

بررسی رفتار تیر بتنی تحت پیچش با آرما تور طولی تنها در روش المان محدود

رضا پور حسینی*، رضا مرشد** و امیر حسین خواجه حسینی***

چکیده

اکثر آیین‌نامه‌های موجود - بر خلاف برش - برای اعضای بتن مسلح تحت پیچش مقاومت پیچشی ناشی از بتن (T_c) را پس از ترک در نظر نمی‌گیرند. در این مقاله مقاومت پیچشی تیرهای بتنی مسلح با آرما تور طولی و بدون خاموت، هنگام و بعد از ترک خوردگی مدل سازی و مورد بررسی قرار گرفته است. این مدل سازی در نرم افزار ANSYS که بر اساس نظریه‌ی المان محدود پایه ریزی شده، صورت گرفته است. نتیجه‌های حاصل از مدلسازی با نتیجه‌های آزمایشگاهی مقایسه شده است. این نتیجه‌های با نتیجه‌های آزمایش‌ها سازگار بوده و نشان دهنده‌ی وجود مقاومت پیچشی پسماند، در تیرهای بتنی مسلح شده با آرما تور طولی تنها است.

واژه‌های کلیدی: مدل سازی، اجزای محدود، تیربتنی، پیچش، آرما تور طولی

۱- مقدمه

تیرهای با ممان پیچشی حاکم داشته باشد. در این تحقیق نتیجه‌های مدل رایانه‌ای که برای ارزیابی مقاومت پیچشی پس از ترک خوردگی تیرهای بتنی مسلح شده با آرما تور طولی تنها و با استفاده از نرم افزار ANSYS، انجام گرفته است، آرایه می‌شود. نتیجه‌های حاصل نشان می‌دهند، به کارگیری این نرم افزار، امکان مدل سازی تیرهای بتنی با آرما تور طولی تنها را تحت پیچش می‌دهد.

۲- برنامه ANSYS

نرم‌افزار ANSYS در سال ۱۹۷۱ در دانشگاه Swanson تولید شده است و در این مقاله از ویرایش ۵/۴ آن استفاده شده است. این نرم‌افزار بر اساس نظریه پر کاربرد و سیستماتیک اجزای محدود بنا شده است [4]. در این نظریه‌ی مسأله، گسسته‌سازی شده و سپس معادله‌های حاکم بر آن تشکیل و حل می‌شوند؛ سپس مقدارهای به دست آمده‌ی گرهی، در معادله‌های اجزای تشکیل دهنده جسم جاگذاری می‌شوند. بنابراین مقدارهای مجهول در نقاط متفاوت جسم براحتی به دست می‌آید [4].

مقاومت اعضای بتنی، پس از ترک خوردگی به طور کامل به نسبت آرما تور و چگونگی توزیع آرما تورها بستگی پیدا می‌کند. از نظر برخی آیین نامه‌ها (آبا [۱] و ACI [۲]) از مقاومت پیچشی عضو بتن مسلح (طرح نشده برای پیچش) پس از ترک صرف نظر می‌شود. بدین ترتیب پدیده‌هایی نظیر درهم قفل شدگی دانه‌ها - که در برش می‌تواند مقاومت برشی (V_c) قابل توجه‌ای ایجاد کند - لحاظ نمی‌شود. بنظر می‌رسد حتی وجود آرما تور طولی تنها (تعبیه شده برای خمش یا افشای حداق‌های آیین نامه‌ای) بتواند امکان تحمل پیچش بعد از ترک را در مقایسه با تیر غیر مسلح فراهم سازد. این مقدار مقاومت پیچشی که می‌توان از آن به عنوان (T_c) نام برد، می‌تواند نقش بسزای در اقتصادی‌تر و دقیق‌تر شدن طراحی پیچشی

* استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد

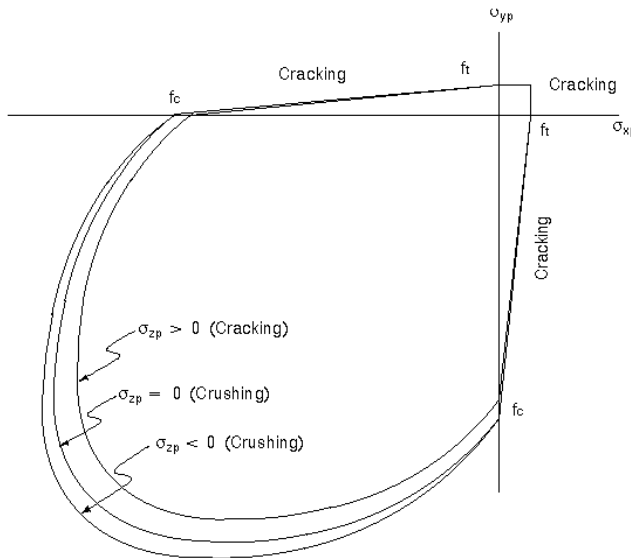
** استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه یزد

*** فارغ التحصیل کارشناسی ارشد عمران، سازه، دانشگاه یزد

(نویسنده مسئول) پست الکترونیکی: aammiir58@yahoo.com

۱-۲ معرفی المانها و رفتار مواد استفاده شده

الف) المان **solid65**: المانی هشت گره‌ای بوده و هر گره، دارای سه درجه‌ی آزادی جابجایی در جهت های X ، Y و Z است. این المان دارای قابلیت‌های ویژه جهت مدل‌سازی بتن و بتن مسلح است. در المان **solid65** می‌توان چهار ماده (۱ ماده زمینه و سه ماده به عنوان آرما تور یا کامپوزیت) تعریف کرد. برای تعریف آرما تور در یک عضو بتن مسلح دو روش وجود دارد؛ نخستین روش، استفاده از مدل آرما تور (*smeard*) است. روش دیگر استفاده از المان **link8** است. در روش دوم، آرما تور در مکان واقعی خود در عضو قرار داده می‌شود. در این تحقیق از قابلیت اخیر، در مدلسازی استفاده شده است. برای این المان، چهار ویژگی (**KEYOPT**) وجود دارد. دو ویژگی مهم آن عبارت اند از: **KEYOPT(1)**: دادن قابلیت ایجاد تغییر شکل های اضافی به المان و **KEYOPT(7)**: دادن قابلیت ویژه‌ی مصالح بتنی (خرد شدن و ترک خوردن) به المان [۳].



شکل ۱ سطح شکست سه ب‌ب‌عدی بتن در فضای تنش‌های اصلی بر اساس معیار شکست ویلیام-وارنک [۳]

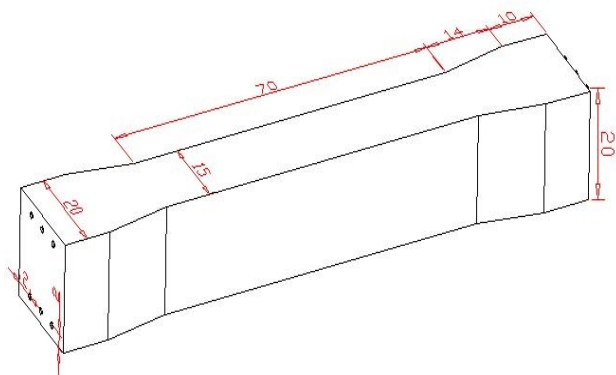
ب) رفتار ماده **concr** برای بتن: در این مدل رفتار، شکست مواد ترد پیش‌بینی می‌شود و شامل هر دو نوع شکست ترک‌خوردگی و خردشدگی است. این مدل تنها در المان **solil65** قابل استفاده است. معیار شکست بتن به علت تنش‌های سه بعدی با استفاده از معیار شکست ویلیام-وارنک [۳] کنترل می‌شود (شکل ۱). در این مدل ۹ پارامتر **C1** تا **C9** وجود دارد که در جدول داده‌های نرم‌افزار آورده شده است. از این میان، چهار پارامتر اول و پارامتر نهم به عنوان مقدارهای ورودی به نرم‌افزار داده می‌شود: **C1** ضریب انتقال برش در ترک باز، **C2** ضریب انتقال برش در ترک بسته، **C3** مقاومت کششی، **C4** مقاومت فشاری و **C9** ضریب وادادگی که المان **solil65** را هنگام کشش کنترل می‌کند. این ضریب به صورت پیش فرض ۰٫۶ است.

