شکل پذیری اعضاء خمشی بتن مسلح پرآرمه ساخته شده با بتن مقاومت بالا

یاسرشریفي[i] *؛ علي اكبر مقصودي[ii]

چکیده

شکست اعضاء بتن مسلح (با فولاد زیاد) ساخته شده از بتن مقاومت بالا، ترد و ناگهانی است، بنابراین بررسی شکل‌پذیری چنین اعضایی اهمیت ویژه دارد. بدین منظور در تحقیق حاضر تعداد شش عدد تیر داراي بتن با مقاومت بالا با درصد فولاد کششي و فشاري متغیر شده ساخته و به کمک نصب ابزارهای دقیق اندازه‌گیری، بصورت آزمایشگاهي بررسي شدند. تیرها تحت بار فزاینده تا مرحله تخریب، بارگذاري شده و مقادیر کرنش میلگردهای طولی کششی و فشاری و همچنین کرنش فشاری بتن همراه با خیز در چند نقطه در طول تیر در حین افزایش بار ثبت شد. بمنظور بررسي تاثیر فولاد فشاري بر شکل‌پذیري، نتایج بدست آمده از تیرهاي داراي فولاد مضاعف با نتایج تیرهاي مشابه دارای فقط فولاد کششي مقایسه شده است. نتایج تحلیل آزمایشگاهی با نتایج تئوری برگرفته از آیین‌نامه‌های CSA و ACI مقایسه شده است. در این مقاله همچنین مقایسه شکل‌پذیري جابجایي و شکل‌پذیري انحناء اعضاء نیز صورت گرفته است.

کلمات کلیدي

شکل‌پذیری، بتن با مقاومت زیاد، اعضاء خمشي با فولاد زیاد، آیین‌نامه‌های ACI و CSA

Ductility Performance of Heavily Steel Reinforced Concrete Flexural Members with High Strength Concrete

Y. Sharifi and A. A. Maghsoudi

ABSTRACT

The nature of fracture in reinforced high strength concrete (HSC) members is brittle and therefore in the seismic areas the ductility investigation of heavily reinforced HSC members is important. Six reinforced HSC beams with different percentage of tensile and high compression bars with attaching electrical strain gauges cast and loaded experimentally up to failure. During the test, the strains on the concrete middle face and on the tension and compression bars along with deflection at different points of the span length measured. Ductility of doubly reinforced members was compared with the singly reinforced members. The theoretical results based on ACI and CSA codes have been compared with the experimental results. In this paper, the displacement and curvature ductility of such members are also reported.

KEYWORDS

Ductility, HSC, heavily reinforced members, codes

تاریخ دریافت مقاله:۱۳۸۶/۶/۱۱

تاریخ اصلاحات مقاله:۱۳۹۱/۲/۱۰

[i] *نویسنده مسئول و استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه ولي‌عصر رفسنجان، y.sharifi@vru.ac.ir

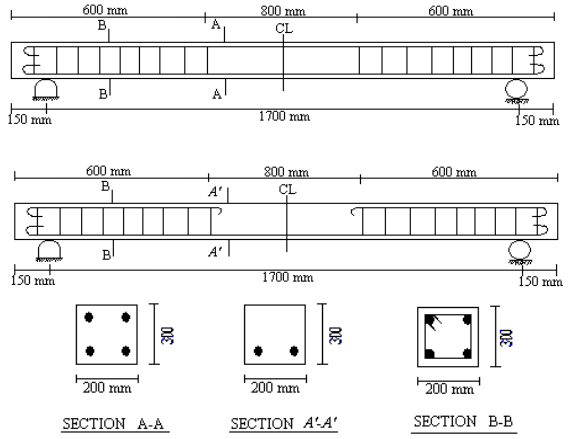
ii دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، maghsoudi.a.a@uk.ac.ir

۱- مقدمه

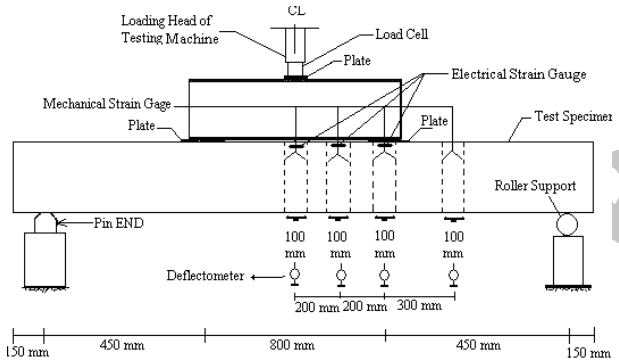
امروزه کاربرد بتن با مقاومت زیاد در سازه‌ها با توجه به خصوصیات و مزایای قابل توجه آنها به سرعت رو به افزایش است. مسئله‌اي که در طراحي مقاطع خمشي بتن مسلح بويژه بتن‌هاي با مقاومت زياد بدليل خصوصيات ترد بودن آنها مطرح است، لزوم شكل‌پذير بودن آنها به خصوص در مناطق زلزله‌خيز است. پارامترهاي زيادي مانند مقاومت فشاري بتن، درصد آرماتور كششي و فشاري، مقدار خاموت محصورکننده بتن، فاصله دو خاموت مجاور، مقاومت تسليم فولادهاي طولي و نسبت عرض به عمق و همچنين شكل هندسي مقطع بر شكل‌پذيري سازه‌هاي بتني موثرند [٦-١]. تحقيقات نشان می‌دهند برخلاف اینکه مطالعات محدودی درباره تیرهای بتن مسلح کم آرمه دارای بتن با مقاومت زیاد موجود است لیکن، تحقیق در زمینه شکل‌پذیری بتن‌های با مقاومت زیاد پر آرمه دیده نشد. این در حالیست که محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای، طراحان را به سوی طرح‌های کم آرمه سوق می‌دهند اما، آشنایی با عملکرد این نوع تیرهای پر آرمه از جنبه کاربردی و تحقیقاتی به خصوص برای مناطق با خطر زلزله کم اهمیت دارد. در این تحقیق، تیرهاي بتني داراي بتن با مقاومت زياد با درصد فولاد كششي و فشاري مختلف ساخته و تحت بارگذاري قرار گرفت. با رسم نمودارهاي لنگر- انحناء، بار- خيز، مقادير نسبت‌هاي شكل‌پذيري در مقاطع و كل تيرها به دو روش شكل‌پذيري انحنا (μ_φ) و شكل‌پذيري جابجايي (μ_Δ) تعيين شده و نتايج با نتايج تئوريك دو آيين‌نامه CSA و ACI كه در آنها استفاده از بتن‌هاي با مقاومت زياد مجاز شمرده شده است، مقايسه شده است.

