

بررسی اثر تنش‌های چسبنده لبه ترک بر رفتار بار-تغییر مکان تیرهای بتن مسلح

وحید بروجردیان*، ابوالفضل شرافتی، حسین کریم‌پور

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۰ بهمن ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۸ آذر ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۴ دی ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۵ دی ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

تیر بتن مسلح
روش عناصر محدود
تنش‌های چسبنده لبه ترک
مکانیک شکست
رفتار بار-تغییر مکان

چکیده: در سه دهه اخیر پیشرفت‌های بسیار زیادی در زمینه تحلیل غیرخطی سازه‌های بتن مسلح به کمک روش عناصر محدود صورت گرفته است، اما هنوز پیش‌بینی دقیق در خصوص پاسخ تیرهای بتن مسلح در شرایط مختلف هندسه و بارگذاری، به کمک روش عناصر محدود، نیاز به تحقیقات بیشتری دارد. محققان نشان داده‌اند برای شبیه‌سازی پاسخ غیر الاستیک بتن در منطقه صدمه‌دیده نزدیک نوک ترک می‌توان از یک توزیع تنش چسبنده روی لبه‌های ترک که مایل به بستن ترک است، استفاده نمود. هدف این مقاله، بررسی عددی تأثیر تنش‌های چسبنده ترک بر رفتار بار-تغییر مکان تیرهای بتن مسلح با استفاده از مدل آسیب-پلاستیک و مکانیک شکست بتن است. در تحلیل عددی به کار رفته، رفتار غیرخطی بتن در ناحیه فشاری با استفاده از نظریه آسیب - پلاستیک مدل‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن در ناحیه کششی و مسئله ترک‌خوردگی و گسترش ترک، از مکانیک شکست غیر خطی مبتنی بر مدل ترک چسبنده استفاده شده است. در این راستا، با استفاده از نرم‌افزار عناصر محدود آباکوس یک سری تیرهای بتن مسلح آزمایشگاهی موجود، شبیه‌سازی شده‌اند. با توجه به محدودیت‌های نرم‌افزار آباکوس در این خصوص، یک روش گام به گام مورد استفاده قرار گرفته است. در روش ارائه شده امکان گسترش چندین ترک چسبنده در تیر در نظر گرفته شده است. مقایسه نمودار بار-تغییر مکان تیرهای بتن مسلح به دست آمده از تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی هماهنگی قابل قبولی را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

از آنجایی که عملکرد مکانیکی سازه‌ها به‌طور آشکاری وابسته به رشد ترک‌هاست، مطالعه عمیق بر روی ناحیه صدمه دیده نزدیک نوک ترک نه تنها به فهم جامع مکانیسم گسیختگی بتن کمک می‌کند؛ بلکه در یافتن و پیش‌بینی ترک‌ها در سازه‌های واقعی اهمیت دارد [۱].

اولین مطالعه جدی روی ترک‌های بتن و شکست ناشی از آن‌ها در سال ۱۹۲۸ توسط ریچارد^۱، برانداگ^۲ و براون^۳ انجام شد. کاپلان^۴ [۲] تلاش نمود که از اصول مکانیک شکست خطی در بتن استفاده نماید. تحقیقات تعدادی از محققین مانند شاه^۵ و مک‌گری^۶ [۳] نشان داد که استفاده از مکانیک شکست خطی در بتن منجر به نتایج نادرستی می‌شود. با درک رفتار غیرخطی بتن، مدل‌های غیرخطی مختلفی به مرور زمان ارائه شدند.

محققان نشان داده‌اند که برای شبیه‌سازی پاسخ غیر الاستیک مصالح موجود در منطقه صدمه دیده نزدیک نوک ترک می‌توان از یک توزیع تنش

چسبنده که مایل به بستن سطوح ترک است استفاده نمود [۴ و ۵].

روش ترک چسبنده^۷ ابتدا توسط داگ^۸ [۴] برای تحلیل رفتار شکست مواد شکل‌پذیر معرفی شد. سپس هیلبرگ^۹ و همکاران [۵] نخستین بار روش ترک چسبنده را با انجام برخی اصلاحات برای شبیه‌سازی خرابی شبه ترد سازه‌های بتنی بکار بردند. آنها برای پیاده سازی عددی مدل مزبور از رویکرد ترک مجزا^{۱۰} استفاده کردند. در تحقیقات اولیه، آن‌ها نشان دادند که حتی اگر از المان محدود درشت استفاده شود، آنالیز تشکیل و توسعه ترک و همچنین تحلیل شکست را می‌توان با مدل ترک چسبنده انجام داد. این روش بدین‌وسیله حساسیت مش بندی را از بین می‌برد. در برخی تحقیقات از این مدل تحت عنوان مدل ترک مجازی^{۱۱} نام برده شده است [۶].

