

## بررسی رفتار خمشی تیرهای بتنی ساخته شده از سنگدانه بازیافتی

حمیدرضا چابکی

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

منصور قلعه نوی \*

دانشیار، گروه مهندسی عمران دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

آرش کریمی پور

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

### چکیده

در این بررسی اثر افزودن سنگدانه‌ی بدست آمده از تخریب ساختمان قدیمی در تهیه مخلوط بتن مطالعه شده است. هدف از انجام این بررسی تعیین رفتار خمشی، ظرفیت خمشی در تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی است. در ساخت نمونه‌های مورد نظر از سنگدانه بازیافتی به ترتیب با مقدار ۰ درصد، ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد جایگزین سنگدانه طبیعی استفاده شده است. نمونه‌ها تحت انجام آزمایش خمش چهارنقطه‌ای استاتیکی بررسی شدند و بعد از ۲۸ روز عمل آوری آزمایش شدند. از این رو، با بررسی نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی به بررسی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح دارای سنگدانه بازیافتی پرداخته شده است. افزون بر این نتایج بدست آمده با روابط ارائه شده توسط آیین نامه ACI318، CSA و EuroCode2 مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از این بررسی نشان می‌دهد که با افزودن نسبت جایگزین سنگدانه بازیافتی مقدار عرض ترک خوردگی خمشی در وسط دهانه افزایش یافته و با گسترش امتداد ترک تا محل اعمال بار تیر بصورت خمشی گسیخته می‌شود. افزون بر این استفاده از ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی در نمونه بدون آرماتور عرضی و نمونه با آرماتور عرضی به فاصله ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بترتیب سبب افزایش ظرفیت خمشی به میزان ۸ درصد، ۲۱ درصد و ۳ درصد شده است.

واژه‌های کلیدی: ظرفیت خمشی، تیرهای بتن مسلح، سنگدانه بازیافتی، ترک خوردگی.

## ۱- مقدمه

اطمینان در ساختمان‌ها را برطرف سازد [۲۸-۱۰]. با این وجود، جهت تشویق به استفاده از مصالح بازیافتی برای ساخت بتن سازه-ای، توانایی جهت طراحی اعضای مختلف بتن تقویت شده با درشت‌دانه‌های بتنی و بازیافتی با استفاده از روش‌های طراحی موجود از اهمیت بالایی برخوردار است [۶]. بر این اساس، تحقیقات منتشرشده‌ی اخیر [۲،۹] نشان داده‌اند جهت دستیابی به توافقی مناسب نسبت به عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح و افزایش داده‌های نتایج مرتبط با بتن سازه‌ای بازیافت شده، تحقیقات بیشتری در مقیاس کامل باید صورت بگیرد. این امر به کسب توانایی در پیش‌بینی رفتار تیرهای بتنی تحت بار سرویس و بار نهایی با درجه تقریب مشابه با بتن معمول منتهی خواهد شد. افزون بر این، برخی از پارامترهای بتن مانند سختی خمشی، ظرفیت مقاومت یا رفتار ترک‌خوردگی باید با هدف طراحی ساختاری دقیق در نظر گرفته شوند. به دلیل بروز شرایطی در رابطه با قابلیت کارکرد معمول پس از ترک‌خوردگی، این پارامترها جهت طراحی صحیح ساختار بتن‌ها مورد نیاز است. ظرفیت مقاومت پس از ترک‌خوردگی را می‌توان بر اساس ارتفاع ناحیه‌ی فشاری بتن ترک‌خورده به دست آورد که به میزان شکل‌پذیری و نسبت آرماتور طولی بستگی دارد. در رابطه با رفتار ترک‌خوردگی، اکثر محققان به این نکته‌ی کلی اشاره داشته‌اند که بتن بازیافتی نشان‌دهنده‌ی رفتار بدتری نسبت به بتن معمول می‌باشد [۱۳، ۱۰، ۹، ۱]. این امر احتمالاً به میزان سختی کمتر منتهی شده که بر این اساس، زمانی که درشت‌دانه‌های بازیافتی در بخش‌های مختلف سازه‌ای به کار می‌رود، بتن از تاثیر کمتری پس از ترک‌خوردگی برخوردار است [۱۴، ۱۵]. در همین راستا، انتظار می‌رود تغییر شکل بیشتر بتن بازیافتی [۱۶-۲۱] به عملکردهای خمشی متفاوتی نسبت به تیرهای ساخته شده با سنگدانه طبیعی منتهی شود. در نتیجه باید مطالعات هدفمند بیشتری انجام شود تا بتوان به آینده روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ها کمک شایانی کرد. با این وجود، نیاز است تا همانند بررسی‌های انجام شده در خصوص تیرهای بتن مسلح، پارامترهای بیشتری نظیر ابعاد سطح مقطع، طول تیر، نسبت آرماتور طولی، مقاومت بتن، نسبت آرماتور عرضی، فاصله خاموت و غیره نیز در تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی مورد بررسی قرار بگیرد و تنها به درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی اکتفا نشود.

در راستای اثر استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در بتن و تاثیر این مصالح بر رفتار اعضای بتنی، تحقیقات متعددی در زمینه‌ی تحلیل عملکرد سازه‌های بتنی بازیافت شده انجام پذیرفته است [۱-۱۳]. قابل ذکر است که این مطالعات در زمینه‌ی طرح اختلاط و بررسی مشخصات فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی بتن ساخته شده حاصل از سنگدانه‌های بازیافتی انجام شده است. با این وجود، کاربرد آن در موارد حقیقی ساخت‌وساز و مهندسی عمران نیازمند مطالعاتی در مقیاس کامل‌تر می‌باشد؛ مطالعاتی که به ارزیابی میزان واکنش بتن بازیافت شده به تغییر شکل بار پردازد تا به نتیجه‌ی مناسبی نسبت به طراحی سازه‌ای بتوان دست یافت. در این راستا، بررسی‌های مختلفی در رابطه با عملکرد خمشی بتن‌های سازه‌ای بازیافت شده انجام گرفته است [۴، ۸، ۹، ۱۲]. با این حال، تعداد تحقیقات صورت گرفته درباره‌ی بتن‌هایی با درصد جایگزینی بالا کافی نبوده و به علاوه، برخی نتیجه‌گیری‌های متناقض نیز در این زمینه شناسایی شده‌اند. از طرفی، برخی از محققان [۱، ۹، ۱۰، ۱۳] به این نتیجه رسیده‌اند که تیرهای بتنی بازیافت شده، از انحراف بالاتر و میزان ترک‌خوردگی پایین‌تر یا برابر با تیرهای بتنی معمول برخوردارند؛ در حالی که برخی دیگر از محققان [۶، ۸] هیچگونه تفاوت قابل توجهی از لحاظ عملکرد خمشی میان بتن‌های بازیافتی و معمول مشاهده نکرده‌اند. از این رو، محققان بررسی‌های خود را بر روی درصد پایین جایگزینی سنگدانه بازیافتی انجام دادند. افزون بر این، بدلیل نا کافی بودن بررسی‌ها در این زمینه، منابع تهیه اینگونه از سنگدانه بطور دقیق شناسایی نشده است و در برخی تحقیقات عملکرد این سنگدانه‌ها مناسب بوده و در برخی دیگر از تحقیقات، نامناسب برآورد شده است. [۷، ۸].

بر اساس پیشینه‌ی تحقیق و علی‌رغم شناسایی برخی از تفاوت‌ها، نیاز است تا به منظور گسترش نتایج، تحقیقات بیشتری انجام گیرد. روش‌های آیین‌نامه‌ای در بتن‌های معمول را می‌توان جهت پیش‌بینی رفتار خمشی تیرهای ساخته شده از بتن‌های بازیافتی نیز بکار برد [۹، ۲۶]. در همین راستا، افزایش درشت‌دانه‌های بتنی بازیافت شده به کاهش میزان سختی بتن منجر می‌شود [۹] که با انحراف‌های افزایش یافته در تیرهای ساخته شده از بتن بازیافتی تطابق دارد. به طور کلی، می‌توان گفت همانند بتن‌های تقویت شده‌ی معمول، بتن‌های بازیافتی نیز می‌تواند نیازهای مرتبط با مقاومت و سطح

$$f_{r.ACI} = 0.62\lambda\sqrt{f'_c} \quad (2)$$

یکی دیگر از ویژگی های حائز اهمیت در طراحی بتن های سازه-ای، رفتار پیوند فولاد-بتن می باشد. فضا و عرض ترک خوردگی به اثر متقابل میان بتن و میلگردهای فولادی بستگی دارد که این امر نیز مستقیماً به میزان سختی بتن پس از ترک خوردگی مرتبط است. با وجود اینکه مقاومت پیوندی پایین بتن های بازیافتی موجب می شود میزان سختی پایین تری برای آن پیش بینی شود که این خاصیت برای درشت دانه های بازیافتی با درصد های جایگزینی متفاوت مورد ارزیابی و تحلیل بیشتر قرار نگرفته است. افزون بر این، میزان سختی پس از ترک خوردگی تا حد زیادی به ارتفاع ناحیه فشاری بستگی دارد که می توان آن را با استفاده از یک نمودار فشاری در سطح مقطع به طور تجربی تعیین نمود. پس از مرور تحقیقات صورت گرفته در این زمینه، زمانی که اثر مشترک این ویژگی ها در یک سازه بتنی با مقیاس کامل و متشکل از درشت دانه های بتنی تحلیل می شود، هیچگونه توافقی نسبت به تاثیر این ویژگی ها دیده نمی شود.