۲- نمونه‌های آزمایشگاهی

شش عدد تير بتن مسلح با بتن مقاومت زياد به ابعاد ۳۰×۲۰ و طول ۲۰۰ سانتي‌متر ساخته شده و تحت بارگذاري دو نقطه‌اي قرار گرفتند. ۳ عدد تير داراي فولاد كششي و فشاري زياد و ۳ عدد تير مشابه ليكن داراي فقط فولاد كششي زياد كه بعضی گزارشهای آن در مرجع [۲] موجود است، مورد مقايسه قرار گرفته است. فولاد برشي فقط در بازوي برش قرار دارد و از فولاد برشي در منطقه ممان ثابت استفاده نشده است. در جدول (۱) جزئيات تيرها آمده است. درجدول، حرف B نشان‌دهنده تيرهايي كه در منطقه ممان ثابت فقط فولاد كششي دارند و حروف BC نشان دهنده تيرهايي كه در منطقه ممان ثابت داراي فولاد فشاري نيز هستند و اعداد ٦، ٧، ٨ و ١٣ نشان‌دهنده تغيير در مقدار فولاد كششي و فشاري مقطع است. در شكل (۱) اطلاعات مربوط به نوع، شكل مقطع تيرها، نحوه بارگذاری، محل نصب پولکی‌ها برای خواندن کرنش بتن وتکیه‌گاه‌ها آورده شده است.



(الف) جزئيات تيرهای آزمايش شده



(ب) نحوه قرارگيری و جزئيات تيرهای آزمايش شده

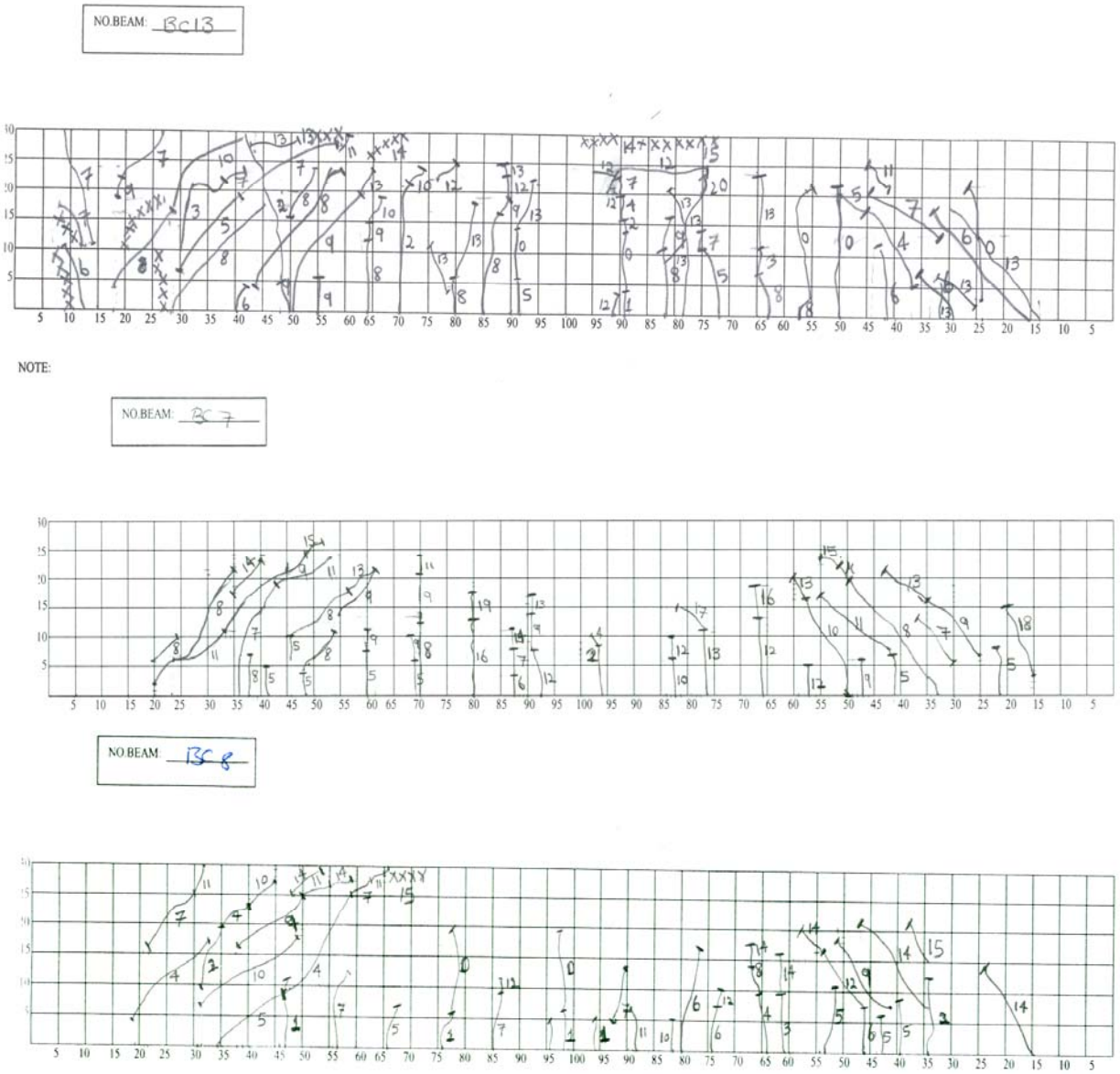
شكل (۱): جزئيات تيرهای آزمايش شده در هنگام بارگذاری

