

مدل رفتاری چسبندگی - لغزش میلگرد
مدفون در بتن با طول مهاری کم

Original Article

مرتضی مهمی (کارشناس ارشد)

وحید بروجردیان* (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

در پژوهش حاضر، رفتار تنش چسبندگی - لغزش بین میلگرد آجدار و بتن با مقاومت معمولی بررسی و یک مدل چسبندگی - لغزش مفهومی مبتنی بر مفاهیم ساده‌ی مکانیک برای میلگرد آجدار با طول مهاری کم ارائه شده است. برای کالیبراسیون مدل از شبیه‌سازی آزمایش‌های بیرون کشیدن میلگرد از داخل بتن در نرم‌افزار عناصر محدود آباکوس استفاده شده است. برای شبیه‌سازی رفتار چسبندگی - لغزش در مدل عناصر محدود، گره‌های فولاد به گره‌های بتن مجاور به‌وسیله‌ی فنرهای غیرخطی متصل شدند. استخراج پارامترهای مدل پیشنهادی براساس فرایند سعی و خطا و با هدف حصول بیشترین انطباق با نتایج آزمایشگاهی انجام شد. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی حاصل از مدل پیشنهادی با سایر مدل‌های موجود در ادبیات نشان داد که مدل پیشنهادی از نظر تطابق با مقادیر آزمایشگاهی، چه در تخمین بیشینه‌ی تنش چسبندگی و چه در خصوص رفتار پس از اوج چسبندگی - لغزش، بسیار بهتر از مدل‌های دیگر بود.

واژگان کلیدی: بتن مسلح، چسبندگی - لغزش، طول مهاری، المان Bond-link، آباکوس.

۱. مقدمه

یکی از ملزومات پیش‌بینی صحیح رفتار سازه‌های بتن مسلح تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی، لحاظ پدیده‌ی لغزش میلگردهاست. فرض چسبندگی کامل بین میلگرد و بتن موجب تخمین بیش از واقع سختی عضو بتن مسلح و برآورد کمتر از واقع تغییر مکان در مدل‌های عددی می‌شود. بیشتر مدل‌های رفتاری ارائه شده برای چسبندگی - لغزش، تنش چسبندگی را به صورت تابعی از مقاومت فشاری بتن و مقدار لغزش در نظر می‌گیرند.^[۱-۴] در یک مطالعه در سال ۱۹۸۱، منحنی چندخطی تنش چسبندگی - لغزش در دو حالت شکست بیرون کشیدن^۱ و شکست شکافت‌خوردگی^۲ برای شرایط چسبندگی مختلف ارائه شده است.^[۵] برخی از فرمول‌بندی‌ها، آثار سخت‌شدگی کششی^۳ پس از تسلیم را در محاسبات منظور می‌کنند. به این منظور، پارامترهای کرنش فولاد، کرنش بتن و آسیب‌دیدگی بتن وارد مدل‌های رفتاری چسبندگی شده است. اولین بار شیما و همکاران (۱۹۸۷)،^[۶] یک مدل چسبندگی با آثار کرنش فولاد، قطر میلگرد و مقاومت بتن را پیشنهاد کردند. پس از آن مارتی و همکاران (۱۹۹۸)،^[۷] یک مدل با فرض رفتاری چسبندگی لغزش صلب خمیری ارائه کردند که با رسیدن فولاد به حد تسلیم، تنش چسبندگی به نصف مقدار اولیه کاهش می‌یابد. ژو و

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۸/۶، اصلاحیه ۱۳۹۶/۱۰/۳۰، پذیرش ۱۳۹۶/۱۱/۲۴.

DOI:10.24200/J30.2018.5027.2195

m.mohemmy@yahoo.com
broujerdian@iust.ac.ir

همکاران (۲۰۱۷)،^[۸] اثر کرنش فولاد را در مدل چسبندگی لغزش وارد کردند. ساتوس و هنریکس (۲۰۱۵)،^[۹] برای در نظر گرفتن آثار کرنش فراتسلیم، یک ضریب کاهش که فقط تابع کرنش فولاد است، پیشنهاد دادند. پانتکی و همکاران (۲۰۱۷)،^[۱۰] یک مدل تحلیل اجزاء محدود سه‌بعدی برای شبیه‌سازی چسبندگی بین بتن و میلگرد ارائه و میلگردها را با المان خرپایی و بتن با المان تنش صفحه‌یی شبیه‌سازی کردند. مندرس و کاسترو (۲۰۱۳)،^[۱۱] مدلی از تماس را ارائه کردند که آثار سیکل‌های رفت و برگشت کرنش را بر زوال تماس بین بتن و فولاد مدل می‌کرد.

در مقایسه‌ی دقت و کارآمدی مدل‌ها باید به این نکته توجه داشت که با افزایش تعداد پارامترهای مدل، استفاده از آن برای مقاصد آیین‌نامه‌یی و مهندسی دشوارتر می‌شود. پس از انتخاب مدل رفتاری مناسب، چالش بعدی در شبیه‌سازی رفتار یک عضو بتن مسلح، نحوه‌ی پیاده‌سازی مدل رفتاری موردنظر در نرم‌افزار المان محدود است. دو روش رایج برای مدل‌سازی رفتار چسبندگی - لغزش بین میلگرد و بتن در تحلیل اجزاء محدود وجود دارد: ۱. روش المان رابط^۴،^[۱۲] که در آن از المان‌های فترتی مجزا با مشخصات مکانیکی معین استفاده می‌شود و ۲. روش ناحیه‌ی اتصال^۵،^[۱۳] که در آن المان چسبندگی ارتباط پیوسته‌یی بین بتن و فولاد به‌وجود می‌آورد. در هر یک از روش‌های اشاره شده، تنظیم پارامترهای المان تماس برای انطباق با مدل رفتاری کار آسانی نیست.

Archive of SID

میلگرد ثابت فرض می‌شود (شکل ۲). در حالت دوم که معمولاً برای میلگردهای با طول مهارتی زیاد متصور است، تنش چسبندگی و لغزش تابعی از مختصات محلی میلگرد فرض می‌شود. وقتی طول میلگرد مدفون در بتن (L) از ۵ برابر قطر میلگرد (Φ_s) بزرگ‌تر نباشد، طول مهارتی کم و در غیر این صورت، طول مهارتی زیاد محسوب می‌شود.^[۱۰] در حالت طول مهارتی کوتاه می‌توان یک رابطه‌ی یک‌به‌یک بین تنش چسبندگی و نیروی وارد شده به نوک میلگرد نوشت (رابطه‌ی ۱):

$$\tau_s(\delta) = \frac{F(\delta)}{\pi \Phi_s L} \quad (1)$$

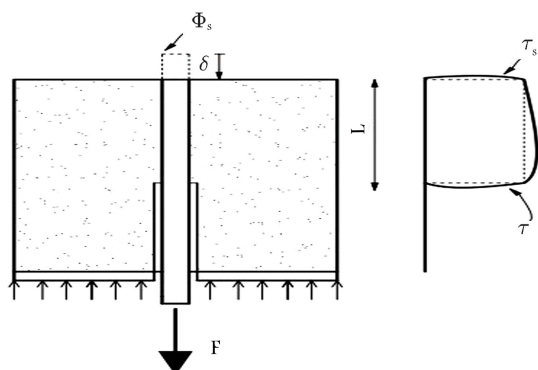
که در آن، δ لغزش، F نیروی نوک میلگرد و τ_s تنش چسبندگی بین بتن و میلگرد است.