از این رو، به منظور بررسی بیشتر، افزون بر در نظر گرفتن درصد جایگزینی بالای سنگدانه بازیافتی (۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد) فاصله آرماتورهای عرضی نیز به عنوان متغیر تاثیرگذار دیگری بر رفتار تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی در نظر گرفته شده است تا با مقایسه با تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه طبیعی به تفاوت رفتار آنها پرداخته شود.

$$M_{ult.ACI} = A'_s f_y (d - d') + (A_s - A'_s) f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (3)$$

$$a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{0.85 f'_c b} \quad (4)$$

که در آن  $b$  عرض مقطع بر حسب میلیمتر،  $d-d'$  فاصله ی بین فولاد فشاری و کششی می باشد.  $A'_s$  و  $A_s$  به ترتیب مساحت فولاد کششی و فشاری مقطع بر حسب میلیمتر مربع است،  $d$  عمق موثر تیر (میلیمتر)،  $\rho$  نسبت فولاد طولی و  $f_y$  تنش تسلیم فولاد بر حسب مگاپاسکال می باشد.

ظرفیت خمشی ترک خوردگی تیر بتن مسلح مطابق آیین نامه CSA-A23.3-04\_2 بصورت زیر بدست می آید:

$$M_{cr.CSA} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (5)$$

$$f_{r.ACI} = 0.6\lambda\sqrt{f'_c} \quad (6)$$

که در آن  $\lambda$  برای بتن با چگالی طبیعی برابر یک فرض می شود. برای بتن های با چگالی پایین این مقدار به ۰.۸۵ تقلیل پیدا می کند و برای بتن سازه ای با چگالی کم در سنگدانه و ماسه طبیعی برابر ۰.۷۵ فرض می شود. افزون بر این لنگر نهایی برای تیرهای با فولاد فشاری مطابق فرمول زیر محاسبه می گردد:

$$M_{ult.CSA} = M_f - M_{fc} \quad (7)$$

$M_{fc}$  لنگر مقاوم فولاد کششی بر حسب مگاپاسکال می باشد.

$$M_{fc} = C \left(d - \frac{a_b}{2}\right) \quad (8)$$

$$a_b = \beta_1 c_b \quad (9)$$

$$c_b = \frac{700}{700 + f_y} d \quad (10)$$

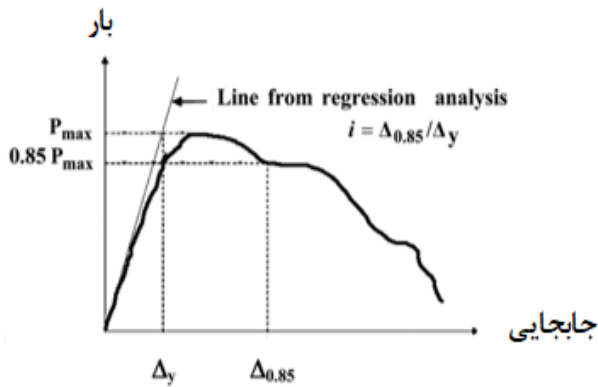
از این رو، به منظور بررسی بیشتر، افزون بر در نظر گرفتن درصد جایگزینی بالای سنگدانه بازیافتی (۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد) فاصله آرماتورهای عرضی نیز به عنوان متغیر تاثیرگذار دیگری بر رفتار تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی در نظر گرفته شده است تا با مقایسه با تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه طبیعی به تفاوت رفتار آنها پرداخته شود.

## ۲- روابط حاکم بر تعیین ظرفیت خمشی

در این بررسی بعد از انجام آزمایش، نتایج بدست آمده از آزمایش ها با روابط ارائه شده در آیین نامه های CSA-A23، Eurocode 2 و ACI318-08 برای تعیین ظرفیت خمشی مورد مقایسه قرار گرفت. ظرفیت خمشی ترک خوردگی تیر بتن مسلح مطابق آیین نامه ACI318-08 بصورت زیر محاسبه می شود [۱۷].

$$M_{cr.ACI} = \frac{f_r I_g}{y_t} \quad (1)$$

که در این رابطه ( $M_{cr.ACI}$ )، لنگر ترک خوردگی می باشد. و  $f_r$ ،  $I_g$  و  $y_t$  به ترتیب مدول ترک خوردگی بتن، ممان اینرسی مقطع ترک خورده ( $m^4$ ) و بیشترین فاصله کششی تا تار خنثی می باشد. که  $f_r$  را مطابق فرمول زیر می توان بدست آورد:



شکل ۱- تعریف نسبت جابجایی و شکل پذیری

## ۲-۱- هدف انجام آزمایش

هدف اصلی این بررسی، تجزیه و تحلیل رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده با سنگدانه بازیافتی است تا بتوان با استفاده از درشت‌دانه‌های بازیافت شده با درجه تقریب مشابه با بتن‌های معمولی، به طراحی بتن سازه‌ای پرداخت. به همین جهت، بیشینه جابجایی وسط دهانه، میزان بار اعمال شده و ظرفیت نهایی نمونه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند. جهت تجزیه و تحلیل رفتار خمشی تیرهای بتنی ساخته شده از سنگدانه بازیافتی تحت بار خمشی رفتار نمونه‌ها تحت لحظه گسیختگی مورد بررسی قرار گرفت. افزون بر این، الگوی ترک خوردگی نیز مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور سنگدانه‌های بازیافتی با درصد جایگزینی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰ درصد جایگزین سنگدانه طبیعی شد. افزون بر، این برای تعیین اثرگذاری افزودن سنگدانه‌ها فاصله آرماتورهای عرضی در سه فاصله مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

## ۲-۲- برنامه آزمایشگاهی

هدف اصلی از انجام این بررسی، بررسی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی حاصل از تخریب ساختمان است. در تحقیقات پیشین، مواردی چون خواص فیزیکی و مکانیکی، انقباض و خزش بتن‌های ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی مورد ارزیابی قرار گرفته اند [۷، ۱۱، ۲۲]. تمرکز این تحقیق بر عملکرد خمشی تیرهای بتنی تقویت شده با درشت‌دانه‌های بازیافتی معطوف است. به همین دلیل، نمونه‌هایی با درصد سنگدانه مختلف تهیه شد و تا زمان شکست نهایی بارگذاری شدند تا انحراف‌ها و تغییرات در سطوح باری مختلف (شرایط پیش از ترک خوردگی، ترک خوردگی، سرویس، بارگذاری و وضعیت نهایی) به دست آید.

