

مدل سازی رفتار چرخه ای ستون بتن آرمه با مدل سازی صریح چسبندگی میلگردهای GFRP

Modeling the Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Column with Explicit Modeling of the Bonding of GFRP Bars

رحیم ابراهیمی^{الف}، علیرضا خالو^{ب*}، محمد طبیعی^ج

^{الف} کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، پردیس بین الملل کیش - دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

^ب استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

^ج دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: نشانی ایمیل: khaloo@sharif.edu.

چکیده

رفتار پیوند بین میلگردهای پلیمری مسلح‌شده با الیاف شیشه (GFRP) و بتن نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال تنش، کنترل ترک‌خوردگی و عملکرد کلی سازه‌های بتن مسلح دارد. با این حال، در بسیاری از تحلیل‌های عددی، رفتار واقعی تنش-لغزش میلگرد و بتن نادیده گرفته شده و فرض اتصال کامل به کار می‌رود که می‌تواند منجر به پیش‌بینی غیرواقع‌بینانه پاسخ سازه شود. هدف این پژوهش، شبیه‌سازی عددی رفتار پیوند میلگردهای GFRP با بتن و ارزیابی تأثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی بر عملکرد پیوند است. نوآوری اصلی این پژوهش در توسعه یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی است که رفتار پیوند بین میلگردهای GFRP و بتن را به صورت صریح با استفاده از المان‌های Bond-Link و روابط تنش-لغزش مدل‌سازی می‌کند و توانسته است با دقت بالایی، ضمن تطابق با داده‌های آزمایشگاهی، خطای پیش‌بینی ظرفیت نهایی سازه را به کمتر از ۵ درصد کاهش دهد. بدین منظور، یک مدل اجزای محدود سه‌بعدی در نرم‌افزار ABAQUS توسعه داده شد که در آن، رفتار پیوند با استفاده از المان Bond-Link و روابط تنش-لغزش صریح مدل‌سازی گردید. رفتار غیرخطی و شکست بتن نیز با بهره‌گیری از مدل آسیب پلاستیک بتن (CDP) شبیه‌سازی شد. مدل عددی برای نمونه‌های ستون بتن مسلح تحت بارگذاری چرخه‌ای به کار رفت و با داده‌های آزمایشگاهی معتبر صحت‌سنجی گردید. نتایج نشان داد که در نظر گرفتن رفتار چسبندگی-لغزش میلگردهای GFRP، تأثیر به‌سزایی در تخمین دقیق ظرفیت نهایی سازه بتنی مسلح می‌گذارد، به‌گونه‌ای که خطا در این برآورد به کمتر از ۵ درصد کاهش می‌یابد از این رو یافته‌های این پژوهش می‌تواند به بهبود طراحی و افزایش ایمنی سازه‌های بتن مسلح با میلگردهای GFRP کمک کند.

کلیدواژه‌ها: میلگرد GFRP؛ رفتار پیوند؛ رفتار چرخه‌ای؛ مدل‌سازی عددی؛ المان bond-link؛ مدل پلاستیک آسیب بتن؛

پسماند؛ ABAQUS.

Abstract

The bond behavior between glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars and concrete plays a decisive role in stress transfer, crack control, and the overall performance of reinforced concrete structures. However, in many numerical analyses, the actual stress–slip behavior between the reinforcement and concrete is neglected, and a perfect bond assumption is adopted, which may lead to unrealistic predictions of structural response. The objective of this study is to numerically simulate the bond behavior of GFRP bars embedded in concrete and to evaluate the influence of geometric and mechanical parameters on bond performance. The primary novelty of this research lies in the development of a 3D finite element model that explicitly simulates the bond behavior between GFRP bars and concrete using Bond-Link elements and stress-slip relationships, achieving high accuracy by closely matching experimental data and reducing the prediction error of the ultimate structural capacity to less than 5%. To this end, a three-dimensional finite element model was developed in ABAQUS, in which the bond behavior was explicitly modeled using Bond-Link elements in conjunction with stress–slip relationships. The nonlinear behavior and failure of concrete were also simulated using the Concrete Damaged Plasticity (CDP) model. The numerical model was applied to reinforced concrete column specimens subjected to cyclic loading and was validated against reliable experimental data. The results indicate that considering the bond–slip behavior of GFRP bars significantly improves the accuracy of estimating the ultimate capacity of reinforced concrete structures, reducing the prediction error to less than 5%. Therefore, the findings of this study can contribute to improved design and enhanced safety of reinforced concrete structures reinforced with GFRP bars.