ج) المان **solid45**: المانی سه بُعدی، هشت گره‌ی و دارای سه درجه آزادی در هر گره است این المان برای حالت های الاستیک، پلاستیک، خزش مناسب است. در دو انتهای تیر، این المان مدل شده است تا تکیه گاه ها به طور مستقیم روی المانی با جنس بتن قرار نگیرند.

د) المان **link8**: این المان می‌تواند به عنوان یک المان خرپا، کابل و یا فنر در نظر گرفته شود. این المان سه بُعدی دو گره‌ای، المانی فشاری-کششی با سه درجه‌ی آزادی است [۳]. آرما تور های طولی با این المان مدل شده اند.

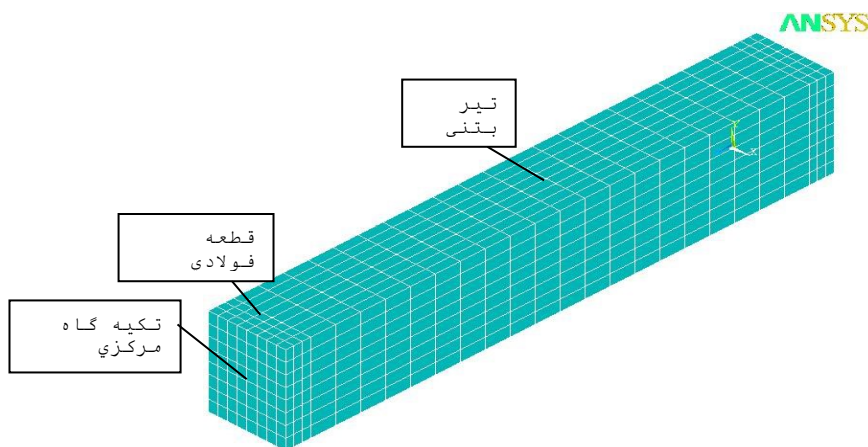
۲-۲ مدل‌سازی تیرها

به منظور ارزیابی اثر آرما تور طولی، ۶ تیر با المان **solid65** و مدل رفتار **concr** مدل شده اند. آرما تورها نیز با المان **link8** و مدل رفتار **Bkin** (دوخطی) به نرم افزار معرفی شده اند. این تیرها در تحقیقی مشابه، در آزمایشگاه بتن دانشگاه یزد مورد آزمایش قرار



شکل ۲ ابعاد نمونه‌های آزمایشی [۵]

