

ارزیابی مدل‌سازی رفتار تیر عمیق با استفاده از نظریه های میدان فشاری اصلاح شده و مدل میدان تنش توزیع شده

سعید فیروزی^۱، سیدمهدی دهقان^۲، محمدمیر نجفقلی پور^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی زلزله دانشگاه صنعتی شیراز، s.firoozi@sutech.ac.ir

۲- استادیار دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شیراز، smdehghan@sutech.ac.ir

۳- استادیار دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شیراز، najafgholipour@sutech.ac.ir

s.firoozi@sutech.ac.ir

چکیده

طبق تعریف استانداردهای طراحی سازه های بتن مسلح، تیر عمیق به تیری اطلاق می شود که نسبت طول دهانه به ارتفاع مقطع آن از ۴ کمتر و یا نسبت طول دهانه برشی آن به ارتفاع مقطع کمتر از ۲ باشد. تیرهای عمیق به دلیل رفتار برشی حاکم بر عملکرد آن ها جزء نواحی ناپیوسته هندسی به شمار می روند. در این تحقیق رفتار نمونه های آزمایشگاهی تیر عمیق توسط نرم افزار VecTor2 که مبتنی بر نظریه میدان فشاری اصلاح شده (MCFT) و مدل میدان تنش توزیع شده (DSFM) است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. این ارزیابی از طریق تحلیل اجزا محدود در نرم افزار با در نظر گرفتن اثر ترک خوردگی بتن و رفتار غیرخطی مصالح می باشد. دو نوع تیر عمیق از دو پژوهش مختلف مورد بررسی می باشد. یکی تیرهای عمیق پیوسته چند دهانه و دیگری تیرهای عمیق تک دهانه است. در نهایت با مقایسه نتایج از جنبه های مختلف شامل ظرفیت نهایی، جابجایی نهایی، الگوی ترک خوردگی و نمودار نیرو- جابجایی در مقایسه با نتایج بررسی آزمایشگاهی این نتیجه حاصل شد که مدل‌سازی توانایی پیش بینی رفتار، ظرفیت و الگوی ترک خوردگی تیرهای عمیق را به خوبی دارد و جهت ارزیابی رفتار تیرهای عمیق به خوبی قابل استفاده است.

کلمات کلیدی: تیر عمیق، نظریه میدان کششی اصلاح شده، مدل میدان تنش توزیع شده، تحلیل اجزا محدود

(کد A)

۱. مقدمه و پیشینه تحقیق

در تقسیم بندی عملکردی، اعضای سازه ای بتن مسلح را می توان به دو گروه نواحی تیرمانند و نواحی ناپیوسته تقسیم بندی کرد. نواحی تیرمانند شامل اعضای است که می توان توزیع خطی کرنش ها در ارتفاع مقطع آن ها و فرض برنولی را در مورد رفتارشان صحیح دانست. اما در نواحی ناپیوسته به دلیل رفتار برشی حاکم بر عملکرد آن ها، نمی توان فرض ساده کننده برنولی را صحیح دانست و همچنین توزیع خطی کرنش ها در ارتفاع مقطع عضو را به صورت فرضی قابل قبول در نظر گرفت. تیرهای عمیق طبق تعریف آئین نامه ACI318 به تیری اطلاق می شود که نسبت طول دهانه به ارتفاع مقطع آن ها از ۴ کمتر باشد و یا نسبت طول دهانه برشی به ارتفاع مقطعشان از ۲ کمتر باشد [۱]. این اعضای سازه ای جزء نواحی ناپیوسته هندسی به شمار می روند و به همین دلیل نیازمند استفاده از روش های مدلسازی دیگری برای بررسی رفتارشان می باشند. استفاده از آزمایش و همچنین روش های اجزا محدودی غیرخطی، به منظور بررسی رفتار این اعضا پیشنهاد می شود. روش های آزمایشگاهی پرهزینه هستند، اما با وجود نرم افزار تحلیل اجزا محدود غیرخطی، این نوع تحلیل در بررسی رفتار تیرهای عمیق مورد استقبال قرار گرفته است. بررسی رفتار تیرهای عمیق از دو جهت قابل اهمیت می باشد. اولاً این بررسی جهت تحلیل، ارزیابی و طراحی تیرهای عمیق می تواند مورد استفاده قرار گیرد. دوماً به دلیل این که در تحلیل و طراحی سقف ها و دیافراگم ها تحت تاثیر بارهای جانبی می توان رفتار دیافراگم را مشابه یک تیر عمیق پیوسته که تکیه گاه های آن اعضای قائم باربر جانبی است، در نظر گرفت [۲].

