

تأثیر آرماتور طولی بر مقاومت پیچشی تیر بتنی

رضا پور حسینی^۱، رضا مرشد^۱، امیر حسین خواجه حسینی^۲

چکیده

در این مقاله مقاومت پیچشی تیرهای بتنی مسلح با آرماتور طولی و بدون خاموت، هنگام و بعد از ترک خوردگی، تحت پیچش خالص مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. بیشتر آیین‌نامه‌های رایج برای اعضای بتن مسلح تحت پیچش مقاومت پیچشی ناشی از بتن را در نظر نمی‌گیرند. با توجه به نتایج حاصل در صورت وجود آرماتورهای طولی با نسبت متداول بمیزان ۱٪ و بالاتر، مقاومت پیچشی پس از ترک خوردگی (پس ماند) مناسبی نزدیک ۵۰٪ مقاومت ترک خوردگی فراهم می‌گردد. این مقاومت پس‌ماند می‌تواند مبنای تعیین مقاومت پیچشی ناشی از بتن قرار گیرد.

کلمات کلیدی:

تیر بتنی، آرماتور طولی، مقاومت پیچشی پسماند، آزمایشات پیچشی، مقاومت پیچشی ترک خوردگی

Effect of Longitudinal Rebars on Torsional Strength in Concrete Beams

R. Porhosseini, R. Morshed, A.H. Khageh Hosseini

ABSTRACT

In this paper, test and evaluation of torsional strength of concrete beams reinforced with longitudinal rebars and without transverse reinforcement, is considered. Most of concrete codes dose not consider any post cracking torsional strength for concrete element which are not reinforced with torsional reinforcement. It seems that ordinary concrete elements, reinforced for bending, have a post cracking torsion strength (T_c), due to aggregate interlock and dowel action. According to the test results, beams which were reinforced by a moderate ratios of longitudinal rebars, showed a ductile torsional behavior in relatively high torsional rotations. A post cracking strength about 50 percent of (T_{cr}) is suggested for these beams.

KEY WORDS

Concrete beam, Longitudinal re-bars, Post cracking strength, Torsional test, Torsion strength

برشی (V_c) قابل توجه‌ای ایجاد کند برای پیچش در نظر گرفته نمی‌شود. بنظر می‌رسد وجود آرماتور طولی تنها، بتواند امکان تحمل پیچش بعد از ترک را در تیرهای بتنی در مقایسه با تیر غیر مسلح فراهم سازد. این مقدار مقاومت پیچشی که می‌توان از آن بعنوان (T_c) نام برد، می‌تواند نقش بسزایی در اقتصادی‌تر و دقیق‌تر شدن طراحی پیچشی تیرها، داشته باشد. در این تحقیق اثرات وجود آرماتور طولی در مقاومت پیچشی پسماند تیر بتنی بررسی می‌گردد.

۱- مقدمه

نظریه‌های مختلفی برای پیش‌بینی مقاومت پیچشی ترک‌خوردگی (T_{cr}) اعضای بتنی ارائه شده است. مقاومت پیچشی اعضای بتنی، پس از ترک خوردگی به طور کامل وابسته به نسبت آرماتور و چگونگی توزیع آنها است. آیین‌نامه‌های رایج (آبا [۱] و ACI [۳]) از مقاومت پیچشی عضو بتنی پس از ترک صرف نظر می‌کنند. بنابراین پدیده‌ای نظیر درهم قفل‌شدگی^۱ دانه‌ها که در برش می‌تواند مقاومت

^۱ اعضای هیات علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد و r_porhosseini@yazduni.ac.ir, morshed@yazduni.ac.ir

^۲ دانش‌اندوخته مهندسی سازه دانشگاه یزد، اداره کل نوسازی مدارس استان یزد aammiirr58@yahoo.com



$$T_{cr,p} = 0.225x^2 y \sqrt{f'_c} \quad (6)$$

α_p در این نظریه نزدیک به ۶۰٪ بزرگتر از α نظریه ارتجاعی می‌باشد. آزمایشات نشان می‌دهد این نظریه در مورد نمونه‌هایی با ابعاد کوچک درست نمی‌باشد [۱۰].