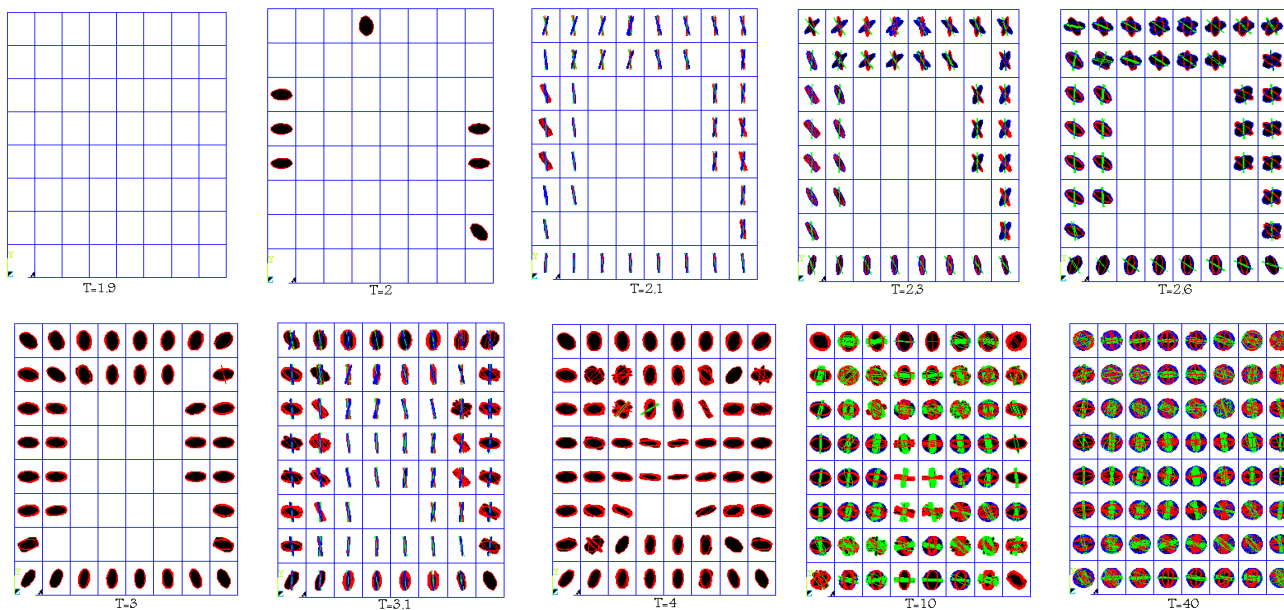
گرفته اند [۵]. ابعاد و مشخصات مورد نیاز برای مدل سازی مطابق با تیرهای آزمایش شده است. مشخصات بتن از آزمایشگاه و آبا [۱]: مدول الاستیسیته $= 5000\sqrt{f'_c}$ ، مقاومت کششی $= 0.6\sqrt{f'_c}$ ، ضریب پواسون $= 0.18$ هستند. مشخصات آرماتورها نیز به صورت: مدول الاستیسیته $= 200000$ و حد جاری شدن $= 400$ (تمامی واحدها بر حسب نیوتن و میلیمتر است). تنها متغیر در میان تیرها تعداد و مقدار آرماتورهای طولی است. شکل ۲ ابعاد و جدول ۱ جزئیاتی نظیر میزان آرماتور و مقاومت فشاری نمونه های آزمایش را ارایه می کنند. برای تعیین میزان مقاومت تیر در مدل، به یک طرف نمونه چرخش وارد شده؛ نیروی عکس العملی که حین چرخش، تدریجی به دست می آید، نماینده مقاومت تیر میباشد. دو قطعه فولادی به ابعاد سطح مقطع (۲۰*۱۵ سانتیمتر) که با المان solid45 و رفتار الاستیک، مدل شده اند، به دو سر تیر بتنی متصل می شوند (شکل ۳). این دو تکیه گاه به خاطر وجود تنشهای تکیه گاهی فولادی انتخاب شده اند؛ تا بتن دچار شکستگی غیر پیچشی نشود.



شکل ۳ تیر المان بندی شده

جدول ۱ جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌ها [۵]

آرماتورگذاری بالا	آرماتورگذاری پایین	مقاومت فشاری N/mm^2	نمونه شماره
.	.	۲۲/۶	۱
2Φ8	2Φ8	۲۱/۷	۲
2Φ10	2Φ10	۱۹/۸	۳
2Φ12+1Φ8	2Φ12+1Φ8	۲۲	۴
3Φ12	3Φ12	۲۰	۵
3Φ12	2Φ10	۲۳/۱	۶



شکل ۴ روند تشکیل ترکهای بسته و تبدیل آنها به ترک باز در مقطع به صورت شماتیک

۲-۳ تنظیم (verify) ضریب های ورودی مدل مادی

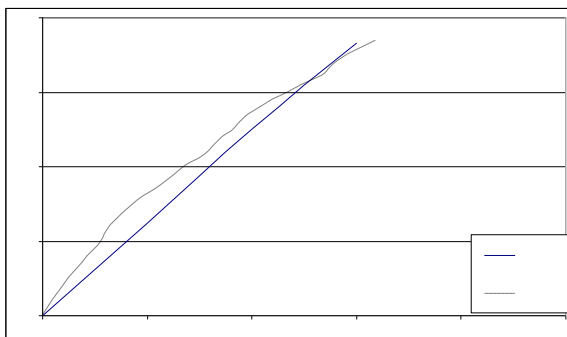
به منظور دستیابی به مقدارهای واقعی دو پارامتر ضریب انتقال برش در ترک باز (C1) و بسته (C2)، که قابل اندازه گیری و محاسبه نیستند. لازم است به روش سعی و خطا این دو پارامتر تصحیح شوند. بعد از تصحیح در هر مرحله، آنالیز دوباره صورت گرفته و نتیجه های قابل اندازه گیری و همچنین مشاهدات ملموس آزمایشگاهی با نتیجه های مدل سازی مقایسه می شود. این عمل تا هنگامی که نتیجه های به یکدیگر نزدیک شوند، ادامه می یابد. البته این دو ضریب نمی توانند باعث تغییرهای کلی در رفتار مدل شوند. برخی از مشاهدات این تحقیق جهت اصلاح C1 و C2 بدین شرح است:

۱- عدم جاری شدن آرمانتورها در هر دو حالت آزمایشگاهی و مدل سازی. ۲- ایجاد ترک به صورت ناگهانی. ۳- هماهنگی گسترش ترک در مدل سازی و آزمایش. در شکل ۴ روند گسترش ترکها، از المانهای خارجی به المانهای مرکزی و تبدیل ترکهای بسته به باز در گامهای متفاوت بارگذاری (تعداد گامها ۴۰ است)، نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود، ترک خوردگی در گام سوم رخ داده است.

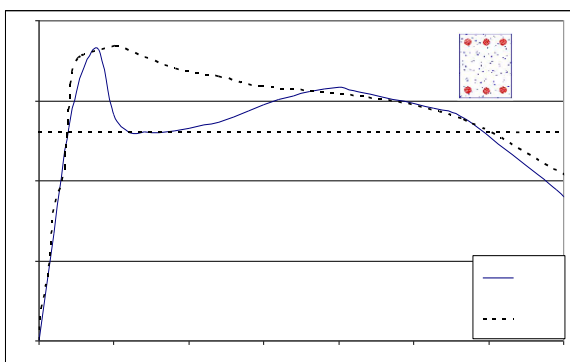
۳- بررسی و مقایسه نتیجه های مدل سازی

در شکل ۵ منحنیهای لنگر پیچشی-زاویه پیچش در تیرهای آزمایش شده [۵] با منحنی به دست آمده از آنالیز غیر خطی، مقایسه شده اند. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، در مدل سازی انجام شده در نرم افزار ANSYS نیز مانند آنچه در آزمایش های مشاهده می شود، یک مقاومت پس از ترک در تیرها وجود دارد. اما دو منحنی حاصل از آزمایش و آنالیز پس از ترک روی هم منطبق نمی شود. بنظر می رسد علت قرار نگرفتن کامل دو منحنی، به دقت پس از ترک منظور نشدن افزایش طول نمونه، ناشی از زبری در سطح شکست، در نرم افزار است؛ پدیده ای که در آزمایش لحاظ می شود. به عبارت دیگر برخی از خواص فیزیکی سطح شکست (عبور مقداری تنش برشی) به وسیله ضریب های انتقال برش لحاظ شده اند. ولی افزایش طول در اثر وجود سنگدانه ها منظور

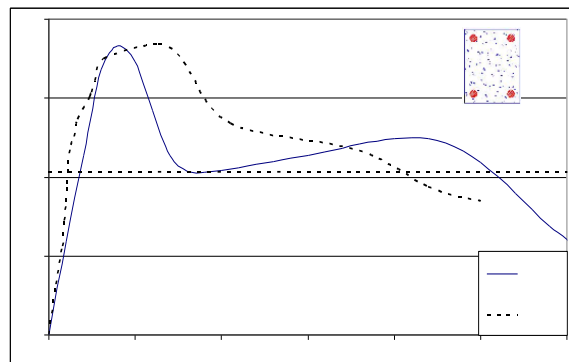
نشده است. علی رغم این مسأله، مقاومت در نقطه ای افت پس از ترک، صفر نیز نمی شود که ممکن است به دلیل چرخش دو سطح شکست نسبت به هم و ازدیاد طول تیر و در نتیجه به کار افتادن آرمانتورها باشد. لازم بذکر است در آزمایش و به دقت بعد از ترک به خاطر زبری سنگدانه ها، نمونه تمایل به افزایش طول دارد؛ ولی آرمانتورها مانع از آن می شوند و به همین دلیل مقاومت، ناگهان افت نمی کند. از نکات قابل برداشت از منحنیهای شکل ۵ این است که چرخش های متناظر با مقاومت پسماند بیشتر از چرخش های اعضا در سازه های بتنی معمولی است [۶-۸]. با توجه به منحنی های حاصل از مدل سازی (نظری)، بعد از یک افت اولیه که پس از ترک رخ می دهد، تمامی نمودارهای دارای یک قسمت به نسبت افقی هستند. اگر به صورت قراردادی کمینه این قسمت افقی به عنوان مقاومت پسماند در نظر گرفته شود. می توان مقایسه ای بین تیرهای مدل شده انجام داد. در شکل ۶ رابطه ی مقاومت پسماند در مقایسه با نسبت آرمانتور ارایه شده است. (در این شکل T_{cr} مقاومت ترک خوردگی تیرهای مدل شده است که از شکل ۵ استخراج شده است)