مکانیزم های خرابی برای تیرهای عمیق پیوسته به طور قابل ملاحظه ای از تیرهای عمیق با تکیه گاه ساده، متفاوت است. تئوری معروف تیر ارتجاعی قابل اعمال بر تیرهای لاغر است، اما برای پیش بینی رفتار تیر عمیق پیوسته که دارای تغییرات برشی بالا و توزیع کرنش غیرخطی در مقطع تیر دارد، قابل استفاده نیست. بیشترین لنگر و بیشترین برش برای تیرهای عمیق پیوسته در یک ناحیه رخ می دهد، حال آن که برای تیرهای عادی در نقاط مختلف است. این هم مکانی محل بیشترین لنگر و برش را روگوفسکی و همکاران [۳] و یانگ و آشور [۴] اشاره کرده اند.

راه حل های حد پایین برای بررسی رفتار تیرهای عمیق بتنی مسلح، مبتنی بر تئوری خمیری است که به طور کلی بر گرفته از مدل خرابایی فشاری-کششی (Strut and Tie) می باشد [۵-۹]. با در نظر گرفتن حد بالای تئوری خمیری، می توان مقاومت برشی تیرهای عمیق ساده را تخمین زد [۱۰]. فرآیندهای ساده شده ای نیز مبتنی بر تئوری خمیری جهت پیش بینی مقاومت برشی تیرهای عمیق با شرایط مختلف تکیه گاهی ارائه شده است [۱۱ و ۱۲].

تحقیقاتی نیز جهت بررسی اثر اندازه مقطع بر مقاومت برشی تیر عمیق صورت گرفته است. بر این اساس، اثر اندازه مقطع در تیرهای بدون میلگرد برشی خود را در خرابی برشی نشان می دهد. بدین صورت که با افزایش ارتفاع مقطع تیر مقاومت برشی کاهش خواهد یافت [۴].

همچنین چندین نظریه جهت بیان اثر اندازه مقطع بر مقاومت برشی ارائه شده است. درگیری سنگدانه ها در راستای ترک های برشی در مقاومت برشی مشارکت قابل توجهی دارند. طبق نتایج حاصل افزایش اندازه تیر با ثابت ماندن اندازه سنگدانه، مستقیماً بر مقاومت برشی اثر دارد و آن را کاهش می دهد [۱۳]. همچنین در بررسی مکانیک خرابی سازه های بتنی، اثر اندازه مقطع در خرابی سازه های بتنی تحت برش قطری مورد بررسی قرار گرفته است [۱۴-۱۶].

۲. معرفی مبانی نظری مدلسازی

با توجه به استفاده از نرم افزار VecTor2 جهت شبیه سازی عددی رفتار تیر عمیق لازم است مبانی نظری و ویژگی های این نرم افزار اشاره گردد.

۱-۲. معرفی نظریه میدان فشاری اصلاح شده

نظریه میدان فشاری اصلاح شده (MCFT: Modified Compression Field Theory) [۱۷]، در سال ۱۹۸۶ توسط Vecchio و Collins به عنوان یک مدل تحلیلی برای پیش بینی پاسخ نیرو-جابجایی اعضای بتن مسلح تحت تنش های قائم و برشی ارائه شد. این روش تنش ها و کرنش های قائم محلی و میانگین، عرض و جهت ترک بتن و میلگرد را از پاسخ نیرو-جابجایی عضو تخمین می زند. ضمناً طبق این روش حالت خرابی عضو نیز قابل تعیین می باشد. مدل های ترک خورده بتن در MCFT به عنوان یک مصالح ناهمسان با استفاده از روش ترک های چرخشی پراکنده (Smearred rotating crack)، در نظر گرفته شده است [۱۸].