۲-۳- نظریه خمش کج

برای پیش‌بینی مقاومت پیچشی اعضای بتنی، سو [۱۰] نظریه خمش کج را تکمیل نمود. وی برای رسیدن به نتیجه دقیق، روند شکست پیچشی را به دقت مورد بررسی قرار داد. ممان پیچشی موجود می‌تواند در سطح شکست به دو مؤلفه ممان خمشی T_b و ممان پیچشی T_t تجزیه شود. بر اساس این نظریه ممان خمشی T_b باعث شکست خمشی در سطح شکست می‌شود. المان تحت تنش نه تنها تحت تأثیر تنش کششی قرار دارد بلکه تحت تنش فشاری عمودی ناشی از T_t نیز می‌باشد. این مسئله سبب کاهش مقاومت کششی بتن به میزان ۱۵٪ خواهد شد. بنابراین با توجه به رابطه (۲)، بدست می‌آید:

$$T_{cr, sb} = 0.5 \sqrt{f'_c} \frac{x^2 y}{3} \quad (7)$$

۳- مقاومت پس ماند تیرهای بتنی

آیین‌نامه‌ها وجود خاموت پیچشی را شرط لازم برای مقاومت پیچشی کل پس از ترک خوردگی در نظر می‌گیرند [۱] و [۳]. در این تحقیق آزمایشاتی برای بررسی مقاومت پس ماند تیرهای بتن مسلح با آرماتور طولی تنها و تحت پیچش خالص برنامه‌ریزی گردید.

۴- برنامه‌ریزی آزمایشات

برای ارزیابی اثر مقدار آرماتور طولی بر روی مقاومت پیچشی، تعداد ۶ نمونه ساخته شد. در این نمونه‌ها از یک طرح اختلاط استفاده شد که مقدار آرماتورها در آنها متفاوت بود. مقادیر آرماتورها و نسبت آنها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌ها

شماره نمونه	آرماتورگذاری بالا	آرماتورگذاری پایین	نسبت آرماتور بالا (%)	نسبت آرماتور پایین (%)
۱	0	0	0	0
۲	2Φ8	2Φ8	۰/۴	۰/۴
۳	2Φ10	2Φ10	۰/۶	۰/۶
۴	2Φ12+1Φ8	2Φ12+1Φ8	۱	۱
۵	3Φ12	3Φ12	۱/۳	۱/۳
۶	3Φ12	2Φ10	۱/۳	۰/۶

گفتنی است مجموعه اقدامات برای انجام آزمایشات شامل طراحی و ساخت دستگاه آزمایش و قالبهای نمونه‌های آزمایش، توسط نویسندگان در دانشگاه یزد انجام گرفته است.

۲- مقاومت پیچشی ترک خوردگی (T_{cr}) مقاطع بتنی

به منظور مقایسه مقاومت پیچشی ترک خوردگی مقاطع بتنی آزمایش شده با نظریه مختلف، به تعدادی از نظریه‌های موجود، اشاره می‌شود [۷]، [۱۱]، [۱۲]:

۱-۲- نظریه ارتجاعی^۲

این روابط برای اولین بار در سال ۱۹۱۲ مطرح گردید. سپس توسط محققان بتدریج کاملتر شد. بر اساس این نظریه شکست پیچشی هنگامی اتفاق می‌افتد که تنش کششی اصلی ماکزیم با مقاومت کششی بتن (f_t) برابر شود. بنابراین ممان پیچشی ارتجاعی ترک خوردگی برابر است با [۵]:

$$T_{cr, e} = \alpha x^2 y f_t \quad (1)$$

که در آن x و y به ترتیب اضلاع کوچکتر و بزرگتر مقطع می‌باشند. α ضریب سن ونان است [۵] که بر اساس نسبت اضلاع بدست می‌آید (برای نمونه‌های مورد آزمایش $x=150$ mm، $y=200$ mm و $\alpha=0.222$). نیز بر اساس آبا [۱] بصورت رابطه (۲) بدست می‌آید (واحدها بر حسب mm و N می‌باشند):

$$f_t = 0.6 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

که در آن f'_c مقاومت فشاری بتن می‌باشد. با جاگذاری رابطه (۲) در رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$T_{cr, e} = 0.133 x^2 y \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

۲-۲- نظریه خمیری^۳

از آنجا که نظریه ارتجاعی برآوردی کمتر از واقعیت دارد، نایلند [۸] توجیه می‌کند که این مقاومت اضافی ناشی از خصوصیات خمیری بتن می‌باشد. در این نظریه نیز معیار شکست، رسیدن تنش کششی اصلی ماکزیم به مقاومت کششی بتن می‌باشد.

$$T_{cr, p} = \alpha_p x^2 y f'_t \quad (4)$$

خاصیت خمیری در این رابطه بکمک ضریب α_p القاء می‌گردد.

$$\alpha_p = (0.5 - x/6y) \quad (5)$$

بنابراین با توجه به رابطه (۲) و نسبت اضلاع نمونه‌ها $\alpha_p = 0.375$ بدست می‌آید همچنین:



Φ: قطر میلگرد

۴-۱- انتخاب ابعاد نمونه‌ها

که نتایج آنها از این قرار می‌باشد: برای درشت دانه‌ها، درصد جذب آب (۰/۹٪)، چگالی انباشته ۲/۸، چگالی ظاهری (۲/۹)، درصد تخلخل (۲/۸٪) و برای ریزدانه‌ها درصد لای (۶٪) و مدول نرمی (۲/۴۹) می‌باشد. همچنین آزمایش دانه‌بندی نیز انجام شد و با حدود بالا و پایین نمودار استاندارد ASTM مقایسه شد و نتایج مناسبی بدست آمد. سیمان مصرفی تیپ I می‌باشد.

۴-۲-۳- طرح اختلاط

در ساخت نمونه‌ها از طرح اختلاط یکسانی استفاده شد: شن بادامی (اندازه بزرگترین دانه ۲۰ میلی‌متر) ۴۰۰، شن نخودی (اندازه بزرگترین دانه ۱۲ میلی‌متر) ۵۰۰، ماسه ۹۰۰، سیمان ۴۰۰ و آب ۲۰۰، کیلوگرم در متر مکعب. اسلامپ بتن در به میزان ۸ سانتیمتر در نظر گرفته شد. این طرح اختلاط برای رسیدن به مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۲۵ مگاپاسکال تهیه شد.

۴-۳- ساخت نمونه‌ها

در هر مرحله از ساخت بتن، یک نمونه تیر پیچشی و دو نمونه استوانه‌ای بتنی، جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری ساخته شد. برای نگه‌داشتن میلگردهای طولی در جای خود، از ورقه‌های یونولیتی، در دو انتهای نمونه استفاده شد. وزن هر یک از نمونه‌ها در نزدیک به ۹۶ کیلوگرم بود. همچنین میزان پوشش بتن برای تمامی نمونه‌ها به اندازه ۲ سانتیمتر بود.

۴-۴- چگونگی انجام آزمایشات

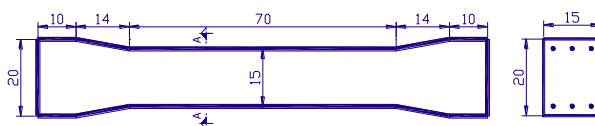
برای انجام آزمایشات پیچشی، دستگاه تست پیچش، مطابق شکل (۳) در دانشگاه یزد طراحی و ساخته شد.



شکل (۳): دستگاه تست پیچش

در این دستگاه تیر بتنی با مقطع مستطیلی از یک طرف مقید در برابر پیچش می‌باشد و در طرف دیگر پیچش خالص بوسیله بار خارج از مرکز و از طریق یک بازو بر مرکز سطح مقطع تیر

از آنجا که ممکن است در محل اعمال لن گر تنشهای اضافی ناشی از فشار فکهای دستگاه بر نمونه‌ها، وارد شود قسمتهای انتهایی نمونه با ابعاد بزرگتر (۲۰×۲۰) سانتیمتر ساخته شد. قسمتهای انتهایی با شیب ملایم به قسمت میانی که دارای ابعاد کوچکتر (۱۵×۲۰) سانتیمتر است، متصل می‌گردند. شکل خاص نمونه‌ها احتمال وقوع شکست پیچشی در ناحیه میانی که اثرات تمرکز تنش تکیه‌گاهی کمتر است را افزایش می‌دهد. طول قسمت میانی ۷۰ سانتیمتر و معادل محیط مقطع میانی ۲×(۲۰+۱۵) سانتیمتر انتخاب شده تا امکان ایجاد یک ترک پیچشی کامل با زاویه ۴۵ درجه دورتادور مقطع فراهم گردد (شکل (۱)).

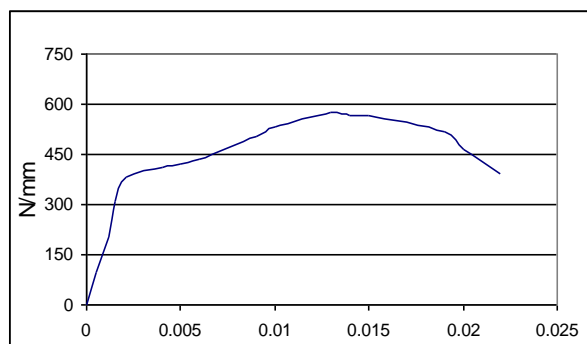


شکل (۱): ابعاد نمونه پیچشی (cm)

۴-۲- مصالح مصرفی

۴-۲-۱- میلگردها

از میلگردهای آجدار به قطرهای ۱۰ و ۱۲ میلی‌متر بعنوان آرماتور طولی در نمونه‌ها استفاده شد. میلگردها همگی از نوع S400 با تنش جاری شدن ۴۰۰ مگاپاسکال و کرنش نهایی به اندازه ۲۰٪ بودند. بعنوان نمونه رابطه تنش-کرنش میلگرد ۱۰ مصرفی که بر اساس آزمایش کشش بدست آمده است، در شکل (۲) ارائه می‌گردد.