مدل‌های چسبندگی لغزش بسیاری برای میلگرد آجدار در ادبیات وجود دارد. مدل‌های جدید، آثار کرنش فرانسلیم را لحاظ می‌کنند، اما در حالت طول مهارتی کم به دلیل شکست بیرون‌کشی و جاری‌نشدن میلگرد، آثار کرنش فرانسلیم اهمیتی ندارد. دو مدل عددی معروف که بدون آثار کرنش فولاد هستند، در ادامه معرفی شده‌اند. مدل اول، مدل فیب^[۱۶] است که مبتنی بر مدل سیامبی^۸ و همکاران،^[۵] ارائه شده است و توسط روابط ۲ الی ۵ و شکل ۳ بیان می‌شود. در جدول ۱، پارامترهای مدل اول ارائه شده است.

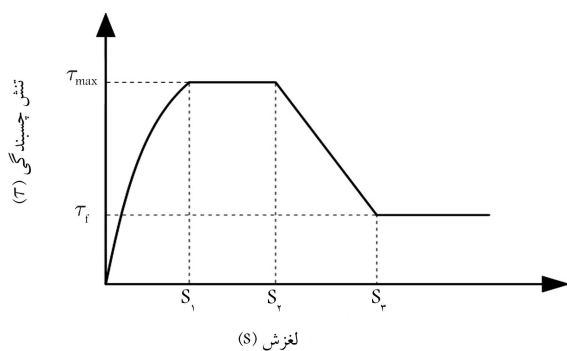
$$\tau_b = \tau_{\max} \left(\frac{S}{S_1} \right)^\alpha \quad 0 \leq S \leq S_1 \quad (2)$$

$$\tau = \tau_{\max} \quad S_1 \leq S \leq S_r \quad (3)$$

$$\tau = \tau_{\max} - (\tau_{\max} - \tau_f) \left(\frac{S - S_r}{S_r - S_r} \right) \quad S_r \leq S \leq S_f \quad (4)$$



شکل ۲. توزیع تنش چسبندگی برای $L \leq 5\phi_s$



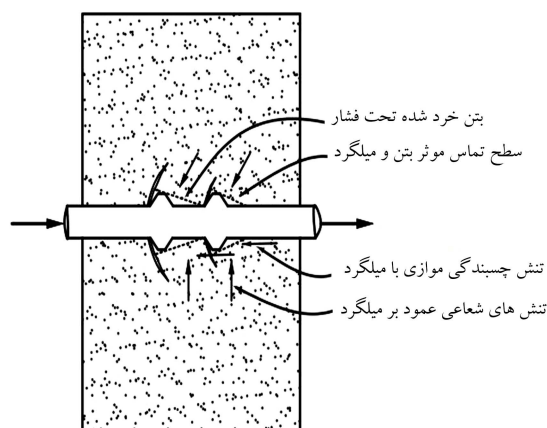
شکل ۳. مدل تنش چسبندگی - لغزش فیب.

در پژوهش حاضر، یک مدل چسبندگی - لغزش مفهومی مبتنی بر مفاهیم ساده‌ی مکانیک برای میلگرد آجدار با طول مهارتی کم ارائه شده است. برای کالیبراسیون مدل، با استفاده از نرم‌افزار عناصر محدود آباکوس،^[۱۵] و استفاده از المان رابط به‌عنوان المان تماس، شبیه‌سازی معتبری از آزمایش بیرون کشیدن میلگرد از بتن در حالت طول مهارتی کم که با شکست بیرون‌کشی همراه است، ارائه شده است. به منظور اعتبارسنجی، مدل ارائه شده با برخی از مدل‌های رایج چسبندگی - لغزش برای میلگردهای آجدار و نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

۲. قانون تنش چسبندگی محلی

در خلال بارگذاری یک نمونه بتن مسلح، رفتار چسبندگی بین میلگرد و بتن به میزان بارگذاری وابسته است. اولین روش انتقال نیرو یا اولین سطح چسبندگی، سطح چسبندگی کشسان نام دارد و به چسبندگی شیمیایی و فیزیکی و زبری میکروسکوپی سطح میلگرد مربوط می‌شود. دومین سطح چسبندگی، به‌وسیله‌ی درگیری آج میلگرد با بتن پس از شکست چسبندگی اولیه شکل می‌گیرد (شکل ۱). آج‌های روی میلگرد، نیروهای فشاری را به بتن انتقال می‌دهند تا به یک بزرگای معینی قبل از خرد شدن یا برش بتن برسند. نیروهای فشاری مذکور به دو مؤلفه‌ی نرمال و مؤلفه‌ی موازی میلگرد که منجر به نیروی چسبندگی می‌شود، تقسیم‌بندی می‌شوند. مؤلفه‌ی نرمال که منجر به تنش‌های فشاری شعاعی در بتن می‌شود، از سوی دیگر تنش کششی محیطی^۶ در بتن را رقم می‌زند. اگر مقدار تنش کشش محیطی از مقاومت کششی بتن (f_t) تجاوز کند، ترک‌خوردگی شعاعی بتن در اطراف میلگرد شکل می‌گیرد. شکل‌گیری اولین ترک شکافت‌خوردگی نمایانگر انتهای مرحله‌ی دوم است. در میلگردهای ساده بسته به میزان مقاومت اصطکاکی میلگردها، لغزش به سمت خارج اتفاق می‌افتد و معمولاً شکست از نوع بیرون کشیدن است. اما در میلگردهای آجدار، علاوه بر چسبندگی شیمیایی و پایداری اصطکاکی، درگیری بین بتن و آج میلگرد باعث افزایش تنش چسبندگی و کاهش لغزش می‌شود و بسته به طول مهارتی، شکست می‌تواند از نوع بیرون کشیدن میلگرد و یا شکافت‌خوردگی بتن باشد.

دو حالت برای تنش چسبندگی وجود دارد: در حالت اول، که معمولاً برای میلگردهایی با طول مهارتی کوتاه متصور است، تنش چسبندگی و لغزش در طول محور



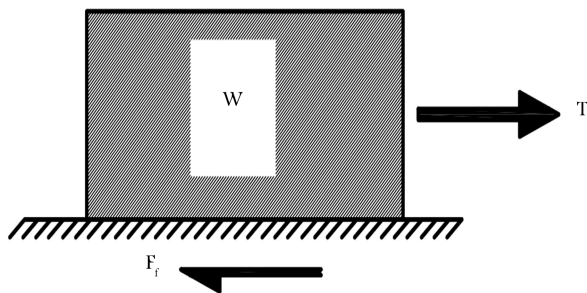
شکل ۱. ایده‌آل‌سازی ناحیه‌ی اتصال.

جدول ۱. پارامترهای مدل فیب.