در این مطالعه با ارائه یک روش گام به گام، رفتار بار تغییر مکان تیرهای بتن مسلح آزمایشگاهی با استفاده از مدل‌های آسیب-پلاستیک و مکانیک شکست غیرخطی بتن مبتنی بر مدل ترک چسبنده مورد بررسی قرار گرفته است. در روش ارائه شده با رویکرد ترک مجزا، توابع نرمی مختلفی به منظور بررسی تأثیر توزیع‌های مختلف نیروهای چسبنده در لبه ترک در نظر

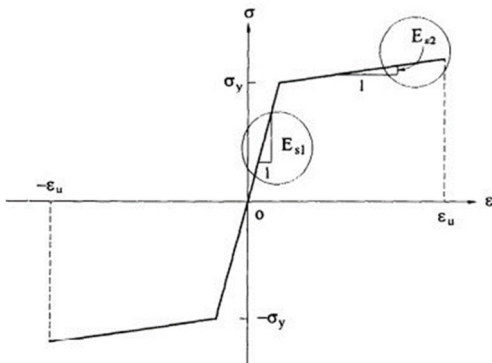
*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: broujerdian@iust.ac.ir

- 1 Richardt
- 2 Brandzaeg
- 3 Brown
- 4 Caplan
- 5 Shah
- 6 Mc Garry

- 7 Cohesive Crack Model, CCM
- 8 Dugdale
- 9 Hillerborg
- 10 Discrete Crack Approach
- 11 Fictitious Crack Model, FCM

میلگرد، منحنی تنش-کرنش فولادهای مدفون در بتن یک کاهش تدریجی در سختی را نشان می‌دهد و این روند تا تسلیم کامل آرماتور پیش می‌رود [۹ و ۱۰].

بنابراین به منظور شبیه‌سازی رفتار کششی و فشاری میلگردهای فولادی در تیرهای بتن مسلح، مطابق شکل ۲، یک رابطه دو خطی با شیب اولیه برابر مدول الاستیسیته فولاد و یک شیب ملایم برای بخش پلاستیک منحنی به اندازه پنج درصد شیب اولیه در نظر گرفته شده است [۱۱].



شکل ۲: رابطه پیشنهادی تنش - کرنش برای میلگردهای فولادی مدفون در بتن [۱۱]

Fig. 2. Proposed stress-strain relation for steel bars embedded in concrete [11]

۲-۲ روابط تنش-کرنش فشاری بتن

در این مطالعه برای شبیه‌سازی رفتار غیر خطی بتن در ناحیه فشاری از نظریه آسیب - پلاستیک (شکل ۳ الف) و روابط تنش - کرنش فشاری ارائه شده توسط ال. اچ سو و سی. اچ سو [۱۲] (شکل ۳ ب) استفاده شده است. برای استفاده از روابط تنش-کرنش فشاری بتن، ابتدا بایستی پارامترهای σ_c ، ϵ_c^{in} و d_c را که به ترتیب بیانگر تنش فشاری در هر مرحله از بارگذاری، کرنش غیر الاستیک و پارامتر خرابی بتن می‌باشد، تعیین شود. کرنش غیر الاستیک از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$\epsilon_c^{in} = \epsilon_c - \epsilon_{oc}^{el} \quad (1)$$

در این رابطه $\epsilon_{oc}^{el} = \frac{\sigma_c}{E_0}$ نشان‌دهنده کرنش الاستیک مصالح آسیب دیده و بیانگر کرنش الاستیک کلی می‌باشد. برای اطمینان از صحت نمودار تنش-کرنش فشاری بتن، کرنش پلاستیک که از رابطه ۲ محاسبه می‌شود، نبایستی مقدار منفی و یا نزولی داشته باشد.

$$\epsilon_c^{pl} = \epsilon_c^{in} - \frac{d_c}{1-d_c} \frac{\sigma_c}{\epsilon_0} \quad (2)$$

پارامتر خرابی فشاری بتن d_c برابر با نسبت کرنش غیر الاستیک ϵ_c^{in} به کرنش فشاری کلی ϵ_c می‌باشد. این مقدار برای مصالح کاملاً سالم صفر و برای مصالح کاملاً آسیب‌دیده ۱ می‌باشد.

