

بررسی رفتار برشی تیرهای بتنی ساخته شده از سنگدانه بازیافتی

حمیدرضا چابکی^۱، منصور قلعه نوی^{۲*}، آرش کریمی پور^۳، محسن خطیبی نیا^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- کارشناس ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

حفظ محیط زیست و کاهش میزان مصالح دورریز در طبیعت از موضوعات بسیار مهم است. امروزه مسئله استفاده از مصالح بازیافتی حاصل از تخریب ساختمان‌های فرسوده و استفاده مجدد از این مصالح در ساخت بتن مورد توجه قرار گرفته است. در این بررسی اثر افزودن مصالح حاصل از تخریب ساختمان‌ها به عنوان سنگدانه در تهیه مخلوط بتن مطالعه شده است. در این بررسی ۹ عدد تیر بتن مسلح به عرض مقطع ۱۵۰ میلی‌متر، ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و طول ۱۵۰۰ میلی‌متر ساخته شد. در ساخت نمونه‌ها از سنگدانه بازیافتی به ترتیب با مقدار ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ جایگزین سنگدانه طبیعی استفاده شده است. نمونه‌ها تحت انجام آزمایش خمش چهارنقطه‌ای استاتیکی بررسی شدند. هدف از انجام این آزمایش، بررسی رفتار برشی تیرهای ساخته شده از درصد مختلف سنگدانه بازیافتی با در نظر گرفتن اثر فاصله آرماتور عرضی است. تغییر مکان وسط تیر، نیروی برشی-تغییر مکان، نیروی برشی-کرنش و گسترش ترک‌های برشی از موارد مورد بررسی بوده است. از این رو، با بررسی نتایج به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی به بررسی رفتار برشی تیرهای بتن مسلح دارای سنگدانه بازیافتی پرداخته شده است. افزون بر این نتایج به دست آمده از ظرفیت برشی نمونه‌ها با روابط ارائه شده در آیین نامه CSA-A23، ACI318-08 و Eurocode 2 مقایسه شد. نتایج به دست آمده از این بررسی نشان می‌دهد که اختلاف قابل ملاحظه‌ای در رفتار برشی تیرهای ساخته شده از سنگدانه بازیافتی و طبیعی وجود دارد.

کلمات کلیدی: ظرفیت برشی، تیرهای بتن مسلح، سنگدانه بازیافتی، ترک خوردگی، خمش چهارنقطه‌ای

*نویسنده مسئول: منصور قلعه نوی

پست الکترونیکی: Ghalehnovi@um.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰/۰۰/۰۰

بهینه‌سازی و اقتصادی نمودن فرآیندها و ساختارها از زمان‌های دور مورد توجه بوده و برای رسیدن به این هدف کارهای فراوانی صورت گرفته است. با پیشرفت صنعت ساختمان و رشد روزافزون ساخت سازه‌ها، متاسفانه شاهد انباشته شدن ضایعات و نخانه‌های ساختمانی در سطح وسیعی هستیم که جز از بین بردن سرمایه‌های کشور و هدررفت منابع، چیز دیگری در بر نخواهد داشت. از سوی دیگر این موضوع به صورت مستقیم و غیر مستقیم، محیط زیست را نیز تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. در سال‌های اخیر در حل این موضوع، مصالح بازیافتی نوینی را با عنوان بتن بازیافتی معرفی شده است. به منظور تهیه بتن بازیافتی از خرد شدن بتن‌های ضایعاتی به عنوان سنگدانه به جای سنگدانه‌های طبیعی استفاده می‌شود. مصالح حاصل از تخریب سازه‌ها شامل مصالح گچی، سیمانی، کاشی، سرامیک، سنگ، آجر و غیره است. این مصالح بعد از تخریب ساختمان به بیرون مناطق مسکونی حمل شده و در محیط زیست رها می‌شوند. امروزه با توجه به پیشرفت علم توجه قابل ملاحظه‌ای به بازیافت این مصالح و استفاده مجدد از این مصالح در ساخت بتن شده است. این مصالح دارای اندازه‌های مختلف هستند و می‌توان از آنها به عنوان جایگزین سیمان و یا سنگدانه استفاده کرد.

از این رو، در سال‌های اخیر بررسی‌هایی در زمینه‌ی استفاده از این مصالح بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه‌های طبیعی در بتن انجام شده است [۸-۱]. نتایج به دست آمده از این بررسی‌ها نشان می‌دهد که اثرگذاری سنگدانه‌های بازیافتی از سنگدانه‌های طبیعی کمتر است. علت این موضوع را می‌توان به تغییر واکنش سنگدانه‌ها با خمیر سیمان، سطح ویژه سنگدانه‌ها، نسبت جذب آب آنها و میزان تخلخل ایجاد شده بدلیل استفاده از سنگدانه بازیافتی به جای سنگدانه طبیعی دانست. همین امر می‌تواند باعث تاثیر منفی در مشخصات مکانیکی بتن ساخته شده نظیر کارایی، میزان نفوذ هوا و مقاومت بتن شود [۹-۱۱]. از این رو بررسی‌های زیادی به منظور افزایش مقاومت مکانیکی تیرهای ساخته شده از سنگدانه‌های بازیافتی توسط انجام شده است. شی و همکارانش [۱۰]، نظریه جدیدی را برای افزایش مقاومت و رفتار فیزیکی تیرهای بتنی دارای سنگدانه بازیافتی ارائه دادند. از این رو به منظور جبران ضعف ایجاد در بتن بدلیل استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی، روش‌هایی توسط محققین نظیر استفاده از دستگاه سنگ شکن به منظور یکپارچه سازی سنگدانه‌ها [۱۲]، خیساندن در آب قبل از استفاده در بتن [۱۳ و ۱۴]، امولسیون پلیمر و باردار کردن سنگدانه‌ها [۱۵ و ۱۶]، دوغاب پوزولان [۱۷] و غیره پیشنهاد شده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده می‌توان گفت که خیساندن در آب قبل از استفاده در بتن موثرترین روش برای افزایش اثرگذاری استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در خمیر سیمان است.

تیم و همکارانش [۱۸] و اسلامی و رملی [۱۹] بررسی‌هایی در خصوص رفتار مکانیکی و جذب آب بتن دارای سنگدانه بازیافتی انجام دادند. نتایج بررسی‌های نشان داده که میزان جذب آب سیمان زمانی که سنگدانه‌های بازیافتی در اسید قرار داده می‌شوند بهبود پیدا می‌کند. بیشتر تحقیقات منتشر شده بر روی مشخصات بتن دارای سنگدانه بازیافتی تازه و سفت شده با استفاده از نمونه‌های استوانه‌ای بوده است. تعداد کمی بررسی بر روی رفتار سازه‌ای اینگونه بتن‌ها در ساخت اعضای نظیر تیر انجام شده است [۲۰-۲۵]. در نتیجه با توجه به بررسی‌های انجام شده، داشتن نظری بر رفتار سازه‌ای تیرهای بتنی دارای سنگدانه بازیافتی مورد نیاز است.

فاطی فازل و همکاران [۲۶] یک روش معادل پیشنهاد کردند. در این روش که به روش حجمی (EMV) معروف است یک طراح ترکیبی ویژه برای ساخت بتن دارای سنگدانه بازیافتی ارائه شده است. نتایج به دست آمده از این روش نشان داد که ظرفیت فشاری بتن دارای سنگدانه بازیافتی کمتر از بتن معمولی است. افزون بر این، چوی فونتبا و همکاران [۲۷] اثر افزودن سیلیسیم را مورد مطالعه قرار دادند. طبق این بررسی ظرفیت برشی هشت تیر با ۵۰٪ جایگزین سنگدانه بازیافتی نشان داد که تفاوت قابل توجهی در این حالت بین بتن معمولی و بتن ساخته شده از سنگدانه بازیافتی وجود ندارد ولی با افزودن سیلیس ترک خوردگی کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند.