۲-۲. معرفی مدل میدان تنش توزیع شده

مدل میدان تنش توزیع شده (DSFM: Distributed Stress Field Model) [۱۹] در سال ۲۰۰۰ توسط Vecchio با هدف برطرف کردن نقص های نظریه MCFT در پیش گویی پاسخ سازه ها و الگوهای بارگذاری مطرح شد. در اجزای مسلح سبک، جایی که لغزش ترک برشی قابل توجه است، چرخش میدان تنش های اصلی تمایل به عقب ماندگی از چرخش میدان کرنش های اصلی دارد. در نظریه MCFT، به دلیل این که چرخش دو میدان کرنش و تنش، مساوی در نظر گرفته شده است، برای برخی اجزا، سختی برشی و مقاومت به طور کلی دست بالا است و بالعکس برای اجزایی که چرخش محدودی دارند سختی و مقاومت برشی دست پایین لحاظ می شود. دلیل این نقص این است که در پاسخ فشاری بتن در نظریه MCFT رفتار بیش از حد نرمی برای اثر تنش های اصلی کششی اعمال شده است. نظریه DSFM به لحاظ مفهومی مشابه MCFT می باشد اما با تغییراتی که در روابط آن ارائه شده، توانسته این نقص ها را برطرف نماید [۱۸].

۳-۲. معرفی نرم افزار VecTor2

نرم افزار VecTor2، یک نرم افزار تحقیقاتی است که توسط محققین دانشگاه تورنتو بر مبنای نظریه میدان فشاری اصلاح شده (MCFT) و مدل میدان تنش توزیع شده (DSFM) جهت پیش بینی پاسخ درون صفحه و ارزیابی تنش های قائم و برشی اجزای بتن مسلح ایجاد شده است. VecTor2 یک نرم افزار مختص تحلیل اجزای محدود غیرخطی دو بعدی بتن مسلح است. این نرم افزار با مطالعه روی رفتارهای بتن مسلح و روش المان محدود در موارد متعددی از تحقیقات طی دو دهه قبل، تدوین یافته است. این نرم افزار با استفاده از مدل های غیرخطی موجود برای بتن مسلح و با به کارگیری توانایی های قدرتمند تحلیل اجزای محدود به کاربر این امکان را می دهد که دقت بیشتری را در مورد عملکرد سازه ای (مقاومت، رفتار پس از اوج، حالت های خرابی، خیز و ترک خوردگی) داشته باشد. همچنین به کاربر اجازه می دهد که از مصالح مرکب بتن مسلح، لحاظ کردن تغییرات مصالح در طول پیشرفت ترک، چالش بین هندسه و بارگذاری را نیز در تحلیل خود لحاظ کند [۱۸].

۳. جزئیات مدلسازی

تیرهای مورد نظر در نرم افزار المان محدود VecTor2 که قابلیت تحلیل و ارزیابی اجزای دوبعدی بتن مسلح دارد، شبیه سازی شد. در این نرم افزار با قرار دادن مدل های رفتاری مناسب برای بتن و میلگرد و لحاظ کردن اثر ترک خوردگی و اعمال بار مناسب، نمونه ها مورد ارزیابی قرار گرفتند.

۱-۳. معرفی نمونه های مورد بررسی

نمونه های مورد بررسی در این تحقیق برگرفته از دو مقاله ی زیر می باشند.