گرفته شده‌اند. در نهایت، نمودارهای بار-تغییر مکان تیرهای بتن مسلح به دست آمده از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

۲-۲ مدل‌سازی عددی تیرهای بتن مسلح

برای مدل‌سازی عددی تیرهای بتن مسلح آزمایشگاهی موجود، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. در روش گام به گام پیشنهادی، امکان ایجاد و گسترش چندین ترک چسبنده به صورت هم‌زمان وجود دارد. یکی از فرضیات اساسی در این پژوهش عدم وقوع لغزش کلی بین بتن و میلگرد است. روش مورد استفاده در این تحقیق مبتنی بر مفهوم ترک مجزا بوده است. مراحل انجام روش مدل‌سازی عددی به صورت الگوریتم زیر می‌باشد:



شکل ۱: الگوریتم پیشنهادی برای مدل‌سازی عددی

Fig. 1. Proposed algorithm for numerical modeling

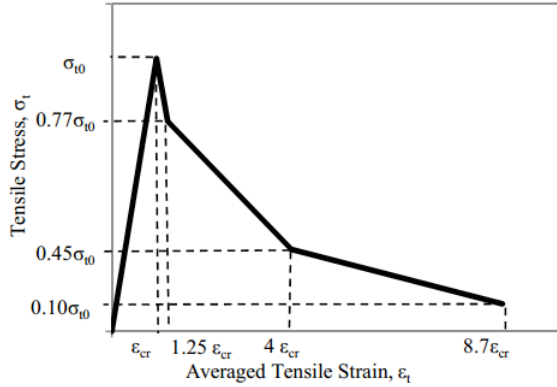
لازم به ذکر است که بارگذاری به صورت بار-کنترل به وسط دهانه تیرها اعمال می‌شود. معیار رشد ترک در بتن، رسیدن تنش کششی به مقاومت کششی بتن در نظر گرفته شده است. هم‌چنین رشد ترک‌ها در جهت عمود بر تنش نرمال لحاظ شده است.

۲-۱ رابطه پیشنهادی تنش - کرنش فولاد

عموماً این‌گونه فرض می‌شود که میلگردهای فولادی درون بتن صرفاً بار محوری تحمل می‌کنند و رفتار آن‌ها با یک رابطه تنش-کرنش تک‌محوره توصیف می‌شود. در بسیاری از مطالعات برای مدل‌سازی رفتار میلگردهای مدفون در بتن از رابطه دو خطی متعارف الاستو پلاستیک کامل استفاده می‌شود [۷]، [۸]. از طرفی رفتار کششی فولاد مدفون در بتن با رفتار یک میلگرد فولادی تنها متفاوت است. پس از وقوع اولین تسلیم در

۲-۳- روابط تنش- کرنش کششی بتن

برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن در ناحیه کششی و مسأله ترک خوردگی و گسترش ترک، از مکانیک شکست غیرخطی مبتنی بر مدل ترک چسبیده استفاده شده است. شکل ۴ نمودار اصلاح شده تنش-کرنش کششی بتن را نشان می‌دهد که در نرم‌افزار آباکوس به کار می‌رود.



شکل ۴: مدل اصلاح شده تنش-کرنش کششی بتن [۱۳]

Fig. 4. Modified tensile stress-strain behavior [13]

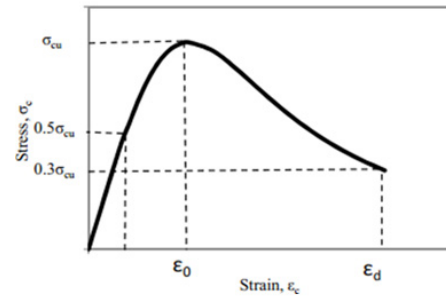
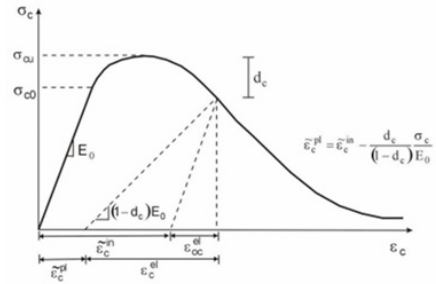
از آن جا که در این مطالعه رویکرد ترک مجزا مد نظر قرار دارد و نه ترک‌پخشی، فقط از قسمت صعودی منحنی رفتاری کششی بتن استفاده شده است و رفتار پس از ترک‌خوردگی با اعمال نیروهای چسبیده در اطراف ترک مدل می‌شود. مقاومت کششی بتن طبق ACI 318-11 [۱۴]، برحسب مقاومت فشاری بتن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_t = 0.62\sqrt{f'_c} \quad (7)$$

در رابطه بالا مقاومت‌ها برحسب MPA هستند.