ضعف بتن در کشش باعث ترک خوردگی اعضای بتنی می‌شود. هنگامی که یک تیر بتنی تحت خمش قرار می‌گیرد، با ایجاد کشش در قسمت تحتانی تیر، ترک‌های خمشی در وسط دهانه شکل می‌گیرد. با افزایش بار و ایجاد میدان کششی در اطراف تکیه‌گاه‌ها، ترک‌های مایل و برشی با توجه به میدان تنش کششی شروع به شکل گرفتن می‌کند. ترک خوردگی با افزایش بار گسترش پیدا کرده و عرض ترک‌ها زیاد می‌شود. در نهایت تیر گسیخته می‌شود. به منظور افزایش مقاومت کششی و جلوگیری از گسیختگی ناگهانی از آرماتورها استفاده می‌شود.

استفاده از آرماتورهای عرضی باعث کاهش عرض ترک‌های برشی و جلوگیری از شکست ترد و ناگهانی می‌شود. زمانی آرماتورگذاری بهترین عملکرد را در کاهش عرض ترک خوردگی‌ها دارد که آرماتور ترک را با زاویه ۹۰ درجه قطع کند. در مسائل اجرایی، قرار دادن خاموت‌ها به نحوی که تمام ترک‌ها را با زاویه ۹۰ درجه قطع کند تقریباً غیر ممکن است.

با توجه به بررسی‌های پیشین اثر استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی که مرجع تهیه آنها خرده آجر و سیمان خرد شده بود تا حدودی مشخص شد. با این وجود اثر فاصله آرماتور و استفاده از سایر منابع حاصل از تخریب ساختمان مورد ارزیابی قرار نگرفت. از این رو، در این بررسی از سنگ‌های شکسته شده حاصل از نمای یک ساختمان قدیمی تخریب شده به عنوان سنگدانه و همچنین اثر فاصله آرماتورهای عرضی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- روابط حاکم بر تعیین ظرفیت برشی

در این بررسی بعد از انجام آزمایش، نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌های CSA-A23 [۲۸]، ACI318-08 [۲۹] و Eurocode 2 [۳۰] و مکانیک شکست برای تعیین ظرفیت برشی مورد مقایسه قرار گرفت. ظرفیت برشی تیر بتن مسلح مطابق آیین نامه CSA-A23 بصورت زیر محاسبه می‌شود [۲۸].

$$V_r = V_c + V_s + V_p \quad (1)$$

در این رابطه V_r ، V_c ، V_s و V_p پارامترهای مقاومت برشی عضو است، که V_r نباید بیشتر از مقدار زیر باشد:

$$V_{r,max} = 0.25\phi_c f'_c b_w d_v + V_p \quad (2)$$

که در آن ϕ_c ضریب مقاومت بتن f'_c مقاومت فشاری بتن (مگا پاسکال)، b_w عرض مقطع نمونه (میلیمتر)، d_v ارتفاع موثر مقطع نمونه است که برابر با بیشینه مقدار $0.9d$ و $0.72h$ (ارتفاع مقطع) می‌باشد. افزون بر این، مقدار V_c از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_c = \phi_c \lambda \beta \sqrt{f'_c} b_w d_v \quad (3)$$

که در این رابطه λ و β به ترتیب ضرایب تعیین بتن کم تراکم و مقاومت برشی بتن ترک خورده می‌باشند. حداکثر مجاز V_c در این رابطه ۸ مگا پاسکال است. برای اعضا دارای آرماتور برشی مقدار V_s از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$V_s = \frac{\phi_c A_v f_y d_v \cot \theta}{S} \quad (4)$$

A_v مساحت آرماتور برشی (میلیمتر مربع)، f_y مقاومت تسلیم فولاد برشی (مگا پاسکال)، θ زاویه مورب تنش فشاری محور طولی عضو و S فاصله آرماتور عرضی (میلیمتر) می‌باشد که (A_v) برابر است با:

$$A_v = 0.06 \sqrt{f'_c} \frac{b_w S}{f_y} \quad (5)$$

ظرفیت برشی تیر بتن مسلح مطابق آیین‌نامه Eurocode 2-05 بصورت زیر به دست می‌آید [۲۹]:

$$V_{R,pred} = \begin{cases} V_{R,c} + V_{R,s} & \text{for } V_{R,c} + V_{R,s} < V_{R,max} \\ \max(V_{R,c}; V_{R,c}) \leq V_{R,max} & \text{for } V_{R,c} + V_{R,s} \geq V_{R,max} \end{cases} \quad (6)$$

که $V_{R,max}$ و $V_{R,c}$ ، $V_{R,s}$ و $V_{R,pred}$ به ترتیب مقاومت برشی تیر بتن مسلح (نیوتن)، مقاومت برشی بتن (نیوتن)، مقاومت برشی آرماتورهای عرضی (نیوتن) و مقدار حداکثر مجاز مقاومت برشی مجاز (نیوتن) می‌باشند. پارامترهای موجود در رابطه (۶) بصورت زیر به دست می‌آیند:

$$V_{R.c} = k_v \sqrt{f_c} z b_w \quad (7)$$

$$V_{R.s} = \frac{A_{sw}}{S} z f_{yw} \cot \theta \quad (8)$$

$$V_{R.max} = k_\varepsilon \eta_{fc} f_c z b_w \sin \theta \cos \theta \quad (9)$$

که z برابر است با $0.9d$ (میلیمتر)، b_w عرض مقطع (میلیمتر)، A_{sw} مساحت آرماتورهای عرضی (میلیمتر) و S فاصله آرماتورهای عرضی (میلیمتر) می‌باشند و سایر پارامترها با روابط زیر به دست می‌آیند:

$$V_{R.pred} = \begin{cases} V_{R.c} + V_{R.s} & \text{for } V_{R.c} + V_{R.s} < V_{R.max} \\ \max(V_{R.c}, V_{R.s}) \leq V_{R.max} & \text{for } V_{R.c} + V_{R.s} \geq V_{R.max} \end{cases} \quad (10)$$

$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0.75 \quad (11)$$

$$k_v = \begin{cases} = \frac{0.4}{1 + 1500\varepsilon_x} \times \frac{1300}{1000 + k_{dg}z} & \text{if } \rho_w = 0 \\ = \frac{0.4}{1 + 1500\varepsilon_x} \times \left(1 - \frac{V_{\varepsilon.test}}{V_{R.max.pred}}\right) \geq 0 & \text{if } \rho_w \geq 0.08\sqrt{f_c}/f_{yw} \end{cases} \quad (12)$$

$$\theta = 20^\circ + 10000\varepsilon_x \quad (13)$$

$$\varepsilon_x = \frac{V_{E.test} \left[\frac{d}{2} \left(\frac{a}{d} - 1 \right) + 1 \right]}{2E_s A_{sl}} \quad (14)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_x + (\varepsilon_x + 0.002) \cot^2 \theta \quad (15)$$

$$k_\varepsilon = \frac{1}{1.2 + 55\varepsilon_1} \leq 0.65 \quad (16)$$

$$\eta_{fc} = \left(\frac{30}{f_c} \right)^{1/3} \leq 1.0 \quad (17)$$

که ε_x کرنش طولی در میانه عمق تیر (میلیمتر-میلیمتر)، E_s مدول الاستیسیته فولاد عرضی (نیوتن بر میلیمتر مربع) و d_g بزرگترین قطر سنگدانه (میلیمتر) می‌باشند.

