

صحت سنجی روابط مقاومت خمشی آیین نامه های معتبر موجود برای بتن با سنگدانه باز یافتی بتنی

محمد صادق محقق زاده دوانی اصل^۱، مهدی آرزومندی^{۲*}، محسن راسفیحانی^۳، سید امید مبرقع^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران سازه، دانشگاه شهاب دانش، ایران، قم

۲- فوق دکترای سازه، دانشگاه اوکلاه های آمریکا و استادیار دانشگاه شهاب دانش، ایران، قم

۳- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران سازه، دانشگاه قم، قم، ایران

Ensadegh1369@gmail.com

چکیده

استفاده از بتن با سنگدانه های باز یافتی حاصل از باز یافت بتن سال های متمادی موضوع بسیاری از مطالعات بوده است. این مقاله مرور جامعی بر تحقیقات گذشته در زمینه مقاومت خمشی تیر بتن مسلح با سنگدانه های باز یافتی انجام داده است. همچنین این مقاله پارامترهایی نظیر درصد آرماتور طولی، مقاومت جاری شدن میلگرد، درصد جایگزینی سنگدانه باز یافتی، مقاومت فشاری بتن و ابعاد تیر بتن مسلح را مورد مطالعه قرار داده است. علاوه بر این در انتها، نتایج آزمایش های مقاومت خمشی بتن خودتراکم با بانک داده های مقاومت خمشی بتن معمولی مورد مقایسه قرار گرفته است. جهت بررسی دقیق نتایج، از تحلیل های آماری (رگرسیون غیرخطی) جهت تعیین بهترین خط برازش شده و محدوده ۹۵ درصد داده ها استفاده شده است. بررسی این نتایج نشان می دهد که روابط آیین نامه های آمریکا و اروپا برای بتن با سنگدانه باز یافتی به ترتیب ۹۳ و ۹۶ درصد محافظه کارانه می باشد (مقاومتی بیشتر از مقادیر محاسبه شده از روابط آیین نامه دارد). علاوه بر آن، تقریباً تمامی داده های بتن با سنگدانه باز یافتی در محدوده ۹۵ درصد بانک داده های مقاومت خمشی بتن معمولی قرار دارد.

کلمات کلیدی: مقاومت خمشی، بتن با سنگدانه باز یافتی بتنی، بتن معمولی

۱. مقدمه

سنگدانه ها حدود ۶۰٪ تا ۷۰٪ از حجم بتن را تشکیل می دهند. امروزه، تمایل به استفاده از بتن سبز باعث استفاده مجدد از سنگدانه حاصل از تخریب بتن شده است. اگرچه می دانیم استفاده از سنگدانه بتن باز یافتی منجر به کاهش قابل توجه انتشار گاز دی اکسید کربن نمی شود، اما می توانیم با کاهش استفاده از سنگدانه های طبیعی علاوه بر حفظ منابع طبیعی، ضایعات حاصل از تخریب در محل های دفن زباله را نیز کاهش دهیم. بیش از ۹۰۰ میلیون تن ضایعات حاصل از تخریب ساخت و ساز تنها در اروپا، ایالات متحده آمریکا و ژاپن هر سال تولید می شود [1]. برای اولین بار در اروپا پس از جنگ جهانی دوم استفاده از سنگدانه بتن باز یافتی به عنوان سنگدانه در بتن آغاز شد. همچنین انجمن پیمانکاران ساختمان ژاپن، تحقیقات درباره استفاده از سنگدانه بتن باز یافتی را

اولین بار پس از بحران نفت در سال ۱۹۷۳ شروع کردند [2]. تحقیقات کاملی درباره خواص بتن تازه و بتن سخت شده بتن های با سنگدانه بتن بازیافتی انجام شده است. اما مطالعات در زمینه رفتار سازه ای بتن با سنگدانه بازیافتی محدود می باشد. این مقاله مطالعات منتشر شده (بین سال های ۱۹۷۷-۲۰۱۸) در مورد مقاومت خمشی بتن با سنگدانه بتن بازیافتی را مورد مطالعه و بررسی قرار داده است. از آنجایی که استفاده از سنگدانه بتن بازیافتی بعنوان ریزدانه مشکلات فراوانی دارد [3]، این مقاله تنها به ارایه مطالعاتی که سنگدانه بتن بازیافتی بعنوان درشت دانه در بتن جایگزین شده اند، پرداخته است.

۲- مقاومت خمشی

در این بخش با مروری بر مطالعات گذشته در زمینه مقاومت خمشی بتن با سنگدانه بازیافتی بتنی، نتایج آن با ضوابط آیین نامه های [4] ACI 318 و [5] EC 2 مقایسه شده است.

۲-۱ مروری بر مطالعات گذشته

جدول ۱ (ضمیمه)، جزییات نمونه های آزمایشگاهی مطالعات گذشته (به ترتیب سال انجام پژوهش) شامل ابعاد تیر، درصد آرماتور طولی، مقاومت جاری شدن میلگرد و مقاومت فشاری بتن را نشان می دهد.

Mukai and Kikuchi [6] در سال ۱۹۸۸، تیرهایی با سطح مقطع مربع (بعد ۱۵۰ میلیمتر) و با طول ۱/۸ متر با درصد جایگزینی ۱۵ و ۳۰ را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج این آزمایش، تفاوت قابل توجهی در مقاومت خمشی نهایی بین بتن معمولی و بتن بازیافتی مشاهده نشد و فقط ممان خمشی ترک خوردگی تیرهای با بتن بازیافتی مقادیر کمتری نسبت به تیرهای بتن معمولی نشان دادند.