۲-۴- توزیع تنش چسبندگی وارد بر لبه ترک

برای شبیه‌سازی پاسخ غیر الاستیک مصالح موجود در منطقه صدمه دیده نزدیک نوک ترک، ناحیه پیشروی شکست^۱ با یک سری نیروهای اعمال شده به دو طرف ترک معادل سازی می‌شود. شکل توزیع این نیروها در دو طرف ترک مشابه تابع نرمی بتن در نظر گرفته شده‌اند. تابع نرمی یکی از ارکان ضروری مدل ترک چسبیده به شمار می‌رود که به صورت نمودار تنش برحسب بازشدگی دهانه ترک بیان می‌شود. محققین در طی سال‌های اخیر توابع نرمی مختلفی را پیشنهاد کرده‌اند. توزیع نیروهای چسبندگی برحسب فاصله از نوک ترک، در طول مشخصی به اندازه سه برابر اندازه بزرگ‌ترین سنگ‌دانه بتن تیرها، در اطراف ترک به صورت خطی، دو خطی و غیرخطی اعمال شده‌اند [۱۵].



شکل ۳: رفتار فشاری بتن: الف) مدل آسیب پلاستیک ب) مدل پیشنهادی ال. اچ سو و سی. اچ سو [۱۲]

Fig. 3. Concrete compressive behavior: a) damage-plastic model, b) Hsu model [12]

متطابق شکل ۳: ب، مدل پیشنهادی ال. اچ سو و سی. اچ سو، مقادیر تنش‌های فشاری را از $0.5\sigma_{cu}$ در شاخه صعودی تا $0.3\sigma_{cu}$ در شاخه نزولی محاسبه می‌کند.

$$\sigma_c = \left[\frac{\beta \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^\beta} \right] \sigma_{cu} \quad (3)$$

که در رابطه بالا :

$$\beta = \frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma_{cu}}{\epsilon_0 E_0} \right)} \quad (4)$$

$$\epsilon_0 = 8.9 \times 10^{-5} \sigma_{cu} + 2.114 \times 10^{-3} \quad (5)$$

مقدار مدول الاستیسیته اولیه نیز از رابطه ۶ محاسبه می‌شود.

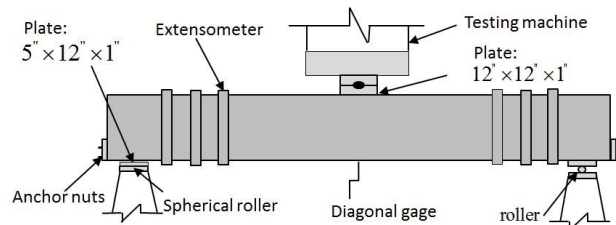
$$E_0 = 1.2431 \times 10^2 \sigma_{cu} + 3.28312 \times 10^3 \quad (6)$$

در روابط بالا σ_{cu} ، E_0 و σ_c برحسب kip/in² می‌باشند.



شکل ۶: نمای آزمایش تیرهای برسلر-اسکوردلیس [۱۸]

Fig. 6. Bresler-Scordelis beam test view [18]

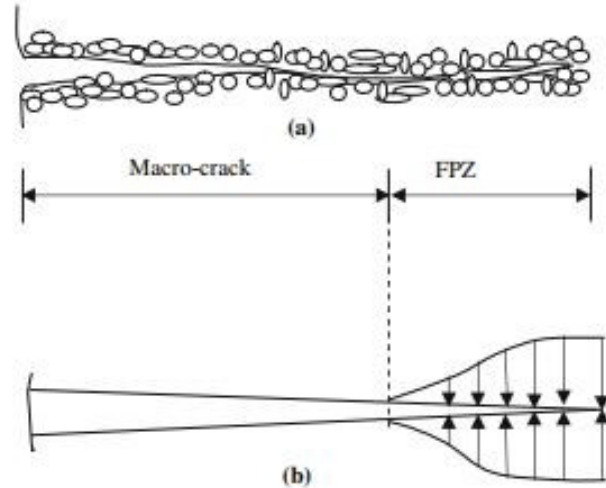


شکل ۷: نمای شماتیک بارگذاری و دستگاه آزمایش برسلر - اسکوردلیس [۱۸]

Fig. 7. Schematic setup of Bresler-Scordelis beam tests [18]

برای جلوگیری از گسیختگی پیوستگی، ناشی از عدم مهار کافی احتمالی، میلگردهای طولی تحتانی تا انتهای تیر ادامه یافته و با مهار ویژه به صفحات فولادی انتهایی با ضخامت ۳۵ میلی متر مهار شده‌اند. سری OA از این تیرها فاقد آرماتور فشاری و برشی بودند. حداکثر اندازه سنگدانه به کار رفته در همه تیرها ۲۰ میلی متر بود.

