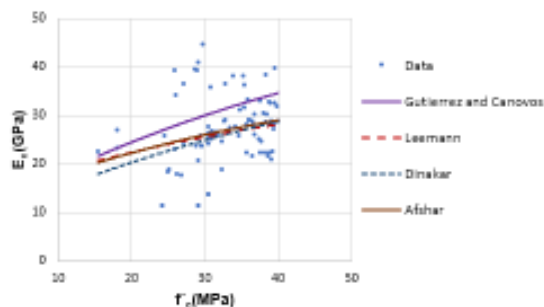
$$E_c = 5480(f'_c)^{0.5} \quad \text{Dinakar et al,2008} \quad (26)$$

$$E_c = 8340(f'_c)^{0.33} \quad \text{Gutierrez and Canovas,1995} \quad (27)$$

$$E_c = 4550(f'_c)^{0.5} \quad \text{Leemann and Hoffman,2005} \quad (28)$$

Hoffmann به ترتیب برای ۱۱، ۲ و ۲۴ درصد داده‌ها مقاومت بیشتری نسبت به مقادیر آیین نامه‌ها را دارند. شکل ۲۸، نتایج آزمایشگاهی را با روابط محققین گذشته Dinakar et al و Gutierrez and Canovas و Leemann and Hoffman مقایسه می کند.

میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی به روابط محققان گذشته داده‌های بتن بازیافتی Dinakar et al، Gutierrez and Canovos و Leemann به ترتیب ۱/۰۰، ۰/۸۳ و ۱/۰۱ بدست آمده است. همچنین روابط محققان گذشته Dinakar et al، Gutierrez and Canovas و Leeman and

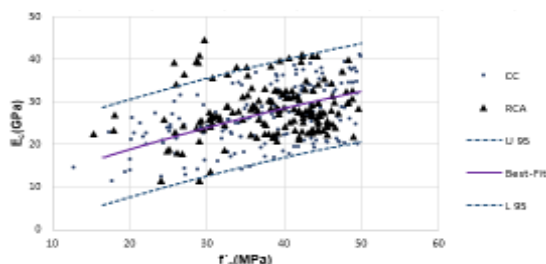


شکل ۲۸. مقایسه نتایج مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه های بازیافتی با روابط محققان گذشته

۴-۳-۳- مقایسه با بانک داده‌های مطالعات گذشته

سنگدانه‌های بازیافتی به این نتیجه می‌رسید که در بهترین خط برازش شده، فقط ۵ درصد داده‌ها خارج از محدوده ۹۵ درصد بهترین خط برازش شده (رگرسیون غیرخطی) داده‌های بتن معمولی قرار دارد.

شکل ۲۹، بانک داده‌های مطالعات گذشته در زمینه مدول الاستیسیته را نشان می‌دهد. با بررسی بر روی نتایج محدوده ۹۵ درصد خط برازش (رگرسیون غیرخطی) و همچنین بهترین خط برازش شده (Best Fit) با نرم افزار Minitab 17.1.0 بر روی داده‌های بتن معمولی و بتن با

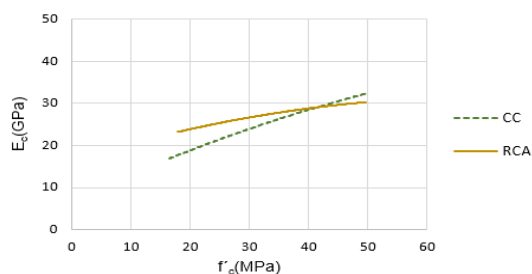


شکل ۲۹. مقایسه داده های مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه های بازیافتی و بتن معمولی

مقاومت فشاری حدود ۴۰ مگاپاسکال کمی بیشتر از خط بتن معمولی است و برای مقاومت فشاری ۴۰ تا ۵۰ مگا پاسکال شیب بتن با سنگدانه‌های بازیافتی کمتر از بتن معمولی است. این بدان معناست که در مقاومت‌های فشاری یکسان بتن (مقاومت فشاری بیشتر از ۴۰ مگاپاسکال) با سنگدانه بازیافتی مدول الاستیسیته کمتری نسبت به بتن معمولی دارد.