اگر  $a \geq a_b$  فولاد فشاری نیاز خواهد بود و مطابق فرمول زیر حساب خواهد شد:

$$C = \varphi_c \alpha_1 f'_c b a_b \quad (11)$$

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f'_c \geq 0.67 \quad (12)$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 f'_c \geq 0.67 \quad (13)$$

که در آن  $\alpha_1$  نسبت بین تنش میانگین در بلوک تنش و مقاومت بتن می‌باشد و  $\beta_1$  نسبت بین عمق بلوک تنش و تار خنثی است. آیین‌نامه Eurocode 2 فرمول دیگری برای تعیین لنگر ترک-خوردگی تیرهای بتنی تقویت شده ارائه می‌دهد که مطابق رابطه زیر قابل تعیین است:

$$M_{cr.Euro} = \frac{f_{ctm} I_u}{(h - X_u)} \quad (14)$$

که در آن  $f_{ctm}$ ،  $I_u$ ،  $h$  و  $X_u$  به ترتیب مقاومت کششی بتن، ممان اینرسی مقطع ترک نخورده، ارتفاع مقطع و ارتفاع تار خنثی در حالت ترک نخورده می‌باشد که مطابق فرمول‌های زیر قابل محاسبه است:

$$X_u = \frac{\frac{bh^3}{2} + (\alpha_e - 1)(A_s d + A_{s2} d_2)}{bh + (\alpha_e - 1)(A_s + A_{s2})} \quad (15)$$

$$I_u = \frac{bh^3}{12} + bh \left( \frac{h}{2} - X_u \right)^2 + (\alpha_e - 1) [A_s (d - X_u)^2 + A_{s2} (X_u - d_2)^2] \quad (16)$$

برای محاسبه لنگر خمشی نهایی Eurocode 2 فرمول زیر را پیشنهاد می‌دهد.

$$M_{ult.Euro} = K_{lim} f_{ck} b d^2 \quad (17)$$

که  $K_{lim}$  یک پارامتر متغیر است که در آیین‌نامه داده شده و  $f_{ck}$  مشخصه مقاومت فشاری بتن بر حسب مگاپاسکال است. شاخص شکل‌پذیری نمونه‌ها یک پارامتر مناسب برای ارزیابی رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح است. کوهن و برتلت [۲۰] یک تعریف نسبتاً مناسبتری را از شاخص شکل‌پذیری پیشنهاد کردند. بر اساس این تعریف، این شاخص را می‌توان به عنوان نسبت بین جابجایی در ۸۵٪ از حداکثر بار در بخش اوج بار از منحنی و جابجایی در اولین محل تماس مماس بر منحنی و بیشینه ظرفیت خمشی توسط رابطه (۱۸) مطابق شکل (۱) محاسبه کرد.

$$i = \frac{\Delta_{0.85}}{\Delta_y} \quad (18)$$

است. همچنین منحنی دانه بندی این سنگدانه‌ها در سه طرح اختلاط با درصد جایگزینی مختلف در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۲- سنگدانه طبیعی



شکل ۳- سنگدانه بازیافتی

### ۳- مشخصات مصالح و هندسه نمونه‌ها

#### ۱-۳- سیمان

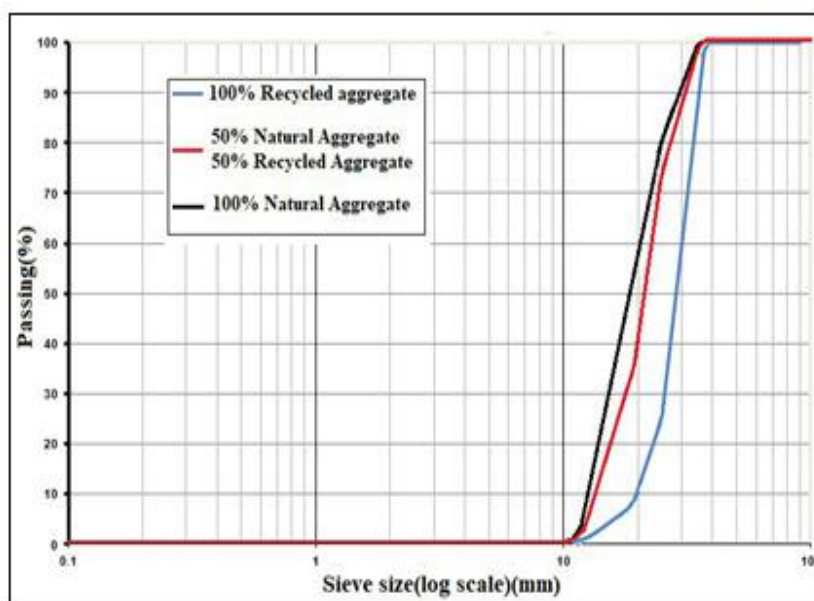
سیمان مورد استفاده در تمام نمونه‌ها سیمان پرتلند معمولی است. مشخصات شیمیایی این سیمان در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان مصرف شده

سیمان	مصالح	
۲۱/۳۶	$SiO_2$	درصد ترکیبات شیمیایی (%)
۵/۵۷	$Al_2O_3$	
۳/۳۵	$Fe_2O_3$	
۶۲/۵	CaO	
-	$Na_2O$	
-	$H_2O$	
-	CaO	
۳/۱۰	وزن مخصوص (گرم بر سانتی متر مکعب)	

#### ۲-۳- سنگدانه‌ها

در این بررسی از دو نوع سنگدانه طبیعی تهیه شده از رودخانه و سنگدانه بازیافتی حاصل از تخریب نمای یک ساختمان در ساخت نمونه‌ها استفاده شده است. سنگدانه‌های بازیافتی با سه مقدار درصد جایگزینی ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. در شکل (۲) و (۳) بترتیب سنگدانه طبیعی و بازیافتی نشان داده شده



شکل ۴- منحنی دانه بندی سنگدانه‌ها

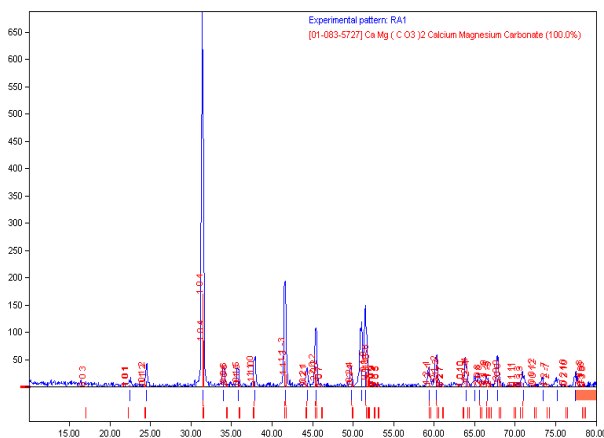
به منظور بررسی رفتار سنگدانه‌ها در نمونه‌های تهیه شده، شیمیایی و شیمیایی آنها مورد بررسی قرار گرفت و مشخصات فیزیکی و شیمیایی آنها مورد بررسی قرار گرفت و بترتیب در جدول (۲) و (۳) ارائه شد. افزون بر این ترکیبات که نتایج این بررسی در شکل (۵) تا (۷) نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

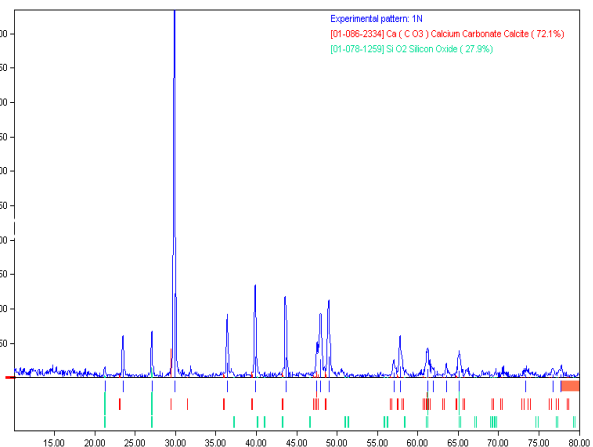
نوع سنگدانه	چگالی ظاهری (gr/cm <sup>3</sup> )	مدول بالک (gr/cm <sup>3</sup> )	جذب آب (wt%)	شاخص سختی (%)	تخلخل (%)
طبیعی	۲/۷۶	۲/۶۵	۱/۴۴۱	۳۱/۰	۳/۸۸
بازیافتی نوع ۱	۲/۶۷	۲/۵۹	۱/۱۸۵	۴۹/۲	۲/۹۹
بازیافتی نوع ۲	۲/۶۶	۲/۵۶	۱/۵۱۹	۴۶/۱	۳/۷۶

جدول ۳- مشخصات شیمیایی سنگدانه‌ها

نوع سنگدانه‌ها			مشخصات اجزا
بازیافتی نوع ۲	بازیافتی نوع ۱	طبیعی	
-	-	۷۲/۱	Ca(Co <sub>3</sub> ) (%)
-	-	۲۷/۹	Sio <sub>2</sub> (%)
-	۱۰۰	-	Ca Mg(Co <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (%)
۱۰۰	-	-	Ca Mg(Co <sub>3</sub> ) (%)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	میزان امشخصات انکسار (%)
۲۵/۱۲	۱۸/۵۸	۲۲/۲۳	تابش پس زمینه (%)
۷۴/۸۸	۸۱/۴۲	۷۷/۷۷	پیشینه انکسار (%)
۴۷/۱۵	۵۳/۱۵	۱۶/۰۸	پیشینه مساحت زیر سطح انتخاب شده (%)
-	-	۱۱/۱۰	پیشینه مساحت فاز A (کلسیم کربنات کلسید) (%)
-	-	۴/۹۹	پیشینه مساحت فاز ۲ (سیلیکون اکسید) (%)
۴۷/۱۵	۵۳/۱۵	-	پیشینه مساحت فاز A (کلسیم مگنسیوم کربنات) (%)



شکل ۶- آزمایش XRD سنگدانه بازیافتی نوع اول



شکل ۵- آزمایش XRD سنگدانه طبیعی

خلاصه نویسی و بررسی راحت تر، نمونه‌ها مطابق جدول (۵) نامگذاری شدند.