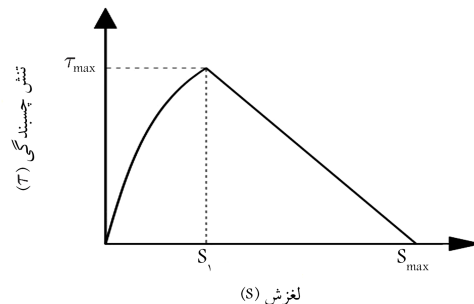
بتن محصور نشده *		بتن محصور شده **		
شرایط چسبندگی خوب	دیگر شرایط چسبندگی	شرایط چسبندگی خوب	دیگر شرایط چسبندگی	
$0/6 \text{ mm}$	$0/6 \text{ mm}$	1 mm	1 mm	s_1
$0/6 \text{ mm}$	$0/6 \text{ mm}$	3 mm	3 mm	s_2
1 mm	$2,5 \text{ mm}$	فاصله ی آج ها	فاصله ی آج ها	s_3
$0/4$	$0/4$	$0/4$	$0/4$	α
$2\sqrt{f_c}$	$1\sqrt{f_c}$	$2,5\sqrt{f_c}$	$1,25\sqrt{f_c}$	τ_{max}
$0/15\tau_{max}$	$0/15\tau_{max}$	$0/4\tau_{max}$	$0/4\tau_{max}$	τ_f

** گسیختگی به علت برش بتن بین آج ها

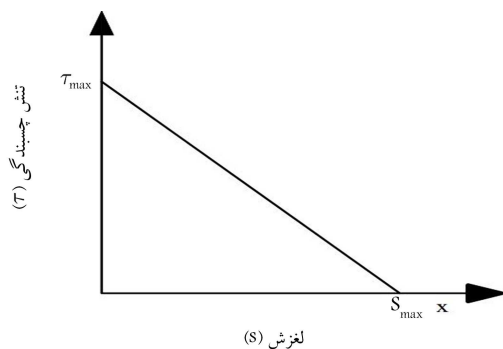
* گسیختگی به علت شکاف خوردگی بتن



شکل ۵. جسم در تماس با سطح.



شکل ۴. مدل تنش چسبندگی - لغزش هسکت و همکاران [۱۷].



شکل ۶. مدل مفهومی چسبندگی - لغزش پیشنهادی.

$$\tau = \tau_f \quad S_r \leq S \quad (5)$$

مدل دوم، مدل هسکت و همکاران^۹ است، [۱۷] که در سال ۲۰۰۷ ارائه و با روابط ۶ و ۷ بیان شده است:

$$\tau_b = \tau_{max} \left(\frac{S}{S_1} \right)^{0,7} \quad 0 \leq S \leq S_1 \quad (6)$$

$$\tau = \tau_{max} \left(\frac{S_{max} - S}{S_{max} - S_r} \right) \quad S_1 \leq S \leq S_{max} \quad (7)$$

که در آن ها، τ_{max} تنش چسبندگی بیشینه، $S_1 = 1,5 \text{ mm}$ و $S_{max} = 15 \text{ mm}$ است (شکل ۴).

این مفهوم را بیان می کند، یک رابطه ی خطی نزولی است که نمودار آن در شکل ۶ مشاهده می شود.

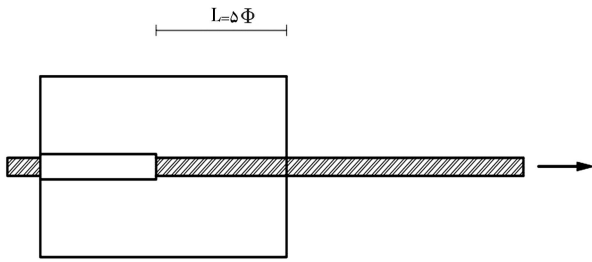
برای به دست آوردن مقادیر مناسب تنش چسبندگی بیشینه و لغزش بیشینه در مدل مفهومی اشاره شده، برای هر کدام از دو پارامتر τ_{max} و S_{max} ، ۳ مقدار مختلف انتخاب شده است. بنابراین، جمعاً ۹ مدل پیشنهادی به روش آزمون و خطا بررسی شده است. در ادامه، با مقایسه ی مدل های مذکور با مقادیر آزمایشگاهی، خطای هر مدل نسبت به مقادیر آزمایشگاهی محاسبه شده است. به این ترتیب، بهترین زوج مقدار برای پارامتر τ_{max} و S_{max} مشخص می شود.

۴. معرفی داده های آزمایشگاهی

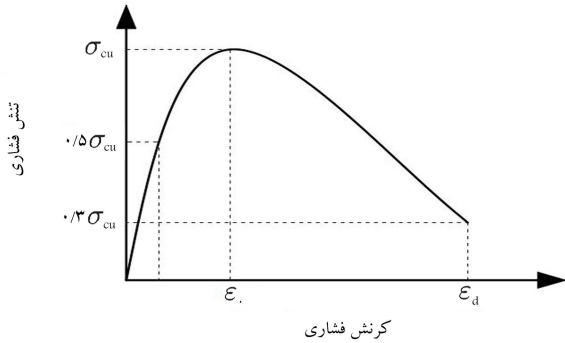
برای ارزیابی مدل های چسبندگی - لغزش موجود و نیز اعتبارسنجی مدل پیشنهادی از برخی نتایج آزمایش های موجود در زمینه ی بیرون کشیدن میلگرد از بتن^{۱۰} که طول مهاری کم دارند، استفاده شده است. بدین منظور، نمونه های آزمایشگاهی سیامپی و

۳. مدل چسبندگی - لغزش پیشنهادی برای میلگرد آجدار

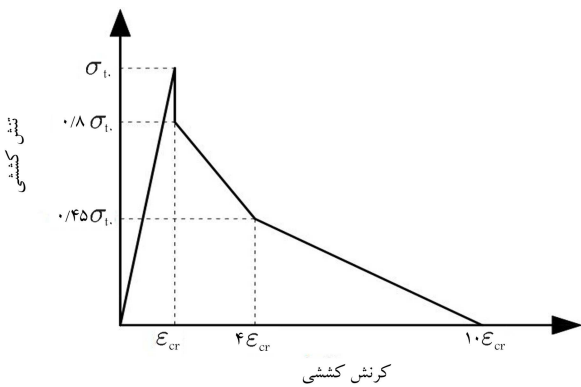
در بخش حاضر، یک مدل چسبندگی - لغزش مفهومی برای میلگرد آجدار در بتن با مقاومت معمولی ارائه شده است. این مدل مبتنی بر قیاس با مسئله ی اصطکاک در مکانیک کلاسیک است. با توجه به شکل ۵، اگر نیروی کششی T به جسمی که روی سطحی قرار گرفته است وارد شود، نیروی اصطکاک F_f بین سطح و جسم، مانع حرکت جسم می شود. با افزایش T تا زمانی که نیروی کششی از ظرفیت نیروی اصطکاک بین جسم و سطح $F_{f \text{ max}}$ کمتر باشد، هیچ لغزشی بین جسم و سطح روی نمی دهد. با قیاس به این مسئله ی ساده، در مدل پیشنهادی فرض بر آن است که در میلگرد آجدار، لغزش از ابتدای بارگذاری اتفاق نمی افتد، بلکه لغزش زمانی شروع می شود که تنش چسبندگی بین بتن و میلگرد به مقدار τ_{max} برسد و باعث گسیختگی اصطکاک بین میلگرد و بتن شود. از آن مرحله به بعد، تنش چسبندگی کاهش می یابد و میلگرد شروع به لغزش می کند، و این لغزش تا مقدار S_{max} ادامه پیدا می کند و در نقطه ی S_{max} ، تنش چسبندگی صفر می شود. ساده ترین مدلی که