۵-۳-۳- تحلیل و آنالیز و رابطه پیشنهادی

با تحلیل‌های آماری انجام شده بر روی بانک داده‌های مدول الاستیسیته بتن معمولی و بتن با سنگدانه‌های بازیافتی، بهترین خط برازش شده برای هر داده با استفاده از نرم افزار Minitab 17.1.0 رسم شده است (شکل ۳۰). شکل ۳۰ نشان می‌دهد که شیب خط بتن با سنگدانه های بازیافتی تا



شکل ۳۰. مقایسه خط برازش شده مدول الاستیسیته بتن معمولی و بتن با سنگدانه‌های بازیافتی

$$E_c = 11.2 (f'_c)^{0.25} \quad (29)$$

۵- نتیجه گیری

فشاری یکسان نسبت به بتن معمولی به دو قسمت، قبل و بعد ۲۵ مگاپاسکال تقسیم می شود که بعد از ۲۵ مگاپاسکال تقریباً شیب نمودار بتن با سنگدانه های بازیافتی کمتر از شیب نمودار بتن معمولی می باشد و قبل از ۲۵ مگاپاسکال شیب نمودار بتن با سنگدانه های بازیافتی بیشتر از شیب نمودار بتن معمولی است.

۷- روابط مدول الاستیسیته آیین نامه های آمریکا، اروپا، کانادا، ACI 363، نروژ، اسپانیا، ایتو، CEB-FIP و برزیل به طور میانگین برای ۷۰ درصد داده ها محافظه کارانه است.

۸- نتایج تحلیل آماری برای مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه های بازیافتی نشان می دهد که فقط ۸ درصد داده ها خارج از محدوده ۹۵ درصد بهترین خط برازش شده (رگرسیون غیرخطی) به داده های بتن معمولی قرار دارد.

۹- در بهترین خط برازش شده برای داده های مدول الاستیسیته، شیب نمودار بتن با سنگدانه های بازیافتی در ازای مقاومت فشاری یکسان نسبت به بتن معمولی به دو قسمت، قبل و بعد ۴۰ مگاپاسکال تقسیم می شود که بعد از ۴۰ مگاپاسکال تقریباً شیب نمودار بتن با سنگدانه های بازیافتی کمتر از شیب نمودار بتن معمولی می باشد و قبل از ۴۳ مگاپاسکال شیب نمودار بتن معمولی کمتر از شیب نمودار بتن با سنگدانه های بازیافتی است.

۱۰- روابط زیر برای مقاومت کششی، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته بتن با سنگدانه های بازیافتی پیشنهاد می گردد.

$$f_{ct} = 0.20 f_c^{0.75}$$

$$f_r = 1.67 f_c^{0.27}$$

$$E_c = 11.2 f_c^{0.25}$$

با بررسی بر روی نتایج، تحلیل های آماری، نمودارها و جداول حاصل از بررسی مشخصات مکانیکی بتن با سنگدانه های بازیافتی (مقاومت کششی، مدول گسیختگی و مدول الاستیسیته) نتایج زیر ارائه می شود.

۱- روابط مقاومت کششی آیین نامه های آمریکا، اروپا، استرالیا، ژاپن، ایتو و CEB-FIP به طور میانگین برای ۵۰ درصد داده ها محافظه کارانه است.

۲- نتایج تحلیل آماری برای مقاومت کششی بتن با سنگدانه های بازیافتی نشان می دهد که تقریباً تمام داده ها در محدوده ۹۵ درصد بهترین خط برازش شده (رگرسیون غیرخطی) به داده های بتن معمولی قرار دارد.

۳- در بهترین خط برازش شده برای داده های مقاومت کششی، شیب نمودار بتن با سنگدانه های بازیافتی در ازای مقاومت فشاری یکسان نسبت به بتن معمولی بیشتر می باشد که این بدان معناست که بتن با سنگدانه های بازیافتی مقاومت کششی بیشتری دارد.

۴- روابط مدول گسیختگی آیین نامه های آمریکا، اروپا، استرالیا و ایتو به طور میانگین برای حدود ۲۰ درصد داده ها محافظه کارانه است.