Yagashita et al. [7] در سال ۱۹۹۴، با مطالعه بر روی ۳ تیر با ابعاد ۱۲۰ * ۱۸۰ میلیمتر، فقط ۱۰ درصد سنگدانه بازیافتی در تیرهای بتن مسلح استفاده کردند و نتایج، حاکی از کاهش ۱۰٪ مقاومت خمشی نهایی تیر با بتن بازیافتی بود.

Maruyama et al. [10] در سال ۲۰۰۴، نیز تیرهایی با ابعاد ۱۵۰ * ۲۰۰ میلیمتر، جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی، طول ۱/۴ متر و یک درصد آرماتور طولی را مورد آزمایش قرار دادند و نتایج آنها تغییر محسوسی را بین مقاومت خمشی بتن معمولی و بازیافتی نشان نداد.

Ajdukiewicz and Kliszczewicz [8] در سال ۲۰۰۷، تیرهای مستطیلی با ابعاد ۲۰۰ * ۳۰۰ میلیمتر با طول ۲/۵ متر و با درصد میلگردهای طولی ۰/۹ و ۱/۶ و با ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی را مورد آزمایش قرار دادند و ۳/۵٪ کاهش مقاومت خمشی نهایی و همچنین تغییر شکل بیشتر نسبت به بتن معمولی را گزارش کردند.

Sato et al. [9] در سال ۲۰۰۷، ۳۷ تیر با ابعاد ۱۵۰ * ۲۰۰ میلیمتر و به طول ۲/۸، ۲/۲ و ۱/۸ متر و با درصد آرماتورهای طولی مختلف (۰/۵۹، ۱/۰۶، ۱/۶۵) و با ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج این آزمایش های تغییر شکل بیشتر، ترک های عریض تر بتن بازیافتی نسبت به بتن معمولی را گزارش کردند. ولی از نظر مقاومت خمشی نهایی تفاوت چندانی بین بتن بازیافتی و معمولی مشاهده نشد.

Fathifazl et al. [11] در سال ۲۰۰۹، تیرهایی با ابعاد 200×350 میلیمتر با جایگزینی ۶۴ و ۷۴ درصد سنگدانه بازیافتی و آرماتوهای طولی بین ۰/۵ تا ۳/۳ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده، مقاومت خمشی نهایی یکسانی را در مقایسه با بتن معمولی در آزمایش ها گزارش کردند.

Bai & Sun [12] در سال ۲۰۱۰، بر روی تیرهایی با ابعاد 150×300 میلیمتر و طول ۲/۱ متر و سنگدانه های بازیافتی (بتن های با عمر ۸ تا ۱۰ ساله) با درصد جایگزینی ۵۰، ۷۰، ۱۰۰ استفاده کردند و همانند مطالعات گذشته تغییر شکل بیشتر و ترک های عریض تری برای تیرهای با سنگدانه بازیافتی گزارش کردند ولی مقاومت خمشی نهایی حدودا یکسانی با بتن معمولی مشاهده گردید.

Choi et al. [18] در سال ۲۰۱۳، تیرهایی با ابعاد 170×200 میلیمتر و با طول ۲/۳۰ متر با درصد جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد رو مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده حکایت از آن دارد که مقاومت خمشی نهایی تیر ۲۰ درصد برای درصد جایگزینی ۱۰۰٪ کاهش پیدا می کند.

Ignjatovic et al. [13] در سال ۲۰۱۳، با آزمایش تیرهایی با ابعاد 200×300 میلیمتر و طول ۳/۵ متر در مقیاس واقعی با جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی، نتایجی مشابه با بتن معمولی از نظر رفتار بار - تغییرمکان، بار بهره برداری و مقاومت خمشی نهایی گزارش نمودند.

Kang et al. [14] در سال ۲۰۱۴، تیرهای بتن معمولی و با مقاومت بالا با ابعاد 135×280 میلیمتر با جایگزینی تا ۵۰٪ سنگدانه بازیافتی با درصد آرماتور طولی ۰/۵ تا ۱/۸ را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایش تعداد ترکهای بیشتر با مقدار کمتر ممان خمشی ترک خوردگی را برای تیر با بتن سنگدانه بازیافتی گزارش کردند. همچنین مشاهده کردند جایگزینی تا ۳۰٪ سنگدانه بازیافتی باعث کاهش مقاومت خمشی نهایی نمی گردد ولی بیشتر از آن مقاومت خمشی نهایی را بصورت محدودی کاهش می دهد.

Knaack and Kurama [15] در سال ۲۰۱۴، تیرهایی با مقطع 230×150 میلیمتر و طول ۲ متر با جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی را مورد آزمایش قرار دادند و گزارش کردند که مقاومت خمشی نهایی تیرها با بتن بازیافتی را می توان با روابط آیین نامه های موجود برای بتن معمولی محاسبه کرد.

Arezoumandi et al. [16] در سال ۲۰۱۵، با جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی در تیرهای بتنی با مقیاس واقعی (300×450 میلیمتر و ۳ متر طول)، نحوه ترک خوردگی و مقاومت خمشی نهایی مشابهی را مشاهده کردند ولی ممان خمشی ترک خوردگی در بتن بازیافتی کمتر از بتن معمولی گزارش کردند.