شکل ۸. نمونه‌ی آزمایشگاهی Pull out برای میلگرد آجدار. [۱۹]



شکل ۹. مدل ساختاری رفتار فشاری بتن. [۲۱]



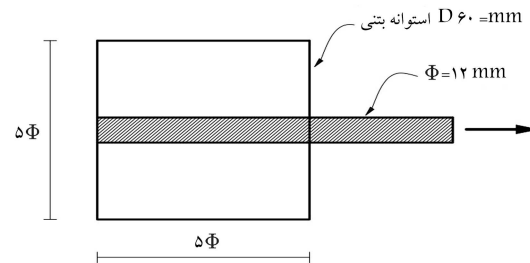
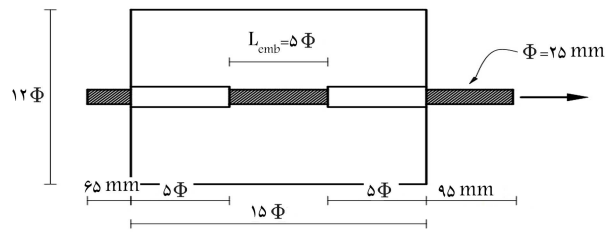
شکل ۱۰. مدل ساختاری رفتار کششی بتن. [۲۲]

۱.۵. مدل سازی رفتار بتن

برای مدل سازی رفتار بتن در مدل اجزاء محدود، به طور گسترده‌ی از مدل حالت خمیری آسیب بتن (CDP) [۲۰] استفاده می‌شود. در پژوهش حاضر، نیز از همین مدل اخیر استفاده شده است. در مدل حالت خمیری آسیب بتن، دو مکانیزم خرابی عمده به صورت ترک خوردگی ناشی از کشش و خردشدگی ناشی از فشار در مصالح بتنی در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های ساختاری به کار گرفته شده برای رفتار فشاری و کششی بتن به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شوند. پارامترهای استفاده شده در پژوهش حاضر برای مدل حالت خمیری آسیب بتن در جدول ۲ ارائه شده است که در آن fb_c/f_c مقاومت فشاری دو محوره‌ی بتن به مقاومت فشاری تک محوره و k نسبت شعاع کششی به فشاری در صفحه‌ی تنش انحرافی ϵ_{cr} بتن است.

۲.۵. مدل سازی رفتار فولاد

برای مدل سازی رفتار فولاد از مدل دوخطی الاستوخمیری کامل استفاده شده است.



شکل ۷. نمونه‌های آزمایشگاهی Pull out برای میلگرد آجدار. [۱۸، ۵]

همکاران، [۵] لتو والیج هازن [۱۸]، [۱۱] و ولکوند و همکاران [۱۹]، [۱۲] که همگی با شکست بیرون کشیدن همراه هستند، انتخاب شده است. در ادامه، جزئیات آزمایش‌های ذکر شده ارائه شده است.

۱.۴. آزمایش سیامپی و همکاران [۵]

آزمایش سیامپی و همکاران، برای طول مهاری کم با این مشخصات استفاده شده است: ابعاد نمونه: $300 \times 300 \text{ mm}$ ، مقاومت فشاری بتن: $f_c = 30 \text{ MPa}$ ، قطر میلگرد: $\Phi_s = 25 \text{ mm}$ ، طول مهاری: $l_{emb} = 5\Phi_s$ ، تنش تسلیم فولاد: $f_y = 420 \text{ MPa}$ (شکل ۷ الف).

۲.۴. آزمایش لتو والیج هازن [۱۸]

آزمایش لتو والی هازن، برای طول مهاری کم با این مشخصات انجام شده است: قطر نمونه: $D = 60 \text{ mm}$ ، مقاومت فشاری بتن: 21 MPa ، قطر میلگرد: $\Phi_s = 12 \text{ mm}$ ، طول مهاری: $l_{emb} = 5\Phi_s$ ، تنش تسلیم فولاد: $f_y = 500 \text{ MPa}$ ، ضخامت حلقه‌ی فولادی دور نمونه: $t = 8 \text{ mm}$ (شکل ۷ ب).

۳.۴. آزمایش‌های ولکوند و همکاران [۱۹]

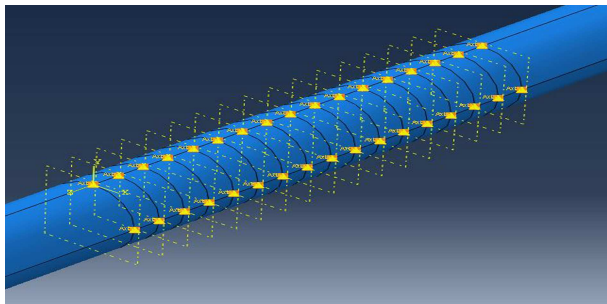
در آزمایش‌های ولکوند و همکاران، از مکعب‌های به ابعاد $200 \times 200 \text{ mm}$ برای بتن و از میلگرد قطر ۱۶ میلی‌متر و طول مهاری $l_{emb} = 5\Phi_s$ و تنش تسلیم میلگرد $f_y = 500 \text{ MPa}$ استفاده شده است (شکل ۸). همچنین مکعب‌ها از بتن‌هایی با مقاومت فشاری متوسط و زیاد ساخته شده‌اند، که در پژوهش حاضر از دو بتن با مقاومت فشاری $f_c = 28 \text{ MPa}$ و $f_c = 34 \text{ MPa}$ استفاده شده است.

۵. مدل سازی عددی

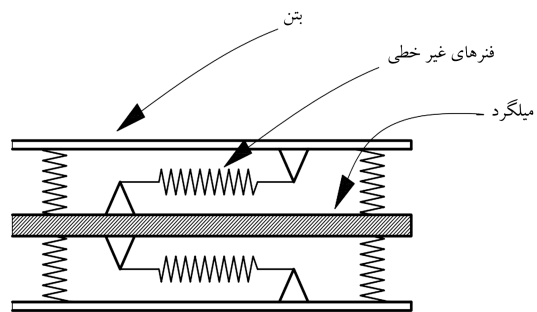
برای مدل سازی آزمایش‌های بیرون کشیدن میلگرد از بتن، از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. جزئیات مدل سازی در بخش کنونی تشریح شده است.

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در مدل حالت خمیری آسیب بتن.