۵- نتایج تحلیل آماری برای مدول گسیختگی بتن با سنگدانه های بازیافتی نشان می دهد که تقریباً تمام داده ها در محدوده ۹۵ درصد بهترین خط برازش شده (رگرسیون غیر خطی) به داده های بتن معمولی قرار دارد.

۶- در بهترین خط برازش شده برای داده های مدول گسیختگی، شیب نمودار بتن با سنگدانه های بازیافتی در ازای مقاومت

۶- مراجع

-Ahmad SH, Shah SP., (1985), "Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete". PCI J; 30(6), pp.92-119.

-AASHTO, Interim bridge design specifications and commentary. Washington (DC): (2006), "American Association of Highway and Transportation Officials (AASHTO)".

- Carino NJ, Lew HS. Re-examination of the relation between splitting tensile and compressive strength of normal weight concrete.(1982). ACI J; 88(2), pp.214-9.
- Carneiro FLLB, Barcellos A. Concrete tensile strength. Bull. No. 13, International Associate of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures; CEB-FIP. High-strength concrete state of the art report. (1990) London: Thomas Telford;.
- Chunheng Zhou a, Zongping Chen a.(2016)." Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate" Construction and Building Materials 134 (2017) pp.497-506.
- CSA CAN3-A23.3. (2004). Design of concrete standards for buildings, (53-61), pp.5-15.
- Dinakar P, Babu KG, Santhanam M., (2008), "Mechanical properties of high-volume fly ash self-compacting concrete mixtures". Struct Concr;9(2), pp.109-16.
- Eurocode No. 2, (2005), "Design of concrete structures. Part 1: General Rules and Rules for Buildings".
- Gonzalez Andreu, Etxeberria Miren.(2014), "Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete" Construction and Building Materials 52, pp. 227-235.
- Gutierrez PA, Canovas MF. The modulus of elasticity of high performance concrete. Mater Struct 1995;28(184), pp.559-74.
<http://bme.t.utokyo.ac.jp/researches/detail/concreteDB/index.html>.
- Ignjatović, I. S., Marinković, S. B., Mišković, Z. M., & Savić, A. R., (2013), "Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading." Materials and structures, Vol. 46, No.6, pp.1045-1059.
- Japan Society of Civil Engineers, (2005), "Standard Specification for Concrete Structure" Japanese Society of Civil Engineering No. 15, Tokyo, Japan. European Committee for Standardization.
- Ajdukiewicz, A. B., & Kliszczewicz, A. T. (2007), "Comparative tests of beams and columns made of recycled aggregate concrete and natural aggregate concrete." Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 5, No.2, pp. 259-273.
- Akazawa T. Tension test method for concrete. (1953), "Int Assoc of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. Bull. No. 16.
- American Concrete Institute ACI Committee. (2008), "Building code requirements for structural concrete ACI 318-08 and commentary 318R-08." Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.
- Arezoumandi, M., Drury, J., & Volz, J. S. (2014), "Effect of Recycled Concrete Aggregate Replacement Level on the Fracture Behavior of Concrete." Journal of Frontiers in Construction Engineering, Vol. 3, No.1, pp.1-8.
- Astm, C. (2010), 78/C 78M, "Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)". West Conshohocken (PA): ASTM.
- Brazilian association of technical standards NBR 6118, (2003), "design of concrete structures, Rio de Janeiro; [in Portuguese]".
- Buck, A. D., (1977), "Recycled Concrete as a Source of Aggregate." Journal of the American Concrete Institute, Vol. 5, pp. 212-219.
- Butler, L., West, J. S., & Tighe, S. L., (2013), "Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength." Construction and Building Materials, Vol. 47, pp. 1292-1301.
- C. Marthong A.S. Sangma, S.A. Choudhury, R.N. Pyrbot, S.L. Tron, L. Mawroh, G.S. Bharti, (2017), "Structural Behavior of Recycled Aggregate Concrete Beam-Column Connection in Presence of Micro Concrete at Joint Region" Structures 11 (2017) , pp. 243-251.