Evangelista et al. [17] در سال ۲۰۱۶، تیرهایی با بتن معمولی و با ابعاد 120×200 میلیمتر و با طول ۲ متر با جایگزینی ۱۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج آزمایش نشان می دهد که با جایگزینی سنگدانه بازیافتی تغییر شکل تیر افزایش پیدا می کند و همچنین مقاومت خمشی نهایی تیر حداکثر ۱۲ درصد برای ۱۰۰٪ جایگزینی سنگدانه بازیافتی کاهش پیدا می کند.

Seara-paz et al. [19] در سال ۲۰۱۸، با جایگزینی ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی در ۶ تیر بتنی با مقیاس واقعی (200×300 میلیمتر و ۳/۵۶ متر طول) را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان می دهد که ممان خمشی ترک خوردگی با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی کاهش پیدا می کند.

Pradhan et al. [20] در سال ۲۰۱۸، با جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی و ۷ تیر بتنی با مقیاس واقعی (200×314 میلیمتر و ۲/۴ متر طول)، را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان می دهد که با جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی ممان خمشی ترک خوردگی و مقاومت خمشی نهایی کاهش جزئی دارد.

۲-۲- مقایسه مقاومت خمشی بتن با سنگدانه بازیافتی بتنی با روابط آیین نامه ها

برای بررسی اینکه روابط مقاومت خمشی آیین نامه های موجود برای بتن با سنگدانه بازیافتی نیز معتبر می باشند، در این بخش نتایج مقاومت خمشی بتن با سنگدانه بازیافتی حاصل از آزمایشگاه با روابط آیین نامه های ACI 318، EC 2 مقایسه می گردد. رابطه ۱، مقاومت خمشی نهایی و رابطه ۲، ممان خمشی ترک خوردگی را نشان می دهد.

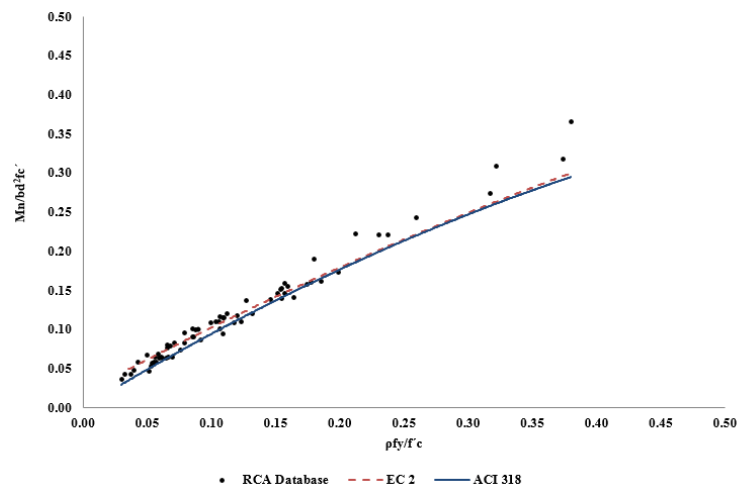
$$M_n = \rho f_y b d^2 (1 - 0.59 \rho \frac{f_y}{f'_c}) \quad (۱)$$

$$M_{cr} = \frac{f_r * I_g}{y_t} \quad (۲)$$

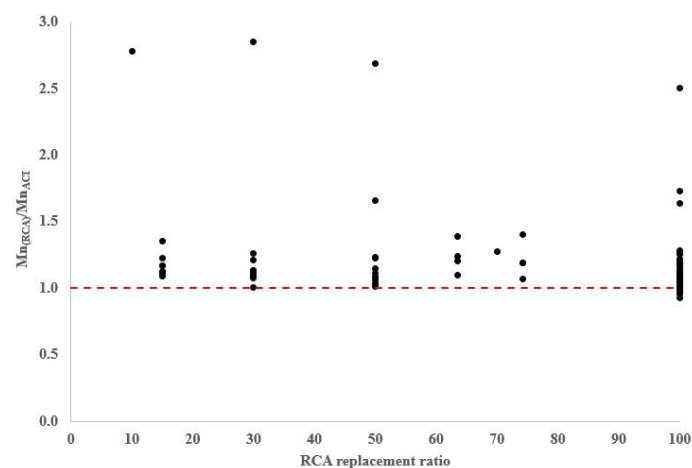
شکل ۱، مقاومت خمشی نهایی (ظرفیت خمشی نهایی) نمونه های آزمایشگاهی را در هر دو حالت آزمایش و آیین نامه ها (ACI 318 و EC 2) مقایسه می کند. میانگین ضرایب نتایج آزمایشگاهی مطالعات ذکر شده به روابط آیین نامه ای برای آیین نامه ها ACI 318 و EC 2 به ترتیب ۱/۲۱ و ۱/۲۴ می باشد. همچنین روابط آیین نامه های آمریکا و اروپا به ترتیب فقط برای ۷ و ۴ درصد داده های مقاومت خمشی بتن با سنگدانه بازیافتی بتنی غیر محافظه کارانه هست (مقاومتری کمتر از مقادیر بدست آمده از روابط آیین نامه ها دارد). نتایج آزمایش های گذشته بتن بازیافتی حاکی از آن است که پراکندگی داده های مقاومت خمشی بتن بازیافتی همانند بتن معمولی بسیار کم است و تمامی داده ها با تقریب قابل قبولی با روابط آیین نامه های ACI 318 و EC 2 همخوانی دارند.