شکل (۲): نمودار تنش کرنش آرماتورهای قطر ۱۰ بعنوان نمونه

۴-۲-۲- مصالح بتن

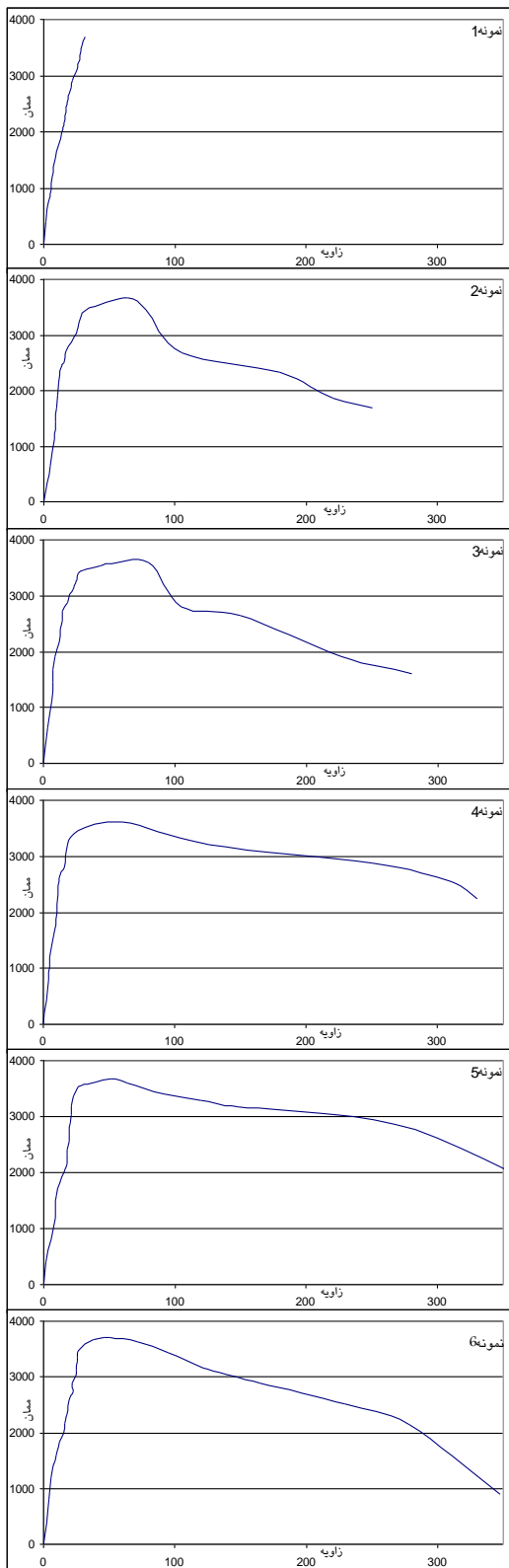
شن استفاده شده در این آزمایش از نوع شن شکسته و ماسه، شسته بود. آزمایشاتی بر روی سنگدانه‌ها انجام گرفته

اعمال می‌شود. محور بازوی پیچشی درون یک تکیه‌گاه بلبرینگی حرکت می‌کند.