در این پژوهش، تعداد شش تیر از سری تیرهای برسلر-اسکوردلیس به سه روش مختلف توزیع نیروهای چسبنده لبه ترک مدل سازی شده‌اند. تیرهای مدل سازی شده شامل سه تیر بتن مسلح فاقد آرماتور فشاری و برشی به نام‌های OA1، OA2 و OA3 و سه تیر بتن مسلح دارای آرماتور برشی، کششی و فشاری به نام‌های A1، A2 و A3 می‌باشند. از توزیع‌های خطی، دو خطی و غیر خطی برای اعمال نیروهای چسبنده در اطراف ترک استفاده شده است. جزئیات مقاطع عرضی این تیرها در شکل ۸ نشان داده شده است. جزئیات بیشتر نیز در جدول ۱ ارائه شده است. خواص مصالح برای بتن، میلگردهای طولی و میلگردهای عرضی در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۵: معادل سازی ناحیه پیشروی شکست (FPZ) با نیروهای چسبنده وارد بر طرفین ترک

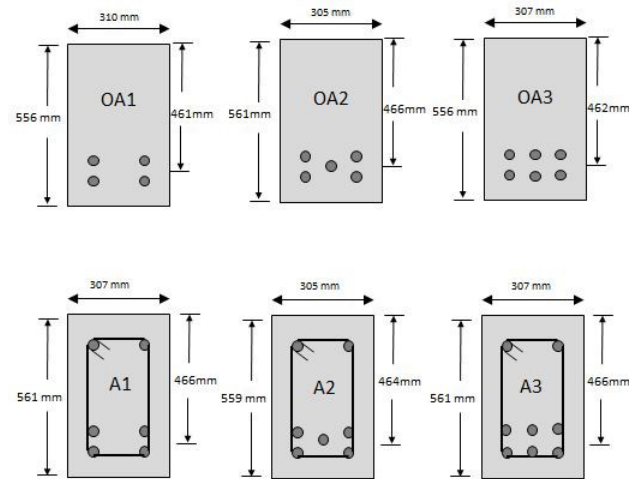
Fig. 5. Simulating fracture process zone with cohesive stresses on crack faces

در این مطالعه برای تابع نرمی خطی از مدل پیشنهادی هیلبرگ [۵]، برای تابع نرمی دوخطی از مدل شیلانگ ژو [۱۶] و برای تابع نرمی غیرخطی از مدل رینهارد [۱۷] استفاده شده است.

۲-۵- مشخصات تیرهای بتن مسلح آزمایشگاهی

به منظور ارزیابی روش ارائه شده و مقایسه با نتایج برخی از آزمایش‌های انجام شده بر روی تیرهای بتن مسلح، مجموعه آزمایش‌های انجام شده توسط برسلر^۴ و اسکوردلیس^۵ [۱۸] که دارای کیفیت بالا و مستندات کافی می‌باشند، به عنوان آزمایش‌های محک انتخاب شدند. در این مجموعه دوازده تایی از تیرهای آزمایش شده که شامل چهار سری سه تایی با نام‌های OA، A، B و C بودند، گستره وسیعی از نسبت میلگرد طولی و عرضی و نسبت دهانه برشی به عمق پوشش داده شده‌اند. این تیرها که با تکیه‌گاه ساده و با یک بار متمرکز در وسط دهانه بارگذاری شده بودند، از نظر نسبت میلگرد طولی، نسبت میلگرد عرضی، طول دهانه، ابعاد مقطع، و مقاومت بتن متفاوت بودند. در این تیرها، نسبت دهانه برش به عمق از ۳/۳ تا ۵/۸ متغیر بود. درصد آرماتور برشی در محدوده ۰ تا ۰/۲٪ متفاوت بود. نمای شماتیک نحوه انجام آزمایش و جزئیات آن به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است.