همچنین اشکال ۲ تا ۵، مقایسه داده های مقاومت خمشی نهایی بتن با سنگدانه بازیافتی بر اساس آیین نامه های آمریکا و اروپا به درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی و درصد آرماتور فولاد طولی را نشان می دهد. (مقادیر بزرگتر از یک بدین معناست که داده های موجود، مقاومت خمشی بیشتر از مقادیر بدست آمده از روابط آیین نامه ها دارد). همانطور که از شکل های ۲ تا ۵ مشاهده می شود روابط آیین نامه های آمریکا و اروپا برای تمامی داده های بتن بازیافتی (۰ تا ۷۰ درصد جایگزینی) محافظه کارانه می شود.

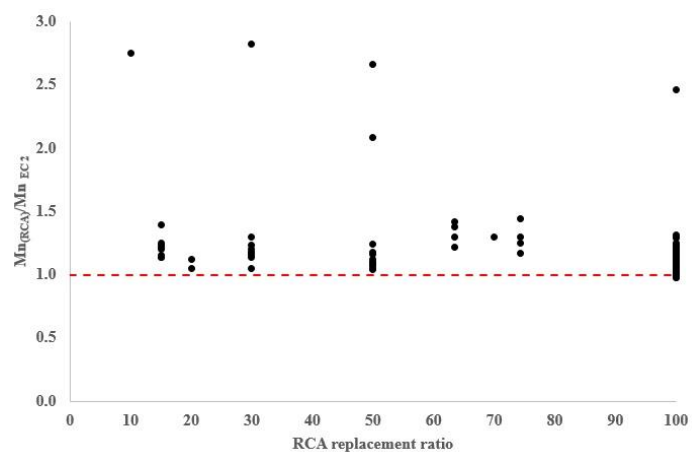
شکل های ۶ و ۷ نیز در مقایسه ممان خمشی ترک خوردگی، ۵۳ درصد تیرهای با بتن بازیافتی در مقاومت خمشی کمتر از رابطه ACI 318 و ۳۹ درصد در مقاومت خمشی کمتر از رابطه EC 2 ترک خوردند. رابطه مقاومت خمشی در هر دو آیین نامه ACI 318 و EC 2 برای بتن با درصد جایگزینی کمتر از ۳۰٪ سنگدانه بازیافتی به طور کامل محافظه کارانه می باشد.



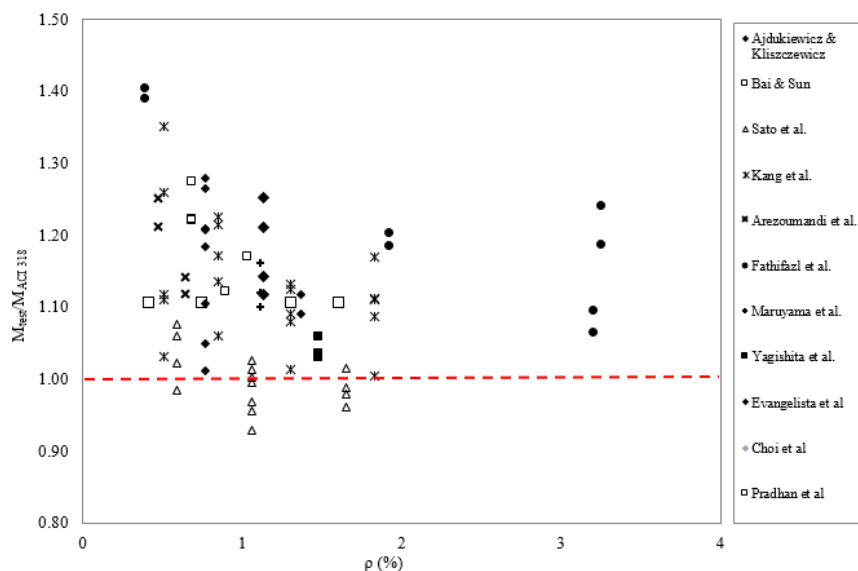
شکل ۱: مقایسه مقاومت خمشی بتن با سنگدانه بازیافتی بتنی با روابط آیین نامه های آمریکا و اروپا



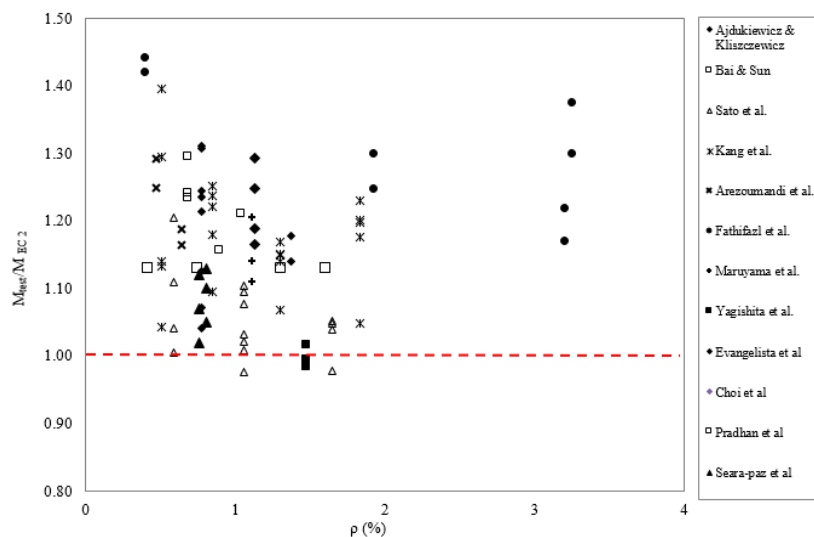
شکل ۲: نسبت مقاومت خمشی سنگدانه بازیافتی به مقاومت خمشی آیین نامه آمریکا - درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی



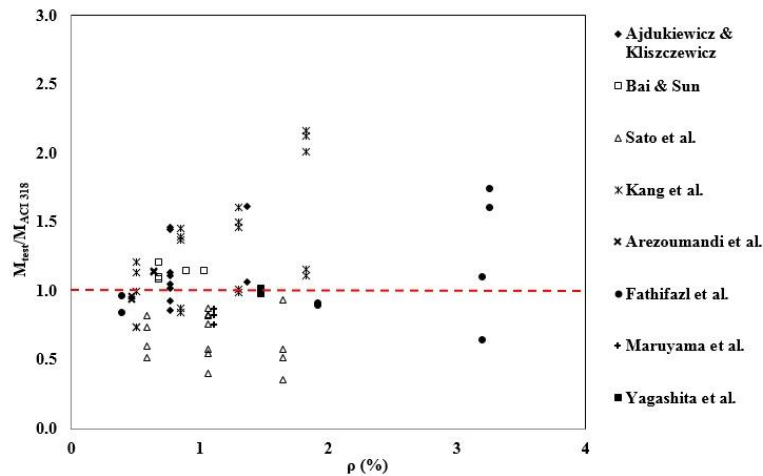
شکل ۳: نسبت مقاومت خمشی سنگدانه بازیافتی به مقاومت خمشی آیین نامه اروپا - درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی



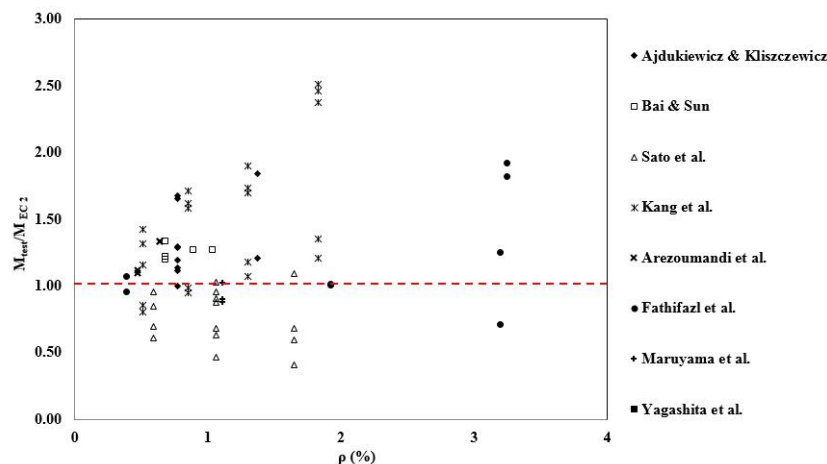
شکل ۴: نسبت مقاومت خمشی سنگدانه بازیافتی به مقاومت خمشی آیین نامه آمریکا- درصد آرماتور فولاد طولی



شکل ۵: نسبت مقاومت خمشی سنگدانه بازیافتی به مقاومت خمشی آیین نامه اروپا - درصد آرماتور فولاد طولی



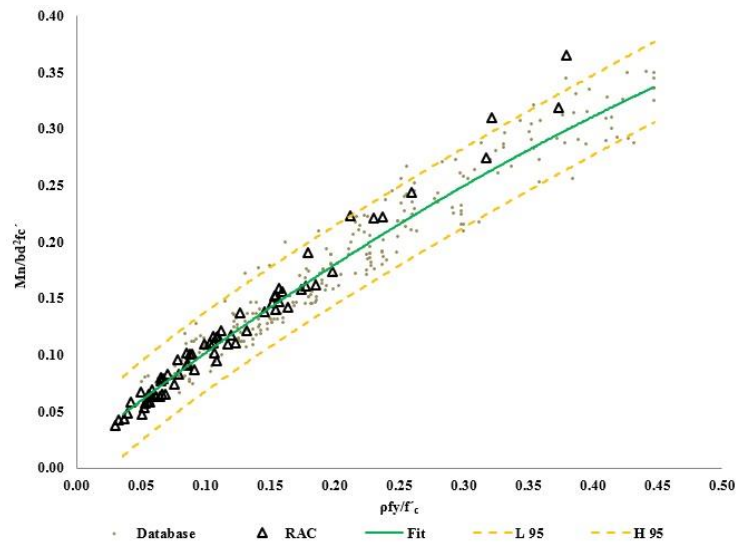
شکل ۶: نسبت ممان خمشی ترک خوردگی سنگدانه بازیافتی به ممان خمشی ترک خوردگی آیین نامه آمریکا - درصد آرماتور فولاد طولی



شکل ۷: نسبت ممان خمشی ترک خوردگی سنگدانه بازیافتی به ممان خمشی ترک خوردگی آیین نامه اروپا - درصد آرماتور فولاد طولی

