

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

مرتضی مهمی (کارشناس ارشد)

وحید بروجردیان* (استادیار)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۸)
دوری ۲ - ۳۵، شماره ۲/۳، ص. ۱۰۵-۹۷

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 ساده مکانیک برای میلگرد آجدار با طول مهاری کم ارائه شده است. برای کالیبراسیون مدل از شبیه سازی آزمایش های بیرون کشیدن میلگرد از داخل بتن در نرم افزار عناصر محدود آباکوس استفاده شده است. برای شبیه سازی رفتار چسبندگی - لغزش در مدل عناصر محدود، گره های فولاد به گره های بتن مجاور به وسیله ی فنرهای غیرخطی متصل شدند. استخراج پارامترهای مدل پیشنهادی براساس فرایند سعی و خطا و با هدف حصول بیشترین انطباق با نتایج آزمایشگاهی انجام شد. مقایسه ی نمودارهای نیرو - جابه جایی حاصل از مدل پیشنهادی با سایر مدل های موجود در ادبیات نشان داد که مدل پیشنهادی از نظر تطابق با مقادیر آزمایشگاهی، چه در تخمین بیشینه ی تنش چسبندگی و چه در خصوص رفتار پس از اوج چسبندگی - لغزش، بسیار بهتر از مدل های دیگر بود.

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

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

۱. مقدمه

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 سه بعدی برای شبیه سازی چسبندگی بین بتن و میلگرد ارائه و میلگردها را با المان خرابایی و بتن با المان تنش صفحه ای شبیه سازی کردند. مندرس و کاسترو (۲۰۱۳)^[۱۱] مدلی از تماس را ارائه کردند که آثار سیکل های رفت و برگشت کرنش را بر زوال تماس بین بتن و فولاد مدل می کرد.

در مقایسه ی دقت و کارآمدی مدل ها باید به این نکته توجه داشت که با افزایش تعداد پارامترهای مدل، استفاده از آن برای مقاصد آیین نامه ای و مهندسی دشوارتر می شود. پس از انتخاب مدل رفتاری مناسب، چالش بعدی در شبیه سازی رفتار یک عضو بتن مسلح، نحوه ی پیاده سازی مدل رفتاری مورد نظر در نرم افزار المان محدود است. دو روش رایج برای مدل سازی رفتار چسبندگی - لغزش بین میلگرد و بتن در تحلیل اجزاء محدود وجود دارد: ۱. روش المان رابط^۴،^[۱۲] که در آن از المان های فتری مجزا با مشخصات مکانیکی معین استفاده می شود و ۲. روش ناحیه ی اتصال^۵،^[۱۳] که در آن المان چسبندگی ارتباط پیوسته ای بین بتن و فولاد به وجود می آورد. در هر یک از روش های اشاره شده، تنظیم پارامترهای المان تماس برای انطباق با مدل رفتاری کار آسانی نیست.

یکی از ملزومات پیش بینی صحیح رفتار سازه های بتن مسلح تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی، لحاظ پدیده ی 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 مدل های عددی می شود. بیشتر مدل های رفتاری ارائه شده برای چسبندگی - لغزش، تنش چسبندگی را به صورت تابعی از مقاومت فشاری بتن و مقدار لغزش در نظر می گیرند.^[۴-۱] در یک مطالعه در سال ۱۹۸۱، منحنی چندخطی تنش چسبندگی - لغزش در دو حالت شکست بیرون کشیدن^۱ و شکست شکافت خوردگی^۲ برای شرایط چسبندگی مختلف ارائه شده است.^[۵] برخی از فرمول بندی ها، آثار سخت شدگی کششی^۳ پس از تسلیم را در محاسبات منظور می کنند. به این منظور، پارامترهای کرنش فولاد، کرنش بتن و آسیب دیدگی بتن وارد مدل های 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 رفتار چسبندگی لغزش صلب خمیری ارائه کردند که با رسیدن فولاد به حد تسلیم، تنش چسبندگی به نصف مقدار اولیه کاهش می یابد. ژو و