- 1 Hillerborg
- 2 Shilang Xu
- 3 Reinhardt
- 4 Bresler
- 5 Scordelis



شکل ۸: جزئیات مقاطع عرضی تیرهای برسler-اسکوردلیس [۱۸]

Fig. 8. Cross-section details of Bresler-Scordelis beam tests [18]

جدول ۱: جزئیات مقاطع عرضی تیرهای برسler - اسکوردلیس

Table 1. Cross-section details of Bresler-Scordelis beam tests

Beam no.	b, mm	h, mm	d, mm	L, mm	Span, mm	Bott. steel	Top steel	Stirrups
OA1	۳۱۰	۵۵۶	۴۶۱	۴۱۰۰	۳۶۶۰	۴ No. ۹	-	-
OA2	۳۰۵	۵۶۱	۴۶۶	۵۰۱۰	۴۵۷۰	۵ No. ۹	-	-
OA3	۳۰۷	۵۵۶	۴۶۲	۶۸۴۰	۶۴۰۰	۶ No. ۹	-	-
A1	۳۰۷	۵۶۱	۴۶۶	۴۱۰۰	۳۶۶۰	۴ No. ۹	۲ No. ۴	No. 2@ 210
A2	۳۰۵	۵۵۹	۴۶۴	۵۰۱۰	۴۵۷۰	۵ No. ۹	۲ No. ۴	No. 2@ 210
A3	۳۰۷	۵۶۱	۴۶۶	۶۸۴۰	۶۴۰۰	۶ No. ۹	۲ No. ۴	No. 2@ 210

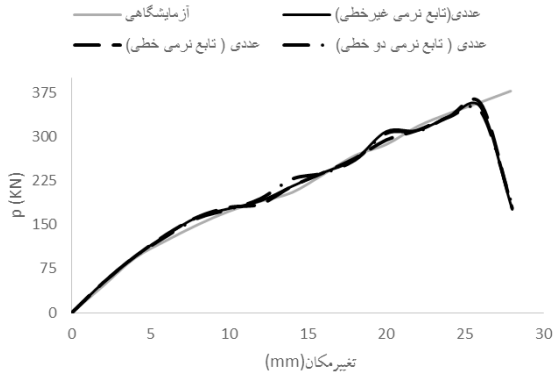
جدول ۲: مشخصات مصالح تیرهای برسler - اسکوردلیس

Table 2. Material details of Bresler-Scordelis beam tests

	Reinforcement			Concrete	
	No. ۲	No. ۴	No. ۹	Beam no.	f_c , MPa
Bar size	No. ۲	No. ۴	No. ۹	OA1	۲۲/۶
Diameter, mm	۶/۴	۱۲/۷	۲۸/۷	OA2	۲۳/۷
Area, mm ²	۳۲/۲	۱۲۷	۶۴۵	OA3	۳۷/۶
f_y , MPa	۳۲۵	۳۴۵	۵۵۵	A1	۲۴/۱
f_u , MPa	۴۳۰	۵۴۲	۹۳۳	A2	۲۴/۳
E_s , MPa	۱۹۰,۰۰۰	۲۰۱,۰۰۰	۲۱۸,۰۰۰	A3	۳۵/۱

۳-۱-۳- تیر OA3

در شکل ۱۱ نمودار بار-تغییر مکان به دست آمده از هر سه روش توزیع خطی، دوخطی و غیرخطی نیروهای چسبنده با نمودار آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۱: مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان محاسباتی تیر OA3 با نمودار آزمایشگاهی

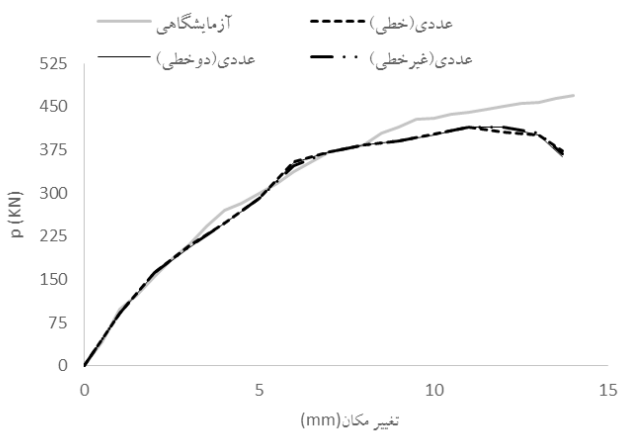
Fig. 11. Comparison of computational and experimental load-deformation curves for beam OA3

۳-۲- تیرهای بتن مسلح خاموت‌دار

برای هریک از تیرهای سری A نتایج به شرح زیر ارائه می‌گردد:

۳-۲-۱- تیر A1

در شکل ۱۲ نمودار بار-تغییر مکان به دست آمده از هر سه روش توزیع خطی، دوخطی و غیرخطی نیروهای چسبنده با نمودار آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۲: مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان محاسباتی تیر A1 با نمودار آزمایشگاهی

Fig. 12. Comparison of computational and experimental load-deformation curves for beam A1