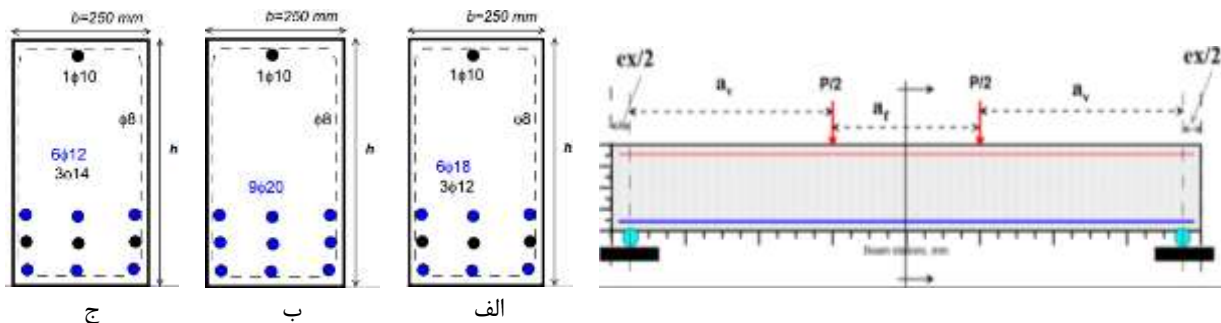
(۱) شورایم و السید [۲۰] در تحقیق خود به بررسی اثر نسبت میلگرد طولی، نسبت عمق به دهانه برشی و عمق تیر بر رفتار تیر عمیق با بتن های پرمقاومت، پرداختند. سه نمونه از تیرهای ساخته شده در این تحقیق، مورد بررسی و مدلسازی قرار گرفته است. مشخصات میلگردها (جدول ۱)، هندسه و مشخصات بتن (جدول ۲)، نحوه بارگذاری و محل تکیه گاه ها (شکل ۱) و مقطع نمونه تیرها (شکل ۲) در ادامه بیان شده است.

جدول شماره ۱- مشخصات میلگردها

d_b (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (GPa)
۱۰	۵۳۳	۷۶۵	۱۹۵
۱۲	۵۶۹	۶۵۸	۲۰۷
۱۸	۵۴۶	۶۷۱	۱۷۹
۲۰	۵۴۲	۶۶۶	۱۷۹

جدول شماره ۲- مشخصات هندسی و بتن

#	f'_c (MPa)	h (mm)	d (mm)	a_v/d	a_v (mm)	a_f (mm)	e_x (mm)	L (mm)	Sec. #	ρ (%)
۱-۱	۵۷/۵	۷۰۰	۶۱۲	۱	۶۱۲	۱۶۰۰	۷۷۶	۳۶۰۰	الف	۱/۲۱
۲-۱	۵۷/۵	۷۰۰	۶۱۲	۱	۶۱۲	۱۶۰۰	۷۷۶	۳۶۰۰	ب	۱/۸۳
۳-۱	۵۷/۵	۷۰۰	۶۱۲	۱	۶۱۲	۱۶۰۰	۷۷۶	۳۶۰۰	ج	۰/۷۳



شکل ۱- نحوه بارگذاری و محل تکیه گاه ها

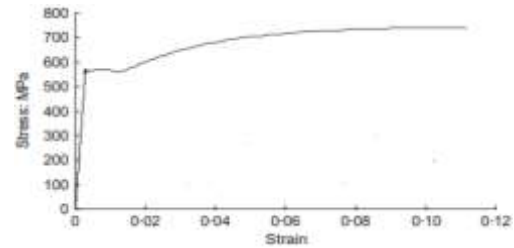
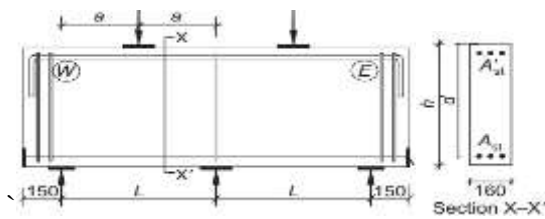
شکل ۲- مقطع نمونه تیرها: الف) تیر شماره ۱-۱

ب) تیر شماره ۲-۱، ج) تیر شماره ۳-۱

(۲) یانگ و آشور [۴] در تحقیق خود، اثر عمق مقطع بر رفتار تیرهای عمیق بتن مسلح پیوسته (چند دهانه) را بررسی نمودند. سه نمونه از تیرهای ساخته شده در این تحقیق، مورد بررسی و مدلسازی قرار گرفت. مشخصات میلگرد (جدول ۳ و شکل ۳)، هندسه و مشخصات بتن (جدول ۴)، نحوه بارگذاری و محل تکیه گاه ها و مقطع نمونه تیرها (شکل ۴) ملاحظه می شود.