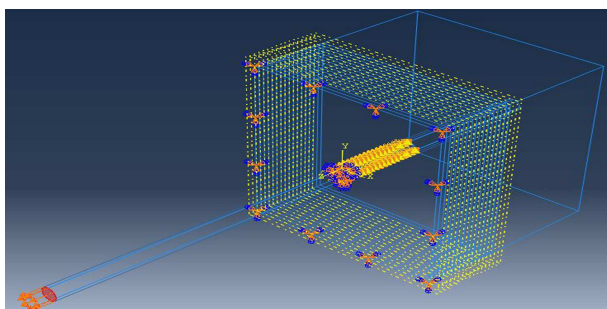
پارامتر ویسکوکشسان ^۱	k	f_{b0}/f_c	خروج از مرکزیت ^۲	زاویه اتساع ^۳
۰٫۰۵	۰٫۶۷	۱٫۱۶	۰٫۰۱	۳۰
		^۲ eccentricity		^۳ dilation angle
		^۱ viscosity parameter		



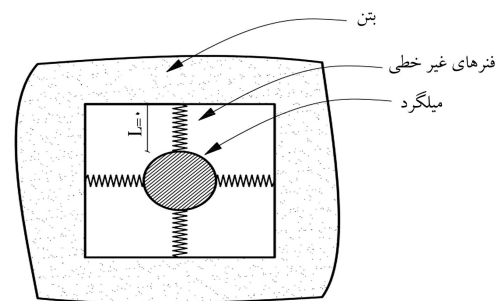
شکل ۱۳. آرایش فنرهای غیرخطی در طول میلگرد.



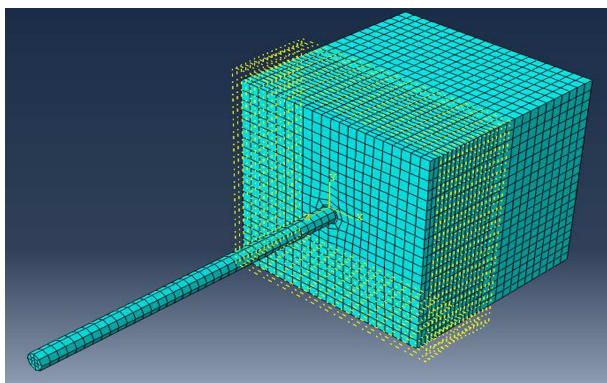
شکل ۱۱. المان Bond-link.



شکل ۱۴. شبیه‌سازی آزمایش بیرون کشیدن (قسمت زرد رنگ فنرهای اتصال بتن به میلگرد را نشان می‌دهد).



شکل ۱۲. اتصال بتن به میلگرد با ۴ فنر غیرخطی.



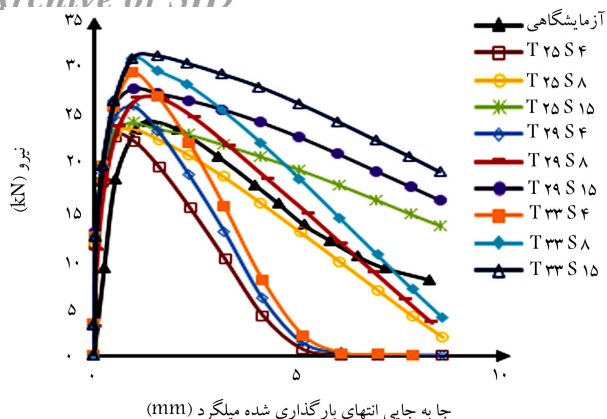
شکل ۱۵. مش بندی نمونه‌ی مدل‌سازی شده‌ی آزمایش Pull out.

۳.۵. مدل‌سازی چسبندگی - لغزش

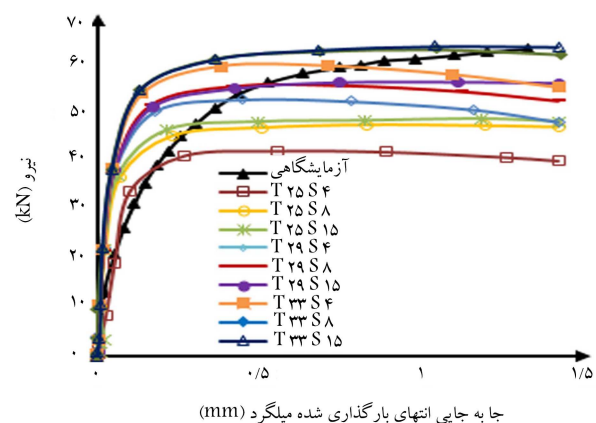
مدل‌سازی چسبندگی - لغزش به دو روش ناحیه‌ی اتصال^{۱۵} و المان رابط^{۱۶} انجام می‌گیرد. در روش ناحیه‌ی اتصال، از المان چسبنده^{۱۷} استفاده می‌شود. روش اتصال، ارتباط پیوسته‌ی بین بتن و میلگرد به وجود می‌آورد و در مقایسه با روش المان رابط، زمان تحلیل را بسیار افزایش می‌دهد. با توجه به مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده شده در پژوهش حاضر که در مقایسه با تحلیل دو بعدی نیاز به زمان بیشتری دارد، در پژوهش حاضر از روش المان رابط استفاده شده است. المان رابط، هیچ‌گونه بعد فیزیکی ندارد و دو گره با مختصات یکسان را با فنرهای غیرخطی به هم وصل می‌کند (شکل ۱۱). با اختصاص منحنی نیرو - تغییرمکان به فنرهای مذکور، می‌توان چسبندگی - لغزش بین بتن و میلگرد مجاور را شبیه‌سازی کرد که نیروی هر فنر از حاصل ضرب تنش چسبندگی در سطح بارگیر فنر به دست می‌آید. دقت شبیه‌سازی اشاره شده، بستگی به تعداد فنرها دارد، در صورتی که از فنرهای زیاد با فاصله‌ی کم استفاده شود، شبیه‌سازی دقت بالایی خواهد داشت و عملکردی شبیه به روش ناحیه‌ی اتصال که ارتباط پیوسته‌ی بین بتن و میلگرد به وجود می‌آورد، خواهد داشت. در پژوهش حاضر، به دلیل شبیه‌سازی سه‌بعدی میلگرد و بتن و برای افزایش دقت، در هر ۵ میلی‌متر از طول میلگرد، از ۴ فنر غیرخطی برای اتصال بتن به میلگرد مطابق شکل‌های (۱۲، ۱۳ و ۱۴) استفاده شده است. شکل ۱۵، مش بندی نمونه‌ی مدل‌سازی شده‌ی آزمایش Pull out را نشان می‌دهد.

۶. کالیبراسیون مدل پیشنهادی

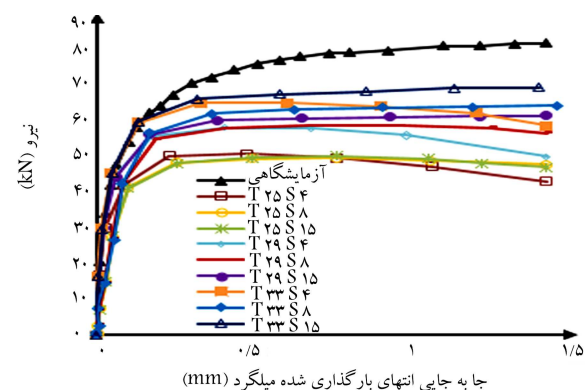
همان‌طور که پیش از این اشاره شد، برای به دست آوردن بهترین مقادیر برای تنش چسبندگی و لغزش بیشینه در مدل‌های پیشنهادی، برای هر کدام از پارامترهای مذکور، ۳ مقدار مختلف استفاده و به‌طور کلی ۹ مدل مطابق جدول ۳ ارزیابی شده است. برای مقایسه‌ی مدل‌های پیشنهادی با مقادیر آزمایشگاهی و اعتبارسنجی آنها، نتایج ۴ آزمایش بیرون کشیدن میلگرد که قبلاً تشریح شده، استفاده شده است. پس از مدل‌سازی عددی ۴ نمونه‌ی آزمایشگاهی ذکر شده، مدل‌های چسبندگی - لغزش پیشنهادی یک به یک استفاده و نتایج تحلیل آنها با منحنی آزمایشگاهی