جدول ۴- طرح اختلاط بتن

مقدار مورد نیاز (kg)	مصالح	نوع بتن
۸۲۰٫۸*	درشتدانه	بتن ساده
۹۵۰	ریزدانه	
۱۴۰۰	ماسه	
۴۰۰	سیمان	
۲	فوق روان کننده	
۱۶۴	آب	
۰٫۴۱	نسبت آب به سیمان	

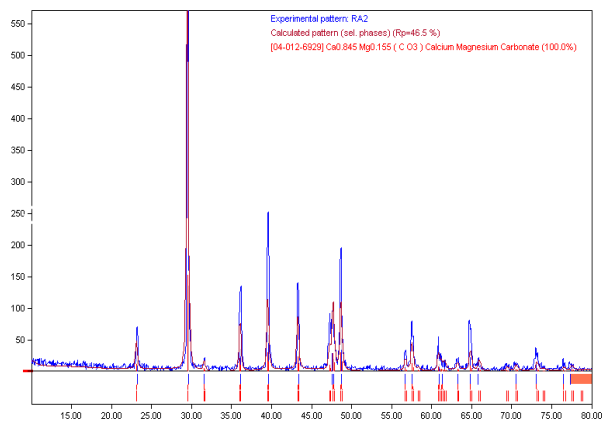
\*بزرگترین اندازه سنگدانه ۱۸ میلیمتر است

جدول ۵- نامگذاری و مشخصات نمونه‌ها

فاصله آرماتورهای عرضی (میلیمتر)	درصد وزنی سنگدانه بازیافتی (%)	نام نمونه
۵۰۰	۱۰۰	100R-WT
۲۰۰	۱۰۰	100R-20T
۱۰۰	۱۰۰	100R-10T
۵۰۰	۵۰	50R-WT
۲۰۰	۵۰	50R-20T
۱۰۰	۵۰	50R-10T
۵۰۰	۰	0R-WT
۲۰۰	۰	0R-20T
۱۰۰	۰	0R-10T

در جدول (۵)، ضریب R و T بر ترتیب بیانگر درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی و فاصله آرماتورهای عرضی است. همچنین W بیانگر نمونه‌های فاقد آرماتور عرضی است. در این نمونه‌ها سه عدد آرماتور عرضی با فاصله ۶۷۵ میلی‌متر استفاده شده که هدف از استفاده این آرماتورها حفظ فاصله بین آرماتور کششی و فشاری بوده است.

نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول (۶) ارائه شده است.



شکل ۷- آزمایش XRD سنگدانه بازیافتی نوع دوم

اولین نکته قابل توجه در استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی نزدیک بودن مشخصات فیزیکی این سنگدانه‌ها نظیر وزن مخصوص، مدول بالک و غیره با سنگدانه طبیعی می باشد. همچنین درصد دانه بندی سنگدانه‌ها باید نزدیک به هم باشد تا بتوان سنگدانه بازیافتی و طبیعی و عملکرد افزودن آنها به طرح اختلاط بتن بکاررفته در تیر را مورد مقایسه قرار داد.

افزون بر این، از عناصری که در افزایش چسبندگی بین سنگدانه و سیمان و انجام واکنش شیمیایی بسیار موثر است، عنصر کلسیم (Ca) می باشد که مقدار آن در سنگدانه‌های بازیافتی بیشتر از سنگدانه طبیعی است. همین امر سبب می شود تا عملکرد سنگدانه بازیافتی از طبیعی بهتر باشد. از این رو، بکارگیری سنگدانه بازیافتی با ترکیبات دارای کلسیم بیشتر، عملکرد بهتری در تهیه بتن خواهد داشت.

### ۳-۳- بتن

در تهیه بتن از سیمان پرتلند معمولی استفاده شد. طرح اختلاط بتن مورد نظر در جدول (۴) ارائه شده است. هنگام بتن ریزی نمونه‌ها، سه نمونه استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر از هر نمونه اصلی تهیه شد. از بین این نمونه‌ها، سه نمونه جهت تعیین مقاومت فشاری استفاده شد. نمونه دارای صفر درصد سنگدانه بازیافتی جایگزین سنگدانه طبیعی به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شد. در دو طرح اختلاط دیگر سنگدانه بازیافتی با درصد جایگزینی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ اضافه شد. در این جایگزینی مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان ثابت در نظر گرفته شد.

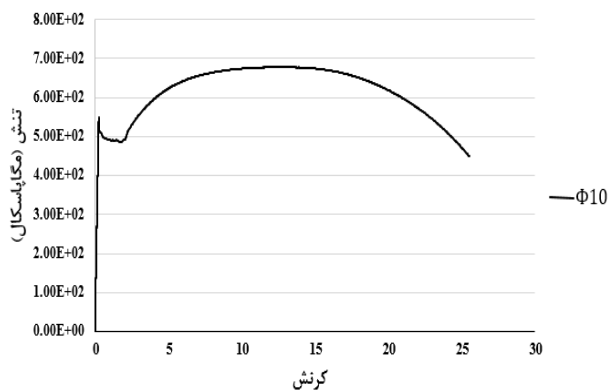
سنگدانه بازیافتی از نوع درشتدانه بوده و با درصد جایگزینی ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰ درصد جایگزین مقدار درشتدانه شد. از این رو، به منظور

جدول ۶- تست مقاومت فشاری نمونه‌ها

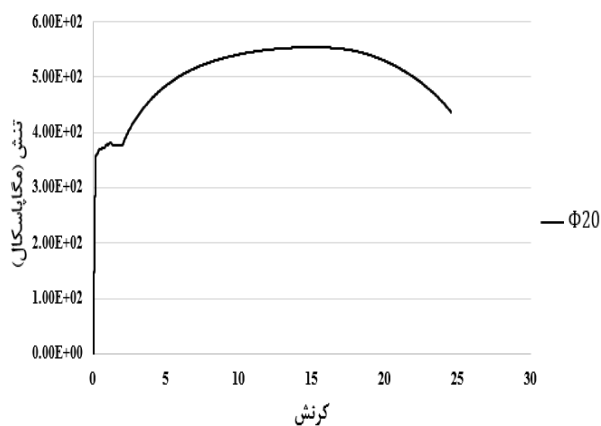
متوسط مقاومت فشاری (Mpa)	مقاومت فشاری نمونه‌ها (MPa)			نام نمونه
	استوانه‌ی سوم	استوانه‌ی دوم	استوانه‌ی اول	
۳۵/۰	۳۷	۳۳	۳۵	100R-WT
۳۷/۳	۳۸	۳۵	۳۹	100R-20T
۳۶/۰	۳۶	۳۸	۳۴	100R-10T
۳۵/۰	۳۷	۳۳	۳۵	50R-WT
۳۵/۰	۳۵	۳۷	۳۶	50R-20T
۳۵/۰	۳۵	۳۷	۳۶	50R-10T
۳۹/۳	۳۸	۴۰	۴۰	0R-WT
۳۷/۳	۳۹	۳۷	۳۵	0R-20T
۳۵/۶	۳۵	۳۶	۳۶	0R-10T

## ۳-۴- میلگرد

در تمام نمونه‌ها از میلگردهای کششی، فشاری و عرضی با قطر ثابت به ترتیب ۲۰ میلی‌متر، ۱۰ میلی‌متر و ۸ میلی‌متر استفاده شد. برای تعیین مشخصات میلگردهای مورد استفاده مطابق شکل (۸)، از هر قطر میلگرد سه نمونه تحت آزمایش کشش بررسی شدند. از هر اندازه میلگرد مصرفی، سه نمونه تحت استاندارد DIN EN 10 002 مورد آزمایش قرار گرفتند که میانگین مشخصات مکانیکی بدست آمده، در جدول (۷) ارائه شده است. در آزمایش انجام شده، افزون بر مقاومت تسلیم و نهایی آرماتورها، منحنی تنش- کرنش آرماتورهای طولی در شکل (۹) نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۹- منحنی تنش-کرنش آرماتورهای طولی مورد استفاده،