جدول شماره ۳- مشخصات میلگرد

d_b (mm)	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (GPa)
۱۹	۵۶۲	۷۴۱	۱۹۸



الف
ب

شکل ۴- مشخصات تیرهای پیوسته
(الف) مقطع نمونه تیر، (ب) نحوه بارگذاری و محل تکیه گاه ها

شکل ۳- نمودار تنش- کرنش میلگرد مورد استفاده در نمونه ها

جدول شماره ۴- مشخصات هندسی و بتن

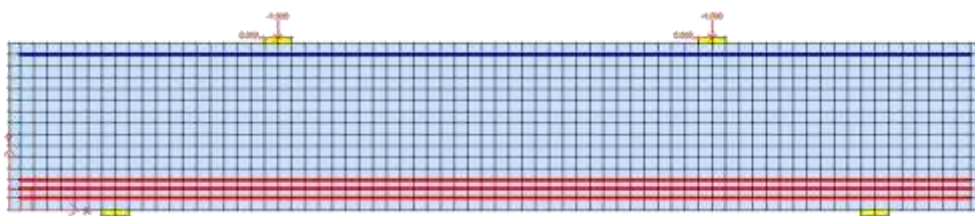
#	f'_c (MPa)	a/h	h (mm)	a (mm)	d (mm)	L (mm)	$A_{st}=A'_{st}$ (mm ²)	$\rho_s=\rho'_s$
۱-۲	۳۲/۴	۰/۵	۷۲۰	۳۶۰	۶۵۳	۷۲۰	۱۱۴۸	۰/۰۱۱
۲-۲	۳۲/۴	۰/۵	۶۰۰	۳۰۰	۵۵۵	۶۰۰	۸۶۱	۰/۰۰۹۷
۳-۲	۳۲/۴	۱	۶۰۰	۶۰۰	۵۵۵	۱۲۰۰	۸۶۱	۰/۰۰۹۷

۴. یافته ها

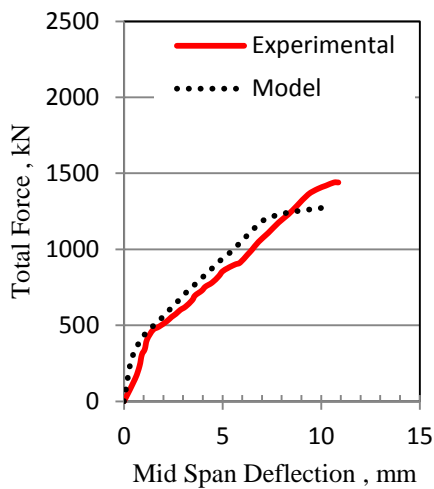
در این بخش به بررسی و ارائه داده های حاصل از مدل سازی نمونه های مورد بررسی، پرداخته می شود. نتایج به صورت نمودار نیرو- جابجایی و چگونگی الگوی ترک خوردن تیر، ارائه می شود.

۴-۱. مقایسه نتایج تیرهای عمیق تک دهانه

پس از مدل سازی (شکل ۵) و تحلیل تیرهای مورد نظر، نمودار نیرو- جابجایی نمونه ۱-۱ در شکل ۶، نمودار نیرو- جابجایی نمونه ۲-۱ در شکل ۷، نمودار نیرو- جابجایی نمونه ۳-۱ در شکل ۸، وضعیت ترک خوردگی نمونه ۱-۱ در لحظه گسیختگی در شکل ۹، وضعیت ترک خوردگی نمونه ۲-۱ در لحظه گسیختگی در شکل ۱۰ و وضعیت ترک خوردگی نمونه ۳-۱ در لحظه گسیختگی در شکل ۱۱ مشاهده می شود. در نمودارها، نتایج مدل سازی با آزمایش شورايم و السید [۲۰] مقایسه می گردد.