شکل ۱۷. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی مدل‌های پیشنهادی با منحنی آزمایشگاهی نمونه‌ی لتو و الیچ هازن. [۱۸]



شکل ۱۸. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی مدل‌های پیشنهادی با منحنی آزمایشگاهی ولکوند و همکاران با بتن $f_c = 28 \text{ MPa}$. [۱۹]

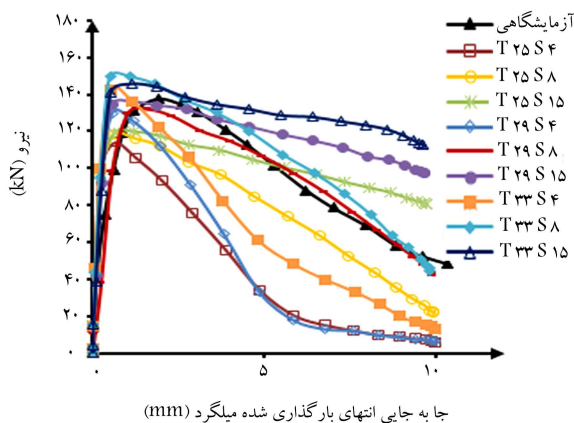


شکل ۱۹. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی مدل‌های پیشنهادی با منحنی آزمایشگاهی ولکوند و همکاران با بتن $f_c = 34 \text{ MPa}$. [۱۹]

مقاومت فشاری بتن در آن از سایر نمونه‌ها بیشتراست. در نتایج ذکر شده به وضوح می‌توان مشاهده کرد که مدل T33S15 بهترین انطباق را با منحنی آزمایشگاهی دارد و مدلهایی با تنش چسبندگی بیشینه $\tau_{max} = 2.75\sqrt{f_c}$ بیشترین خطا را دارند. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت هر قدر مقاومت فشاری بتن افزایش می‌یابد، باید ضریب α در رابطه $\tau_{max} = \alpha\sqrt{f_c}$ افزایش یابد. ستون پنجم جدول ۴، خطاهای مدل‌های پیشنهادی را با منحنی آزمایشگاهی موردنظر

جدول ۳. تنش چسبندگی و لغزش بیشینه در مدل‌های پیشنهادی.

نام مدل	$\tau_{max} (MPa)$	$S_{max} (mm)$
T25S4	$2.75\sqrt{f_c}$	4
T25S8	$2.75\sqrt{f_c}$	8
T25S15	$2.75\sqrt{f_c}$	15
T29S4	$2.9\sqrt{f_c}$	4
T29S8	$2.9\sqrt{f_c}$	8
T29S15	$2.9\sqrt{f_c}$	15
T33S4	$3.3\sqrt{f_c}$	4
T33S8	$3.3\sqrt{f_c}$	8
T33S15	$3.3\sqrt{f_c}$	15

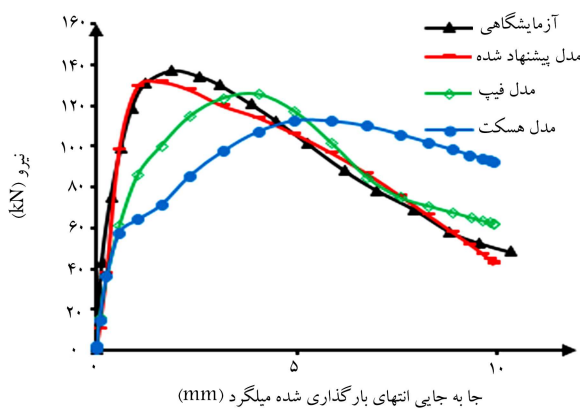


شکل ۱۶. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی مدل‌های پیشنهادی با منحنی آزمایشگاهی نمونه‌ی سیامپی و همکاران. [۵]

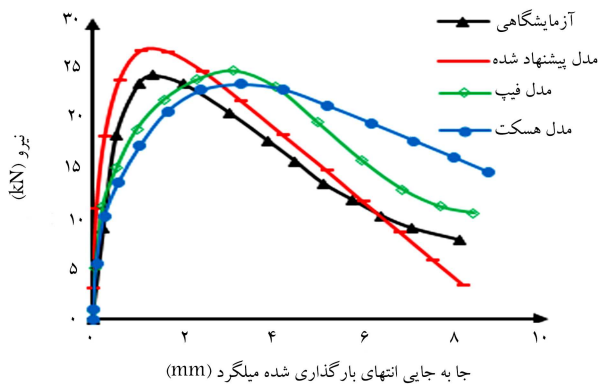
مقایسه شده است. برای محاسبه‌ی خطا بین مدل‌های پیشنهادی و مقادیر واقعی در هر نمونه، از روش جذر مجموع مربعات اختلاف نیرو بین منحنی‌های عددی و آزمایشگاهی در جابه‌جایی یکسان استفاده شده است. در شکل‌های ۱۶ الی ۱۹، مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی انتهای بارگذاری شده‌ی میلگرد را برای ۹ مدل پیشنهادی و ۴ منحنی آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. همچنین در جدول ۴، مقادیر خطای هر مدل با مقادیر آزمایشگاهی محاسبه شده است. در شکل ۱۶، در بین مدل‌های پیشنهادی، مدل T29S8 نسبت به سایر مدل‌ها، انطباق بهتری با منحنی آزمایشگاهی دارد و پس از آن مدل‌های T33S8 و T25S8. مقادیر خطای مندرج در ستون دوم جدول ۴ نیز مؤید همین مطلب است. همچنین می‌توان گفت که مدلهایی که لغزش بیشینه $S_{max} = 4 \text{ mm}$ دارند، اختلاف قابل ملاحظه‌ی با مقادیر آزمایشگاهی دارند. براساس شکل ۱۷ و ستون سوم جدول ۴، مدل‌های پیشنهادی T25S8 و T29S8، تقریباً اختلاف یکسانی با منحنی آزمایشگاهی دارند و نسبت به سایر مدل‌ها نتایج بهتری نشان می‌دهند. نتایج به دست آمده در شکل ۱۸ نشان می‌دهند که مدل T25S4 در قسمت اولیه‌ی نمودار (قسمت صعودی) انطباق مناسب، اما در قسمت دوم (قسمت ثابت) اختلاف قابل ملاحظه‌ی با منحنی آزمایشگاهی دارد و همچنین مدل‌های T33S8 و T33S15 در قسمت اولیه‌ی نمودار، خطای زیاد و در قسمت ثابت نمودار خطای کمتری دارند. و به طور کلی در شکل ۱۸، مدل‌های T29S8 و T29S15 میانگین مدل‌های دیگر هستند و همانطور که در ستون چهارم جدول ۴ مشاهده می‌شود، خطای کمتری نسبت به سایر مدل‌ها دارند. شکل ۱۹، مربوط به نمونه‌ی آزمایشگاهی است که

جدول ۴. خطای مدل‌های پیشنهادی در برآورد مقادیر آزمایشگاهی.