۳- مقایسه نتایج مطالعات عددی و آزمایشگاهی

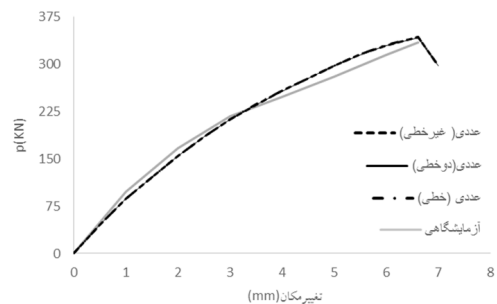
نتایج حاصل از تحلیل عددی، در قالب نمودار بار-تغییر مکان وسط دهانه ارائه می‌شوند. نمودار بار-تغییر مکان برای هر کدام از تیرها با استفاده از سه نوع توزیع نیروی خطی، دوخطی و غیرخطی بیان شده‌اند.

۳-۱- تیرهای بتن مسلح بدون خاموت

برای هریک از تیرهای سری OA، نتایج به شرح زیر در شکل‌های ۲۰ تا ۹ نشان داده شده است:

۳-۱-۱- تیر OA1

در شکل ۹ نمودار بار-تغییر مکان به دست آمده از هر سه روش توزیع خطی، دوخطی و غیرخطی نیروهای چسبنده با نمودار آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.

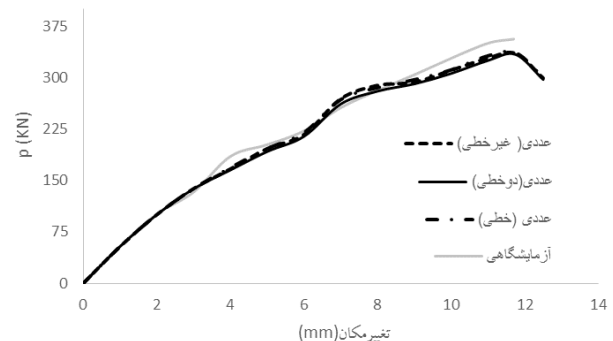


شکل ۹: مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان محاسباتی تیر OA1 نمودار آزمایشگاهی

Fig. 9. Comparison of computational and experimental load-deformation curves for beam OA1

۳-۱-۲- تیر OA2

در شکل ۱۰ نمودار بار-تغییر مکان به دست آمده از هر سه روش توزیع خطی، دوخطی و غیرخطی نیروهای چسبنده با نمودار آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۰: مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان محاسباتی تیر OA2 نمودار آزمایشگاهی

Fig. 10. Comparison of computational and experimental load-deformation curves for beam OA2

۴- نتیجه گیری

از مقایسه نتایج تحلیل عددی و نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی به‌کاررفته در این مطالعه، با دقت قابل قبولی می‌تواند نمودار بار-تغییر مکان تیرهای بتن مسلح خاموت دار و بدون خاموت را پیش‌بینی کند.

هم‌چنین با توجه به مقایسه‌های صورت گرفته، نتیجه می‌شود که اختلاف بسیار اندکی بین نمودارهای بار-تغییر مکان به‌دست‌آمده از تحلیل عددی با استفاده از توزیع نیروهای چسبیده به‌صورت خطی، دوخطی و غیرخطی وجود دارد. به عبارتی، در استفاده از توزیع‌های خطی، دوخطی و غیرخطی، تفاوت چندانی در نتایج حاصل نمی‌شود.

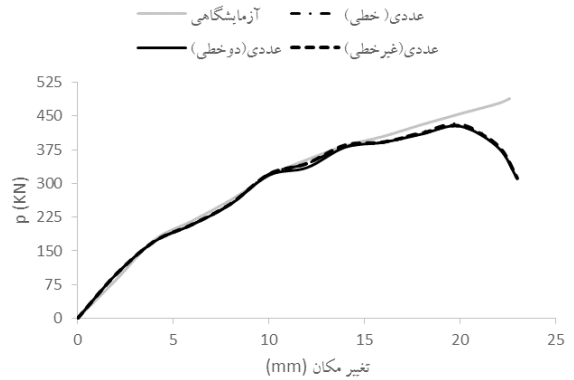
با دقت در نمودارها مشخص می‌شود که در تیرهای فاقد خاموت، توزیع تنش چسبندگی خطی و در تیرهای دارای خاموت، توزیع تنش چسبندگی غیرخطی منجر به پیش‌بینی بهتر نمودار بار - تغییر مکان می‌شود.