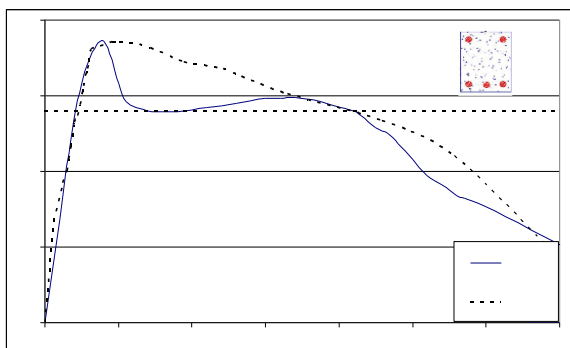
شکل ۵ الف) مقایسه ی منحنی ممان ($N.m$) - چرخش ($(Rad/mm) \times 10^{-7}$) حاصل از نظری و آزمایش نمونه ۲ بدون آرمانتور



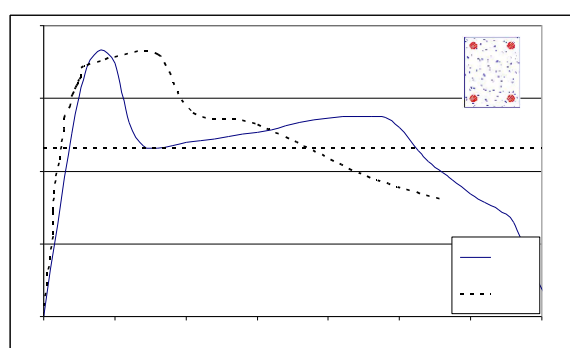
شکل ۵ (ه) مقایسه منحنی ممان ($N.m$) - چرخش ($(Rad/mm) \times 10^{-7}$) حاصل از نظری و آزمایش نمونه ۵ا با آرماتور ۱,۳٪



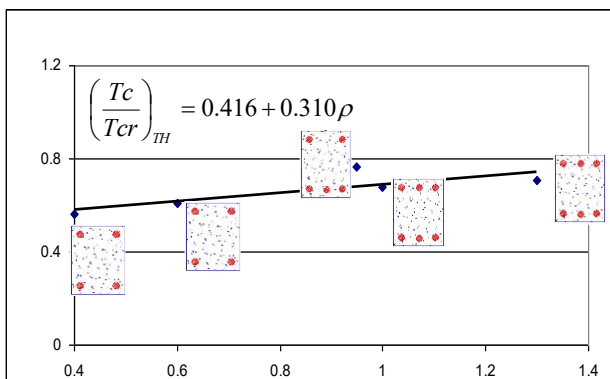
شکل ۵ (ب) مقایسه منحنی ممان ($N.m$) - چرخش ($(Rad/mm) \times 10^{-7}$) حاصل از نظری و آزمایش نمونه ۵ب با آرماتور ۰,۴٪