مدل	خطا با نمونه‌ی			
	سیامپی و همکاران	لتو و الیچ هازن	ولکوند و همکاران $f_c = 28 MPa$	ولکوند و همکاران $f_c = 34 MPa$
T25S4	231	32	40	90
T25S8	116	17	32	77
T25S15	87	21	31	76
T29S4	225	31	30	62
T29S8	34	17	26	54
T29S15	124	29	24	50
T33S4	170	31	32	46
T33S8	71	23	33	46
T33S15	167	38	33	37



شکل ۲۰. مقایسه‌ی منحنی آزمایشگاهی نیرو - جابه‌جایی با منحنی‌های عددی برای نمونه‌های آزمایشگاهی سیامپی و همکاران.^[۵]



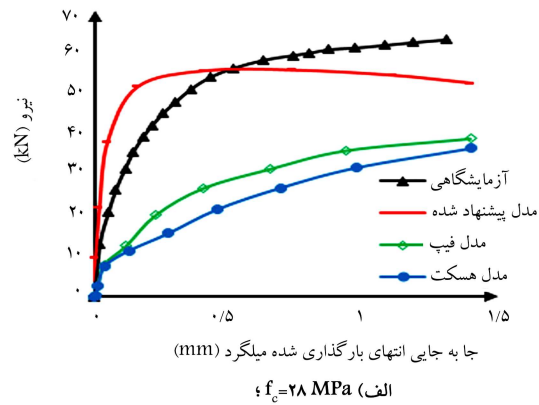
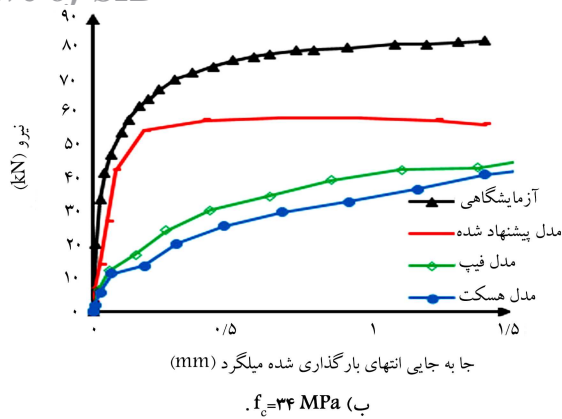
شکل ۲۱. مقایسه‌ی منحنی آزمایشگاهی نیرو - جابه‌جایی با منحنی‌های عددی برای نمونه‌های آزمایشگاهی لتو و الیچ هازن.^[۱۸]

اولین لغزش‌ها زمانی اتفاق می‌افتد که تنش چسبندگی بین بتن و میلگرد به مقدار مشخص τ_{max} برسد. بنابراین بدیهی است که در شکل‌های ۲۰ و ۲۱، نمودار مدل پیشنهادی، انطباق بسیار بهتری نسبت به دو مدل دیگر با نمودار آزمایشگاهی داشته باشد، زیرا در جابه‌جایی بسیار کم، نیرو در نمودار آزمایشگاهی به مقدار قابل توجهی می‌رسد.

نشان می‌دهد. در حالت کلی با جمع مجموع خطاهای هر مدل برای ۴ نمونه‌ی آزمایشگاهی، خطای کل برای آن مدل به دست می‌آید. همان‌طور که در ستون ششم جدول ۴ مشاهده می‌شود، مدل T29S8 و پس از آن به ترتیب مدل‌های T33S8 و T25S15، بهترین انطباق و کمترین خطا را نسبت به سایر مدل‌ها با مقادیر آزمایشگاهی دارند.

۷. ارزیابی و مقایسه‌ی بهترین مدل پیشنهادی با مدل‌های موجود

در قسمت قبل بهترین مدل پیشنهادی، مدل T29S8 که در مجموع کمترین خطا را نسبت به مقادیر آزمایشگاهی دارد، معرفی شد. در بخش حاضر، مدل پیشنهادی منتخب با مدل‌های پیش‌گفته‌ی فیب و هسکت مقایسه شده است. در شکل‌های ۲۰ و ۲۱، آزمایشگاهی نیرو - جابه‌جایی انتهای بارگذاری شده‌ی میلگرد با مدل‌های عددی به ترتیب برای نمونه‌های آزمایشگاهی سیامپی و همکاران،^[۵] و لتو و الیچ هازن،^[۱۸] مشاهده می‌شود که مطابق آن‌ها، مدل پیشنهادی نسبت به دو مدل دیگر نتایج بسیار بهتری را ارائه می‌کند. در جابه‌جایی بسیار کم (حدود ۰/۵ میلی‌متر) منحنی‌های مربوط به دو مدل عددی دیگر با منحنی آزمایشگاهی انطباق خوبی دارد، ولی در ادامه اختلاف‌ها زیاد شده است. ولی به هر حال در شاخه‌ی نزولی، مدل فیب نسبت به مدل هسکت نتایج بهتری را نشان می‌دهد. در شکل ۲۲، نیز مقایسه‌ی نتایج آزمایشگاهی با مدل‌های عددی برای نمونه‌های آزمایشگاهی ولکوند و همکاران،^[۱۹] و نتایج نمودار نیرو - جابه‌جایی انتهای بارگذاری شده‌ی میلگرد مشاهده می‌شود، که مطابق آن برای شبیه‌سازی عددی از ۳ مدل عددی فیب، هسکت و مدل پیشنهادی استفاده شده است. مشاهده می‌شود که شیب اولیه‌ی نمودار آزمایشگاهی نسبت به دو مدل عددی فیب و هسکت اختلاف فاحشی دارد که دلیل آن به نمودار اولیه‌ی دو مدل فیب و هسکت بر می‌گردد. در شکل ۳ که مدل فیب را نشان می‌دهد، لغزش متناظر با بیشینه‌ی تنش چسبندگی برای مود شکست بیرون کشیدن در بازه‌ی بین ۱ تا ۳ میلی‌متر رخ می‌دهد و همچنین در شکل ۴ که مدل هسکت را نشان می‌دهد، لغزش متناظر با بیشینه‌ی تنش چسبندگی ۱/۵ میلی‌متر است و این حاکی از آن است که برای رسیدن به تنش چسبندگی بیشینه به مقدار لغزش قابل ملاحظه‌ی نیاز است. اما در مدل پیشنهادی پژوهش حاضر (شکل ۶)،



شکل ۲۲. مقایسه‌ی منحنی آزمایشگاهی نیرو - جابه‌جایی با منحنی‌های عددی برای نمونه‌های آزمایشگاهی ولکوند و همکاران. [۱۹]

با پارامترهای $t_{max} = 2.9\sqrt{f_c}$ و $S_{max} = 8\text{ mm}$ که در کل کمترین خطا را داشت، به‌عنوان بهترین مدل پیشنهادی معرفی شد. مدل پیشنهادی منتخب با دو مدل موجود فیب و هسکت مقایسه شد و نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی نسبت به دو مدل دیگر، انطباق بسیار بهتری با منحنی آزمایشگاهی دارد. در پژوهش حاضر، برای شبیه‌سازی رفتار تماس بین بتن و فولاد در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس از المان Bond-link استفاده شد. به کمک المان ذکر شده می‌توان بین گره‌های بتن و فولاد با مختصات یکسان، فنرهای غیرخطی رابط را تعریف و با تعیین مشخصات فنر، آثار چسبندگی - لغزش را لحاظ کرد. در نهایت، نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که روش شبیه‌سازی تنش چسبندگی - لغزش بیان شده در پژوهش حاضر، روشی بسیار مناسب برای در نظر گرفتن اندرکنش تماسی بین بتن و فولاد است. لازم به ذکر است که مدل پیشنهادی پژوهش حاضر که برای مود شکست بیرون کشیدن میلگرد ارائه شده است، با افزودن آثار کرنش فراتسلیم فولاد، قابل توسعه برای حالت طول مهارتی بلند و شکست شکافت‌خوردگی بتن است.