Keywords: GFRP bars; bond behavior; cyclic behavior; numerical modeling; bond-link element; concrete damaged plasticity (CDP); hysteresis; ABAQUS.

در دهه‌های اخیر، استفاده از مصالح بتن آرمه به عنوان یکی از پرکاربردترین سیستم‌های سازه‌ای، نقش کلیدی در صنعت ساخت‌وساز ایفا کرده است. در این مصالح، اگرچه میلگردهای فولادی به دلیل رفتار الاستوپلاستیک و ظرفیت بالای جذب انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر خوردگی، منجر به افت عملکرد بلندمدت سازه‌ها می‌شود. در این راستا، میلگردهای پلیمری مسلح‌شده با الیاف شیشه (GFRP) به عنوان جایگزینی مناسب برای فولاد مورد توجه قرار گرفته‌اند. مقاومت بسیار بالا در برابر خوردگی، وزن کم و رفتار خطی تا نقطه گسیختگی از جمله مزایای اصلی این نوع میلگردها محسوب می‌شود. با این وجود، برخی ویژگی‌های GFRP نظیر مدول الاستیسیته پایین‌تر نسبت به فولاد، رفتار ترد و فقدان شکل‌پذیری پس از تسلیم، چالش‌هایی را در تحلیل و طراحی اعضای بتنی مسلح به این نوع آرماتور ایجاد می‌کند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در کاربرد میلگردهای GFRP، رفتار پیوند آن‌ها با بتن پیرامونی است. در واقع بر خلاف میلگردهای فولادی که فرض اتصال کامل برای آن‌ها با بتن در شبیه‌سازی با تقریب قابل قبولی به نتایج درست می‌انجامد [۱]، ماهیت پیوند میلگردهای GFRP با بتن تفاوت‌های کلیدی با پیوند میلگردهای فولادی داشته که در پژوهش گودونیس و همکاران [۲] به تفصیل به آن پرداخته شده است. از طرفی مطالعات آزمایشگاهی متعدد نشان داده‌اند که رفتار پیوند میلگردهای GFRP، ماهیتی غیرخطی، وابسته به لغزش و مستعد افت تدریجی دارد. از این رو، نمی‌توان از فرض اتصال کامل برای تخمین پیوند بین بتن و این نوع میلگردها بهره برد. در چنین شرایطی، رفتار پیوند نقش مستقیمی در شکل‌گیری منحنی‌های پسماند^۱، افت سختی، ظرفیت جذب انرژی و در نهایت ظرفیت نهایی عضو دارد.

شایان ذکر است که در سال‌های اخیر، بررسی رفتار پیوند میلگردهای FRP در بتن به یکی از موضوعات کلیدی پژوهش‌های مهندسی عمران تبدیل شده است که در ادامه به صورت مختصر به برخی از این پژوهش‌ها اشاره می‌شود.

مطالعات اولیه در این زمینه، مانند پژوهش الیجهاوزن و همکاران در سال ۱۹۸۳، روابط تنش-لغزش محلی بین میلگرد و بتن را تحت بارهای کششی به تفصیل بررسی کردند. آن‌ها با ارائه مدل‌های ریاضی دقیق، به درک عمیق‌تری از مکانیزم‌های پیوند کمک کرده و پایه‌ای برای تحلیل‌های بعدی رفتار بتن مسلح، به ویژه در شرایط بارگذاری غیرخطی و تحت تنش‌های کششی، فراهم آوردند [۳].