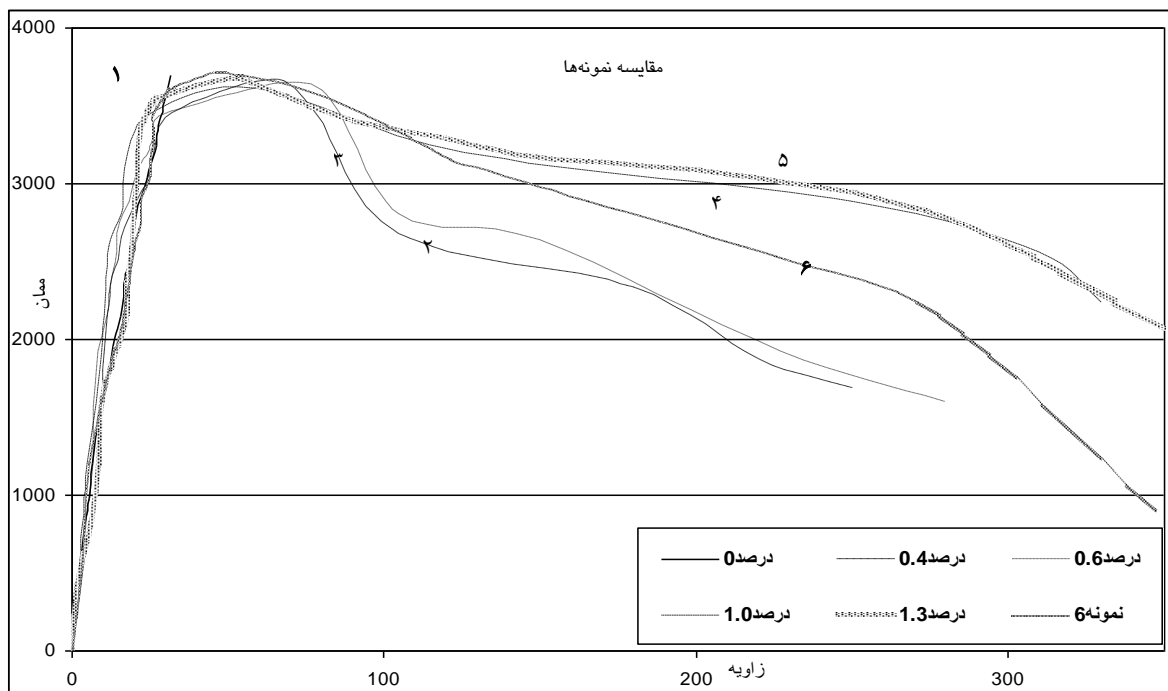
طول بازوی پیچش در این دستگاه برابر ۸۰ سانتیمتر می‌باشد. در این دستگاه، بار بوسیله یک حلقه اندازه‌گیری بار، که در انتهای بازوی پیچشی قرار دارد، اعمال و اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری چرخش در طول نمونه از دو تغییر مکان سنج^۱ در دو انتهای نمونه و در قسمت میانی آن، استفاده شد.

۵-۱-۱- ارائه و بررسی نتایج آزمایشات و مقایسه با آزمایشات مشابه

رابطه لنگر پیچشی-زاویه پیچش، برای نمونه‌های مورد آزمایش در شکل (۴) ارائه گردیده است. در شکل (۵) نیز مقایسه کوتاهی از رفتار نمونه‌های مختلف ارائه می‌کند. همچنین در شکل (۶) نیز چگونگی شکست نمونه ۴ نشان داده شده است. در جدول (۲) مقاومت ترک خوردگی نمونه‌ها با روابط نظری مقایسه شده است.



شکل (۴): نمودارهای لنگر-چرخش نمونه‌ها (مانان بر حسب $N.m$ و زاویه بر زاویه حسب 10^{-7} Rad/mm می‌باشد)



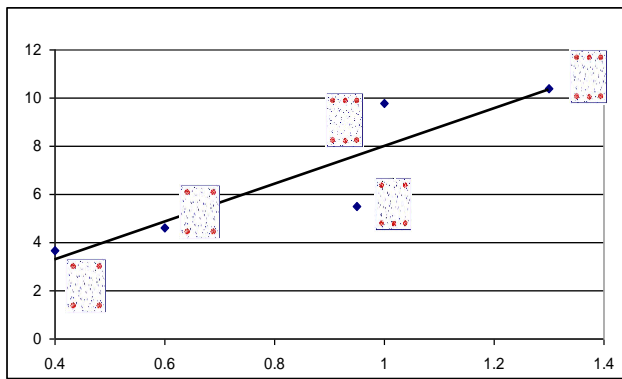
شکل (۵): نمودارهای لنگر-چرخش نمونه‌ها (ممان بر حسب Nm و زاویه حسب 10^{-7} Rad/mm می‌باشد)