۲-۳- مقایسه مقاومت خمشی بتن با سنگدانه بازیافتی بتنی با بانک داده های بتن معمولی

شکل ۸، نتایج مقاومت خمشی تیرهای بتنی با سنگدانه بازیافتی را با بانک داده های مقاومت خمشی تیر با بتن معمولی مقایسه می کند. تحلیل های آماری انجام شده توسط نرم افزار Minitab 17 [۲۱] بر روی داده ها با استفاده از رگرسیون غیرخطی منجر به ترسیم منحنی های بهترین خط برازش شده (Fit) و کران بالا (U95) و پایین (L95) ۹۵ درصد این داده ها در شکل ۹ شده است. همانطوریکه از این شکل مشخص می باشد داده های بتن بازیافتی در محدوده میانی (محدوده ۹۵٪ داده ها که توسط روش رگرسیون غیرخطی محاسبه شده است) داده های بتن معمولی قرار دارد. این بدان معناست که نتایج مقاومت خمشی نهایی بتن بازیافتی بسیار نزدیک به مقاومت خمشی نهایی بتن معمولی می باشد.



شکل ۸: مقایسه ظرفیت خمشی تیرهای بتن باز یافتی با بتن معمولی

A_s : سطح مقطع بر حسب میلیمتر مربع
 b : عرض موثر بر حسب میلیمتر
 d : عمق موثر بر حسب میلیمتر
 f'_c : مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال
 f_y : مقاومت مشخصه فولاد بر حسب مگاپاسکال
 f_r : مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال
 k : ضریب طول موثر
 M_{cr} : ممان خمشی ترک خوردگی
 M_n : مقاومت خمشی نهایی
 ρ : درصد فولاد طولی آرماتور

۳- نتیجه گیری

نتیجه گیری های زیر بر اساس مطالعات گذشته در مورد مقاومت خمشی تیرهای بتن مسلح با سنگدانه های بازیافتی بتن می باشد :

- ۱- سنگدانه های بازیافتی در بتن باعث عریض تر شدن ترکها و کم شدن فاصله بین ترک های خمشی می گردد .
- ۲- استفاده از سنگدانه های بازیافتی باعث افزایش تغییر شکل تیرهای بتن مسلح می گردد .
- ۳- ممان خمشی ترک خوردگی تیرهای با سنگدانه های بازیافتی کمتر از مقدار پیش بینی شده توسط آیین نامه ها و همچنین تیرهای بتن مسلح با سنگدانه های طبیعی می باشد .
- ۴- با جایگزینی سنگدانه بازیافتی در بتن تا ۳۰٪ کاهش محسوسی در مقاومت خمشی نهایی در تیرهای بتن مسلح مشاهده نگردید .
- ۵- با جایگزینی ۱۰۰٪ سنگدانه بازیافتی به جای سنگدانه طبیعی کاهش حدود ۱۰٪ در مقاومت خمشی نهایی تیرهای بتن مسلح ملاحظه گردید .
- ۶- روابط آیین نامه های آمریکا و اروپا به ترتیب برای ۷ و ۴ درصد داده های مقاومت خمشی بتن با سنگدانه بازیافتی بتنی غیر محافظه کارانه هست.
- ۷- داده های مقاومت خمشی بتن با سنگدانه بازیافتی در محدوده ی ۹۵ درصد داده های مقاومت خمشی بتن معمولی قرار دارد.

۴ - مراجع

- [1] World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) Report (2012). "Recycling concrete" <http://www.wbcscement.org/index.php/key-issues/sustainability-with-concrete/54>.
- [2] Buck, A. D. (1977). "Recycled Concrete as a Source of Aggregate." Journal of the American Concrete Institute, Vol. 5, pp. 212-219.
- [3] Bellen, G. and Fernando M. (2007). "Shear strength of recycled concrete beams." Construction and Building Materials, Vol. 21, No. 4, pp. 887-893.
- [4] American Concrete Institute ACI Committee. (2014). "Building code requirements for structural concrete ACI 318-14 and commentary 318R-14." Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.
- [5] European Committee for Standardization. Eurocode No. 2, (2005). "Design of concrete structures. Part 1: General Rules and Rules for Buildings".
- [6] Mukai, T., & Kikuchi, M. (1988). "Properties of reinforced concrete beams containing recycled aggregate." Demolition and reuse of concrete and masonry, Vol. 2, pp. 670-679.
- [7] Yagishita, F., Sano, M., and Yamada, M. (1994). "Behavior of Reinforced Concrete Beams containing Recycled Coarse Aggregate" , Demolition and Reuse of Concrete & Masonry Rilem Proceeding 23, E&FN Spon, pp. 331-342.
- [8] 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.
- [9] Sato, R., Maruyama, I., Sogabe, T., & Sogo, M. (2007). "Flexural behavior of reinforced recycled concrete beams." Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 5, No. 1, pp. 43-61.
- [10] Maruyama, I., Sogo, M., Sogabe, T., Sato, R., & Kawai, K. (2004). "Flexural properties of reinforced recycled concrete beams." In Internacional RILEM conference on the use of recycled materials in buildings and structures, Barcelona.
- [11] Fathifazl, G., Razaqpur, A. G., Isgor, O. B., Abbas, A., Fournier, B., & Foo, S. (2009). "Flexural performance of steel-reinforced recycled concrete beams." ACI Structural Journal, Vol. 106, No. 06, pp. 858-867.
- [12] Bai, W. H., & Sun, B. X. (2010). "Experimental Study on Flexural Behavior of Recycled Coarse Aggregate Concrete Beam." Applied Mechanics and Materials, Vol. 29, pp. 543-548.
- [13] 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.
- [14] Kang, T. H.-K., Kim, W., Kwak, Y., and Hong S.(2014) "Flexural Testing of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Aggregates", ACI Structural Journal, Vol. 111, No. 3, pp. 607-616.
- [15] Knaack, A. M., & Kurama, Y. C. (2014). "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Coarse Aggregates." Journal of Structural Engineering, Vol, 141.