در شكل (۲) نوع و نحوه پيشرفت ترک‌ها با هر افزايش بار نشان داده شده است. فولاد برشي بنحوي طراحي شده است تا در بار نهايي از شكست برشي تير جلوگيري شود (بعبارت ديگر، سعی شده تا شكست خمشی مقدم بر شكست برشی شود). فاصله بين دو بار نقطه‌اي در تمام نمونه‌ها ثابت و برابر ۸۰۰ *mm* است. خيز در نقاط مختلف دهانه بوسيله خيزسنج‌ها اندازه‌گيري شد، كرنش در فولاد كششي و فشاري بوسيله كرنش‌سنج‌هاي الكتريكي نصب شده بر آنها، اندازه‌گيري شد. بدين منظور در محل موردنظر، ابتدا آج ميلگرد برای طول مشخص، از قسمتی از قطر ميلگرد برداشته شده سپس در سطح صيقلی شده عاری از هر گونه آلودگی با چسب

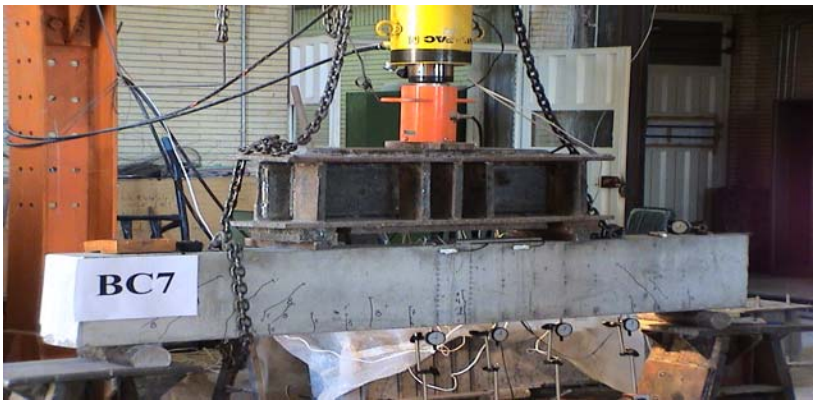
مخصوص، کرنش‌سنج الکتریکی نصب شد و در حین آزمایش تیرها، خواندن کرنش‌سنج‌های الکتریکی توسط دیتالاگر در هر مرحله از بارگذاری انجام و پردازش‌های لازم صورت گرفته است. پولکي‌ها (صفحات فلزی[1]) بر سطح بتن، در چندین ارتفاع مقطع، برای خواندن کرنش بتن نصب شده و در ضمن مراحل بارگذاري هر تیر تا لحظه شکست انجام شده است.

جدول(۱): مشخصات تیرها

شماره تیر	f'_c (MPa)	d (mm)	d′ (mm)	A_s	ρ (%)	A'_s	ρ′ (%)
BC13	۷۳/۶۵	۲۵۶	۴۰	۴Φ۲۸	۴/۸۱	۴Φ۲۸	۴/۸۱
B6	۷۱/۰۰	۲۵۶	-	۴Φ۲۸	۴/۸۱	-	-
BC7	۶۶/۸۱	۲۶۶	۵۷	۴Φ۲۸ + ۲Φ۱۶	۵/۳۸	۳Φ۲۲ + ۲Φ۱۴	۲/۷۲
B7	۷۰/۵۰	۲۶۶	-	۴Φ۲۸ + ۲Φ۱۶	۵/۳۸	-	-
BC8	۷۷/۷۲	۲۵۸	۵۹	۲Φ۲۸ + ۶Φ۲۲	۶/۸۱	۲Φ۲۸ + ۲Φ۱۴ +۱Φ۱۶	۳/۳۷
B8	۷۱/۸۰	۲۵۸	-	۲Φ۲۸ + ۶Φ۲۲	۶/۸۱	-	-



شکل(۲): چگونگي نوع، نحوه وقوع و پیشروي ترك‌ها با هر افزایش بار در وجه طولي تیرها



شکل(۳): نحوه بارگذاری، پیشروی ترکها در تیر BC7

در هر افزايش بار مشاهدات عینی، خوانده‌های لازم و پیشروی ترك روي سطح تير ثبت مي‌شد. در شکل (۳) نحوه بارگذاری، پیشروی ترکها و غیره مربوط به تیرهای آزمایش شده نشان داده شده است. در ضمن از کرنش سنج‌های الکتریکی نیز برای خواندن کرنش، سطح بتن و مقایسه آنها با مقادیر حاصل از کرنش‌سنج‌های مکانیکی، استفاده شد. مقایسه نتایج بدست آمده نشان‌دهنده دقت بیشتر کرنش‌سنج‌های الکتریکی نسبت به مکانیکی است و بنابراین از نتایج کرنش‌سنج‌های الکتریکی استفاده شد.

۳- شکل‌پذیری

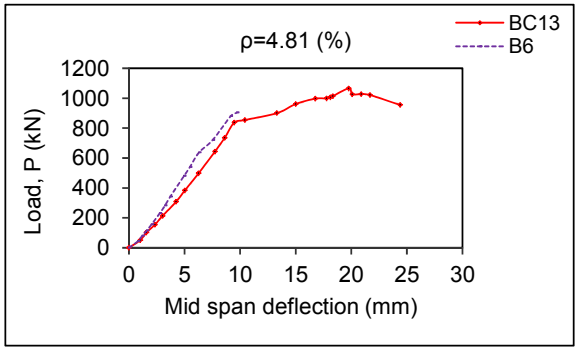
مصالح شكل‌پذير به موادي گفته مي‌شوند كه در حين تحمل بار، كرنش‌هاي زيادي از خود نشان مي‌دهند. كاربرد اين تعريف براي اعضاء و سازه‌هاي بتن مسلح، عبارت است از توانايي حمل تغييرشكل‌هاي غير ارتجاعي قابل توجه قبل از تخريب عضو مي‌باشد. به عبارت ديگر يك ماده يا سازه ترد با رسيدن به بار بيشينه بطور ناگهاني شكسته مي‌شود. در صورتي كه يك سازه شكل‌پذير نامعين از نظر ايستايي در معرض نشست غير منتظره يا بارگذاري بيش از حد قرار گيرد، سازه تمايل به تغيير شكل غير ارتجاعي (خميری) داشته و دوباره بعضي از اثرات بارگذاري بيش از حد را به قسمت‌هاي ديگر سازه پخش مي‌نمايد [۳].