جدول (۲): مشخصات مقاومتی نمونه‌ها و مقایسه با نظریه‌های ارتجاعی، خمیری و خمش کج

نسبت ممان (خمش کج)/(آزمایش)	لنگر ترک خوردگی خمش (کج $N.m$)	لنگر ترک خوردگی خمیری ($N.m$)	لنگر ترک خوردگی ارتجاعی ($N.m$)	لنگر حداکثر آزمایش $N.m$	لنگر ترک خوردگی آزمایش ($N.m$)	مقاومت فشاری N/mm^2	نمونه
۱/۰۳	۳۵۶۵	۴۸۱۳	۲۸۴۵	۳۶۹۰	۳۶۹۰	۲۲/۶	۱
۱/۰۰	۳۴۹۴	۴۷۱۶	۲۷۸۸	۳۶۷۰	۳۵۰۰	۲۱/۷	۲
۱/۰۳	۳۳۳۷	۴۵۰۵	۲۶۶۳	۳۶۰۰	۳۴۵۵	۱۹/۸	۳
۰/۹۹۲	۳۵۱۸	۴۷۴۹	۲۸۰۷	۳۶۱۰	۳۴۹۰	۲۲	۴
۱/۰۶	۳۳۵۴	۴۵۲۸	۲۶۷۶	۳۶۶۰	۳۵۶۰	۲۰	۵
۱/۰۱	۳۶۰۵	۴۸۶۶	۲۸۷۶	۳۷۱۰	۳۶۶۰	۲۳/۱	۶



شکل (۶): چگونگی ترک خوردگی در نمونه ۴

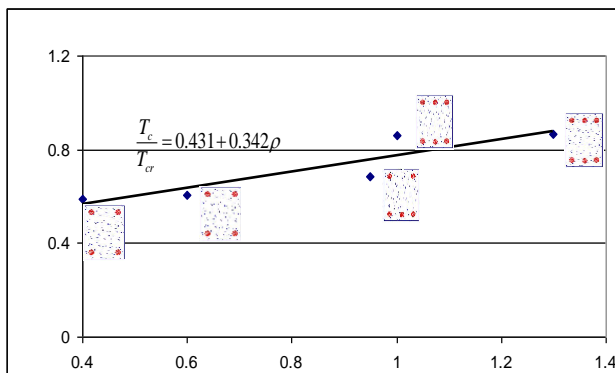


شکل (۷): شکل پذیری در نمونه‌ها (ρ متوسط نسبت آرماتور در بالا و پایین مقطع)

برای انجام یک مقایسه دیگر بین تیرهای آزمایش شده در این تحقیق، می‌توان با تعریف مقاومت پسماند، آن را در نمونه‌های مختلف، مورد مقایسه قرار داد. بدین ترتیب که، زاویه چرخش نهایی هر تیر را به برابر با ضریبی از زاویه ترک خوردگی (در اینجا ۸ برابر زاویه ترک خوردگی)، تعریف نمود. مقاومت متناظر با این زاویه نهایی، بعنوان مقاومت پسماند، فرض می‌گردد (ستون سوم جدول (۳)).

بمنظور کاهش اثر اختلاف مقاومت فشاری نمونه‌ها، نسبت مقاومت پسماند به ترک خوردگی، معیار مناسبتری جهت مقایسه می‌باشد.

شکل (۸) نسبت مقاومت پسماند را در نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. همچنین رابطه بدست آمده تحت شرایط حاکم بر این آزمایشات، تعاریف و فرضیات روی شکل (۸) ارائه شده است.



شکل (۸): مقاومت پسماند برحسب نسبت آرماتور (ρ متوسط نسبت آرماتور در بالا و پایین می‌باشد)

همانطور که در شکل (۸) دیده می‌شود، وجود آرماتور طولی باعث باقی ماندن مقداری از مقاومت، بعد از ترک شده است. همچنین با افزایش مقدار آرماتور، نسبت مقاومت پسماند نیز افزایش یافته است. در این شکل همچنین تأثیر جزئیات

همان طور که در جدول (۲) مشخص می‌باشد، نتایج تخمینی نظریه خمش کج تا به میزان به نتایج آزمایشات نزدیک می‌باشد. بررسی نتایج نشان می‌دهد، پس از ترک خوردگی بخش قابل ملاحظه‌ای از مقاومت پیچشی تا مقادیر چرخشهای زیاد حفظ می‌شود. مقدار این مقاومت پیچشی (مقاومت پسماند) با میزان آرماتورهای طولی رابطه مستقیم دارد.

با توجه به شکل (۵) دیده می‌شود، با افزایش نسبت آرماتور مقاومت پسماند افزایش می‌یابد و این پدیده به صورت مستمر تا زوایای چرخش بالا ادامه دارد.

با توجه به تفاوت اندک در مقاومت فشاری نمونه‌ها و در نتیجه مقاومت ترک خوردگی آنها، بمنظور مقایسه نمونه‌ها (بدون در نظر گیری تفاوت مقاومت‌های فشاری بتن)، معیار مقایسه ای ارائه می‌گردد. برای تعریف این معیار می‌توان از مفهوم شکل پذیری در خمش یا نیرو محوری بهره گرفت [۴]. بدین ترتیب که چرخش نهایی تیر برابر چرخش متناظر با درصدی از مقاومت ترک پیچشی (در این جا ۸۰٪) فرض می‌گردد. این معیار مقایسه (شکل‌پذیری)، از نسبت چرخش نهایی به چرخش ترک خوردگی (θ_u/θ_{cr})، حاصل می‌شود.