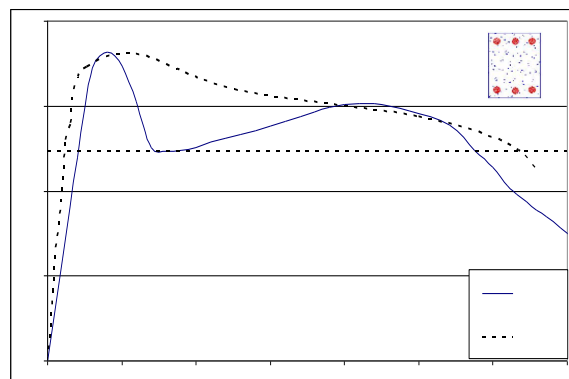
شکل ۵ (و) مقایسه منحنی ممان ($N.m$) - چرخش ($(Rad/mm) \times 10^{-7}$) حاصل از نظری و آزمایش نمونه ۵ج با آرماتور ۰,۹٪



شکل ۵ (ج) مقایسه منحنی ممان ($N.m$) - چرخش ($(Rad/mm) \times 10^{-7}$) حاصل از نظری و آزمایش نمونه ۵د با آرماتور ۰,۶٪



شکل ۶ رابطه‌ی مقاومت پسماند با نسبت آرماتور از نتیجه‌های نظری (ρ نسبت متوسط آرماتور در بالا و پایین مقطع)



شکل ۵ (د) مقایسه منحنی ممان ($N.m$) - چرخش ($(Rad/mm) \times 10^{-7}$) حاصل از نظری و آزمایش نمونه ۵د با آرماتور ۰,۱٪

۵- منابع

- [۱] معاونت امور فنی و دفتر امور فنی و تدوین معیارها، "آیین نامه بتن ایران (آبا)"، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، مرکز مدارک علمی و انتشارات، ۱۳۸۲.
- [2] ACI 318-05. "Building Code Requirements for Structural Concrete (318-05) and Commentary," (318R-05). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., 2005.
- [3] "ANSYS", ANSYS User's Manual 5.4, ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, 1997.
- [۴] فگان. م.ج. ترجمه حجتی م.ج.، "تحلیل اجزای محدود"، انتشارات دانشگاه مازندران، ۱۳۸۱.
- [۵] خواجه حسینی. ا.ج. "ارزیابی تاثیر آرما تور طولی بر مقاومت پیچشی اعضای بتنی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه یزد، ۱۳۸۳.
- [۶] معاونت امور فنی و دفتر امور فنی و تدوین معیارها، "دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمانهای موجود"، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، مرکز مدارک علمی و انتشارات، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۱.
- [7] 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.
- [8] Adam Csikos and Isstvan Hegedus. "Torsion of Reinforced Concrete Beams," Technical University of Budapest, Department of Reinforced Concrete Structures, H1521 Budapest, 1998.

همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، وجود آرما تور طولی در مدل سازی نیز (همچون آزمایش) باعث باقی ماندن مقداری از مقاومت بعد از ترک شده است. با افزایش نسبت آرما تور، این مقاومت پسماند نیز افزایش یافته است. در این شکل همچنین تأثیر جزییات آرما تور گذاری بر مقاومت پسماند به صورت ظاهری و در نمونه های متفاوت، ارایه شده است.

۴- نتیجه گیری و پیشنهاد

الف) با توجه به محافظه کارانه بودن نتیجه های نظری نسبت به آزمایش (شکل ۵) و در صورت تنظیم صحیح پارامترهای مدل مادی concr در نرم افزار ANSYS، این نرم افزار می تواند ابزار به نسبت مناسبی برای تخمین مقاومت پسماند تیرهای تحت پیچش با آرما تور طولی تنها باشد.

ب) نمونه های تیر که با نسبت های متداول آرما تور طولی (حدود ۱٪ و بالاتر) مسلح شده بودند، مقاومت پسماند قابل توجهی را تا زوایای چرخش بالا نشان دادند (شکل ۵ د) الی (و).

ج) به عنوان یک پیشنهاد می توان در صدی از مقاومت ترک خوردگی (با توجه به نمونه های مدل شده در این تحقیق حدود ۵۰٪) را در طراحی تیرهایی که تحت پیچش خالص هستند، به عنوان T_c در نظر گرفت (شکل ۶).

د) به عنوان پیشنهاد تحقیق در آینده می توان نمونه هایی با آرما تور طولی تنها و تحت بارهای توأم خمشی، پیچشی و برشی برای به دست آوردن مقاومت پسماند در شرایط عمومی تر را هم آزمایش و هم مدل کرد.