همچنین بر اساس آیین نامه ACI 318 مقاومت برشی تیرهای بتنی تقویت شده با فولاد عرضی مطابق فرمول زیر حساب

می‌شود [۳۰]:

$$V = V_s + V_c \quad (18)$$

$$V_s = n A_v f_s = \frac{\rho}{S} A_v f_s = \frac{A_v f_{st} d}{s} \quad (19)$$

$$V_c = (0.6\sqrt{f'_c} + 2500\rho_w \frac{V_u d}{M_u}) b_w d \leq 0.29\sqrt{f'_c} b_w d \quad (20)$$

که در آن A_v مساحت آرماتور عرضی (میلیمتر مربع)، f_{st} تنش تسلیم آرماتور عرضی (مگا پاسکال)، s فاصله آرماتور عرضی

(میلیمتر)، ρ_w نسبت آرماتور عرضی، V_u و M_u به ترتیب نیروی برشی و لنگر در وسط دهانه (نیوتن-میلیمتر) می‌باشند

۳- مشخصات مصالح و هندسه نمونه‌ها

۳-۱- 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٪ در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. در شکل (۱)

و (۲) به ترتیب نمونه‌ای از سنگدانه طبیعی و بازیافتی نشان داده شده است. همچنین منحنی دانه بندی این سنگدانه‌ها در سه طرح اختلاط

با درصد جایگزینی مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است سنگدانه‌ها از لحاظ دانه‌بندی به هم نزدیک می‌باشند.

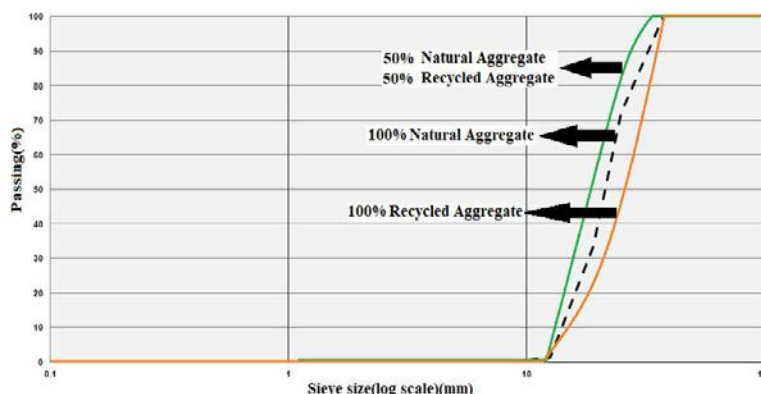
به منظور بررسی رفتار سنگدانه‌ها در نمونه‌های تهیه شده مشخصات فیزیکی و شیمیایی آنها مورد بررسی قرار گرفت و به ترتیب در جدول (۱) و (۲) ارائه شد. افزون بر این ترکیبات شیمیایی این سنگدانه‌ها با انجام آزمایش XRD^۱ به کمک اشعه ایکس انجام شد و ترکیبات سازنده آنها مورد بررسی قرار گرفت نتایج این بررسی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۲: سنگدانه بازیافتی



شکل ۱: سنگدانه طبیعی



شکل ۳: منحنی دانه بندی سنگدانه ها

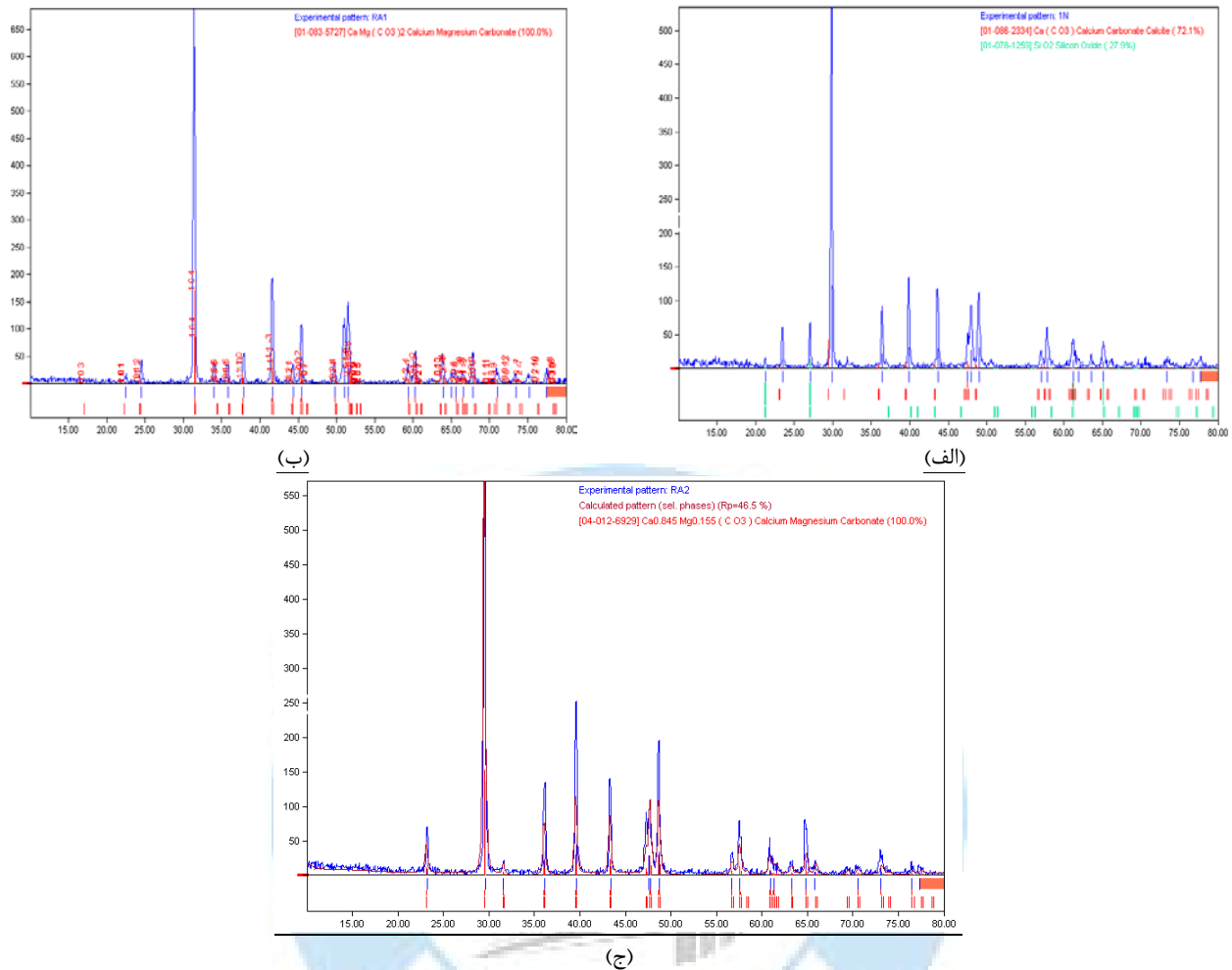
جدول ۱: مشخصات فیزیکی سنگدانه ها

نوع سنگدانه	چگالی ظاهری (g/cm ³)	مدول بالک (g/cm ³)	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 ۲: مشخصات شیمیایی سنگدانه ها

نوع سنگدانه ها			مشخصات اجزا
بازیافتی نوع ۲	بازیافتی نوع ۱	طبیعی	
-	-	۷۲/۱	Ca(Co3) (%)
-	-	۲۷/۹	Sio2 (%)
-	۱۰۰	-	Ca Mg(Co3)2 (%)
۱۰۰	-	-	Ca Mg(Co3) (%)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	میزان امشخصات انکسار (/.)
۲۵/۱۲	۱۸/۵۸	۲۲/۲۳	تابش پس زمینه (/.)
۷۴/۸۸	۸۱/۴۲	۷۷/۷۷	بیشینه انکسار (/.)
۴۷/۱۵	۵۳/۱۵	۱۶/۰۸	بیشینه مساحت زیر سطح انتخاب شده (/.)
-	-	۱۱/۱۰	بیشینه مساحت فاز A (کلسیم کربنات کلسید) (/.)
-	-	۴/۹۹	بیشینه مساحت فاز ۲ (سیلیکون اکسید) (/.)
۴۷/۱۵	۵۳/۱۵	-	بیشینه مساحت فاز A (کلسیم مگنسیوم کربنات) (/.)