مقدار چرخش نهایی برای اکثر نمونه‌ها (نمونه‌های ۴، ۵ و ۶ با نسبت آرماتور ۱٪ و بیشتر) قابل توجه و بیش از چرخش‌های مشاهده شده، در اعضای بتنی معمولی است [۲]، [۶]، [۹]، [۱۳].

جدول (۳): مقایسه نمونه‌ها از نظر شکل پذیری و مقاومت پسماند

نمونه	ممان ترک خوردگی آزمایش	مقاومت پسماند	چرخش ترک خوردگی	چرخش نهایی	شکل پذیری
	$N.m$	$N.m$	$Rad/mm \times 10^{-7}$	$Rad/mm \times 10^{-7}$	
۲	۳۵۰۰	۲۰۵۷	۲۶	۹۵	۳/۶۵
۳	۳۴۵۵	۲۰۹۸	۲۶	۱۲۰	۴/۶۲
۴	۳۴۹۰	۳۰۰۹	۲۵	۲۴۵	۹/۸
۵	۳۵۶۰	۳۰۸۴	۲۶/۷	۲۷۸	۱۰/۴۱
۶	۳۶۶۰	۲۵۰۷	۲۷	۱۴۹	۵/۵۲

در شکل (۷) میزان شکل‌پذیری در نمونه‌ها، ارائه شده است؛ همچنین در این شکل به صورت ظاهری، تأثیر تعداد و آرایش آرماتورها بر شکل‌پذیری مشخص می‌باشد.

آرماتورگذاری بر مقاومت پسماند به صورت ظاهری و در نمونه‌های مختلف، قابل مقایسه است.

۵-۲- مقایسه نتایج با آزمایشات مشابه

بیشتر آزمایشات مشابه صورت گرفته در زمینه پیچش در کمیته ۴۳۸ [۴] آیین نامه بتن آمریکا [۴] جمع آوری و مورد بررسی قرار گرفته است.

آیین نامه ACI-89 برای مقطع بتنی مقاومت پیچشی ناشی از بتن را در نظر می‌گیرد و در طراحی این مقاومت با مقاومت خاموت جمع می‌گردد. مقاومت ناشی از بتن در تیر بدون برش بکمک رابطه (۸) بیان می‌شود.

$$T_c = 0.067 \sqrt{f'_c} x^2 y \quad (8)$$

جدول (۴) مقایسه‌ای بین مقاومت پسماند آزمایشات این گزارش با مقاومت پیچشی سفارش شده در آیین نامه ACI-89 ارائه می‌کند.

جدول (۴): مقایسه مقاومت پسماند با ACI-89

نمونه	مقاومت فشاری	مقاومت پسماند آزمایشات	مقاومت توصیه شده ACI-89	نسبت
۲	۲۱/۷	۲۰۵۷	۱۴۰۴	۱.۴۶
۳	۱۹/۸	۲۰۹۸	۱۳۴۱	۱.۵۶
۴	۲۲	۳۰۰۹	۱۴۱۴	۲.۱۳
۵	۲۰	۳۰۸۴	۱۳۴۸	۲.۲۹
۶	۲۳/۱	۲۵۰۷	۱۴۴۹	۱.۷۳

بنظر می‌رسد اختلاف موجود در مقاومتها با توجه به مبنای نظری محاسبه مقاومت ذاتی در ACI-89 که ۴۰٪ مقاومت ترک خوردگی حاصل از تئوری خمش کج می‌باشد قابل توجیه می‌باشد چرا که در این تئوری مقاومت ناشی از وجود آرماتورهای طولی لحاظ نمی‌شود. همچنین کاهش یاد شده در ACI-89 بدلیل وجود لنگر خمشی محتمل در مقطع اعمال شده در حالی که در گزارش حاضر مقطع تنها تحت پیچش است.

۶- نتیجه گیری و پیشنهاد

۱- مقاومت ترک خوردگی بدست آمده از نظریه خمش کج، برای تخمین مقاومت پیچشی ترک خوردگی تیرهای بتنی، (با یا بدون آرماتور) به نتایج آزمایشات انجام شده نزدیکتر بود (جدول (۲)).