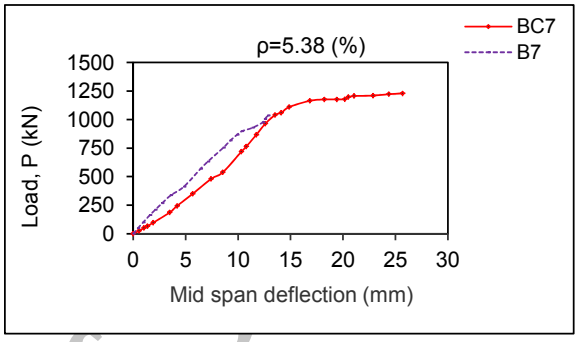
٤- شکل‌پذیری جابجایی (μ_d)

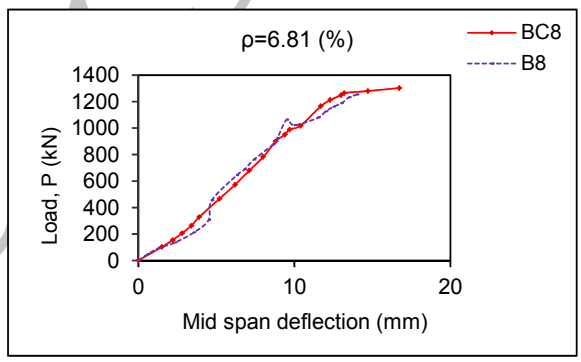
در اين تحقيق براى بررسي رفتار كل تير، از شكل‌پذيري جابجايي (μ_d) و براي بررسي رفتار انفرادي مقاطع از شكل‌پذيري انحناء (μ_ϕ) استفاده شده است. شكل‌پذيري جابجايي عبارتست از نسبت جابجايي در بار نهايي (Δ_u) به جابجايي در اولين نقطه‌اي كه فولاد كششي جاري (Δ_y) مي‌شود. بارنهايي در آزمايش تير به اينصورت تعريف شده است كه، بيش‌ترين باري كه يك تير در حين بارگذاري قادر به تحمل آن است و پس از آن، با كم‌ترين افزايش بار، منحني در نمودار بار- خيز داراي سير نزولي مي‌شود. بنابراين با اين تعريف، (Δ_y) در نمودار بار- خيز، نقطه‌اي روي منحني است كه شيب در آن تغيير مي‌نمايد و به صفر نزديك مي‌شود، و (Δ_u) نقطه‌اي است كه شيب منحني منفي مي‌شود. در شكل (٤) نمودار بار - خيز تيرهای مورد بررسی در این تحقیق آورده شده است. در جدول (۲) مقادیر (Δ_y)، (Δ_u) و (μ_d) محاسبه و آورده شده است.

همانطورکه از شکل (۷ (الف)) مشخص است غیر از قسمت اول نمودار، مقایسه دو منحنی رسم شده برای تیرهای با و بدون فولاد فشاری نشان می‌دهد که شکل‌پذیری جابجایی تیرهای مشابه از نظر مقدار فولاد کششی بر هم منطبق هستند. همانطور که از جدول (۲) مشخص است تنها تفاوت در مقادیر شکل‌پذیری جابجایی بین دو نوع تیر با و بدون فولاد فشاری مربوط به تیر B6 است که علت آن شکست برشی زود هنگام آن است. در صورتی که در تیر B6 شکست برشی اتفاق نمی‌افتاد، شکل‌پذیری جابجایی آن به طورحتم بیشتر می‌شد.

همان‌گونه که از شکل (۵) مشخص است، حداقل شکل‌پذیری جابجایی برابر با ۳، نشان داده شده است و مقایسه این مقدار با مقادیر بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی (شکل ۵) حاکی از این است که هیچیک از تیرهای با و بدون فولاد فشاری قادر به تامین کم‌ترین شکل‌پذیری نیستند. هم‌چنین یاداوری می‌شود، ساختمان‌های موجود که بر اساس آیین‌نامه‌های ACI قبل از سال ۲۰۰۲ طراحی شده باشند، بطور غیر مستقیم مقدار حداقل شکل‌پذیری جابجایی برابر با ۲ در صورتی که از مقدار ρ_b ρ_{max} = ۰/۷۵ استفاده شود را بدست خواهند داد که هم‌چنان کمتر از مقدار حداقل ۳ نشان داده شده در شکل (۵) است که می‌توان از آن بعنوان یک نقیصه نام برد. این نقص در آیین‌نامه ACI، ۲۰۰۵ و ۲۰۰۲ برطرف شده و روش طرح تغییر یافته است.







شکل(٤): نمودار بار- خیز تیرهاي آزمایش شده

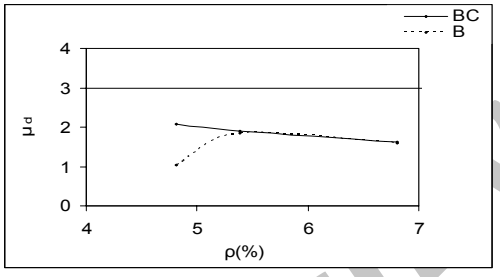
توضیح در مورد کفایت یک مقدار خاص به عنوان نسبت شکل‌پذیری μ امر مشکلی است زیرا این نسبت فقط یک معیار اختیاری از ظرفیت چرخش غیر الاستیک یک مقطع است. شکل‌پذیری موردنیاز در یک وضعیت بخصوص بر حسب وضعیت موردنظر و کمیت کرنش فشاری نهایی در بحرانی‌ترین تار بتن"ε_u" بکار رفته برای تعیین ضریب شکل‌پذیری"μ" متفاوت است. برخلاف اختلاف نظر محققین [۷تا۹] در مورد کم‌ترین میزان شکل‌پذیری (که بیشتر در محدوده ٦ تا ۳ توصیه شده است)، توصیه می‌شود [۳] برای اهداف طراحی، نسبت شکل‌پذیری بدست آمده از معادله (۱) و (۳ و ۵) برای سازه‌های نواحی زلزله‌خیز باید حداقل ٤ و در سازه‌هایی که نیاز به شکل‌پذیری محدود دارند حداقل ۳ باشد.