¹ X-Ray Diffraction Analysis



شکل ۴: آزمایش XRD سنگدانه (الف) سنگدانه طبیعی، (ب) سنگدانه بازیافتی نوع اول و (ج) سنگدانه بازیافتی نوع دوم

۲-۳- بتن

در تهیه بتن از سیمان تیپ سه استفاده شد. طرح اختلاط بتن مورد نظر در جدول (۳) ارائه شده است. هنگام بتن ریزی نمونه‌ها، شش 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 و سه نمونه برای تعیین مقاومت کششی استفاده شد. یک نمونه به عنوان نمونه شاهد و فاقد سنگدانه بازیافتی 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 و برابر ۰٫۴۱ در نظر گرفته شد و برای جلوگیری از افت مقاومت فشاری بتن به کمک فوق روان کننده اسلامپ نمونه‌ها کنترل شد. قابل ذکر است که سنگدانه بازیافتی از نوع درشت‌دانه بوده و با درصد جایگزینی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ جایگزین مقدار درشت‌دانه شد.

جدول ۳: طرح اختلاط بتن

نام نمونه	آب ($\frac{Kg}{m^3}$)	سیمان ($\frac{Kg}{m^3}$)	سنگدانه بازیافتی ($\frac{Kg}{m^3}$)	درشتدانه طبیعی ($\frac{Kg}{m^3}$)	ریز دانه طبیعی ($\frac{Kg}{m^3}$)
100RA	۱۶۵	۴۰۰	۰	۸۴۰	۹۵۰
50RA	۱۶۵	۴۰۰	۴۲۰	۴۲۰	۹۵۰
0RA	۱۶۵	۴۰۰	۸۴۰	۰	۹۵۰

برای حصول اطمینان از مقاومت نمونه‌های مورد نظر، از هر نمونه، سه عدد نمونه‌ی استوانه‌ای تحت آزمایش فشار قرار داده شد. متوسط مقاومت فشاری سه نمونه‌ی استوانه‌ای از هر نمونه اصلی، به عنوان مقاومت فشاری آن نمونه منظور شد. نتایج به‌دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴: تست مقاومت فشاری نمونه‌ها

نام نمونه	مقاومت فشاری نمونه‌ها (MPa)			متوسط مقاومت فشاری (MPa)	ضریب انحراف از میانگین
	استوانه‌ی اول	استوانه‌ی دوم	استوانه‌ی سوم		
100RA-WTD	۳۵	۳۳	۲۷	۳۵/۰	۱/۶۳
100RA-20TD	۳۹	۳۵	۳۸	۳۷/۳	۱/۶۹
100RA-10TD	۳۴	۳۸	۲۶	۳۶/۰	۱/۶۳
50RA-WTD	۳۵	۳۳	۲۷	۳۵/۰	۱/۶۳
50RA-20TD	۳۶	۳۷	۲۵	۳۵/۰	۰/۸۱
50RA-10TD	۳۶	۳۷	۲۵	۳۵/۰	۰/۸۱
0RA-WTD	۴۰	۴۰	۳۸	۳۹/۳	۰/۹۴
0RA-20TD	۳۵	۳۷	۳۹	۳۷/۳	۱/۶۳
0RA-10TD	۳۶	۳۶	۳۵	۳۵/۶	۰/۴۷

۳-۳- 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 (۵)، 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 به‌دست آمده، در جدول (۵) ارائه شده است.

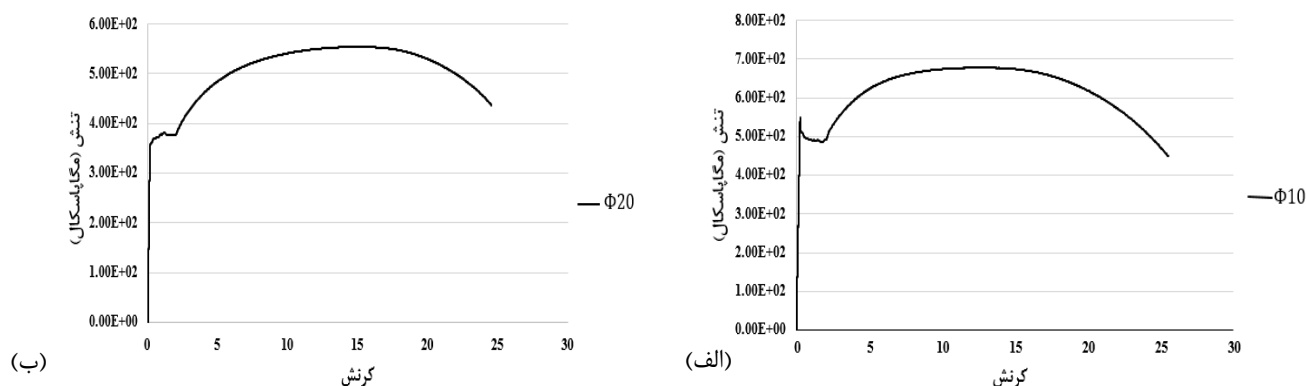


شکل ۵: دستگاه کشش آرماتور

جدول ۵: نتایج آزمایش میلگرد

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

در آزمایش انجام شده، افزون بر مقاومت تسلیم و نهایی آرماتورها، منحنی تنش-کرنش آرماتورهای طولی در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶: منحنی تنش-کرنش آرماتورهای طولی مورد استفاده، الف) $\Phi 10$ ب) $\Phi 20$

۹ نمونه تیر بتن مسلح به عرض مقطع ۱۵۰، ارتفاع ۲۰۰ و طول ۱۵۰۰ میلی‌متر، جهت بررسی رفتار برشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده از درصد متفاوت سنگدانه بازیافتی ساخته شد. نسبت درصد فولاد کششی موجود به فولاد کششی حالت بالانس نمونه برابر با ۶۶/۸٪ است. در تمامی نمونه‌ها از میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر برای آرماتور فشاری، قطر ۲۰ میلی‌متر برای آرماتور کششی و از آرماتور به قطر ۸ میلی‌متر جهت تسطیح عرضی استفاده شد. در شکل (۷) به ترتیب نمونه‌ای از قالب‌بندی، آرماتوربندی و نمونه‌ی بتن‌ریزی شده نشان داده شده است.



(ج)



(ب)



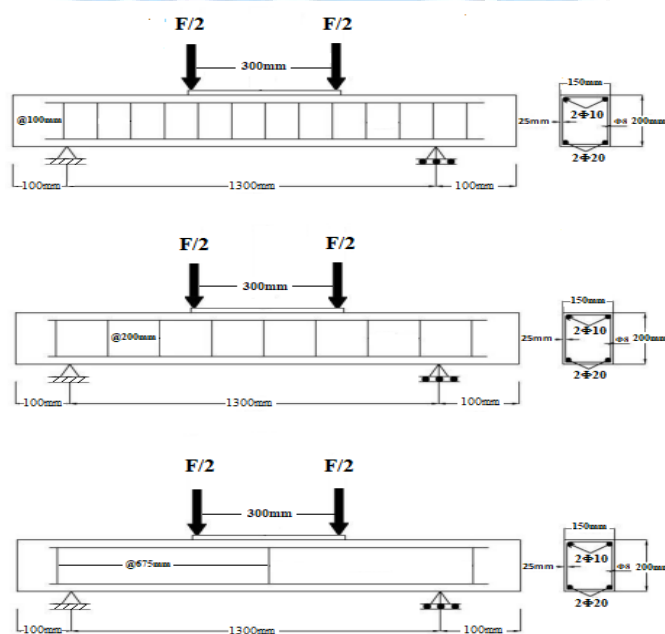
(الف)