* نویسنده مسئول

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

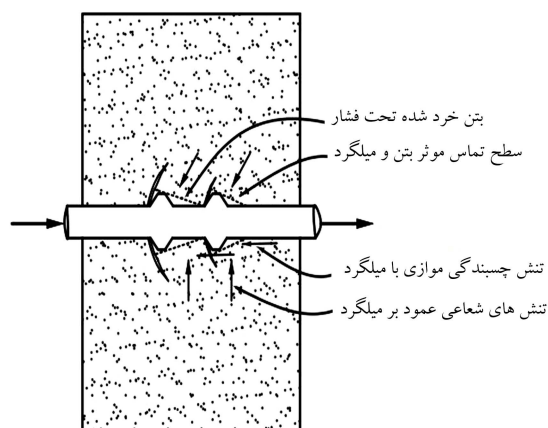
DOI:10.24200/J30.2018.5027.2195

در پژوهش حاضر، یک مدل چسبندگی - لغزش مفهومی مبتنی بر مفاهیم ساده‌ی مکانیک برای میلگرد آجدار با طول مهاري 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 مهاري 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 مهاري، 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 مهاري کوتاه متصور است، تنش چسبندگی و لغزش در طول محور



شکل ۱. ایده‌آل‌سازی ناحیه‌ی اتصال.

میلگرد ثابت فرض می‌شود (شکل ۲). در حالت دوم که معمولاً برای میلگردهای با طول مهاري 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 مهاري کم و در غیر این صورت، طول مهاري زیاد محسوب می‌شود.^[۱۰] در حالت طول مهاري کوتاه می‌توان یک رابطه‌ی یک‌به‌یک بین تنش چسبندگی و نیروی وارد شده به نوک میلگرد نوشت (رابطه‌ی ۱):

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

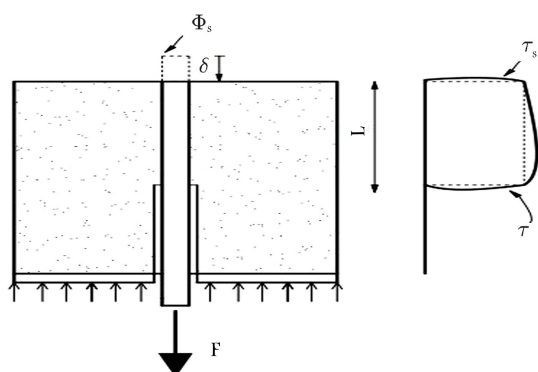
که در آن، δ لغزش، F نیروی نوک میلگرد و τ_s تنش چسبندگی بین بتن و میلگرد است.

مدل‌های چسبندگی لغزش بسیاری برای میلگرد آجدار در ادبیات وجود دارد. مدل‌های جدید، آثار کرنش فراتسلیم را لحاظ می‌کنند، اما در حالت طول مهاري کم به دلیل شکست بیرون‌کشی و جاری‌نشدن میلگرد، آثار کرنش فراتسلیم اهمیتی ندارد. دو مدل عددی معروف که بدون آثار کرنش فولاد هستند، در ادامه معرفی شده‌اند. مدل اول، مدل فیب^{۷، [۱۶]} است که مبتنی بر مدل سیامپی^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.

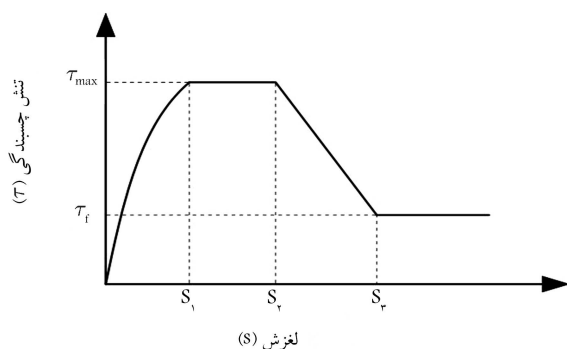
$$\tau_b = \tau_{\max} \left(\frac{S}{S_1} \right)^\alpha \quad 0 \leq S \leq S_1 \quad (2)$$