^۱ Hysteresis

در سال ۱۹۹۲، پائولی و پرستلی در کتاب خود که یکی از جامع‌ترین منابع در زمینه طراحی لرزه‌ای سازه‌های بتنی و بنایی محسوب می‌شود، به تفصیل رفتار اعضا و اتصالات تحت بارگذاری لرزه‌ای پرداخته و مکانیزم‌های شکست، از جمله رفتار پیوند میلگرد و بتن را مورد تحلیل قرار دادند [۴].

در سال ۱۹۹۷، کوسنزا و همکاران به بررسی رفتار مکانیکی پیوند میلگردهای FRP در بتن پرداخته و مدل‌های تحلیلی مختلفی از جمله مدل‌های Malvar و BPE را ارزیابی کردند. یافته‌های این مطالعه نشان داد که این مدل‌ها می‌توانند به خوبی شاخه صعودی و حتی کل منحنی تنش-لغزش را شبیه‌سازی کنند [۵].

کواپوم در سال ۲۰۱۰، یک پژوهش تجربی و تحلیلی جامع در مورد رفتار پیوند میلگردهای FRP در بتن انجام داد و تأثیر قطر میلگرد، مقاومت بتن و نوع سطح میلگرد را بر ظرفیت پیوند و پاسخ تنش-لغزش بررسی کرد. نتایج به‌دست آمده بیانگر آن بود که میلگردهای FRP نسبت به فولاد لغزش قابل توجهی قبل از شکست دارند و پیش‌بینی‌های کدهای موجود نیازمند اصلاح برای طراحی دقیق‌تر هستند [۶].

در همان سال، هوآنگ رفتار پیوند بتن و میلگرد فولادی تحت شرایط آتش‌سوزی را با استفاده از مدل غیرخطی المان محدود مورد بررسی قرار داد. مدل Bond-Link برای شبیه‌سازی رفتار پیوند استفاده شد و نتایج آزمون‌های کشش و تیرها در دماهای مختلف کالبره شد. براساس یافته‌های این پژوهش، تخریب پیوند در دماهای بالای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد نقش کلیدی در مقاومت بتن مسلح در برابر حریق دارد و فرض اتصال کامل در تحلیل‌های حرارتی می‌تواند پیش‌بینی‌های غیرایمن ایجاد کند [۷].

سزن و موله در سال ۲۰۰۴، به بررسی دقیق رفتار پیوند میلگرد در بتن، به ویژه در ستون‌های بتن مسلح تحت بارگذاری چرخه‌ای (لرزه‌ای) پرداختند. پژوهشگران تأثیر عواملی مانند لاغری بتن و بارگذاری چرخه‌ای را بر روابط پیوند بررسی و اعتبارسنجی کردند. نتایج این مطالعه برای درک بهتر رفتار غیرخطی سازه‌ها تحت زلزله و بهبود مدل‌های پیش‌بینی عملکرد لرزه‌ای اعضای بتنی، بسیار حائز اهمیت است [۸].

در سال ۲۰۱۴، مورسیا-دلسو و شینگ در مطالعه‌ای، یک مدل نیمه‌تجربی برای شبیه‌سازی رفتار پیوند میلگرد در بتن ارائه کردند که در آن اثرات تخریب پیوند ناشی از لغزش چرخه‌ای، تسلیم کششی میلگرد و ترک‌خوردگی بتن در نظر گرفته شد. نتایج این پژوهش نشان داد که شبیه‌سازی دقیق رفتار پیوند می‌تواند شکست ناشی از ترک بتن را به شکل قابل قبولی بازتولید کند [۹].