شکل ۷: مراحل تهیه نمونه‌ها الف) قالب‌بندی انجام شده، ب) آرماتوربندی انجام شده برای نمونه‌ها و ج) بتن‌ریزی انجام شده

در نمونه‌ها سنگدانه بازیافتی با درصد وزنی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ جایگزینی سنگدانه طبیعی استفاده شد. همچنین فواصل آرماتورهای عرضی در نمونه‌های مختلف ۵۰۰ میلی‌متر، ۲۰۰ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ابعاد هندسی و آرایش میلگردهای طولی و عرضی و تعریف نمونه‌ها به ترتیب در شکل (۸) و جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶: نامگذاری و مشخصات نمونه ها

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



شکل ۸: ابعاد هندسی نمونه‌ها، آرایش میلگردهای طولی و عرضی نمونه و بارگذاری

در جدول (۶) ضریب RA و TD به ترتیب بیانگر درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی و فاصله آرماتورهای عرضی است. همچنین W بیانگر نمونه‌های فاقد آرماتور عرضی است. در نمونه فاقد آرماتور عرضی سه عدد آرماتور عرضی با فاصله ۵۰۰ میلی‌متر استفاده شده که هدف از استفاده این آرماتورها حفظ فاصله بین آرماتور کششی و فشاری بوده است.

۳-۴- دستگاه بارگذاری

نمونه‌های تهیه شده بعد از ۲۸ روز تحت خمش چهارنقطه ای قرار داده شدند. فاصله‌ی بین نقطه‌های بارگذاری ۳۰۰ میلی‌متر بود. بارگذاری بصورت کنترل جابجایی انجام شد و بارگذاری تا زمان تسلیم نمونه‌ها انجام شد. بار محاسباتی، بار کل جک است. بارگذاری تا لحظه‌ی نهایی گسیختگی تیر افزایش داده شد. تغییر شکل تیر در هر مرحله به کمک LVDT قرار داده شده در وسط تیر اندازه‌گیری شد.

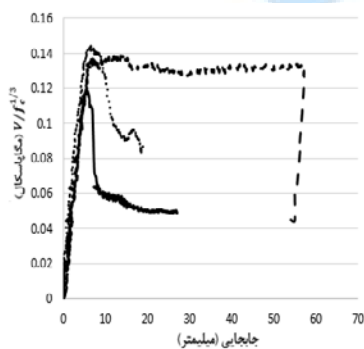
همچنین به منظور تعیین کرنش یک کرنش سنج در زیر تیر و در وسط دهانه قرار داده شد. در شکل (۹) نحوه ی بارگذاری نمونه ها نشان داده شده است.



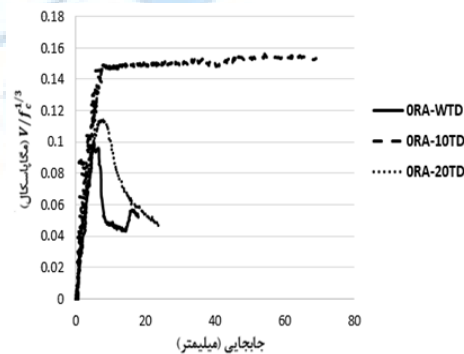
شکل ۹: دستگاه بارگذاری و نحوه ی بارگذاری نمونه ها

۴- بحث نتایج

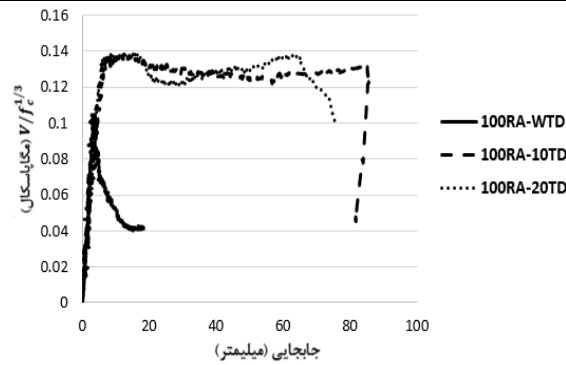
به منظور بررسی اثر درصد جایگزین سنگدانه بازیافتی بر رفتار برشی تیرهای بتن مسلح نمودار نیروی برشی نرمال شده-تغییر مکان وسط دهانه در شکل (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. در این نمونه ها اثر فاصله آرماتور عرضی نیز در نظر گرفته شده است. همانطور که از این شکل مشخص است در نمونه هایی که سنگدانه طبیعی داشته و سنگدانه بازیافتی جایگزین نشده با کاهش فاصله آرماتورهای برشی، مقاومت برشی افزایش می یابد. افزون بر این کاهش فاصله آرماتورهای عرضی تاثیر قابل توجهی بر تغییر شکل نمونه ها دارد. جاگزینی سنگدانه بازیافتی و کاهش فاصله آرماتور برشی با کاهش ترک های برشی ظرفیت برشی نمونه افزایش قابل توجهی پیدا کند. افزون بر این استفاده از سنگدانه های بازیافتی با درصد جاگزینی ۱۰۰٪ باعث افزایش قابل ملاحظه ی ظرفیت برشی نمونه و شکل پذیری آن می شود. این تغییرات در نمونه های دارای آرماتور برشی به فواصل ۲۰۰ میلیمتر و ۱۰۰ میلیمتر نیز قابل مشاهده است با این تفاوت که کاهش فاصله آرماتور برشی به ۱۰۰ میلیمتر و استفاده از ۱۰۰٪ سنگدانه بازیافتی تغییر مکان وسط نمونه بیشتری مقدار را دارد.



(ب)



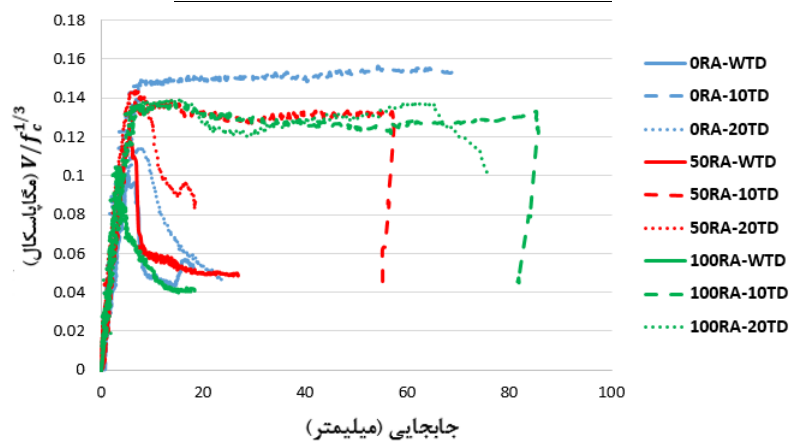
(الف)



(ج)

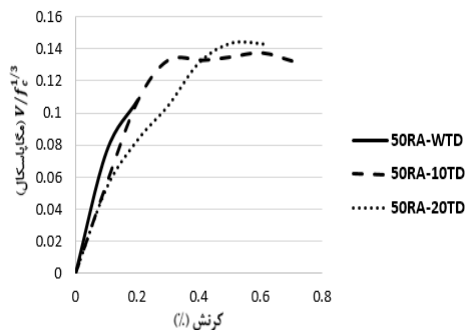
شکل ۱۰: نمودار برش نرمال شده-تغییر مکان وسط دهانه تیر الف) بدون سنگدانه بازیافتی، ب) ۵۰٪ جایگزینی سنگدانه بازیافتی و ج) ۱۰۰٪ جایگزینی سنگدانه

بازیافتی با در نظر گرفتن فواصل آرمانتور عرضی مختلف

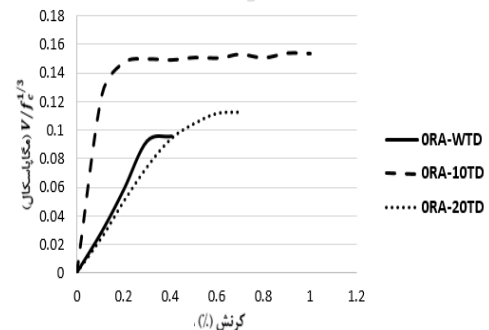


شکل ۱۱: نمودار برش نرمال شده-تغییر مکان وسط دهانه تیر با درصد سنگدانه بازیافتی و فواصل آرمانتور عرضی مختلف