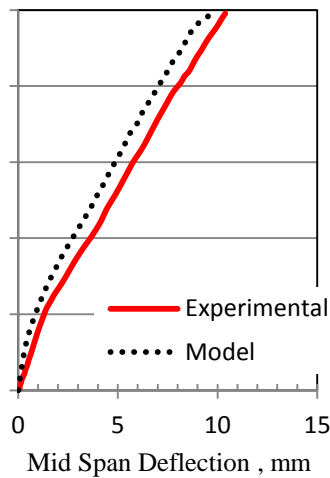


شکل ۵) هندسه و شبکه بندی اجزای تیر مدل سازی شده در نرم افزار VecTor2



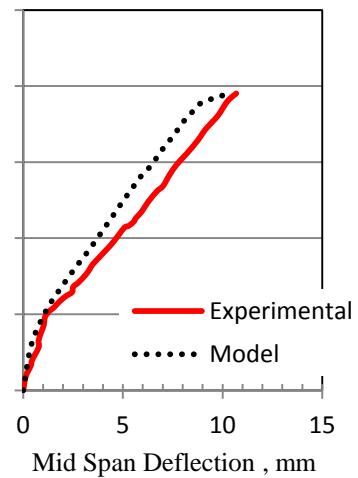
شکل ۸

نمودار نیرو-جابجایی نمونه ۳-۱



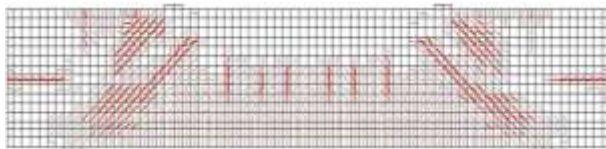
شکل ۷

نمودار نیرو-جابجایی نمونه ۲-۱

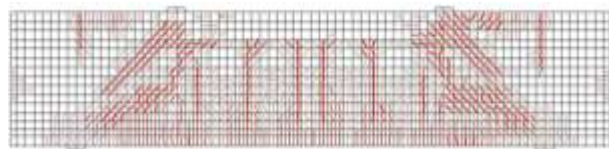


شکل ۶

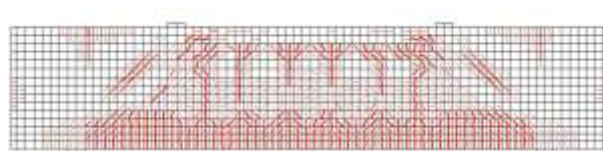
نمودار نیرو-جابجایی نمونه ۱-۱



شکل ۱۰ وضعیت ترک خوردگی نمونه ۲-۱



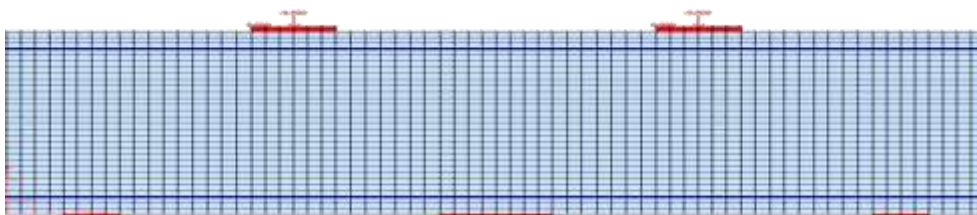
شکل ۹ وضعیت ترک خوردگی نمونه ۱-۱



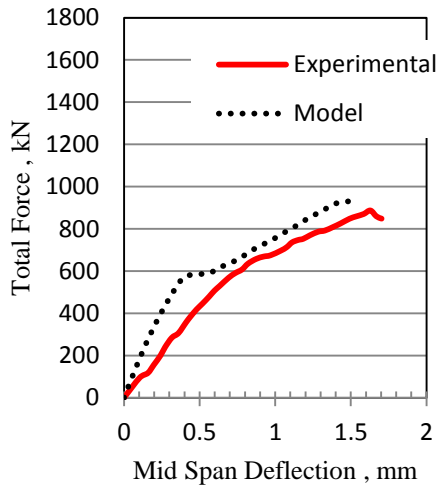
شکل ۱۱ وضعیت ترک خوردگی نمونه ۳-۱

۲-۴. مقایسه نتایج تیرهای عمیق پیوسته (چند دهانه)