[16] Arezoumandi, M., Smith, A., Volz, J. S., & Khayat, K. H. (2014). "An experimental study on flexural strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate." *Engineering Structures*, Vol.88, pp. 154-162.

[17] Evangelista, L & Brito, J.de (2016). "Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Made with Fine Recycled Concrete Aggregates." *KSCE Journal of Civil Engineering*, pp. 1-11.

[18] Chio, W.C & Hyun, D. Y. (2013). "Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate." *Materials and Design*, Vol.51, pp. 742-750.

[19] Seara-Paz, S., Gonzalez-Fonteboa, B., Martinez-Abella, F. & Eiras-lopez, J. (2018). "Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate." *Engineering Structures*, Vol.156, pp. 32-45.

[20] Pradhan, S., Kumar, S., & Barai, S. V. (2018). "Performance of reinforced recycled aggregate concrete beams in flexure: experimental and critical comparative analysis." *Materials and Structures*, pp. 51-58.

[21] Minitab 17 Statistical Software [Computer software]. Incorporation, Minitab.

جدول ۱: جزییات تیرهای مطالعات گذشته

fy	fc	p	d	h	b	%	سال	مؤلف
۳۳۰	۰/۳۹	۱/۴۷	۱۵۰	۱۸۰	۱۲۰	۱۰۰	۱۹۹۴	Yagishita et al. [7]
۳۳۰	۳۲/۰	۱/۴۷	۱۵۰	۱۸۰	۱۲۰	۱۰۰		
۳۳۰	۳۳/۲	۱/۴۷	۱۵۰	۱۸۰	۱۲۰	۱۰۰		
۳۳۱	۶۹/۰	۱/۱۱	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۲۰۰۴	Maruyama et al [10]
۳۳۱	۴۶/۵	۱/۱۱	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۳۱	۳۲/۹	۱/۱۱	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۳۲	۳۰/۴	۰/۵۹	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۲۰۰۷	Sato et al [9]
۳۳۲	۲۸/۴	۰/۵۹	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۳۲	۳۴/۵	۰/۵۹	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۳۲	۳۱/۸	۰/۵۹	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۵۳	۳۰/۴	۱/۰۶	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۵۳	۲۸/۴	۱/۰۶	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۵۳	۳۴/۵	۱/۰۶	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۵۳	۳۱/۸	۱/۰۶	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۴۲	۳۰/۴	۱/۶۵	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۴۲	۲۸/۴	۱/۶۵	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۴۲	۳۴/۵	۱/۶۵	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۴۲	۳۱/۸	۱/۶۵	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۳۱	۶۹	۱/۰۶	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۳۱	۴۶/۵	۱/۰۶	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۳۳۱	۳۲/۹	۱/۰۶	۱۶۰	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۴۱۰	۳۴/۶	۰/۷۷	۲۹۱	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۰۰۷	Ajdukiewicz & Kliszczewicz [8]
۴۱۰	۵۶/۴	۰/۷۷	۲۹۱	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰		
۴۱۰	۴۰/۱	۰/۷۷	۲۹۱	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰		
۴۱۰	۶۰/۲	۰/۷۷	۲۹۱	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰		
۴۱۰	۸۵/۳	۰/۷۷	۲۹۱	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰		
۴۱۰	۳۵/۳	۰/۷۷	۲۹۱	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰		
۴۱۰	۵۷/۶	۰/۷۷	۲۹۱	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰		
۴۱۰	۱۰۵	۰/۷۷	۲۹۱	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰		
۴۱۰	۳۶/۶	۱/۳۷	۲۹۱	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰		
۴۱۰	۳۴/۶	۰/۷۷	۲۹۱	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۲۰۱۰	Bai & Sun [12]
۴۲۰	۴۲/۳	۰/۶۸	۲۶۰	۳۰۰	۱۵۰	۵۰		
۴۲۰	۴۳/۷	۰/۶۸	۲۶۰	۳۰۰	۱۵۰	۷۰		
۴۲۰	۴۳/۵	۰/۶۸	۲۶۰	۳۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۴۲۰	۴۳/۵	۰/۸۹	۲۶۰	۳۰۰	۱۵۰	۱۰۰		
۴۲۰	۴۳/۵	۱/۰۳	۲۶۰	۳۰۰	۱۵۰	۱۰۰	۲۰۰۹	Fathifazl et al. [11]
۴۷۳	۳۶/۹	۰/۳۹	۳۰۴	۳۵۰	۲۰۰	۶۳/۵		
۴۰۷	۳۶/۹	۱/۹۲	۳۰۱	۳۵۰	۲۰۰	۶۳/۵		
۴۳۱	۳۶/۹	۳/۲	۳۰۷	۳۹۰	۲۰۰	۶۳/۵		
۴۳۱	۳۶/۹	۳/۲۵	۳۰۲	۳۵۰	۲۰۰	۶۳/۵		
۴۷۳	۴۳/۵	۰/۳۹	۳۰۴	۳۵۰	۲۰۰	۷۴		
۴۰۷	۴۳/۵	۱/۹۲	۳۰۱	۳۵۰	۲۰۰	۷۴		
۴۳۱	۴۳/۵	۳/۲	۳۰۷	۳۹۰	۲۰۰	۷۴		
۴۳۱	۴۳/۵	۳/۲۵	۳۰۲	۳۵۰	۲۰۰	۷۴	۲۰۱۳	Choi et al. [18]
*	۳۱/۶	۰/۴	۱۷۰	۲۰۰	۱۷۰	۱۰۰		
۲۹۱	۳۹/۶	۰/۴	۱۷۰	۲۰۰	۱۷۰	۱۰۰		
۴۱۴	۳۶/۱	۰/۴	۱۷۰	۲۰۰	۱۷۰	۵۰	۲۰۱۵	Arezoumandi et al. [16]
۵۶۸	۳۰/۵	۰/۴۷	۴۰۰	۴۶۰	۳۰۵	۱۰۰		
۵۶۸	۳۱/۳	۰/۴۷	۴۰۰	۴۶۰	۳۰۵	۱۰۰		
۵۱۷	۳۰/۵	۰/۶۴	۴۰۰	۴۶۰	۳۰۵	۱۰۰		
۵۱۷	۳۱/۳	۰/۶۴	۴۰۰	۴۶۰	۳۰۵	۱۰۰	۲۰۱۴	Kang et al. [۱۴]
۳۷۷	۵۹/۴	۰/۵۱	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۱۵		
۴۰۸	۵۹/۴	۰/۸۵	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۱۵		