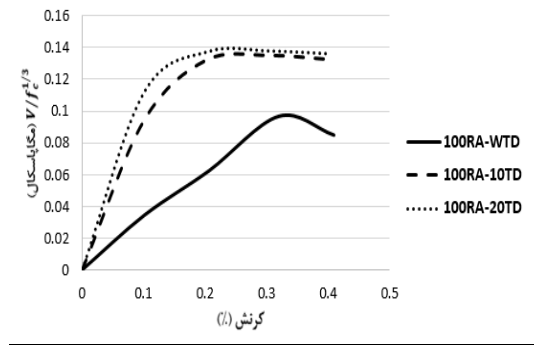
همانطور که از شکل (۱۱) مشاهده می‌شود استفاده از سنگدانه بازیافتی نه تنها سبب کاهش مقاومت برشی نمونه نمی‌شود بلکه باعث افزایش قابل ملاحظه‌ی ظرفیت برشی و تغییر شکل تیرهای بتن مسلح ساخته شده با این سنگدانه ها دارد. از عامل های بسیار مهم در تغییر شکل و ترک خوردگی نمونه‌ها و تعیین رفتار برشی تیرهای بتن مسلح کرنش ایجاد شده در بتن است. بدین منظور، نمودار برش نرمال شده-کرنش بتن در وسط دهانه با استفاده از یک کرنش سنج نصب شده در زیر تیر و در وسط دهانه اندازه‌گیری و در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) برای نمونه با درصد جایگزینی سنگدانه و فاصله آرمانتور عرضی مختلف نشان داده شده است.



(ب)

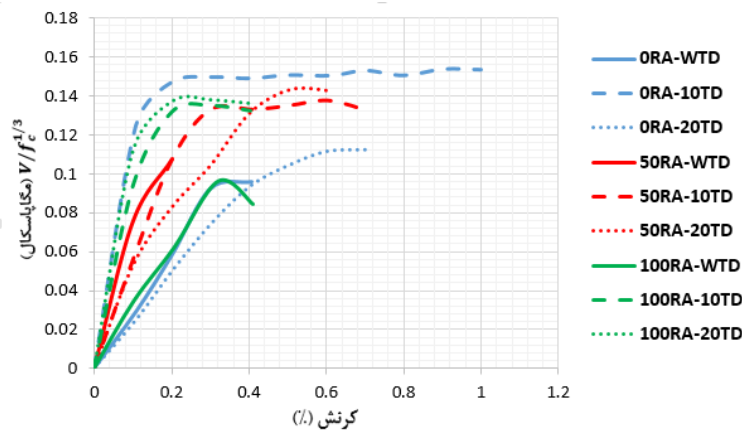


(الف)



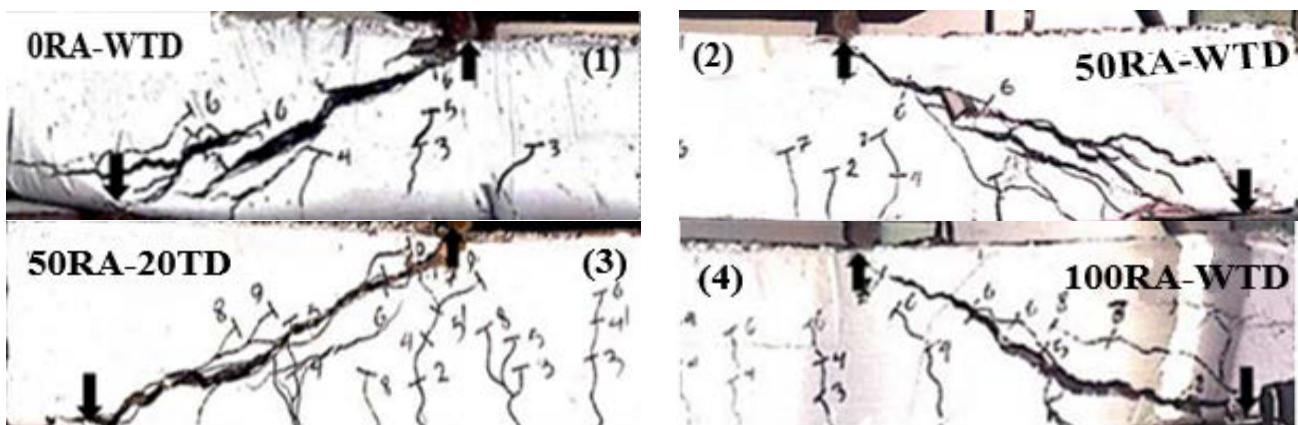
(ج)

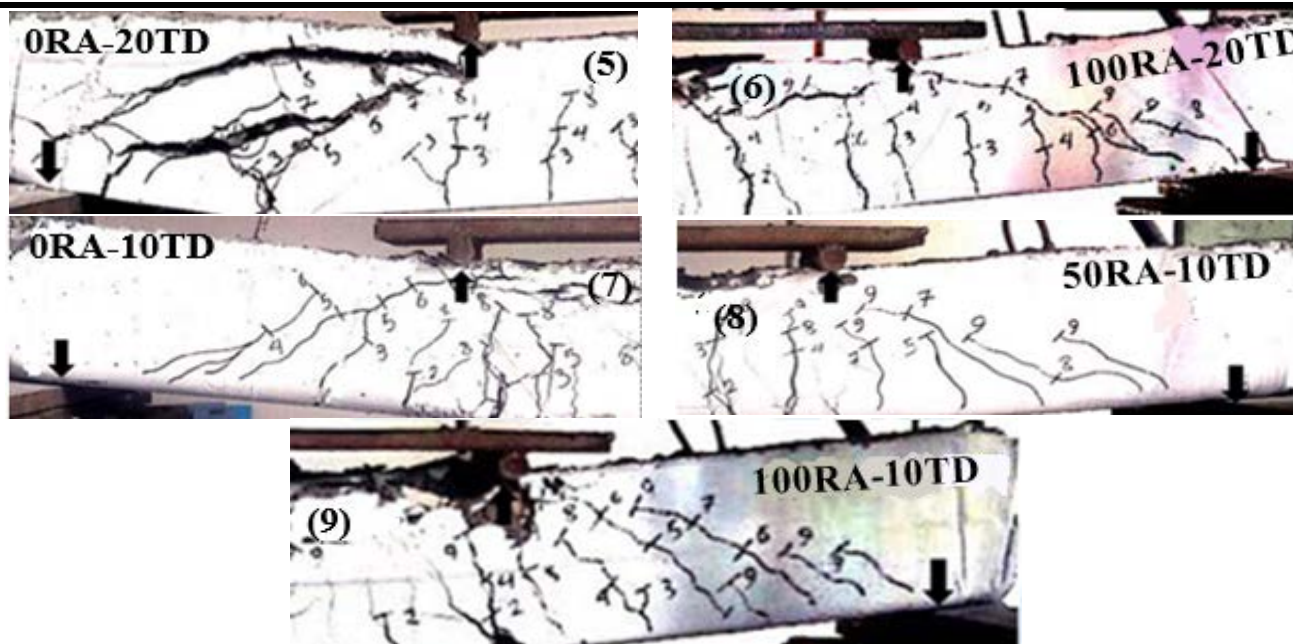
شکل ۱۲: نمودار برش-کرنش بتن وسط دهانه تیر الف) بدون سنگدانه بازیافتی، ب) ۵۰٪ جایگزینی سنگدانه بازیافتی و ج) ۱۰۰٪ جایگزینی سنگدانه بازیافتی با در نظر گرفتن فواصل آرماتور عرضی مختلف