(الف)  $\Phi 10$  (ب)  $\Phi 20$



شکل ۸- دستگاه کشش آرماتور



جدول ۷- نتایج آرماتورهای کششی

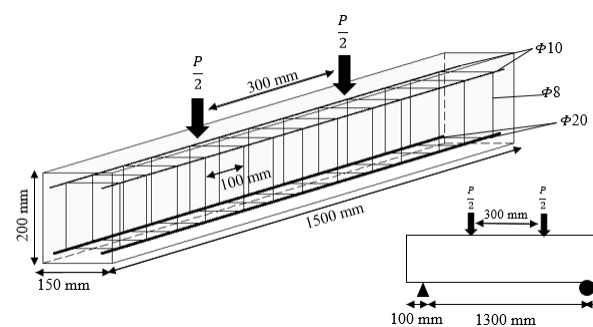
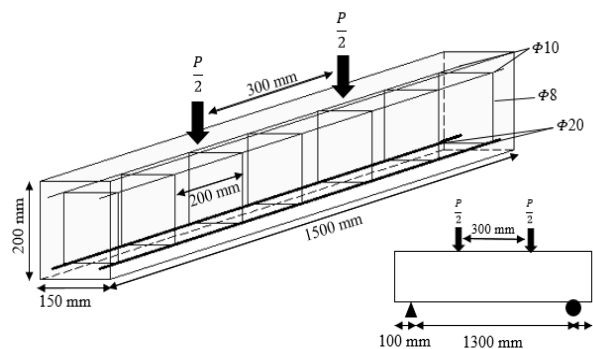
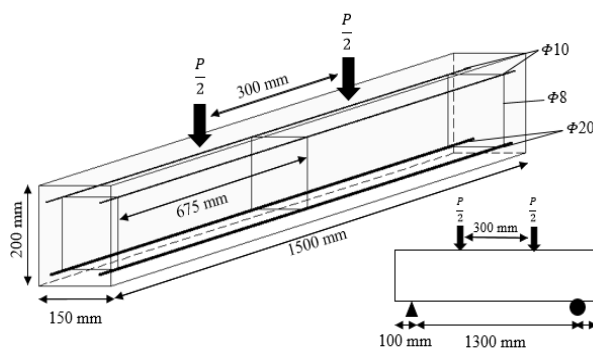
قطر آرماتور (mm)	مقاومت تسلیم (MPa)	مقاومت نهایی (MPa)	کرنش تسلیم %	کرنش نهایی %	مدول الاستیسیته (GPa)
۸	۳۷۱	۵۶۰	۱۲/۹۴	۲۴/۹۱	۲۰۹/۲
۱۰	۴۰۸	۶۷۷	۱۳/۰۴	۲۵/۵۱	۲۱۰/۱
۲۰	۳۷۱	۵۶۱	۱۵/۲۷	۲۵/۸۲	۲۱۳/۱

#### ۴- دستگاه بارگذاری

تعداد ۹ نمونه تیر بتن مسلح به عرض مقطع ۱۵۰، ارتفاع ۲۰۰ و طول ۱۵۰۰ میلی‌متر، جهت بررسی تاثیر فاصله آرماتور برشی بر رفتار تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی با درصدهای جایگزینی وزنی ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد ساخته شد. نسبت درصد فولاد کششی موجود به فولاد کششی حالت بالانس نمونه، برابر با ۰/۶۶۸ است. همچنین فواصل آرماتورهای عرضی در نمونه‌های مختلف ۶۷۵، ۲۰۰، ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی در شکل (۱۰) ارائه شده است.



شکل ۱۱- دستگاه بارگذاری و نحوه بارگذاری نمونه‌ها



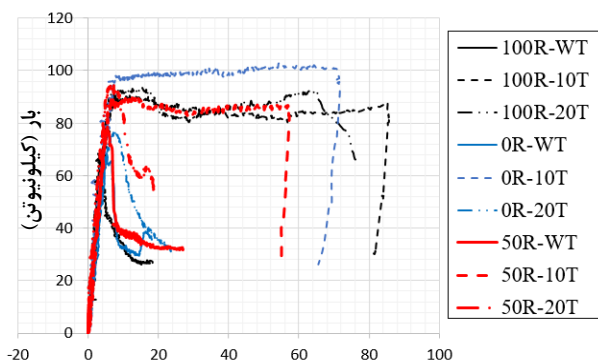
شکل ۱۰- ابعاد هندسی نمونه‌ها، آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه و بارگذاری

#### ۵- بحث نتایج

در این بررسی بارگذاری به صورت استاتیکی چهار نقطه ای انجام شد و توسط تغییر شکل سنج الکتریکی، تغییر مکان وسط نمونه اندازه‌گیری شد. به منظور اثر تغییر فاصله آرماتورهای برشی بر رفتار خمشی تیرهای ساخته شده با درصد جایگزینی متفاوت سنگدانه بازیافتی نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه مطابق شکل (۱۲) بدست آمد. در این شکل اثر تغییر فاصله آرماتور برشی با توجه به درصد جایگزینی مختلف سنگدانه بازیافتی در تمامی نمونه‌ها بر رفتار خمشی نمونه‌ها نشان داده شده است.

در حالی است که با جایگزین کردن ۵۰ درصد سنگدانه بازیافتی، ظرفیت نمونه هنگامی که آرماتور عرضی به میزان کمتر (فاصله ۲۰۰ میلی‌متر) تعبیه شود، ظرفیت خمشی نمونه افزایش قابل توجهی پیدا کرده است ولی شکل‌پذیری و بیشینه تغییر مکان نمونه همچنان نسبت به نمونه با فاصله خاموت ۱۰۰ میلی‌متر به میزان قابل توجهی کمتر است. در نمونه‌ای که سنگدانه بازیافتی به میزان ۱۰۰ درصد با سنگدانه طبیعی جایگزین شده است، با وجود افزایش فاصله خاموت عرضی از ۱۰۰ میلی‌متر به ۲۰۰ میلی‌متر ظرفیت خمشی و تغییر شکل نمونه‌ها به میزان قابل توجهی بهبود پیدا کرده است. این بیانگر این موضوع است که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی با درصد جایگزینی بالا تاثیر قابل توجهی در افزایش تغییر شکل نمونه و ظرفیت خمشی دارد.

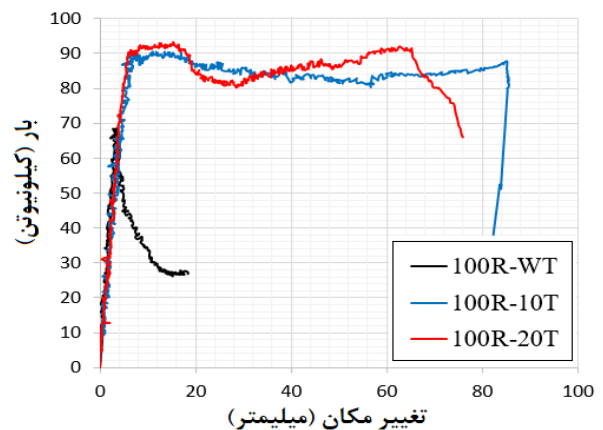
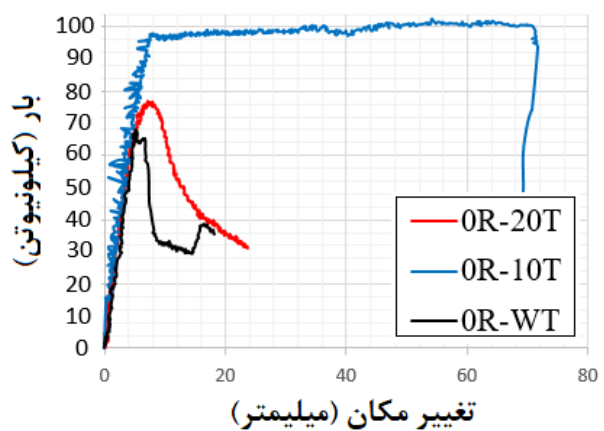
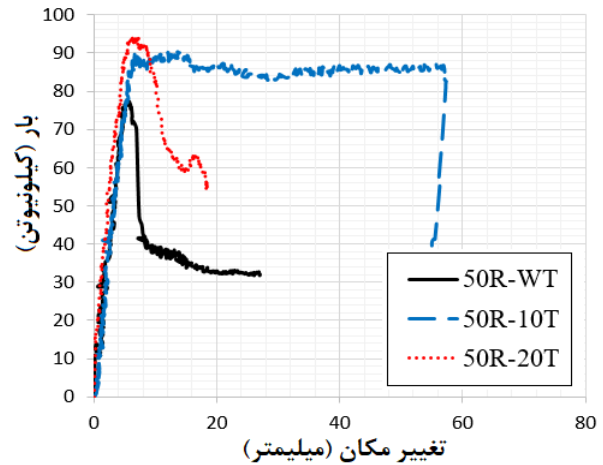
طبق شکل (۱۳)، افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی با ثابت در نظر گرفتن فاصله آرماتورهای عرضی تاثیر قابل توجهی بر افزایش ظرفیت خمشی و بیشینه تغییر مکان تیرهای بتن مسلح دارد.