لین و ژانگ نیز در همان سال یک مطالعه با هدف ارزیابی جامع مدل‌های موجود برای توصیف رفتار پیوند میان FRP و بتن و مقایسه دقت پیش‌بینی آن‌ها انجام دادند. این روش شامل گردآوری و تحلیل داده‌های تجربی منتشره از آزمون‌های کشش و خمش میلگردهای FRP و سپس صحت‌سنجی مدل‌های تنش-لغزش شناخته شده بود. بر اساس یافته‌های به‌دست آمده، برخی از مدل‌ها تنها قادر به بازتولید بخش‌های محدود رفتار پیوند بوده، درحالی‌که مدل‌های اصلاح‌شده قابلیت بالاتری در این زمینه داشتند [۱۰].

در سال ۲۰۱۷، رضازاده و همکاران دو مدل مبتنی بر تخریب برای شبیه‌سازی کاهش ظرفیت پیوند میلگردهای GFRP در بتن ارائه کردند و مدل تحلیلی ساده‌ای با یک پارامتر برازش منحنی معرفی نمودند. همچنین در این پژوهش، یک مدل سه‌بعدی المان محدود با رفتار غیرخطی بتن و پیوند میلگرد و بتن ساخته شد. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل‌ها قادر به بازتولید داده‌های آزمون‌های کشش بودند [۱۱].

ولجکویچ و همکاران در سال ۲۰۲۰، به بررسی رفتار پیوند میلگردهای GFRP در اعضای بتن مسلح جدار نازک پرداختند. مدل سه‌بعدی المان محدود در ABAQUS توسعه یافت و کالیبراسیون با داده‌های آزمون کشش انجام شد. بر اساس یافته‌های این پژوهش، مشخص گردید که ضخامت عضو و مقاومت بتن اثر قابل توجهی بر تنش و توزیع پیوند دارند، به‌گونه‌ای که کاهش ضخامت عضو باعث افزایش تمرکز تنش و کاهش مقاومت پیوند می‌شود [۱۲].

در سال ۲۰۲۱، رولاند و همکاران یک مدل تحلیلی تنش - لغزش محلی برای میلگردهای FRP در بتن ارائه کردند که با داده‌های آزمون کشش مجهز به حسگرهای فیبر نوری کالیبره شد. مدل تحلیلی در چارچوب المان محدود با استفاده از مدل آسیب ناحیه پیوند پیاده‌سازی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که مدل مذکور قادر به بازتولید دقیق پروفیل کرنش و سازوکار پیوند تحت بارهای زیاد بوده است، با این حال برای پیش‌بینی رفتار در بارهای کم و سطوح آسیب محدود نیاز به اصلاحات بیشتر وجود داشت [۱۳].

در همان سال، نیوموکنو و همکاران، یک مرور تحلیلی جامع بر رفتار پیوند کوتاه‌مدت و بلندمدت میلگردهای FRP در بتن ارائه دادند. در طی این مطالعه، پایگاه داده‌ای شامل ۱۰۰۲ آزمون کشش جمع‌آوری و تحلیل شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد که عملکرد میلگردهای FRP به شرایط سطح و خواص بتن وابسته است و تحلیل داده‌ها امکان شناسایی پارامترهای مؤثر بر مقاومت پیوند و پیش‌بینی دوام طولانی‌مدت را فراهم می‌کند، که اهمیت انتخاب مناسب سطح و شرایط پیوند را در بهبود عملکرد بلندمدت FRP نشان می‌دهد [۱۴].

واریوش و رسول در سال ۲۰۲۲، یک مطالعه مروری با هدف بررسی و تحلیل جامع رفتار پیوند فولاد و GFRP با بتن انجام دادند. روش پژوهش شامل جمع‌آوری و بررسی مطالعات پیشین درباره سازوکارهای پیوند و پارامترهای مؤثر بر آن بود. بر اساس نتایج حاصله الیاف GFRP به دلیل حساسیت بالا به شرایط سطحی و مشخصات بتن، به طور کلی از ظرفیت پیوند کمتری نسبت به میلگرد فولادی برخوردار هستند [۱۵].