۲- نمونه‌های بتنی مسلح شده با آرماتور طولی، مقاومت پسماند پیچشی قابل ملاحظه‌ای را تا زوایای چرخش بالا، نشان دادند (شکل (۵)).

۳- با افزایش نسبت آرماتور، مقاومت پیچشی پسماند و شکل‌پذیری تعریف شده نمونه‌ها افزایش یافته است (شکل (۷)).

۴- تحت پیچش خالص، در نظر نگرفتن مؤلفه پیچش ناشی از بتن تا حدی دور از واقعیت می‌باشد. تأثیر این مؤلفه به حدی است که در مواردی که امکان بازتوزیع لنگر پیچشی وجود دارد، می‌تواند نیاز به در نظر گرفتن پیچش همسازی (معادل $0.67 \times T_{cr}$) را به میزان زیادی، برطرف نماید.

۶- با توجه به شکل (۸) پیشنهاد می‌گردد، درصدی از مقاومت ترک خوردگی (نزدیک ۵۰٪) در طراحی تیرهایی که تحت پیچش می‌باشند، بعنوان T_c (مقاومت پیچشی بتن) در نظر گرفته شود.

۷- تقدیر و تشکر

از آنجا که برای انجام آزمایشات پیچشی، ساخت دستگاه تست پیچش و ساخت قالبهای بتنی در دانشگاه یزد انجام شده است. نویسندگان مقاله از تمامی دست‌اندرکاران آزمایشگاه بتن و سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه یزد بابت انجام این تحقیق، تشکر می‌نمایند.

۸- منابع:

- [۱] معاونت امور فنی و دفتر امور فنی و تدوین معیارها؛ آیین نامه آبا (آیین نامه بتن ایران، تجدید نظر اول)، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، مرکز مدارک علمی و انتشارات، ۱۳۸۲.
- [۲] معاونت امور فنی و دفتر امور فنی و تدوین معیارها، دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، مرکز مدارک علمی و انتشارات، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۱.
- [۳] ACI 318-05; *ACI Code, (Building Code Requirements for Structural Concrete (318-2005) and Commentary)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2005.
- [۴] ACI 318-89; *ACI Code, (Building Code Requirements for Structural Concrete (318-1989) and Commentary)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, 1989.
- [۵] ACI committee 438; *ACI Code, (Tentative recommendations for the design reinforced concrete members to resist torsion)*, *Acı Journal proceedings*, Vol. 66, No. 1, pp. 1-8, Jan, 1969.
- [۶] Mau, S.T and Hsu, T. T. C ; *Concrete Shear in Earthquake*, University of hoston, Texas, 1991.
- [۷] Timoshenko, S.; *Strength of Materials, (Strength of Materials part2 Advanced Theory and Problems)*, CBS Publishers, Indiana, 1995.

- [۸] Mitchell, D. and Collins, M.P., “*Diagonal Compression Field Theory – (A Rational Model for Structural Concrete in Pure Torsion)*”, Structural Journal of the American Concrete Institute, Vol. 71, No. 8, pp. 396-408, 1974.
- [۹] Tavio, A., and Teng, S., “*Effective Torsional Rigidity of Reinforced Concrete Members*”, Structural Journal of the American Concrete Institute, Vol. 101, No. 2, pp. 252-260, Mar-Apr, 2004.
- [۱۰] Nyland, H., “*Torsional and Torsion Restraint by Concrete Structures*”, Stations Committee for Byggnadsforskning, Stockholm, Bulletin No. 3, 1945.
- [۱۱] Koutchoukali, N. and Belarbi, A. “*Torsion of High-Strength Reinforced Concrete Beams and Minimum Reinforcement Requirements*”, Structural Journal of the American Concrete Institute, Vol. 98, No. 4, pp. 462-469, 2001.
- [۱۲] Hsu, T. T. C. “*Torsion of Structural Concrete*”, Structural Journal of the American Concrete Institute, Sep 1964.
- [۱۳] Humphreys, R., “*Torsional Properties of Prestressed Concrete*”, Structural engineering, London, Vol. 35, No. 6, June 1957, PP.213-224.
- [۱۴] Zia, P., “*Torsional Strength of Prestressed Concrete Members*”, Structural Journal of the American Concrete Institute, Vol. 57, No. 10, April 1961.
- [۱۵] Csikos, A., and Hegedus, I., “*Torsion of Reinforced Concrete Beams*”, Technical University of Budapest, Department of Reinforced Concrete Structures, H1521 Budapest, 1998.

۹- زیر نویس ها

-
- ∩ Interlocking
 - ∪ Elastic
 - ∩ Plastic
 - ε Skew bending
 - ° Hso
 - ∩ Dial gage