شکل ۱۳: نمودار برش-کرنش بتن وسط دهانه تیر با درصد سنگدانه بازیافتی و فواصل آرماتور عرضی مختلف

مطابق شکل (۱۲) مشخص می‌شود که با کاهش فاصله خاموت‌ها کرنش بهبود بیشتری پیدا می‌کند. افزون بر این افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی سبب می‌شود تا بیشینه ظرفیت برشی افزایش یافته و نمونه در کرنش کمتر و با بروز ترک برشی در بیشینه ظرفیت برشی بصورت ناگهانی شکسته شود. علت این امر را می‌توان در وجود سطوح شکسته بیشتر در سنگدانه بازیافتی نسبت به سنگدانه طبیعی دانست که با افزایش قابل توجه ظرفیت برشی باعث شکست ناگهانی می‌شود. استفاده از سنگدانه بازیافتی با سطوح شکسته بیشتر نسبت به سنگدانه طبیعی باعث پیوستگی بهتر سنگدانه با خمیر سیمان می‌شود که همین سبب افزایش قابل توجه ظرفیت برشی نمونه می‌شود. در نمونه‌ها یکی از عوامل بسیار موثر بخصوص در نمونه‌هایی که بصورت برشی دچار شکست شدند تعبیه مقدار کافی آرماتور عرضی است که با اینکار نیز عرض ترک برشی بخصوص در لحظه شکست نمونه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. از این رو در شکل (۱۴) توزیع ترک خوردگی و مسیر گسترش ترک در این نمونه‌ها نشان داده شده است.

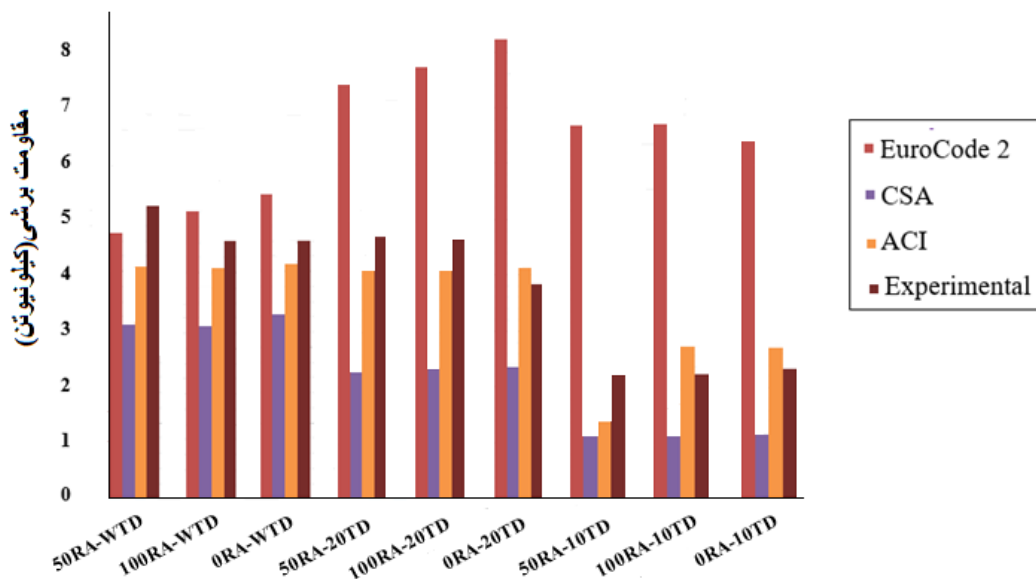




شکل ۱۴: ترک خوردگی برشی و گسترش ترکهای برشی در هنگام بارگذاری

با توجه به شکل (۱۴)، فقدان آرماتور عرضی باعث شکست برش نمونه ها می شود. در این تیرها، ترکهای مورب در اطراف تکیه گاهها رخ داده و با افزایش بار وارده افزایش یافته است. همانطور که در شکل ملاحظه می شود عرض ترکهای برشی با افزایش مقدار سنگدانه بازیافتی کاهش می یابد. که دلیل آن را می توان وجود پیوستگی بیشتر در سنگدانه بازیافتی بدلیل تیز گوشه بودن آنها در بتن دانست. وجود آرماتور عرضی با فاصله ۲۰۰ میلی متر باعث کاهش عرض ترکهای برشی می شود، اما در نمونه هایی با آرماتور عرضی با فاصله ۲۰۰ میلی متر نیز شکست برشی رخ داده است. افزون بر این وجود آرماتور عرضی با فاصله ۱۰۰ میلی متر، رفتار برشی نمونه ها را بهبود می بخشد. این نمونه ها با جابجایی بیشتری در وسط دهانه گسیخته شده است و ظرفیت باربری تیرها در این حالت افزایش می یابد. همانطور که از شکل (۱۴) مشخص است استفاده توام از سنگدانه بازیافتی و تعبیه آرماتور عرضی به فاصله ۱۰۰ میلی متر تاثیر بسزایی در بهبود رفتار برشی تیرها داشته است. استفاده از ۱۰۰٪ سنگدانه بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی در تهیه بتن باعث می شود تا عرض ترکهای برشی کاهش یافته و تیر با ظرفیت برشی بیشتر دچار شکست شود.

در طراحی و ساخت تیرهای بتن مسلح آیین نامه های مختلف روابطی به منظور پیش بینی ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح ارائه کرده اند. این روابط بر پایه رفتار تیرهای بتن مسلح دارای سنگدانه طبیعی برقرار شده است. از این بررسی میزان اعتماد به این روابط و یا ضعف آنها در پیش بینی ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده از سنگدانه بازیافتی دارای اهمیت است. از این رو، برای ارزیابی نتایج استفاده از سنگدانه بازیافتی بر رفتار برشی تیرهای بتن مسلح، نتایج آزمایشگاهی به دست آمده با آیین نامه های ACI318-08 و Eurocode 2 مقایسه شده است.



شکل ۱۵: مقایسه مقاومت برشی بدست آمده با روابط پیشنهاد شده

نتایج به دست آمده در شکل (۱۵) نشان داده شده است. طبق شکل (۱۵)، آیین‌نامه‌های ACI و CSA می‌توانند مقاومت برشی را در صورت استفاده از سنگدانه بازیافتی به خوبی پیش‌بینی کنند اما آیین‌نامه Eurocode 2 زمانی که فاصله آرماتورها را کاهش داده می‌شود و از ۱۰۰٪ سنگدانه بازیافتی استفاده می‌شود با ضریب اطمینان خیلی بیشتری مقاومت برشی را پیش‌بینی می‌کند که البته این پیش‌بینی در نمونه‌هایی که فاقد آرماتور عرضی می‌باشد به واقعیت نزدیک‌تر می‌شود. در آیین‌نامه‌های ACI و CSA، زمانی که سنگدانه بازیافتی کاملاً جایگزین سنگدانه طبیعی می‌شود مقاومت برشی را نمی‌تواند تعیین نماید بخصوص در نمونه‌هایی که فاصله آرماتور برشی با فاصله ۲۰۰ میلی‌متر تعبیه شده است. در مجموع آیین‌نامه‌های ACI و CSA می‌توانند به طور مناسب مقاومت برشی را پیش‌بینی کنند، در صورتی که آیین‌نامه Eurocode 2 در نمونه‌هایی که فاصله آرماتور عرضی به ۲۰۰ و ۱۰۰ میلی‌متر کاهش پیدا می‌کند، نمی‌تواند به درستی مقاومت برشی را پیش‌بینی کرده و نتایج آن قابل اعتماد نمی‌باشد. افزون بر این روابط آیین‌نامه‌ی CSA بسیار دست بالا است.