۵- بررسی شکل‌پذیری جابجایی در مقاطع مختلف

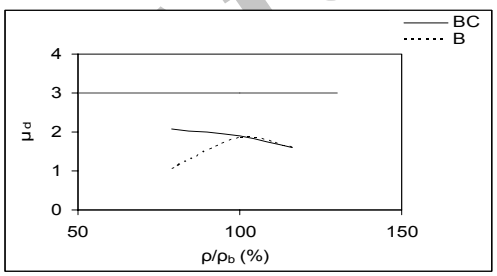
با توجه به اینکه در تحقیق حاضر، خیز در مقاطع مختلف در طول تیر به کمک خیزسنج‌های با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر در حین بارگذاری برای هر افزایش باری خوانده شد، بنابراین برای مقایسه شکل‌پذیری جابجایی به‌دست آمده از خیز مقاطع مختلف تیر، مقادیر شکل‌پذیری جابجایی (با فرض اینکه مقاطع مختلف در یک بار مشخص به مرحله تسلیم و هم‌زمان به مرحله نهایی می‌رسند) به صورت جداگانه در جداول (۳)، (٤) و (۵) آورده شده است.

جدول(۲): شکل‌پذیری جابجایی (μ_d)، Δ_y و Δ_u تیرهای آزمایش شده

شماره تیر	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	$\mu_\Delta=\Delta_u/\Delta_y$
BC13	۹/۴۸	۱۹/۷۷	۲/۰۸
B6	۹/۲۸	۹/۷۰	۱/۰۴
BC7	۱۳/۵۳	۲۵/۶۷	۱/۹۰
B7	۶/۹۵	۱۲/۸۴	۱/۸۴
BC8	۱۰/۴۰	۱۶/۷۳	۱/۶۱
B8	۸/۷۶	۱۴/۰۰	۱/۵۹



شکل (۵ – الف): اثر فولاد کششي و فشاري بر شکل‌پذيري جابجايي



شکل (۵ – ب): اثر فولاد کششي و فشاري بر شکل‌پذيري جابجايي

در شکل (۷) اثر فولاد کششي و فشاري (ρ و ρ') بر شکل‌پذيري و اثر فولاد کششي بصورت عامل ρ/ρ_b در شکل‌پذيري تيرها نشان داده شده است.

جدول(۳): شکل‌پذیري جابجايي (μ_d)، Δ_y و Δ_u درمقاطع مختلف تير آزمايش شده BC13

۷۰ سانتيمتر از وسط تير	۴۰ سانتيمتر از وسط تير	۲۰ سانتيمتر از وسط تير	وسط تير	BC13	
۵/۳۷	۸/۴۳	۹/۳۷	۹/۴۸	خيز در مرحله تسليم	(mm)
۱۰/۰۷	۱۷/۱۸	۲۰/۰۹	۱۹/۷۷	خيز در مرحله نهايی	(mm)
۱/۸۷	۲/۰۴	۲/۱۴	۲/۰۸	شکل‌پذيری	

جدول(٤): شکل‌پذيري جابجايي (μ_d)، Δ_y و Δ_u درمقاطع مختلف تير آزمايش شده BC7

۷۰ سانتيمتر از وسط تير	۴۰ سانتيمتر از وسط تير	۲۰ سانتيمتر از وسط تير	وسط تير	BC7	
۱۰/۱۸	۱۲/۶۵	۱۳/۲۵	۱۳/۵۳	خيز در مرحله تسليم	(mm)
۱۳/۱۴	۱۹/۹۱	۲۳/۳۹	۲۵/۶۷	خيز در مرحله نهايی	(mm)
۱/۲۹	۱/۵۷	۱/۷۶	۱/۹۰	شکل‌پذيری	

جدول(۵): شکل‌پذيري جابجايي (μ_d)، Δ_y و Δ_u در مقاطع مختلف تير آزمايش شده BC8

۷۰ سانتيمتر از وسط تير	۴۰ سانتيمتر از وسط تير	۲۰ سانتيمتر از وسط تير	وسط تير	BC8	
۶/۹۸	۹/۶۳	۱۰/۲۹	۱۰/۳۶	خيز در مرحله تسليم	(mm)
۹/۸۴	۱۳/۸۲	۱۶/۲۱	۱۶/۷۳	خيز در مرحله نهايی	(mm)
۱/۴۱	۱/۴۳	۱/۵۷	۱/۶۱	شکل‌پذيری	

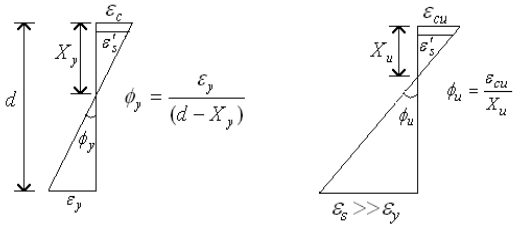
جدول(٦): مقايسه شکل‌پذيري انحناء آزمايشگاهي و تئوري تيرها