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

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



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



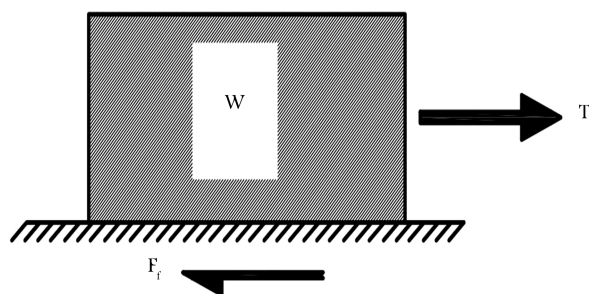
شکل ۳. مدل تنش چسبندگی - لغزش فیب.

جدول ۱. پارامترهای مدل فیب.

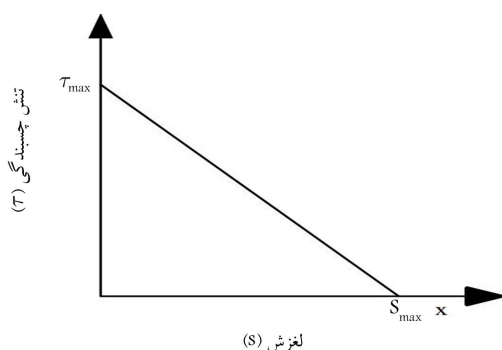
بتن محصور نشده *		بتن محصور شده **	
شرایط چسبندگی خوب	دیگر شرایط چسبندگی	شرایط چسبندگی خوب	دیگر شرایط چسبندگی
s_1	$0/6\text{ mm}$	1 mm	1 mm
s_2	$0/6\text{ mm}$	3 mm	3 mm
s_3	1 mm	فاصله ی آج ها	فاصله ی آج ها
α	$0/4$	$0/40$	$0/4$
τ_{\max}	$2\sqrt{f_c}$	$2/5\sqrt{f_c}$	$1/25\sqrt{f_c}$
τ_f	$0/15\tau_{\max}$	$0/4\tau_{\max}$	$0/4\tau_{\max}$

* گسیختگی به علت شکاف خوردگی بتن

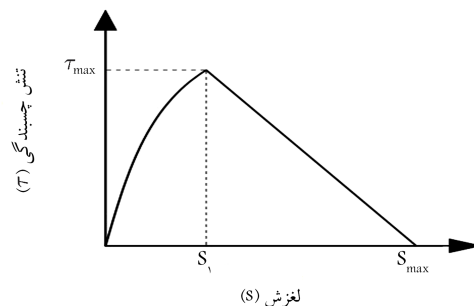
** گسیختگی به علت برش بتن بین آج ها



شکل ۵. جسم در تماس با سطح.



شکل ۶. مدل مفهومی چسبندگی - لغزش پیشنهادی.



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

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

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

$$\tau_b = \tau_{\max} \left(\frac{S}{S_1} \right)^{0/4} \quad 0 \leq S \leq S_1 \quad (6)$$

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

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

۳. مدل چسبندگی - لغزش پیشنهادی برای میلگرد آجدار

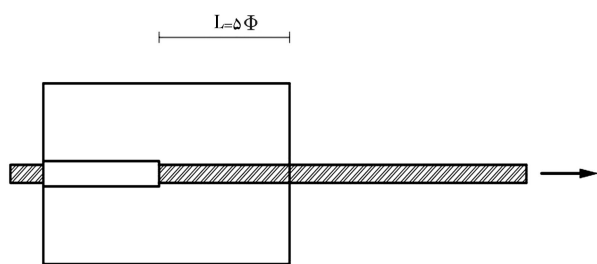
در بخش حاضر، یک مدل چسبندگی - لغزش مفهومی برای میلگرد آجدار در بتن با مقاومت معمولی ارائه شده است. این مدل مبتنی بر قیاس با مسئله ی اصطکاک در مکانیک کلاسیک است. با توجه به شکل ۵، اگر نیروی کششی T به جسمی که روی سطحی قرار گرفته است وارد شود، نیروی اصطکاک F_f بین سطح و جسم، مانع حرکت جسم می شود. با افزایش T تا زمانی که نیروی کششی از ظرفیت نیروی اصطکاک بین جسم و سطح $F_{f\max}$ 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