fy	fc	ρ	d	h	b	%	سال	مؤلف
۳۸۹	۵۹/۴	۱/۳	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۱۵	۲۰۱۴	Kang et al. [۱۴]
۴۱۱	۵۹/۴	۱/۸۳	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۱۵		
۳۷۷	۴۸/۸	۰/۵۱	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۳۰		
۴۰۸	۴۸/۸	۰/۸۵	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۳۰		
۳۸۹	۴۸/۸	۱/۳	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۳۰		
۴۱۱	۴۸/۸	۱/۸۳	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۳۰		
۳۷۷	۳۲/۷	۰/۵۱	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۱۵		
۴۰۸	۳۲/۷	۰/۸۵	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۱۵		
۳۸۹	۳۲/۷	۱/۳	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۱۵		
۴۱۱	۳۲/۷	۱/۸۳	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۱۵		
۳۷۷	۳۱/۷	۰/۵۱	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۳۰		
۴۰۸	۳۱/۷	۰/۸۵	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۳۰		
۳۸۹	۳۱/۷	۱/۳	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۳۰		
۴۱۱	۳۱/۷	۱/۸۳	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۳۰		
۳۷۷	۲۹/۰	۰/۵۱	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۵۰		
۴۰۸	۲۹/۰	۰/۸۵	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۵۰		
۳۸۹	۲۹/۰	۱/۳	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۵۰	۲۰۱۸	Seara-paz et al. [۱۹]
۴۱۱	۲۹/۰	۱/۸۳	۲۳۰	۲۷۰	۱۳۵	۵۰		
*	۵۳/۵	۰/۷۶	۲۴۹	۳۰۰	۲۰۰	۲۰		
*	۵۱/۸	۰/۷۶	۲۴۹	۳۰۰	۲۰۰	۵۰		
*	۴۲/۹	۰/۷۶	۲۴۹	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰		
*	۴۶/۷	۰/۸۱	۲۴۹	۳۰۰	۲۰۰	۲۰		
*	۴۲/۲	۰/۸۱	۲۴۹	۳۰۰	۲۰۰	۵۰	۲۰۱۸	Pradhan et al. [20]
*	۳۲/۴	۰/۸۱	۲۴۹	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰		
*	۴۲/۸	۱/۶۱	۳۰۰	۳۱۴	۲۰۰	۱۰۰		
*	۴۲/۸	۱/۶۱	۳۰۰	۳۱۴	۲۰۰	۱۰۰		
*	۴۲/۸	۱/۳۱	۳۰۰	۳۱۴	۲۰۰	۱۰۰		
*	۴۲/۸	۰/۷۵	۳۰۰	۳۱۴	۲۰۰	۱۰۰		
*	۴۲/۸	۰/۷۵	۳۰۰	۳۱۴	۲۰۰	۱۰۰		
*	۴۲/۸	۰/۴۲	۳۰۰	۳۱۴	۲۰۰	۱۰۰		

Verification of flexural strengths' provisions of existing codes for recycle concrete aggregate

Using recycled aggregate concrete (RAC) has been the subject of many studies for years. A comprehensive literature review on flexural strength of RAC is presented. In addition, databases are created for flexural strength of RAC in order to lead to changes or acceptance in design codes and standards' provisions. These data were compared with the American and European standards provisions. Results of this study show that existing code provisions are conservative for 93% and 96% for ACI 318 and EC 2, respectively. In addition, results also compared with conventional concrete flexural database. Almost all of the RAC flexural data are within 95% bound of conventional concrete flexural data. Furthermore, RAC beams showed lower cracking moments and wider cracks compared to conventional concrete beams.

KEY WORDS:

Flexural strength, Recycled aggregate concrete, Conventional concrete