شماره تير	آزمايشگاهي			تئوري (ACI)			تئوري (CSA)		
	μ_ϕ	$\phi_u\times10^{-5}$	$\phi_y\times10^{-5}$	μ_ϕ	$\phi_u\times10^{-5}$	$\phi_y\times10^{-5}$	μ_ϕ	$\phi_u\times10^{-5}$	$\phi_y\times10^{-5}$
BC13	۵/۱۰	۷/۰۵	۱/۳۸	۳/۱۱	۴/۶۱	۱/۴۸	۳/۹۰	۵/۷۸	۱/۴۸
B6	۱/۰۸	۲/۵۵	۲/۳۵	۱/۴۹	۲/۳۶	۱/۵۸	۱/۸۶	۲/۹۴	۱/۵۸
BC7	-	-	۱/۷۳	۲/۰۷	۲/۹۹	۱/۴۴	۲/۶۵	۳/۸۲	۱/۴۴
B7	۱/۷۷	۲/۲۵	۱/۲۶	۱/۳۳	۲/۲۰	۱/۶۵	۱/۶۶	۲/۷۴	۱/۶۵
BC8	۳/۳۸	۵/۰۷	۱/۵۰	۱/۷۶	۲/۷۸	۱/۵۸	۲/۱۸	۳/۴۵	۱/۵۸
B8	۱/۴۰	۲/۴۸	۱/۷۷	۱/۸۶	-	-	-	۲/۱۰	-

با بررسی و مطالعه جداول فوق مشخص است، برخلاف اينکه با دور شدن از مقطع وسط تير شکل‌پذيری جابجايی (μ_d) کاهش يافته است ولی اين کاهش چشم‌گير نيست و به‌نظر ميرسد فرض استفاده از شکل‌پذيری جابجايی مقطع وسط برای شکل‌پذيری کل تير برای تيرهای دارای HSC با فولاد زياد، معقول است.

٦- شکل‌پذيري انحناء (μ_ϕ)

شکل‌پذيري انحناء عبارتست از نسبت انحناء در بار نهايي (ϕ_u) (منظور لحظه اعمال بار تخريب تير است) به انحناء در اولين نقطه‌اي که فولاد کششي جاري، (ϕ_y) مي‌شود. بنابراين، (ϕ_y) در نمودار ممان-انحناء نقطه‌اي روي منحني است که شيب آن تغيير نموده و به صفر نزديك مي‌شود و (ϕ_u) نقطه ديگري که شيب آن داراي سير نزولي مي‌شود، است. برای طراحي، به‌طورمعمول محاسبات مربوط به انحناء را ميتوان از تئوري خط مستقيم انجام داد [۳]. با بکارگيري مفاهيم شکل (٦) می توان شکل‌پذيري انحناء ($\mu=\phi_u/\phi_y$) را در تيرهای با و يا بدون فولاد فشاري محاسبه نمود. مفاهيم و فرمول‌ها با دقت کافی از تئوری خط مستقيم استخراج شده است.



شکل (٦): انحناء تسليم ϕ_y و انحناء نهائي تخريب ϕ_u (لحظه اعمال بار تخريب) خمشي

الف - مقطع بدون فولاد فشاري

$$\mu = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{\varepsilon_{cu}(\alpha\beta_1 f'_c)E_s(1+\rho n(2\rho n+\rho^2 n^2)^{1/2})}{\rho f_y^{\,2}} \qquad (۱)$$

f_y : تنش تسليم فولاد کشـشي، d : عمـق مـؤثر، Kd : عمـق منطقه فشاري (X_y)، ε_{cu}: کرنش فشاري درهنگام خردشدن بتن،

X_u: عمق منطقه فشار در حالت نهايي، α: ضـريب بلـوك تـنش فـشاري بـتن، β_1: ارتفـاع بلـوك تـنش فـشاري بـتن بـه عمـق محورخنثي(X). $\rho = \frac{A_s}{bd}$ و $n = \frac{E_s}{E_c}$

ب- مقطع با فولاد فشاري

$$k = \left[n^2(\rho+\rho')^2 + 2n\left(\rho + \frac{\rho' d'}{d}\right)\right]^{1/2} - n(\rho+\rho') \qquad (۲)$$

اگر فولاد فشاري در لحظه شكست جاري شود:

$$\mu = \frac{\alpha\beta_1 f_c' \varepsilon_{cu} E_s (1-k)}{f_y^2 (\rho-\rho')} \qquad (۳)$$

اگر فولاد فشاري در لحظه شكست جاري نشود:

$$X_u = \left[\frac{(\rho' E_s \varepsilon_{cu} - \rho f_y)^2 d^2}{(2\alpha f_c')^2 \beta_1^2} + \frac{\rho' E_s \varepsilon_{cu} d d'}{(\alpha f_c')\beta_1}\right]^{1/2} - \frac{(\rho' E_s \varepsilon_{cu} - \rho f_y) d}{(2\alpha f_c')\beta_1} \qquad (۴)$$

$$\mu = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{E_s \varepsilon_{cu} (1-k) d}{f_y X_u} \qquad (۵)$$

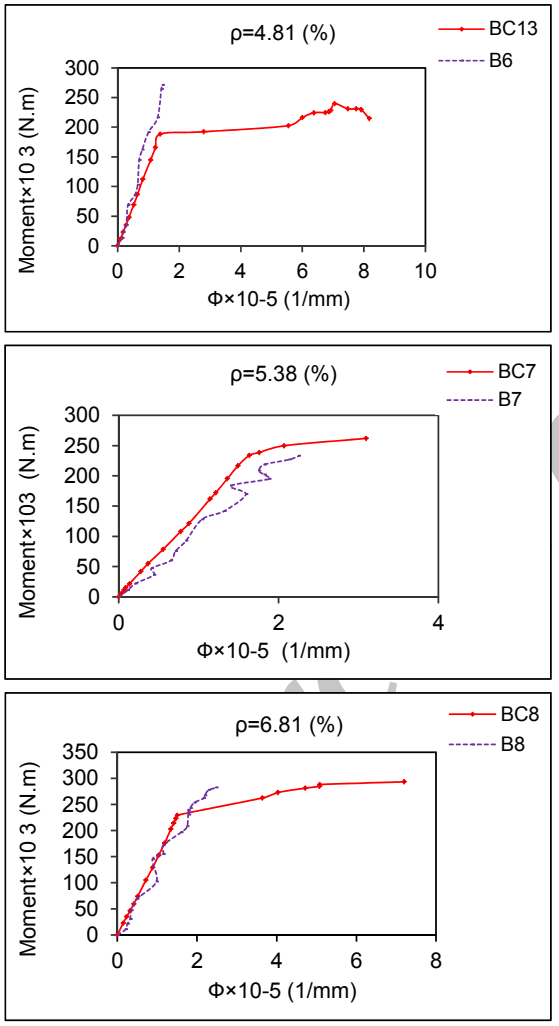
در تيرهاى پرآرمه براى محاسبات حالت تئوريک شكل‌پذيرى همانطور كه از تئوري‌هاى مختلف مشهود است، شكل‌پذيرى، مفهوم واقعى ندارد (ميلگردهاى طولى، تسليم نمى‌شوند). بنابراين در اين تحقيق انحناء در حالت نهايى با استفاده از معادله (۵) براى تيرهاى پرآرمه محاسبه شده است. در شكل (۷) نمودار ممان - انحناء تيرهاي آزمايشي داراى فولاد فشارى و مقايسه آنها با تيرهاى مشابه ولى فاقد فولاد فشارى نشان داده شده است. هم‌چنين در جدول (٦) مقادير مقايسه انحناء در لحظه جاري شدن فولاد كششي (ϕ_y) و انحناء در بار نهايي (ϕ_u) و شكل‌پذيري انحناء (μ_ϕ) براي نتايج آزمايشگاهي و تئوري كه بر اساس رابطه (۱) تا (۵) بدست آمده‌اند، نشان داده شده است. در اين روابط مقادير α، β_1، ε_{cu} و E_c بر اساس پيشنهاد آيين‌نامه‌هاي CSA [۱۱] و ACI [۱۰] عبارت است از:

جدول (۷): مقادير پيشنهادى آيين نامه هاى ACI و CSA جهت پارامترهاى بلوک تنش فشارى معادل و مدول الاستيسيته تن با مقاومت بالا

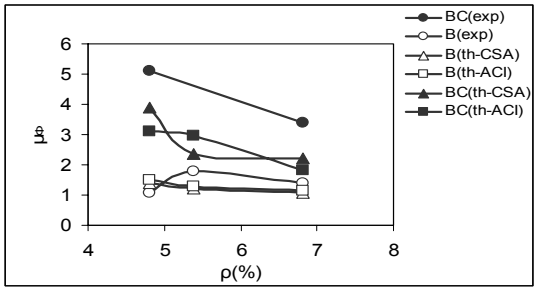
	ACI	CSA
α	۰/۸۵	۰/۸۵ - ۰/۰۰۱۵$f'_c \geq$ ۰/۶۷
β_1	۱/۰۹۰ - ۰/۰۰۸$f'_c \geq$ ۰/۶۵	۰/۹۷ - ۰/۰۰۲۵$f'_c \geq$ ۰/۶۷
ε_{cu}	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳۵
E_c	۳۲۰۰$\sqrt{f'_c}$ + ۶۹۰۰	(۳۲۰۰$\sqrt{f'_c}$ + ۶۹۰۰)ω

$$\omega = \left(\frac{\rho}{2300}\right)^{1.5}$$

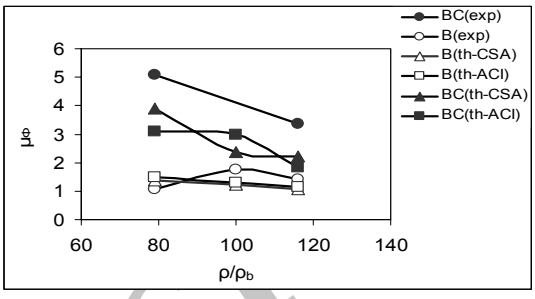
همان‌گونه كه از جدول (٦) مشهود است، در هنگام آزمايش تير BC7، بعلت پاره شدن كرنش‌سنج الكتريكي، مقدار كرنش در فولاد كششي در بار نهايي امكان‌پذير نشد و بنابراين امكان محاسبه انحناء در اين بار مقدور نيست. در شكل (۷) بسيار واضح است كه تيرهاى داراى فولاد فشارى، سطح زير نمودار بيش‌ترى را نسبت به تيرهاى بدون فولاد فشارى در ديا‌گرام‌هاى ممان- انحنا،كه بيانگر ميزان انرژى جذب شده توسط سازه است را دارد. اين موضوع در مورد ديا‌گرام‌هاى بار- خيز بررسى نشد زيرا تفاوت چندانى بين دو حالت با و بدون فولاد فشارى وجود نداشت.



شكل (۷): نمودار ممان - انحناء تيرها



شکل (۸- الف): اثر فولاد کششي و فشاري بر شکل‌پذيري انحناء

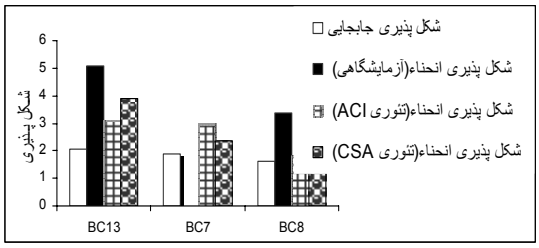


شکل (۸- ب): اثر فولاد کششي و فشاري بر شکل‌پذيري انحناء

از آنجا که بیشتر شکل‌پذيري کل تير با توجه به نسبت جابجايي در حالت نهايي به حالت تسليم بدست مي‌آيد، اما محاسبه تئوريک آن نسبت به محاسبه شکل‌پذيري مقطع تير مشکلتر است. بنابراين ساده‌ترين و رايج‌ترين روش بيان شکل‌پذيري تئوري يك مقطع عبارت از نسبت انحناء نهايي محاسبه شده به انحناء تسليم محاسبه شده يك مقطع.

۷- مقايسه شکل‌پذيری انحناء آزمايشگاهی و تئوری

در جدول (٦) نتايج به‌دست آمده از شکل‌پذيری انحناء آزمايشگاهی در تيرهای مورد بررسی با نتايج محاسبه شده به‌کمک دو آيين‌نامه [۱۱] CSA و [۱۰] ACI که در آنها استفاده از بتن با مقاومت زياد مطرح است، مقايسه شده است. نتايج اين مقايسه به صورت نمودار ميله ای در شکل (۹) نشان داده شده است. در شکل (۹) به دليل نبود شکل‌پذيری انحناء آزمايشگا هی تير BC7 به‌دليل پاره شدن کرنش‌سنج الکتريکی، محل موردنظر خالی در نظر گرفته شده است. با توجه به جدول شماره (٦) شکل‌پذيری محاسبه شده با استفاده از روابط تئوری به يکديگر نزديک بوده در حالی که شکل‌پذيری به‌دست آمده آزمايشگاهی از شکل‌پذيری محاسبه شده با استفاده از روابط تئوری، بيشتر است و اين موضوع در مورد تيرهای با فولاد فشاری واضح‌تر است.