شکل ۱۳- نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه تیر با درصد سنگدانه بازیافتی و فواصل آرماتور عرضی مختلف

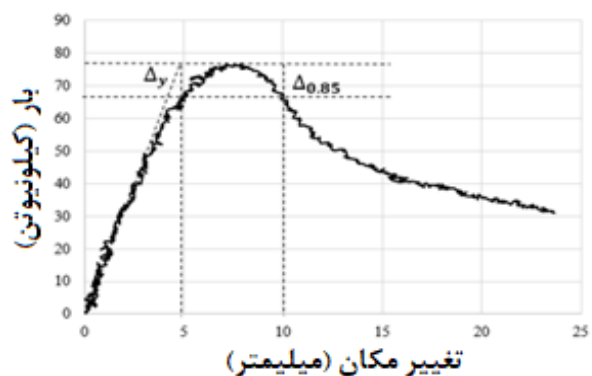
همانطور که پیش از این نیز بیان شد، یکی از شاخص‌های مهم و کاربردی در تعیین رفتار تیرهای بتن مسلح، ضریب شکل‌پذیری است. این ضریب که از منحنی بار-تغییر مکان نمونه‌های تیر بدست می‌آید برای ۹ نمونه مورد بررسی در این پژوهش، در شکل (۱۴) تا (۲۲) نشان داده شده است که نتایج بدست آمده از این محاسبات در جدول (۸) ارائه شده است.

مطابق شکل (۱۴) تا (۲۲) و جدول (۸)، استفاده از سنگدانه بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی تاثیر قابل توجهی بر

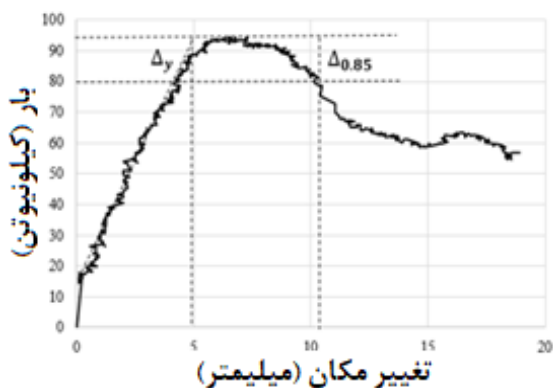


شکل ۱۲- نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه تیر با ۰، ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی و فواصل آرماتور عرضی مختلف

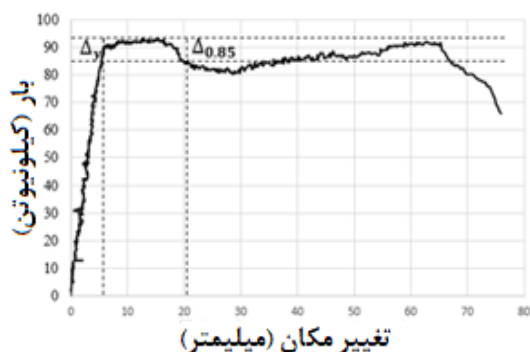
طبق شکل (۱۲) استفاده از آرماتور عرضی تاثیر بسزایی در بهبود تغییر شکل تیر دارد. در نمونه‌های فاقد آرماتور عرضی، ظرفیت خمشی نمونه بعد از رسیدن به بیشینه مقدار، بصورت ناگهانی افت کرده و نمونه بصورت شکست ترد ناگهانی تخریب می‌شود. این



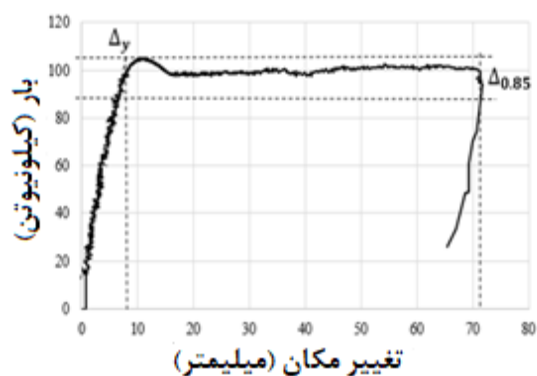
شکل ۱۷- شکل پذیری نمونه OR-20T



شکل ۱۸- شکل پذیری نمونه 50R-20T

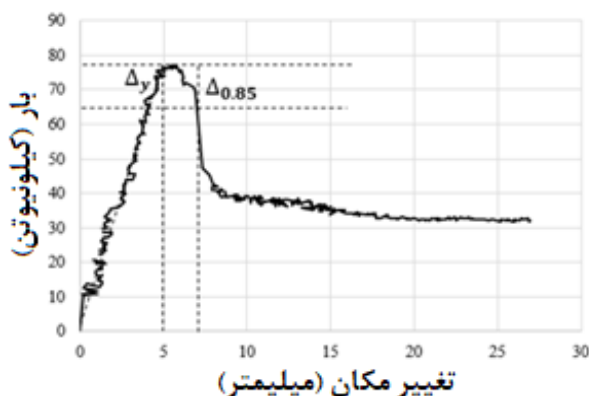


شکل ۱۹- شکل پذیری نمونه 100R-20T

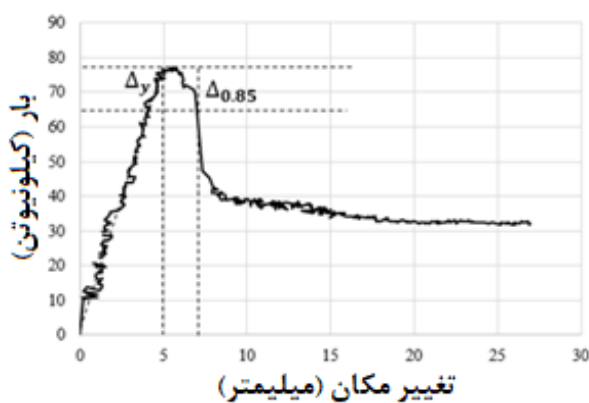


شکل ۲۰- شکل پذیری نمونه OR-10T

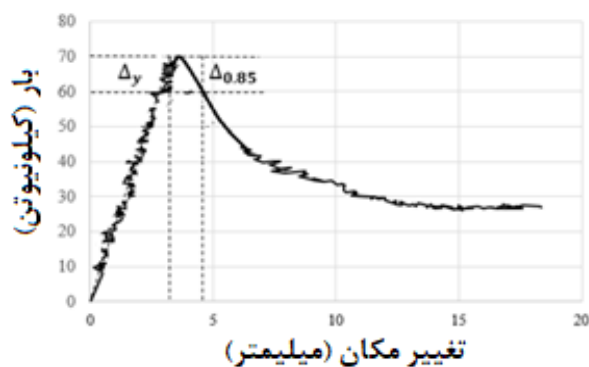
افزایش شکل پذیری دارد. این اثر گذاری زمانی که آرماتور عرضی به میزان قابل توجهی تامین شود قابل توجه تر خواهد بود و نمونه با افزایش شکل پذیری نمونه با تغییر شکل بیشتر و بصورت نرم دچار شکست می شود. در نتیجه طبق جدول (۸)، با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی، نمونه‌ها به سمت شکست نرم پیش رفته و شکست بصورت ناگهانی بروز نمی‌کند.