۸. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک مدل چسبندگی - لغزش برای مود شکست بیرون‌کشیدگی میلگرد از بتن ارائه شده است. مبنای مدل مذکور، یک تئوری ساده‌ی فیزیکی است و تفاوت آن با سایر مدل‌ها این است که لغزش در میلگرد آجدار زمانی اتفاق می‌افتد که تنش چسبندگی به مقدار بیشینه نائل شود و قفل بست بین بتن و میلگرد شکسته شود. پارامترهای اصلی مدل ارائه‌شده عبارت‌اند از: تنش چسبندگی بیشینه در ابتدای لغزش و لغزش بیشینه در لحظه‌ی گسیختگی کامل بین بتن و میلگرد. برای کالیبراسیون مدل، ۳ مقدار متفاوت برای تنش چسبندگی بیشینه و ۳ مقدار متفاوت برای لغزش بیشینه اتخاذ شد و در مجموع ۹ مدل بررسی شدند. سپس با مدل‌سازی عددی ۴ نمونه‌ی آزمایش بیرون‌کشیدن میلگرد، ۹ مدل پیشنهادی برای در نظر گرفتن اندرکنش بتن و فولاد استفاده و پس از تحلیل، نتایج آن‌ها با مقادیر آزمایشگاهی مقایسه شدند. پس از محاسبه‌ی خطای کل در هر مدل، مدل

پانویس‌ها

1. pull out failure
2. splitting failure
3. tension stiffening
4. bond-link method
5. bond zone
6. Circumferential stress (Hoop stress)
7. fib (CEB-FIP)
8. Ciampi et al.
9. Haskett et al.
10. pull out test
11. Lettow and Eligehausen
12. Valcuende et al.
13. concrete damage plasticity (CDP)
14. deviatoric stress plane
15. bond zone
16. bond link
17. cohesive element

منابع (References)

1. Sulaiman, M.F., Ma, C.K., Apandi, N.M. and et al. "A review on bond and anchorage of confined high-strength concrete", *Structures*, **97**(8), pp. 97-109 (2017).
2. Al-Mahmoud, F., Mechling, J.M. and Shaban, M. "Bond strength of different strengthening systems-Concrete elements under freeze-thaw cycles and salt water immersion exposure", *Construction and Building Materials*, **70**(11), pp. 399-409 (2014).
3. FIB-Bulletin 55-Model Code 2010-First Complete Draft, Volume 1, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland (2010).
4. Gravina, R.J., Hadigheh, S.A. and Setunge, S. "Interfacial bond strength of resinimpregnated fibre reinforced polymer laminates bonded to concrete using vacuum and heat: experimental study", *Austral. J. Struct. Eng. (AJSE)*, **15**(2), pp. 189-201 (2014).

5. Ciampi, V., Eligehausen, R., Bertero, V.V. and et al. "Analytical model for deformed-bar bond under generalized excitations", Transactions of IABSE Colloquium on Advanced Mechanics of Reinforced Concrete, Delft, Netherlands (1981).
6. Shima, H., Chou, L.L. and Okamura, H. "Micro and macro models for bond in reinforced concrete", *Journal of the Faculty of Engineering*, **39**(2), pp. 133-194 (1987).
7. Marti, P., Alvarez, M., Kaufmann, W. and et al. "Tension chord model for structural concrete", *Struct. Eng. Int.*, **8**(4), pp. 287-298 (1998).
8. Zhou, B., Wu, R. and Feng, J. "Two models for evaluating the bond behavior in pre-and post-yield phases of reinforced concrete", *Construction and Building Materials*, **147**(8), pp. 847-857 (2017).
9. Santos, J. and Henriques, A.A. "New finite element to model bond-slip with steel strain effect for the analysis of reinforced concrete structures", *Engineering Structures*, **86**(3), pp. 72-83 (2015).
10. Panteki, E., Maca, P. and Haussler-Combe, U. Finite element analysis of dynamic concrete-to-rebar bond " experiments in the push-in configuration", *International Journal of Impact Engineering*, **106**(8), pp. 155-170 (2017).
11. Mendes, L.A.M. and Castro, L.M.S.S. "A new RC bond model suitable for three-dimensional cyclic analyses", *Computers & Structures*, **120**(4), pp. 47-64 (2013).
12. Majdi, Y., Hsu, C.T.T. and Punurai, S. "Local bond-slip behavior between cold-formed metal and concrete", *Engineering Structures*, **69**(6), pp. 271-284 (2014).
13. Dehestani, M., Asadi, A. and Mousavi, S.S. "On discrete element method for rebar-concrete interaction", *Construction and Building Materials*, **151**(10), pp. 220-227 (2017).
14. Alsheghri, A.A. and Al-Rub, R.K.A. "Finite element implementation and application of a cohesive zone damage-healing model for self-healing materials", *Engineering Fracture Mechanics*, **163**(9), pp. 1-22. (2016).
15. ABAQUS v.6.10. Standard User's Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc. (2010).
16. CEB-FIP, "CEB-FIP Model Code 1990: Design Code, London, Telford (1993).
17. Haskett, M., Oehlers, D.J. and Mohammed Ali, M.S. "Local and global bond characteristics of Steel reinforcing bars", *Engineering Structures*, **30**(2), pp. 376-383 (2008).
18. Lettow, S. and Eligehausen, R. "The simulation of bond between concrete and reinforcement in nonlinear three-dimensional finite element analysis", in 5th International PhD Symposium in Civil Engineering, Delft, The Netherlands, pp. 16-19 (2004).
19. Valcuende, M. and Parra, C. "Bond behavior of reinforcement in self-compacting concretes", *Constr. Build. Mater.*, **23**, pp. 162-70 (2009).
20. Lubliner, J., Oliver, S. and Onate, E. "A plastic-damage model for concrete model for concrete", *International Journal of Solids and Structures*, **25**(2), pp. 299-326 (1989).
21. Hsu, L.S. and Hsu, C.-T.T. "Complete stress-strain behavior of high-strength concrete under compression", *Magazine of Concrete Research*, **46**(169), pp. 301-312 (1994).
22. Nayal, R. and Rasheed, H.A. "Tension stiffening model for concrete beams reinforced with steel and FRP bars", *Journal of Materials in Civil Engineering*, **18**(6), pp. 831-841 (2006).