شکل (۹): مقايسه شکل‌پذيري تيرها

۸- نتيجه‌گيری

در تحقيق حاضر تعداد شش عدد تير داراي بتن با مقاومت بالا با درصد فولاد کششي و فشاري متغير شده ساخته و به کمک نصب ابزارهای دقيق اندازه‌گيری برررسي شدند. تيرها تحت بار تا مرحله تخريب، بارگذاري شده و مقادير کرنش ميلگردهای طولی کششی و فشاری و همچنين کرنش فشاری بتن همراه با خيز در چند نقطه در طول تير در حين افزايش بار ثبت شد. بمنظور بررسي تاثير فولاد فشاري بر شکل‌پذيري، نتايج بدست آمده از تيرهاي داراي فولاد مضاعف با نتايج تيرهاي مشابه دارای فقط فولاد کششي مقايسه شده است. نتايج تحليل آزمايشگاهی با نتايج تئوری برگرفته از آيين‌نامه‌های CSA و ACI مقايسه شده است. با توجه به مطالب بحث شده نتايج زير استخراج می شود:

۱- با تعبيه فولاد فشاری در تيرهای دارای بتن با مقاومت زياد، بر ميزان بارنهايی به مقدار قابل‌توجه‌ای افزوده نمی‌شود ولی مقدار خيز و انحنا، در بار نهايی مقدار زيادی افزايش می‌يابد.

۲- با بررسی نتايج آزمايشگاهی برای تامين رفتار شکل‌پذيری جابجايی اعضا، خمشی با حد پايين قابل قبولی برابر با ۳، هيچ‌يک از تيرهای با و بدون فولاد فشاری به‌دليل استفاده از فولاد کششی زياد به اين حداقل دسترسی پيدا ننموده‌اند.

۳- شکل‌پذيری انحناء آزمايشگاهی تقريبا بيش از دو برابر شکل‌پذيری جابجايی تيرهای مورد آزمايش است. بطور کلی در تيرهای بررسی شده شکل پذيری انحناء آزمايشگاهي و تئوری بيش از شکل پذيری جابجايی که بيانگر شکل پذيری کل تير است بدست آمده است.

٤- برای مناطق زلزله‌خيز استفاده از تيرهای پرآرمه (بيش ازρ_b ۰/۷۵) به‌دليل شکل‌پذيری کم توصيه نمي‌شود. در اين تحقيق برای کم‌ترين ρ استفاده شده در تيرها ($۰/۷۹\rho_b$) بيش‌ترين شکل‌پذيری جابجايي و انحنا، بترتيب برابر با ۲/۰۸ و ۵/۱۰ به‌دست آمد.

۵- برای تیرهای بدون فولاد فشاری، شکل‌پذیری انحناء و جابجایی تفاوت چندانی ندارند ولی در تیرهای با فولاد مضاعف شکل‌پذیری انحناء به طور تقریب بیش از دو برابر شکل‌پذیری جابجایی است.

۱۰- مراجع

[۱] تاريويرديلوي اصل، سعيد.، "بررسي تجربي و تئوريك پارامترهاي موثر در شكل پذيري اعضاء خمشي بتن مسلح"، پايان نامه كارشناسي ارشد، دانشگاه صنعتي شريف، تهران، ۱۳۷۳

[۲] مقصودي، علي اكبر.، قنبري ننيز، فرهاد.، محمد حسني، محمد.، "شكل پذيري تيرهاي بتن مسلح داراي بتن با مقاومت بالا ي كم آرمه" اولين كنگره ملي مهندسي عمران، دانشگاه صنعتي شريف، تهران، كد مقاله ۱۰۲۱، ۱۳۸۳.

[۳] مقصودی، علی اکبر، "شکل پذیری سازه های بتن آرمه ویژه مناطق زلزله خیز" ، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان،۱۳۷۵.

[۴] مقصودی، علی اکبر، اکبرزاده بنگر، حبیب" آنالیز شکل پذیری تیرهای محصور شده دارای بتن مقاومت بالا" اولین کنگره مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۸۳، کد مقاله ۱۰۲٤

[۵] Ashour, A.A., "Effect of Compressive Strength and Tensile Reinforcement Ratio on Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams," Engng. Struct. J., 2000, pp. 413-423.

[۶] Mattock, A.H., "The Rotational Capacity of Hinging Region in Reinforced Concrete Beams", Proceedings of the International Symposium on Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, ASCE-ACI, Miami, Nov., 1964, pp. 143-181.

[۷] Corley, W.G., "Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams,"Proc-American of Civil Engineers, J.Struct, Div. 92(ST5), 1966.

[۸] Tsong, Y., Yue, L.H., Jaw, W.T., "Amelioration of Sttirrup and Compression Reinforcement on the Ductility of Reinforced High-Strength Concrete Beam," Proceeding of the sessions related to seismic engineering and structures congress, San Francisco, CA., 1989, pp. 569-604.

[۹] Blume, J.A., Newmark, N.M., and Coring, L.H., "Design of Multi Story reinforced Concrete Buildings for Earthquake Motions," Portland Cement Association, 1961.

[۱۰] ACI Committee 363, "Review of ACI Code for Possible Revisions for High-Strength Concrete," American Concrete Institute, Detroit, 2005.

[۱۱] CSA Technical Committee, "Design of Concrete Structure for Buildings," CAN3-A23.3-M94, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 2004.

۹- تقدیر و تشکر

نویسنده برخود لازم می‌داند از حمایت دانشگاه ولي‌عصر (عج) رفسنجان تشکر نماید.

۱۱- زیر نویس

[۱] Demec