پس از مدل‌سازی (شکل ۱۲) و تحلیل تیرهای مورد نظر، نمودار نیرو-جابجایی نمونه ۱-۲ در شکل ۱۳، نمودار نیرو-جابجایی نمونه ۲-۲ در شکل ۱۴، نمودار نیرو-جابجایی نمونه ۳-۲ در شکل ۱۵، وضعیت ترک خوردگی نمونه ۱-۲ در لحظه گسیختگی در شکل ۱۶، وضعیت ترک خوردگی نمونه ۲-۲ در لحظه گسیختگی در شکل ۱۷ و وضعیت ترک خوردگی نمونه ۳-۲ در لحظه گسیختگی در شکل ۱۸ ارائه شده است. نتایج مدل‌سازی با آزمایش یانگ و آشور [۴] مقایسه شده است.

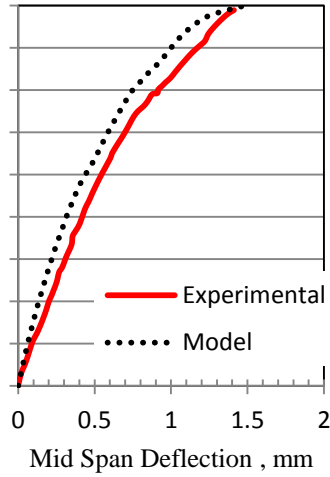


شکل ۱۲ هندسه و شبکه بندی اجزای تیرمدلسازی شده در نرم افزار VecTor2



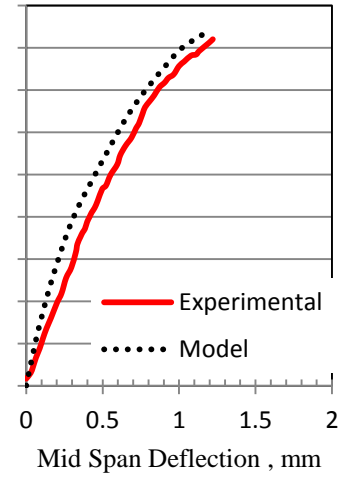
شکل ۱۵

نمودار نیرو-جابجایی نمونه ی ۳-۲



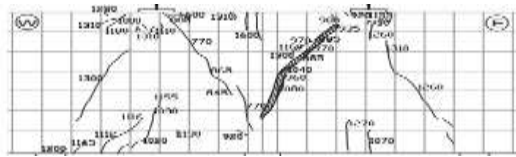
شکل ۱۴

نمودار نیرو-جابجایی نمونه ی ۲-۲



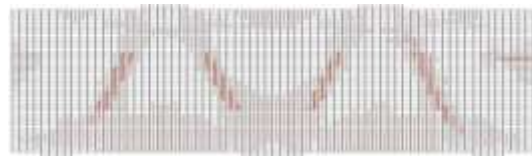
شکل ۱۳

نمودار نیرو-جابجایی نمونه ی ۱-۲



ب

شکل ۱۶) مقایسه وضعیت ترک خوردگی نمونه ۱-۲: الف) مدل تحلیلی، ب) نمونه آزمایشگاهی



الف

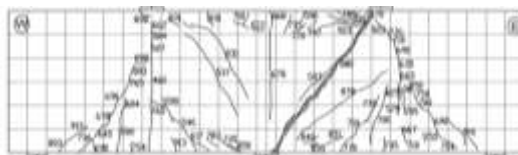


ب

شکل ۱۷) مقایسه وضعیت ترک خوردگی نمونه ۲-۲: الف) مدل تحلیلی، ب) نمونه آزمایشگاهی

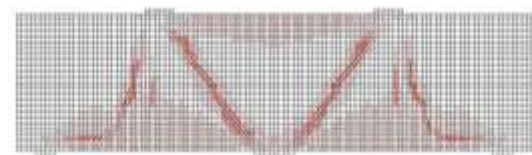


الف



ب

شکل ۱۸) مقایسه وضعیت ترک خوردگی نمونه ۲-۳: الف) مدل تحلیلی، ب) نمونه آزمایشگاهی



الف

۵. جمع بندی

عواملی که در بررسی نمونه ها در مدلسازی با نرم افزار VecTor2 لحاظ شدند اثرات ترک خوردگی، مدل رفتاری مناسب برای بتن و میلگرد، شبیه سازی هندسه به صورت دقیق و اعمال بارگذاری متناسب را در بر می گیرد. با توجه به رعایت این نکات در مدلسازی ها، مشاهده گشت که شبیه سازی توانایی خوبی در پیش بینی رفتار تیر عمیق دارد. از مقایسه نتایج

مشاهده شد که ظرفیت نهایی، جابجایی نهایی، وضعیت و الگوی ترک خوردگی نمونه ها به خوبی و با دقت مناسبی به دست آمد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که می توان از مدلسازی مناسب با نرم افزار VecTor2 که مبنای کارکرد آن دو نظریه MCFT و DSFM است، جهت ارزیابی رفتار، ظرفیت و الگوی شکست تیرهای عمیق به خوبی و با دقت مناسبی بهره برد.

۶. منابع

- [1] ACI 318. (2015). "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)". American Concrete Institute.
- [2] Naeim, F. (1989). "The seismic design handbook". Springer Science & Business Media.
- [3] Rogowsky, D. M., MacGregor, J. G., & Ong, S. Y. (1983). "Tests of reinforced concrete deep beams".
- [4] Yang, K. H., & Ashour, A. F. (2007). "Influence of section depth on the structural behaviour of reinforced concrete continuous deep beams".