مراجع

- [1] S.W. Hu, Z.X. Mi, J. Lu, A study on the crack propagation process in concrete structures using energy method, in: Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ, 2012, pp. 3151-3155.
- [2] M. Kaplan, Crack propagation and the fracture of concrete, in: Journal Proceedings, 1961, pp. 591-610.
- [3] S.P. Shah, F.J. McGarry, Griffith fracture criterion and concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, 97(6) (1971) 1663-1676.
- [4] D.S. Dugdale, Yielding of steel sheets containing slits, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 8(2) (1960) 100-104.
- [5] A. Hillerborg, M. Modéer, P.-E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cement and concrete research, 6(6) (1976) 773-781.
- [6] Y. Jenq, S.P. Shah, Two parameter fracture model for concrete, Journal of engineering mechanics, 111(10) (1985) 1227-1241.
- [7] F.J. Vecchio, M.P. Collins, The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear, ACI J., 83(2) (1986) 219-231.
- [8] F.J. Vecchio, M.P. Collins, Compression response of cracked reinforced concrete, Journal of Structural Engineering, 119(12) (1993) 3590-3610.
- [9] T.T. Hsu, L.-X. Zhang, Tension stiffening in reinforced concrete membrane elements, Structural Journal, 93(1) (1996) 108-115.
- [10] H.-G. Kwak, F.C. Filippou, Finite element analysis of reinforced concrete structures under monotonic loads, Department of Civil Engineering, University of

۳-۲-۲- تیر A2

در شکل ۱۳ نمودار بار-تغییر مکان به‌دست‌آمده از هر سه روش توزیع خطی، دوخطی و غیرخطی نیروهای چسبیده با نمودار آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.

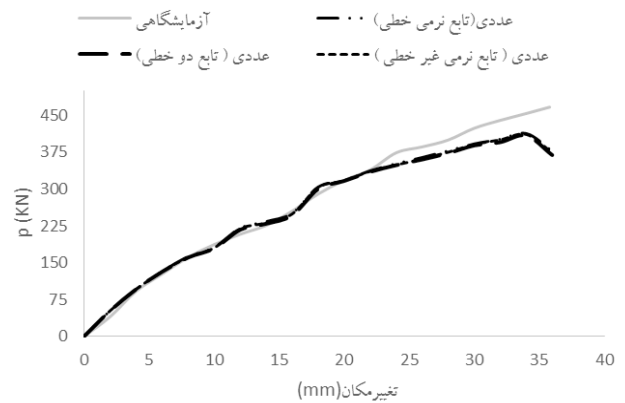


شکل ۱۳: مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان محاسباتی تیر A2 با نمودار آزمایشگاهی

Fig. 13. Comparison of computational and experimental load-deformation curves for beam A2

۳-۲-۳- تیر A3

در شکل ۱۴ نمودار بار-تغییر مکان به‌دست‌آمده از هر سه روش توزیع خطی، دوخطی و غیرخطی نیروهای چسبیده با نمودار آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۴: مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان محاسباتی تیر A3 با نمودار آزمایشگاهی

Fig. 14. Comparison of computational and experimental load-deformation curves for beam A3

- [14] B. Code, ACI 318-11 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Retrieved, 8 (2012).
- [15] S. Kumar, S.V. Barai, Concrete fracture models and applications, Springer Science & Business Media, 2011.
- [16] S. Xu, Determination of parameters in the bilinear, Reinhardt's non-linear and exponentially non-linear softening curves and their physical meanings. *Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen*, Hamburg, Libri Bod, 15 (1999) 410-424.
- [17] H.W. Reinhardt, H.A. Cornelissen, D.A. Hordijk, Tensile tests and failure analysis of concrete, *Journal of structural engineering*, 112(11) (1986) 2462-2477
- [18] B. Bresler, A.C. Scordelis, Shear strength of reinforced concrete beams, in: *Journal Proceedings*, 1963, pp. 51-74.
- California Berkeley, CA, 1990.
- [11] V. Broujerdian, M.T. Kazemi, Smearred rotating crack model for reinforced concrete membrane elements, *ACI Structural Journal*, 107(4) (2010) 411.
- [12] L. Hsu, C.-T. Hsu, Complete stress—strain behaviour of high-strength concrete under compression, *Magazine of Concrete Research*, 46(169) (1994) 301-312.
- [13] B.L. Wahalathantri, D. Thambiratnam, T. Chan, S. Fawzia, A material model for flexural crack simulation in reinforced concrete elements using ABAQUS, in: *Proceedings of the first international conference on engineering, designing and developing the built environment for sustainable wellbeing*, Queensland University of Technology, 2011, pp. 260-264.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

V. Broujerdian, A. Sherafati, H. Karimpour, Effect of Crack Cohesive Stresses on the Load-Deformation Response of Reinforced Concrete Beams, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(1) (2018) 89-96.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11366.5012