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

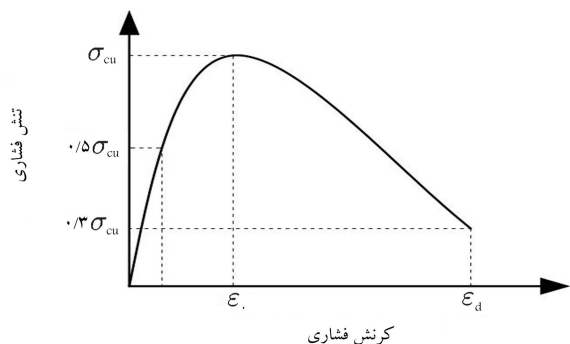
برای به دست آوردن مقادیر مناسب تنش چسبندگی بیشینه و لغزش بیشینه در مدل مفهومی اشاره شده، برای هر کدام از دو پارامتر τ_{\max} و S_{\max} ، ۳ مقدار مختلف انتخاب شده است. بنابراین، جمعاً ۹ مدل پیشنهادی به روش آزمون و خطا بررسی شده است. در ادامه، با مقایسه ی مدل های مذکور با مقادیر آزمایشگاهی، خطای هر مدل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

۴. معرفی داده های آزمایشگاهی

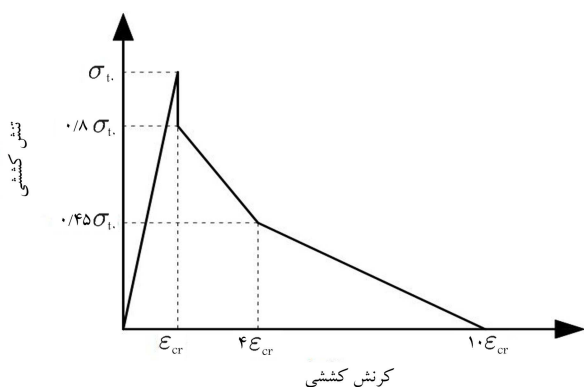
برای ارزیابی مدل های چسبندگی - لغزش موجود و نیز اعتبارسنجی مدل پیشنهادی از برخی نتایج آزمایش های موجود در زمینه ی بیرون کشیدن میلگرد از بتن^{۱۰} که طول مهاری کم دارند، استفاده شده است. بدین منظور، نمونه های آزمایشگاهی سیامپی و



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



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



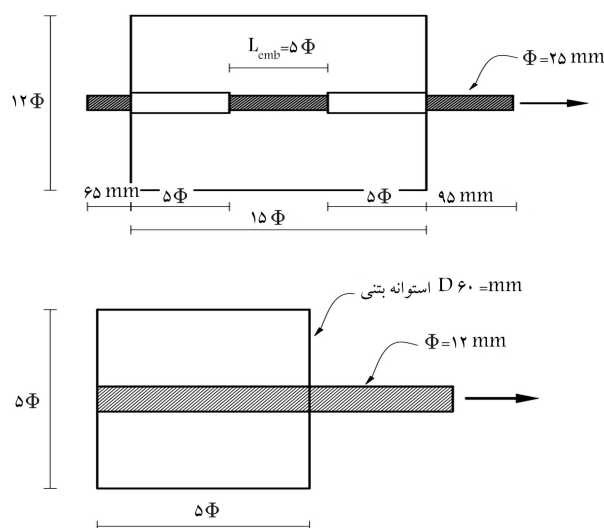
شکل ۱۰. مدل ساختاری رفتار کششی بتن. [۲۲]

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) [۲۳] 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 f_b/f_c مقاومت فشاری دو محوره‌ی بتن به مقاومت فشاری تک محوره و k نسبت شعاع کششی به فشاری در صفحه‌ی تنش انحرافی [۲۴] 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 و الیچ هازن [۱۸]، [۱۹] و ولکوند و همکاران [۱۹] 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 و الیچ هازن [۱۸]