- [5] ACI. (2005). "318-Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary". American Concrete Institute International.
- [6] Marti, P. (1985, January). "Basic tools of reinforced concrete beam design". In Journal Proceedings, Vol. 82, No. 1, pp. 46-56.
- [7] Mau, S. T., & Hsu, T. S. T. (1989). "Formula for the shear strength of deep beams". Structural Journal, 86(5), 516-523.
- [8] Siao, W. B. (1993). "Strut-and-tie model for shear behavior in deep beams and pile caps failing in diagonal splitting". ACI Structural Journal, 90(4).
- [9] Tan, K. H., Kong, F. K., Teng, S., & Weng, L. W. (1997). "Effect of web reinforcement on high-strength concrete deep beams". ACI structural journal, 94(5), 572-582.
- [10] Wang, W., Jiang, D. H., & Hsu, C. T. T. (1993). "Shear strength of reinforced concrete deep beams". Journal of Structural Engineering, 119(8), 2294-2312.
- [11] Ashour, A. F., & Morley, C. T. (1996). "Effectiveness factor of concrete in continuous deep beams". Journal of Structural Engineering, 122(2), 169-178.
- [12] Ashour, A. F., & Rishi, G. (2000). "Tests of reinforced concrete continuous deep beams with web openings". Structural Journal, 97(3), 418-426.
- [13] Taylor, H. P. (1972). "Shear strength of large beams". Journal of the Structural Division, 98(St 11).
- [14] Bazant, Z. P., & Kim, J. K. (1984). "Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams". Journal of the American Concrete Institute, 81(5), 456-468.
- [15] Bazant, Z. P., & Planas, J. (1997). "Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials". CRC press, (Vol. 16).
- [16] Walraven, J., & Lehwalter, N. (1994). "Size effects in short beams loaded in shear". Structural Journal, 91(5), 585-593.
- [17] Vecchio, F. J., & Collins, M. P. (1993). "Compression response of cracked reinforced concrete". Journal of structural engineering, 119(12), 3590-3610.
- [18] Wong, P. S., Vecchio, F. J., & Trommels, H. (2002). "VecTor2 and FormWorks user's manual". Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Ont.
- [19] Vecchio, F. J. (2000). "Disturbed stress field model for reinforced concrete: formulation". Journal of structural engineering, 126(9), 1070-1077.
- [20] Shuraim, A. B., & El-Sayed, A. K. (2016). "Experimental verification of strut and tie model for HSC deep beams without shear reinforcement". Engineering Structures, 117, 71-85.