در سال ۲۰۲۳، لویز و کاروالیو، در یک مطالعه مرکب از بررسی تجربی و عددی به تحلیل رفتار پیوند میلگردهای FRP با سطح ماریچی در بتن پرداختند. در این پژوهش، آزمون‌های کشش برای ارزیابی عملکرد پیوند انجام شد و مدل المان محدود ABAQUS با فرض رفتار الاستیک تا شکست برای میلگرد و بتن توسعه یافت. یافته‌های این پژوهش نشان داد که هندسه سطح میلگرد نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد پیوند دارد و مدل عددی توانست نتایج تجربی را با خطای اندک پیش‌بینی کند [۱۶].

در سال ۲۰۲۴، عربی با هدف پیش‌بینی مقاومت پیوند مسلح‌کننده‌های FRP و بتن و ارزیابی نقش طول مهاری بر این رفتار، مطالعه‌ای گسترده انجام داد. روش مطالعه شامل سه مرحله بود؛ مروری بر مطالعات پیشین، جمع‌آوری یک پایگاه داده جامع از نتایج تجربی مربوط به پارامترهای مؤثر بر مقاومت پیوند و تحلیل این داده‌ها. در طی این پژوهش مشخص گردید که برخی مدل‌ها تطابق خوبی با داده‌های تجربی نشان می‌دهند، در حالی که سایر مدل‌ها انحراف معنی‌داری را نشان می‌دهند [۱۷].

توکل و حاجی‌کاظمی در سال ۲۰۲۵، به مقایسه عملکرد لرزه‌ای ستون‌های بتن مسلح با سه نوع آرایش میلگرد (فولاد، GFRP و ترکیبی) پرداختند. مدل المان محدود تحت بارگذاری محوری و جانبی چرخه‌ای توسعه پیدا کرد و یافته‌ها نشان داد که ستون‌های

GFRP و ستون‌های مرکب، ظرفیت تغییرشکل جانبی بیشتری بدون آسیب غیر قابل بازگشت دارند و افزایش نسبت سختی آرایش ترکیبی موجب تغییر پاسخ پس از تسلیم از نرم‌شدگی به سخت‌شدگی گردیده است [۱۸].

در راستای استانداردسازی و ارائه دستورالعمل‌های عملی، آیین‌نامه‌هایی مانند Fib Model [۱۹] و ACI 440.1R-15 [۲۰] چارچوب‌هایی را برای طراحی سازه‌های بتنی مسلح با FRP، از جمله مباحث مربوط به رفتار پیوند، ارائه کردند. در آیین‌نامه Fib Model، مجموعه‌ای جامع از دستورالعمل‌های طراحی برای سازه‌های بتنی وجود دارد. بخش‌های مربوط به مصالح FRP، به ویژه رفتار پیوند آن‌ها با بتن، استانداردهای عملی و تئوری‌های به‌روز را ارائه می‌دهد. آیین‌نامه Fib تأکید بر استفاده از مدل‌های پیشرفته برای پیوند FRP با بتن دارد تا از عملکرد ایمن و کارآمد سازه‌ها اطمینان حاصل شود و راهنمایی‌های لازم برای طراحی مهندسان فراهم گردد [۱۹]. راهنمای ACI 440.1R-15، دستورالعمل‌های عملی و تئوری‌های لازم برای طراحی و اجرای سازه‌های مسلح شده با میلگردهای FRP را پوشش می‌دهد. به طور خاص، مباحث مربوط به رفتار پیوند میلگردهای FRP با بتن، از جمله روابط تنش-لغزش و عوامل مؤثر بر آن، با جزئیات شرح داده شده است. این راهنما به مهندسان کمک می‌کند تا با در نظر گرفتن ویژگی‌های منحصر به فرد FRP، طراحی‌های قابل اطمینان‌تری انجام دهند [۲۰].