آزمایش لتو و الیچ 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]

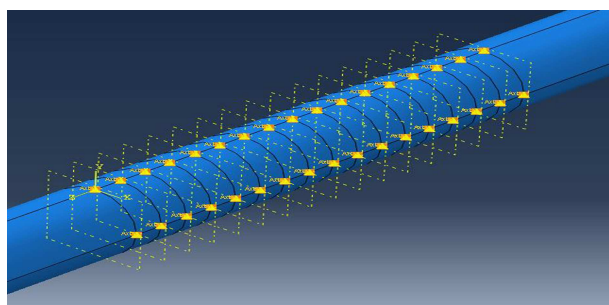
در آزمایش‌های ولکوند و همکاران، از مکعب‌های به ابعاد $200 \times 200 \text{ mm}$ برای بتن و از میلگرد قطر ۱۶ میلی‌متر و طول مهاری $l_{emb} = 5\Phi_s$ و تنش تسلیم میلگرد $f_y = 500 \text{ MPa}$ استفاده شده است (شکل ۸). همچنین مکعب‌ها از بتن‌هایی با مقاومت فشاری متوسط و زیاد ساخته شده‌اند، که در پژوهش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

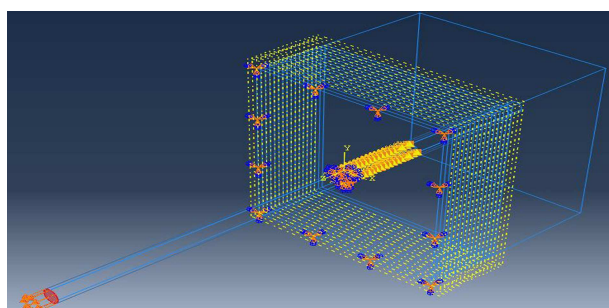
برای مدل سازی آزمایش‌های بیرون کشیدن میلگرد از بتن، از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس استفاده شده است. جزئیات مدل سازی در بخش کنونی تشریح شده است.

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

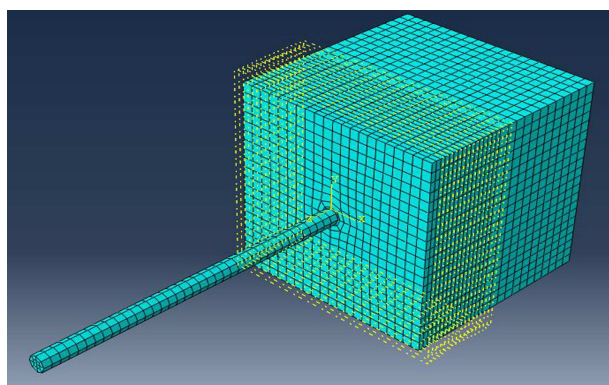
پارامتر ویسکوکشسان ^۱	k	f_{b0}/f_c	خروج از مرکزیت ^۲	زاویه اتساع ^۳
۰٫۰۵	۰٫۶۷	۱٫۱۶	۰٫۰۱	۳۰
^۱ viscosity parameter ^۲ eccentricity ^۳ dilation angle				



شکل ۱۳. آرایش فنرهای غیرخطی در طول میلگرد.



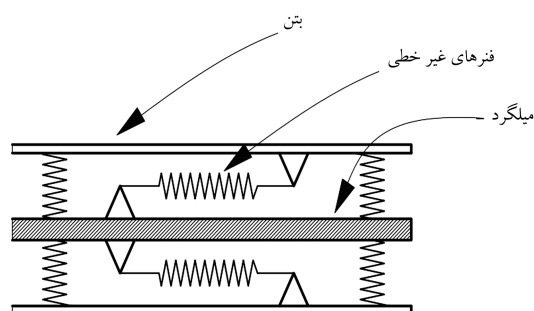
شکل ۱۴. شبیه سازی آزمایش بیرون کشیدن (قسمت زرد رنگ فنرهای اتصال بتن به میلگرد را نشان می دهد).