شکل ۱۴- شکل پذیری نمونه OR-WT



شکل ۱۵- شکل پذیری نمونه 50R-WT

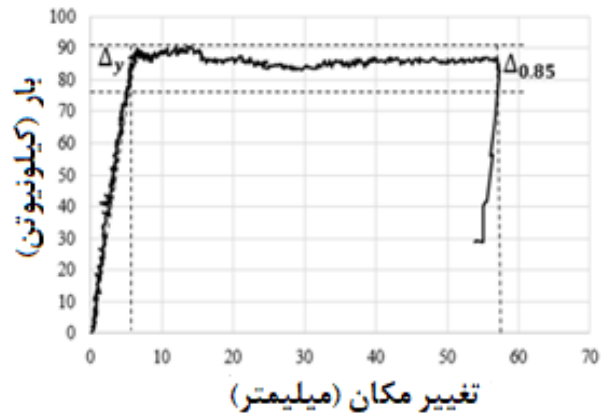


شکل ۱۶- شکل پذیری نمونه 100R-WT

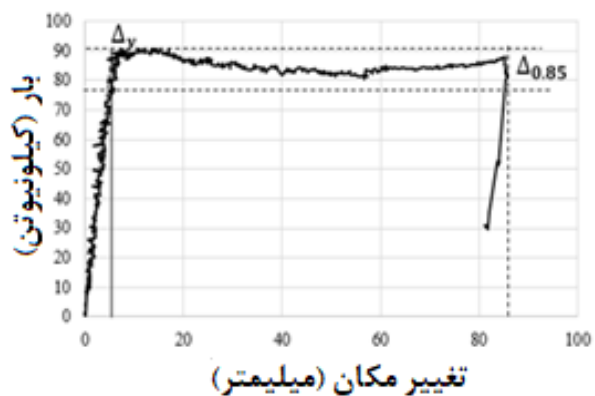
افزودن سنگدانه بازیافتی باعث افزایش ترک خوردگی شده است در حالیکه عرض ترک‌ها کاهش یافته است و در لحظه‌ی نهایی تیر با تغییر شکل بیشتر و عرض ترک کمتر گسیخته شده است. این در حالی است که عدم استفاده از آرماتور عرضی سبب بروز شکست برشی و ترد در لحظه‌ی نهایی شده است. در نمونه‌های دارای آرماتور عرضی به فاصله ۲۰۰ میلی‌متر با جایگزینی سنگدانه بازیافتی به میزان ۰ و ۵۰ درصد شکست بصورت برشی و ترد اتفاق افتاده است در حالیکه با جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه بازیافتی شکست از حالت ترد به حالت نرم تغییر حالت داده و در لحظه‌ی نهایی بصورت خمشی و با بروز بزرگترین ترک در وسط دهانه‌ی نمونه گسیخته شده است. استفاده از آرماتور عرضی به فاصله ۱۰۰ میلی‌متر سبک شکست نرم در لحظه‌ی نهایی شده است. افزون بر این، با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی نمونه با ترک‌های بیشتر ولی با عرض ترک کمتر و با شکل پذیری بیشتر گسیخته شده است.

با توجه به اثرگذاری درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی بر رفتار خمشی تیرهای بتن مسلح، نتایج بدست آمده از ظرفیت خمشی در لحظه ترک خوردگی و لحظه گسیختگی نمونه‌های مورد بررسی با ظرفیت خمشی قابل محاسبه توسط آیین‌نامه EuroCode2 و CSA، ACI318 مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده از این مقایسه در دو لحظه ترک خوردگی و شکست نمونه بترتیب در شکل‌های (۲۴) و (۲۵) ارائه شده است. طبق نتایج بدست آمده تمامی آیین‌نامه‌ها مورد بررسی، لنگر ترک خوردگی را کمتر از مقدار آزمایشگاهی و دست بالا در نظر می‌گیرند. در این میان آیین‌نامه EuroCode 2 نتایج را نزدیک تر در نظر می‌گیرد در حالی که نتایج بدست آمده طبق روابط ACI و CSA غیر اقتصادی و بسیار دست بالا است.

در خصوص بررسی لنگر نهایی، مطابق شکل (۲۵)، آیین‌نامه ACI و CSA نتایج واقع‌تری را ارائه می‌کنند در حالیکه آیین‌نامه EuroCode 2 برخلاف لنگر ترک خوردگی، در تعیین لنگر نهایی بسیار غیر منطقی و دست بالا ظرفیت تیرهای بتن مسلح دارای سنگدانه بازیافتی را تعیین می‌کند.



شکل ۲۱- شکل پذیری نمونه 50R-10T

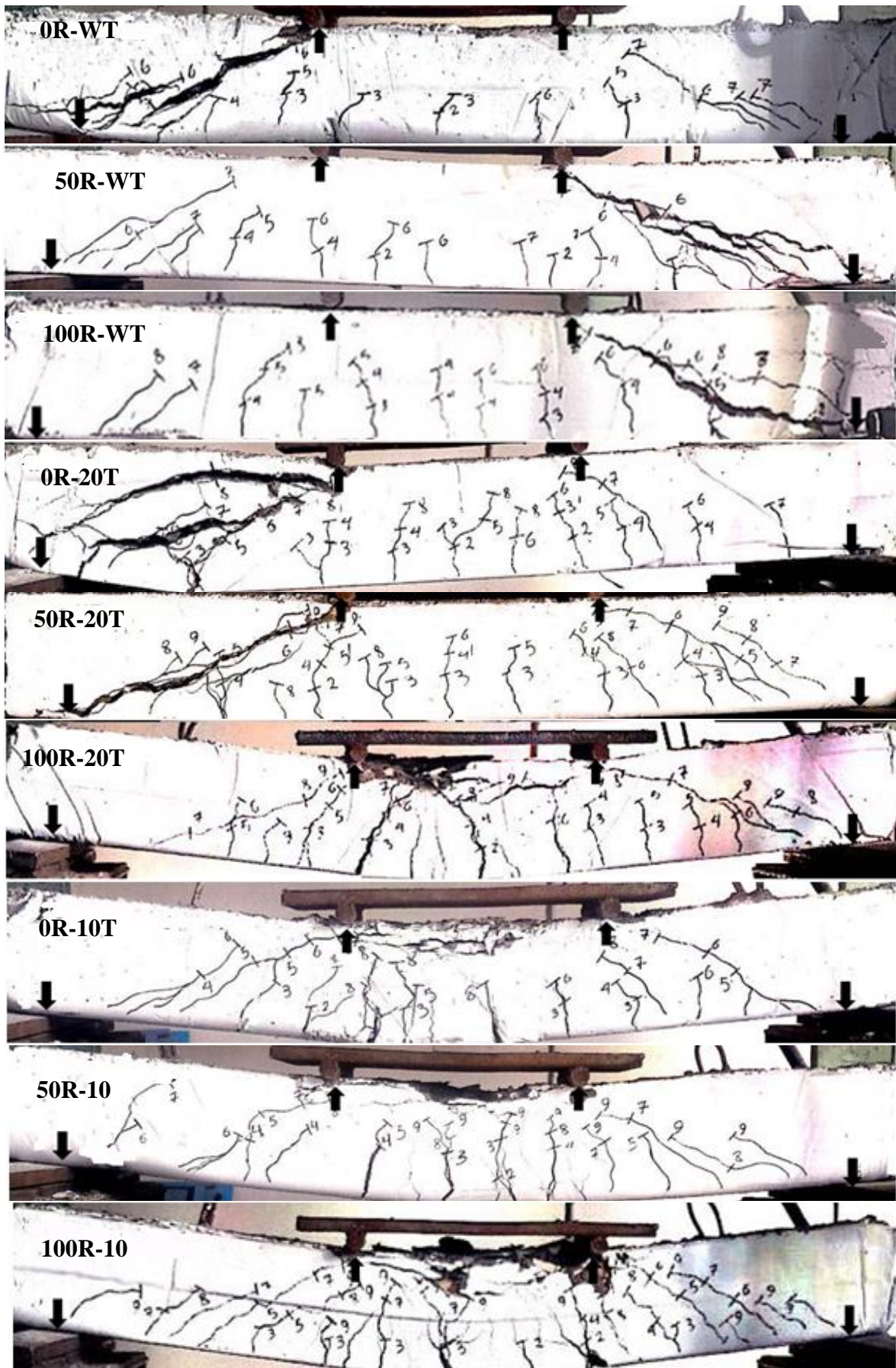


شکل ۲۲- شکل پذیری نمونه 100R-10T

جدول ۸- ضریب شکل پذیری

نمونه	ضریب شکل پذیری (i)
0R-WT	۱/۳
50R-WT	۱/۵
100R-WT	۱/۶
0R-20T	۱/۲
50R-20T	۲/۲
100R-20T	۲/۸
0R-10T	۷/۸
50R-10T	۷/۸
100R-10T	۱۱/۷

شکست نمونه‌ها و میزان شکل پذیری آنها با گسترش ترک خوردگی و عرض ترک‌ها در ارتباط است. از این رو برای بررسی دقیق‌تر در شکل (۲۳) نحوه‌ی شکست نمونه‌ها و مسیر گسترش ترک‌ها نشان داده شده است. با توجه به شکل (۲۳)،



شکل ۲۳- ترک خوردگی و مسیر گسترش ترک‌ها

از این رو، با توجه به اهمیت حفظ محیط زیست و استفاده از مصالح دور ریز می‌توان به میزان ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی را جایگزین سنگدانه طبیعی کرد.