- Sewing, M., (2006), "Resistance and durability of concrete produced from recycled aggregates, Master's thesis of civil engineering (Soil and Pey trend)", Ferdowsi University of Mashhad.
- Spanish code for structural concrete EHE (1998), Real Decreto 2661/1998, Madrid; [in Spanish].
- Standards Australia, (2009), "Concrete structures." AS 3600, Sydney, Australia.
- Subhasis Pradhan, Shailendra Kumar, Sudhirkumar V. Barai, (2017), "Recycled aggregate concrete: Particle Packing Method (PPM) of mix design approach" *Construction and Building Materials* 152 (2017), pp. 269–284.
- Sumit Arora, S.P. Singh.(2015). Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% Coarse Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials* 102 (2016), pp. 782–791.
- Tabsh, S. W., & Abdelfatah, A. S., (2009), "Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete". *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No.2, pp. 1163-1167.
- Wagangluss, George, Crete, Frank, (2010), *Handbook of Waste Management*, Translators: Khani, Mohammad Reza., Purataei, Mehdi, Khosro Mahmoudkhani, Rouhollah., Vol. 1 and II, Publications of the Municipalities and Departments of the Country.
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) Report (2012), <http://www.wbcscement.org>.
- Kou, S. C., & Poon, C. S., (2013), "Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash." *Cement and Concrete Composites*, Vol. 37, pp. 12-19.
- Kutalmıs Recep Akça a, Özgür Çakır b, Metin İpek., (2015), "Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates" *Construction and Building Materials* 98 (2015), pp. 620–630.
- Leemann A, Hoffmann C. Properties of self-compacting and conventional concrete – differences and similarities. *Mag Concr Res* 2005;57(6), pp.315–9.
- Liam J. Butler, Jeffrey S. West, and Susan L. Tighe, (2015), "Bond of Reinforcement in Concrete Incorporating Recycled Concrete Aggregates" 2014 American Society of Civil. Minitab 17 Statistical Software [Computer software]. Incorporation, Minitab.
- National Building Regulations, (1992), "Ninth Edition "Design and Implementation of Reinforced Concrete Structures" Departeman for the National Building Regulations, Ministry of Housing and Urban Planning Norwegian Council for Strandardization. Concrete structures— design rules. NS3473, Oslo (Norway): Norges Standardiserings Forbund.
- Rajendra Kumar Choubey, Shailendra Kumar, M. Chakradhara Rao., (2015), "Modeling of fracture parameters for crack propagation in recycled aggregate concrete" *Construction and Building Materials* 106, pp.168–178.
- Raphael JM. Tensile strength of concrete, (1984), *ACI J*; 81(2), pp.158–65.

Verification of Mechanical Properties of Recycled Concrete in Regulatory Relations

Sh. Afshar, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Shahab Danesh University, Qom, Iran.

M. Arezoumandi, Professor, University of Oklahoma, USA and Assistant Professor, Shahab Danesh University, Qom, Iran.

M. Saadatkhoosh, M.Sc., Grad., Department of Civil Engineering, Shahab Danesh University, Qom, Iran.

Email: shaghayeghafshar29@gmail.com

Received: June 2019- Accepted: December 2019

ABSTRACT

Around 25 billion tons of concrete is used each year globally that means over 3.8 tons per person in the world each year. Occupying about 60% to 70% of the volume, aggregate is a main ingredient of concrete. Nowadays, there is an increasing trend toward using sustainable concrete and reusing of aggregates from demolished concrete is one way to achieve this aim. Although using recycled concrete aggregate (RCA) does not lead to significant reduction of CO₂ emission, but it reduces using natural resources (natural aggregate) as well as helping to reduce dumping construction and demolition wastes in landfills. More than 900 million tons of construction and demolition waste is produced each year only in Europe, the U.S., and Japan. A comprehensive literature review on mechanical properties of recycled aggregate concrete (RAC) including compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity and modulus of rupture is presented. In addition, databases are created for mechanical properties of RAC in order to lead to changes or acceptance in design codes and standards' provisions. These data were compared with the American, European, Australian, Japanese, Canadian standards provisions. Results of this study show that existing code provisions are not always conservative for mechanical properties of RAC.

Keywords: Recycled Aggregates Concrete, Mechanical Properties, Splitting Tensile Strength, Modulus of Elasticity, Modulus of Rupture