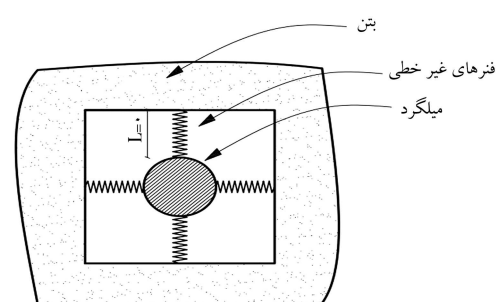
شکل ۱۵. مش بندی نمونه ی مدل سازی شده ی آزمایش Pull out.

۶. کالبراسیون مدل پیشنهادی

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



شکل ۱۱. المان Bond-link.



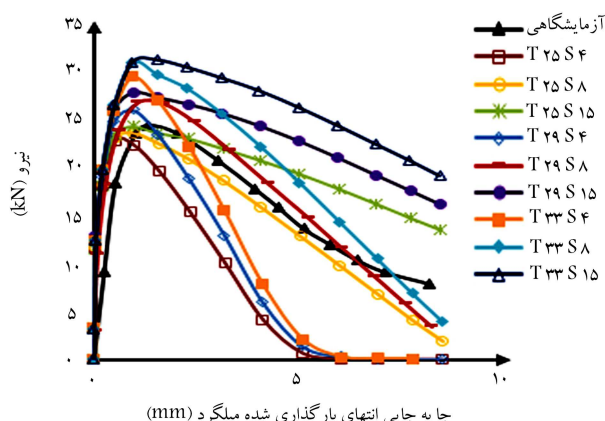
شکل ۱۲. اتصال بتن به میلگرد با ۴ فنر غیرخطی.

۳.۵. مدل سازی چسبندگی - لغزش

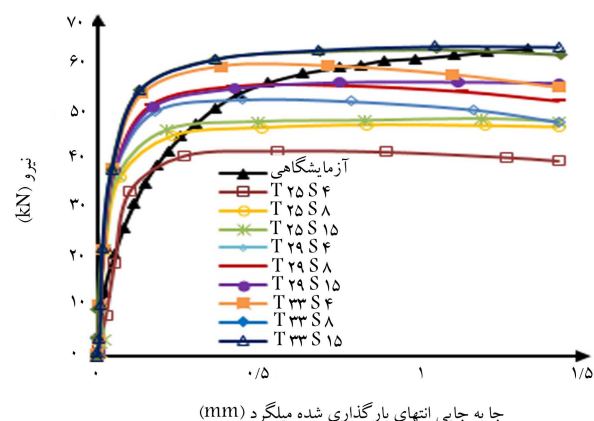
مدل سازی چسبندگی - لغزش به دو روش ناحیه ی اتصال^{۱۵} و المان رابط^{۱۶} انجام می گیرد. در روش ناحیه ی اتصال، از المان چسبنده^{۱۷} استفاده می شود. روش اتصال، ارتباط پیوسته یی بین بتن و میلگرد به وجود می آورد و در مقایسه با روش المان رابط، زمان تحلیل را بسیار افزایش می دهد. با توجه به مدل سازی سه بعدی استفاده 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، هیچ گونه بعد فیزیکی ندارد و دو گره با مختصات یکسان را با فنرهای غیرخطی به هم وصل می کند (شکل ۱۱). با اختصاص منحنی نیرو - تغییر مکان به فنرهای مذکور، می توان چسبندگی - لغزش بین بتن و میلگرد مجاور را شبیه سازی کرد که نیروی هر فنر از حاصل ضرب تنش چسبندگی در سطح بارگیر فنر به دست می آید. دقت شبیه سازی اشاره شده، بستگی به تعداد فنرها دارد، در صورتی که از فنرهای زیاد با فاصله ی کم استفاده شود، شبیه سازی دقت بالایی خواهد داشت و عملکردی شبیه به روش ناحیه ی اتصال که ارتباط پیوسته یی بین بتن و میلگرد به وجود می آورد، خواهد داشت. در پژوهش حاضر، به دلیل شبیه سازی سه بعدی میلگرد و بتن و برای افزایش دقت، در هر ۵ میلی متر از طول میلگرد، از ۴ فنر غیرخطی برای اتصال بتن به میلگرد مطابق شکل های (۱۲، ۱۳ و ۱۴) استفاده شده است. شکل ۱۵، مش بندی نمونه ی مدل سازی شده ی آزمایش Pull out را نشان می دهد.