۵- نتیجه گیری

در این بررسی اثر استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی جایگزین سنگدانه‌های طبیعی در ساخت تیرهای بتنی مورد مطالعه قرار گرفت. هدف از این بررسی تعیین رفتار برشی تیرهای بتنی و مقایسه نتایج به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی با روابط ارائه شده در آیین‌نامه‌ها است. بدین منظور ۹ نمونه تیر بتن مسلح به عرض مقطع ۱۵۰ میلی‌متر، ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و طول ۱۵۰۰ میلی‌متر ساخته شد. سنگدانه بازیافتی با درصد جایگزینی ۰٪، ۵۰٪ و ۱۰۰٪ به مخلوط بتن اضافه شد. افزون بر آن آرماتورهای عرضی با فاصله ۵۰۰ میلی‌متر، ۲۰۰ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر در نمونه‌ها تعبیه شد. از این رو، با توجه به این بررسی نتایج زیر به دست آمد:

۱. سنگدانه‌های بازیافتی مصالح مناسبی برای ساخت بتن سازه‌ای و اعضای اصلی سازه‌های بتن مسلح نظیر تیرها است. قابل ذکر است که دست‌یابی به نتیجه‌ی مناسب زمانی امکان‌پذیر است که منبع استفاده برای تهیه سنگدانه بازیافتی باید مناسب باشد.
۲. با جایگزینی سنگدانه بازیافتی ظرفیت برشی افزایش می‌یابد. این در حالی است که بعد از رسیدن به بیشینه ظرفیت برشی، افت ظرفیت در نمونه فاقد سنگدانه بازیافتی بیشتر است و تغییر مکان در نمونه با جایگزین سنگدانه بازیافتی بیشتر از نمونه شاهد است.
۳. با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی عرض ترک‌ها کاهش یافته و ترک خوردگی گسترش بیشتری پیدا می‌کند.

۴. با کاهش فاصله خاموت‌ها کرنش بهبود بیشتری پیدا می‌کند. افزون بر این افزایش درصد جایگزینی سنگدانه بازیافتی سبب می‌شود تا بیشینه ظرفیت برشی افزایش یافته و نمونه در کرنش کمتر و با بروز ترک برشی در بیشینه ظرفیت برشی بصورت ناگهانی شکسته شود. علت این امر را می‌توان در وجود سطوح شکسته بیشتر در سنگدانه بازیافتی نسبت به سنگدانه طبیعی دانست.
۵. در صورت استفاده از سنگدانه بازیافتی باید آرماتور عرضی به میزان کافی در طول تیر تعبیه شود.
۶. در تعیین ظرفیت برشی تیرهای ساخته شده از سنگدانه بازیافتی آیین‌نامه ACI و CSA را بخوبی ارائه می‌کند و برای پیش‌بینی ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح دارای سنگدانه بازیافتی قابل استفاده است در حالی که آیین‌نامه CSA ظرفیت برشی را دست بالاتر پیش‌بینی می‌کند. از طرف دیگر آیین‌نامه Eurocode 2 ظرفیت برشی را با تخمین نامناسبی پیش‌بینی می‌کند و استفاده از روابط این آیین‌نامه مناسب نمی‌باشد.

مراجع

- [1] Pedro, D., Brito, J. De and Evangelista, L. (2015). Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste – influence of the crushing process., *Mater. Struct.* 48 (12) 3965–3978.
- [2] Pedro, D., Brito, J. De and Evangelista, L. (2014). Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Constr. Build. Mater.* 71 141–151.
- [3] André, A., Brito, J. De, Rosa, A. and Pedro, D. (2014). Durability performance of concrete incorporating coarse aggregates from marble industry waste. *J. Cleaner Prod.* 65 389–396.
- [4] Seo, D.S. and Choi, H.B. (2014). Effects of the old cement mortar attached to the recycled aggregate surface on the bond characteristics between aggregate and cement mortar. *Constr. Build. Mater.* 59. 72–77.
- [5] Marie, I. and Quiasrawi, H. (2012). Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *J. Cleaner Prod.* 37 243–248.
- [6] Koenders, E. Pepe, M. and Martinelli, E. (2014) "Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates", *Cem. Concr. Res.* 56. 203–212.
- [7] Bravo, M., Brito, J. De Pontes, J. and Evangelista, L. (2015). Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Constr. Build. Mater.* 77. 357–369.
- [8] Yildirim, S., Meyer, C. and Herfellner, S. (2015). Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze–thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 91. 288–296.
- [9] Qasrawi, H. and Marie, I. (2013). Towards better understanding of concrete containing recycled concrete aggregate. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 8.128-145.
- [10] Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W. Chong, L. and Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate: a review. *J. Cleaner Prod.* 112. 466–472.
- [11] Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Build. Environ.* 42. 407–415.
- [12] Bru, K. Touz, S. Bourgeois, F. Lippiatt, N. and Menard, Y (2014). Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. *Int. J. Miner. Process.* 126. 90–98.
- [13] Katz, A. (2004). Treatments for the improvement of recycled aggregate. *J. Mater. Civ. Eng.* 16. 597–603.
- [14] Ismail, S. and Ramli, M. (2013). Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Constr. Build. Mater.* 44. 464–476.
- [15] Spaeth, V. and Tegguer, A. (2013). Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. *Int. J. Sustainable Built Environ.* 2. 143–152.
- [16] Kou, S.C. and Poon, C.S. (2010). Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates. *Cem. Concr. Compos.* 32. 649–654.
- [17] Dilbas, H. Simsek, M. and Cakir, O. (2014). An investigation on mechanical and physical properties of recycled aggregate concrete (RAC) with and without silica fume. *Constr. Build. Mater.* 61. 50–59.
- [18] Tam, V. Tam, C.M. and Le, K.N. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resour. Conserv. Recycl.* 50. 82–101.
- [19] Ismail, S. and Ramli, M. (2014). Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 68. 726–739
- [20] Xiao, J. Xie, H. and Yang, Z. (2012). Shear transfer across a crack in recycled aggregate concrete. *Cem. Concr. Res.* 42. 700–709.
- [21] Kim, S.W., Jeong, C.Y., Lee, J.S. and Kim, K.H. (2013). Size effect in shear failure of reinforced concrete beams with recycled aggregate. *J. Asian Archit. Build. Eng.* 12. 323–330.
- [22] Arezoumandi, M. Smith, A., Volz, J. and Khayat, K. (2015). An experimental study on flexural strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate. *Eng. Struct.* 88. 154–162.
- [23] Reis, N., Brito, J. De, Correia, J. and Arruda, M. (2015). Punching behaviour of concrete slabs incorporating coarse recycled concrete aggregates. *Eng. Struct.* 100. 238–248.

- [24] Schubert, S., Hoffmann, C. Leemann, A., Moser, K. and Motavalli, M. (2012). Recycled aggregate concrete: experimental shear resistance of slabs without shear reinforcement. *Eng. Struct.* 41, 490-497.
- [25] Li, C.Y., Li, G.X., Shao, W. Guo, Q. and Liu, R. (2013). Shear-crack behaviors of reinforced fullrecycled aggregate concrete beams. *Appl. Mech. Mater.* 43, 794-799.
- [26] Fathifazl, G., Razaqpur, A.G. Isgor, O. Abbasd, A. Fournier, B. and Foo, S. (2011). Shear capacity evaluation of steel reinforced recycled concrete (RRC) beams. *Eng. Struct.* 33, 1025-1033.
- [27] Fonteboa G., Abella, M. Lage, M. and Lopez, E. (2009). Structural shear behaviour of recycled concrete with silica fume. *Constr. Build. Mater.* 23, 3406- 3410.
- [28] CSA A23.3-14, (2014). *Design of concrete structures*, a trade-mar k of the Canadian Standards Association, operating as "CSA Group" published in June 2014 by CSA Group.
- [29] European Committee for Standardization. Eurocode No. 2. (2005). *Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings*.
- [30] ACI 318RM-14, (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