۲- بیان مسأله و اهداف

در سازه‌ها، ستون‌ها عناصر اصلی در تحمل و انتقال نیروهای لرزه‌ای‌اند و تحلیل رفتار غیرخطی آن‌ها تحت بارهای چرخه‌ای برای طراحی لرزه‌ای بسیار مهم است. اخیراً استفاده از میلگردهای کامپوزیتی GFRP به جای فولاد، به دلیل مقاومت زیاد نسبت به وزن، دوام در برابر خوردگی و خنثی بودن مغناطیسی، گسترش یافته است. نرم‌افزارهای عددی مانند ABAQUS با روش المان محدود، امکان شبیه‌سازی دقیق رفتار مصالح و سازه‌ها، بررسی سازوکارهای شکست و بهینه‌سازی طراحی را فراهم می‌کنند [۲۱]. با این حال، صحت و دقت نتایج عددی به انتخاب مدل رفتاری مناسب مصالح، مدل‌سازی صحیح پیوند بتن و میلگرد و تعریف دقیق شرایط مرزی و بارگذاری وابسته است. ناهم‌انگهی بین مدل‌های عددی و داده‌های آزمایشگاهی می‌تواند ارزیابی ظرفیت، سختی و شکل‌پذیری ستون‌ها را دچار خطا کند. به طور خاص، رفتار پیوند بین بتن و میلگرد، به خصوص در ترکیب میلگردهای فولادی و GFRP که خواص فیزیکی متفاوتی دارند، عامل مؤثری در توزیع تنش و شکل‌گیری سازوکارهای شکست در ستون‌ها محسوب می‌شود. با توجه

به مطالب مذکور در این مطالعه، یک مدل عددی اجزای محدود از ستون بتن آرمه مسلح به میلگردهای فولادی و GFRP در نرم افزار ABAQUS توسعه داده شده و در آن، رفتار پیوند این میلگردها با استفاده از یک مدل تنش - لغزش پیوند مناسب شبیه سازی شده است [۲۱]. نتایج حاصل از این مدل با داده های آزمایشگاهی و همچنین نتایج مدل عددی مبتنی بر فرض اتصال کامل مقایسه شده و تأثیر رفتار پیوند بر پاسخ چرخه ای، منحنی های پسماند و ظرفیت نهایی ستون مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در این مطالعه، داده های آزمایشگاهی مورد استفاده از مطالعه تجربی یوان و همکاران [۲۲] استخراج گردیده و نتایج مربوط به مدل عددی با فرض اتصال کامل میلگردها با بتن از پژوهش توکل و حاجی کاظمی [۱۸] برداشت گردیده است.

در یک نگاه کلی، با در نظر گرفتن موارد فوق، اهداف اصلی این پژوهش به طور خلاصه به شرح زیر است:

- ۱) توسعه یک مدل عددی جامع در نرم افزار ABAQUS جهت شبیه سازی رفتار چرخه ای ستون های بتن مسلح شده با GFRP [۲۱].
- ۲) صحت سنجی مدل عددی توسعه یافته از طریق مقایسه نتایج با داده های تجربی حاصل از آزمایش های صورت گرفته.
- ۳) حصول اطمینان از صحت مدل سازی رفتار پیوند بتن و GFRP در مدل عددی از طریق انطباق نتایج با مشاهدات آزمایشگاهی.
- ۴) اطمینان از عدم وابستگی دقت نتایج شبیه سازی به همگرایی مش و برخورداری مدل از پایداری لازم.
- ۵) مقایسه دقت شبیه سازی رفتار چرخه ای ستون بتنی با در نظر داشتن رفتار پیوند با مدل سازی با فرض اتصال کامل از طریق تطابق نتایج با داده های تجربی.