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

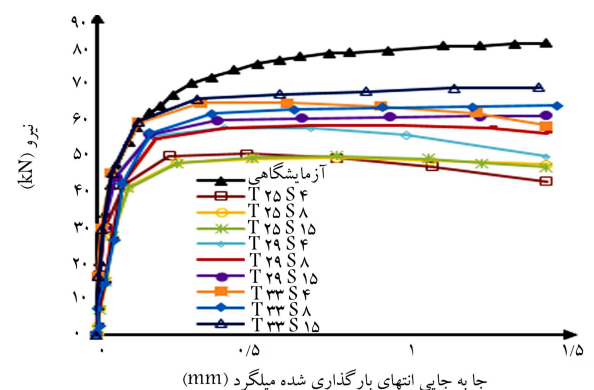
نام مدل	$\tau_{max}(MPa)$	$S_{max}(mm)$
T25S4	$2.5\sqrt{f_c}$	4
T25S8	$2.5\sqrt{f_c}$	8
T25S15	$2.5\sqrt{f_c}$	15
T29S4	$2.9\sqrt{f_c}$	4
T29S8	$2.9\sqrt{f_c}$	8
T29S15	$2.9\sqrt{f_c}$	15
T33S4	$3.3\sqrt{f_c}$	4
T33S8	$3.3\sqrt{f_c}$	8
T33S15	$3.3\sqrt{f_c}$	15



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

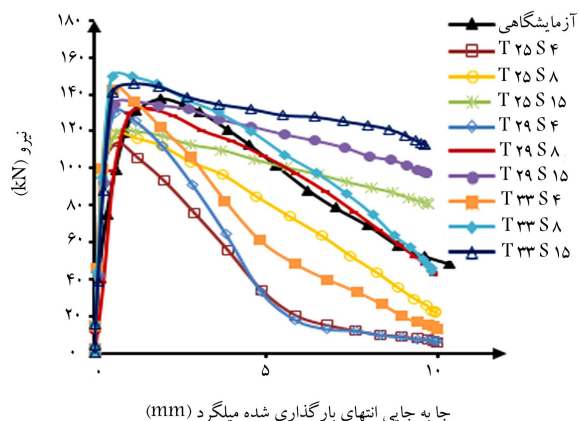


شکل ۱۸. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی مدل‌های پیشنهادی با منحنی آزمایشگاهی ولکوند و همکاران با بتن $f_c = 28 MPa$. [۱۹]



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

مقاومت فشاری بتن در آن از سایر نمونه‌ها بیشتر است. 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 $\tau_{max} = 2.5\sqrt{f_c}$ ، 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

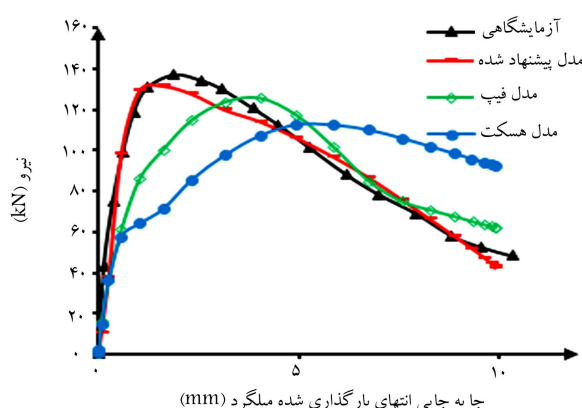


شکل ۱۶. مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی مدل‌های پیشنهادی با منحنی آزمایشگاهی نمونه‌ی سیامپی و همکاران. [۵]