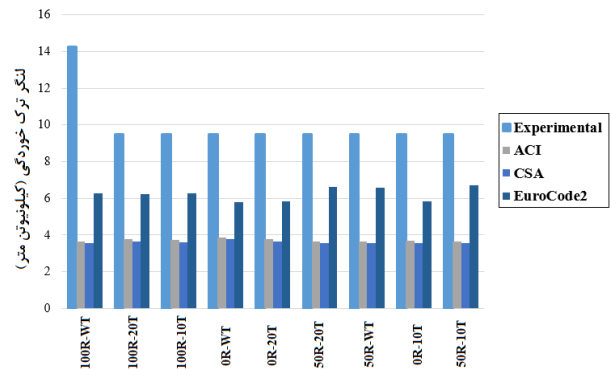
۳- استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی سبب افزایش شکل‌پذیری تیرهای بتن مسلح می‌شود که همین امر باعث می‌شود تا نمونه با تغییر شکل بیشتر و بصورت نرم دچار شکست شود.

۴- با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، تعداد ترک‌ها بیشتر شده و عرض ترک کاهش می‌یابد.

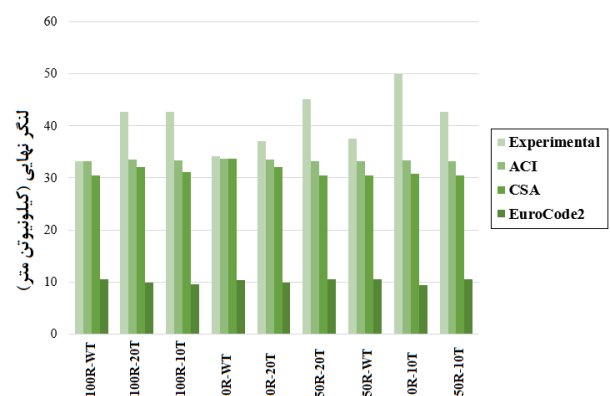
۵- در مقایسه‌ی ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح با درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی با روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌های ACI، CSA، EuroCode 2 و محاسبه‌ی لنگر ترک خوردگی آیین‌نامه Eurocode 2 و در محاسبه‌ی لنگر نهایی آیین‌نامه ACI و CSA دارای روابط قابل قبولی هستند و روابط ارائه شده در این آیین‌نامه‌ها برای تیرهای بتن مسلح دارای سنگدانه بازیافتی قابل تعمیم است.

## ۷- مراجع

- [1]. Arora, S. and Singh. S. P. "Analysis of flexural fatigue failure of concrete made with 100% coarse recycled concrete aggregates" *Construction and Building Materials*, 2016 102: 782–791.
- [2]. Choi. W. C. and Yun. H. D. "Long-term deflection and flexural behavior of reinforced concrete beams with recycled aggregate" *Materials and Design*, 2013 51: 742–750.
- [3]. Azad A. M. "Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete" *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 593–604.
- [4]. Gao. D. and Zhang. L. "Flexural performance and evaluation method of steel fiber reinforced recycled coarse aggregate concrete" *Construction and Building Materials*, 2018, 159: 126–136.
- [5]. Guo. Y., Zhang. J., Chen. G. and Xie. Z. "Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures" *Journal of Cleaner Production*, 2014, 72: 193–203.
- [6]. Carneiro. J.A., Lima. P.R.L., Leite. M.B. and Filho, R.D. "Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Composites*, 2014, 46: 65–72.
- [7]. Meda, A., Minelli, F. and Plizzari, G.A. "Flexural behavior of RC beams in fiber reinforced



شکل ۲۴- مقایسه مقاومت خمشی بدست آمده با روابط پیشنهاد شده در لحظه بروز اولین ترک



شکل ۲۵- مقایسه مقاومت خمشی بدست آمده با روابط پیشنهاد شده در لحظه شکست نمونه

## ۶- نتیجه گیری

در این بررسی اثر استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی بجای سنگدانه‌های طبیعی بر رفتار خمشی تیرهای بتنی مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور، نه نمونه تیر بتن مسلح با درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ مورد بررسی قرار گرفت. افزون بر این اثر فاصله آرماتور عرضی با در نظر گرفتن سه فاصله مختلف مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به این بررسی نتایج زیر بدست آمد:

- ۱- در صورت عدم استفاده از آرماتور عرضی، جایگزینی سنگدانه بازیافتی تاثیر قابل توجهی بر بیشینه تغییر مکان و ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح ندارد در حالیکه با استفاده از آرماتور عرضی تاثیر استفاده از سنگدانه بازیافتی قابل توجه می‌شود.

- ۲- در صورتی که آرماتور عرضی به میزان کافی در تیرهای بتن مسلح تعبیه شود، افزودن سنگدانه بازیافتی تاثیر قابل توجهی بر بیشینه تغییر مکان و ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح دارد.

(fib). 2010

[20]. Cohn, M.Z. and Bartlett, M. "Computer-simulated flexural test of partially pre-stressed concrete section", ASCE Journal of Structural Division 5: 1982, 2747-2765.

[21]. ASTM C136 / C136M-14 Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2014.

concrete", Composites, Part B, 2012, 43: 2930–2937.

[8]. Soutsos, M.N., Le, T.T. and Lampropoulos, A.P. "Flexural performance of fiber reinforced concrete made with steel and synthetic fibers", Construction and Building Materials, 2012 36: 704–710.

[9]. Seara-Paz S., González-Fontebo. B., Martínez-Abella. F. and Eiras-López. J. "Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate", Engineering Structures, 2018, 156: 32–45.

[10]. Tošić. N., Marinkovic. S. and Ignjatovic. I "A database on flexural and shear strength of reinforced recycled aggregate concrete beams and comparison to Eurocode 2 predictions", Construction and Building Materials, 2016, 127 932–944.

[11]. Tarek. T. M., Das. H. K., Mahmood. A. H., Rahman. M. N and Awal. M.A. "Flexural performance of RC beams made with recycled brick aggregate", Construction and Building Materials, 2017, 134: 67–74.

[12]. Zaetanga. Y, Sata. V, Wongs. A and Chindaprasir. P "Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate" Construction and Building Materials, 2016 Volume 111, 15 May, Pages 15-21.

[13]. Weiss. W.J., Shah. S.P. "Recent trends to reduce shrinkage cracking in concrete pavements" Proceedings of the Airfield Pavement Conference, Aircraft/Pavement Technology: In the Midst of Change, 1997, pp. 217-228.

[14]. Banthia. N., Gupta. R. and Mindess. S. "Developing crack resistant SFRC overlay materials for repair applications" NSF Conference, Bergamo, Italy. 2004,

[15]. Banthia. N. and Sheng. J. "Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites" Cement and Concrete Composites, 1996, 18: 251-269.

[16]. Bindiganavile. V. and Banthia. N. "Polymer and steel fiber reinforced cementitious composites under impact loading, Part 1: Bond-Slip Response" American Concrete Institute, Materials Journal, 2001, 98(1): 10-16.

[17]. ACI 318-08, Building code requirement for structural concrete and commentary, Reported by ACI committee 318. 2008

[18]. CSA A23.3-14, Design of concrete structures, A trade-mar k of the Canadian Standards Association, operating as "CSA Group" published in June 2014 by CSA Group. 2014

[19]. CEB-FIP Model Code 2010 Volume 2, International Federation for Structural Concrete

## Study of the Flexural behaviour of recycled aggregate concrete beams

Hamid Reza Chaboki

M.sc student, Department of civil engineering, Birjand University, Birjand, Iran

Mansour Ghalehnovi \*

Associate Professor, Department of civil engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Arash Karimipour

M.sc student, Department of civil engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### Abstract

In this research, the effect of recycled aggregates obtained from the demolition of the old building on the preparation of concrete mixtures has been studied. The purpose of this study was to determine flexural behavior, flexural strength in reinforced concrete beams made of recycled aggregate. In the production of samples, recycled aggregates are used with 0%, 50% and 100% natural aggregates, respectively. The samples were tested for static quadrilateral bending and tested after 28 days of experiment. Therefore, by examining the results of laboratory studies, the flexural behavior of RC beams with the expansion of the recycling has been investigated. In addition, the results are compared with the relationships provided by ACI318, CSA and EuroCode2. The results obtained from this review show that by adding the ratio to the recycled aggregate substitute, the amount of net bending size at the critical level increases and, with the expansion of the crack extending to the place of loading, the load is released flexibly. In addition, the use of 100% recycled aggregate increases the shape and flexural strength of RC concrete beams.

**Keywords:** Flexural behaviour, reinforced concrete beams, recycled aggregate, cracking.

---

\* Corresponding Author: Ghalehnovi@um.ac.ir