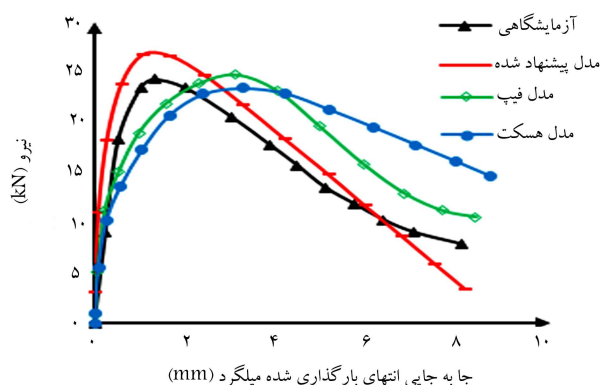
مقایسه شده است. برای محاسبه‌ی خطا بین مدل‌های پیشنهادی و مقادیر واقعی در هر نمونه، از روش جذر مجموع مربعات اختلاف نیرو بین منحنی‌های عددی و آزمایشگاهی در جابه‌جایی یکسان استفاده شده است. در شکل‌های ۱۶ الی ۱۹، مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی انتهای بارگذاری شده‌ی میگرد را برای ۹ مدل پیشنهادی و ۴ منحنی 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 $S_{max} = 4 mm$ دارند، اختلاف قابل ملاحظه‌ای 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 ملاحظه‌ای 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				مجموع خطا
	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	393
T25S8	116	17	32	77	242
T25S15	87	21	31	76	215
T29S4	225	31	30	62	348
T29S8	34	17	26	54	131
T29S15	124	29	24	50	227
T33S4	170	31	32	46	279
T33S8	71	23	33	46	173
T33S15	167	38	33	37	275



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



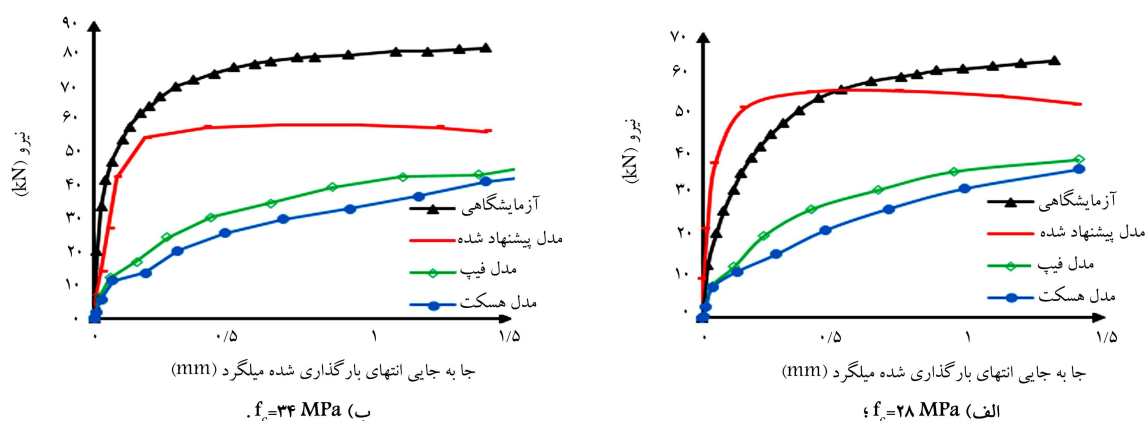
شکل ۲۱. مقایسه‌ی منحنی آزمایشگاهی نیرو - جابه‌جایی با منحنی‌های عددی برای نمونه‌های آزمایشگاهی لتو و الیچ هازن.^[۱۸]

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 ۵/۵ 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-جابجایی 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، به عنوان بهترین مدل پیشنهادی معرفی شد. مدل پیشنهادی منتخب با دو مدل موجود فیپ 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 به دست 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 شکافت خوردگی بتن است.

۸. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، یک مدل چسبندگی - لغزش برای مود شکست بیرون کشیدگی 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 ناقل شود و قفل بست بین بتن و میلگرد شکسته شود. پارامترهای اصلی مدل ارائه شده 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 بیرون کشیدن 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).