۳- مدل سازی عددی

در این پژوهش، به منظور شبیه سازی رفتار پیوند بین میلگردهای GFRP و بتن، از روش اجزای محدود در نرم افزار ABAQUS استفاده شده است [۲۱]. در این بخش، مفروضات اصلی، مشخصات مصالح، روش مدل سازی پیوند، شرایط بارگذاری و مرزی، مش بندی و فرآیند صحت سنجی مدل به صورت خلاصه ارائه می شود.

۳-۱- مفروضات و رویکرد کلی مدل سازی

برای شبیه سازی رفتار پیوند، اندرکنش بین میلگرد و بتن با استفاده از المان Bond-Link مدل سازی شد [۲۳]. این المان فاقد ابعاد فیزیکی بوده و صرفاً برای تعریف رفتار تنش - لغزش در ناحیه پیوند به کار می رود. طول مهاری میلگرد به چندین بخش تقسیم شده

و برای هر بخش یک المان Bond-Link تعریف می‌شود تا توزیع تنش و لغزش به صورت تدریجی در امتداد میلگرد شبیه‌سازی گردد. رفتار تنش - لغزش هر المان براساس مدل پیشنهادی ابراهیمی و خالو [۷] تعریف شده (شکل ۱) و برای لحاظ آن در محیط ABAQUS از گزینه Connector با رفتار Axial استفاده گردید [۲۱]. نیروی ایجاد شده در هر المان برابر حاصل ضرب تنش برشی پیوند در سطح مؤثر تماس است که از حاصل ضرب محیط میلگرد در طول بخش مربوطه به دست می‌آید. بدیهی است که افزایش تعداد المان‌های Bond-Link و کاهش طول آن‌ها، دقت مدل‌سازی رفتار پیوند را افزایش می‌دهد. پارامترهای اختصاص یافته به مدل CDP شامل زاویه اتساع (ψ)، خروج از مرکزیت سطح پتانسیل پلاستیک (m)، پارامتر f و پارامتر پایدارکننده ویسکوپلاستیک (η) می‌شود. مقادیر این پارامترها در جدول ۱ ارائه گردیده است.

۳-۲- مشخصات مصالح

۳-۲-۱- بتن

رفتار بتن با استفاده از دو منحنی تنش - کرنش مجزا برای نواحی فشاری و کششی مدل‌سازی شد. برای بخش فشاری، مدل کنت و پارک [۲۴-۲۵] به کار گرفته شد و رفتار کششی بتن با یک مدل دو خطی تعریف گردید. به منظور شبیه‌سازی پاسخ غیرخطی، ترک‌خوردگی کششی و خردشدگی فشاری بتن، از مدل CDP^۱ استفاده شد. این مدل امکان در نظر گرفتن کاهش سختی، تخریب تدریجی و بازیابی جزئی سختی در بارگذاری‌های چرخه‌ای را فراهم می‌کند. پارامترهای اصلی مدل آسیب پلاستیک بتن شامل زاویه اتساع، خارج از مرکزیت سطح پتانسیل پلاستیک، نسبت تنش‌های فشاری دو محوره به تک محوره و پارامتر ویسکوپلاستیک براساس منابع معتبر انتخاب شدند. کاهش سختی الاستیک بتن در اثر گسترش ترک‌ها و آسیب نیز به صورت مجزا در کشش و فشار لحاظ گردید.

^۱ Concrete Damaged Plasticity

۳-۲-۲- میلگرد فولادی

رفتار میلگرد فولادی به صورت یک منحنی تنش - کرنش سه خطی مدل شده است تا پاسخ الاستیک و پلاستیک آن شبیه‌سازی گردد. پارامترهای این منحنی براساس نوع فولاد به کار رفته تعیین می‌شوند. همچنین قابل ذکر است که در این پژوهش، رفتار فشاری و کششی آرماتور فولادی یکسان در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۳- میلگرد GFRP

براساس یافته‌های تجربی، رفتار میلگردهای GFRP تا نقطه اوج به صورت خطی است و بنابراین این میلگردها به عنوان مصالح الاستیک در مدل در نظر گرفته شده‌اند.

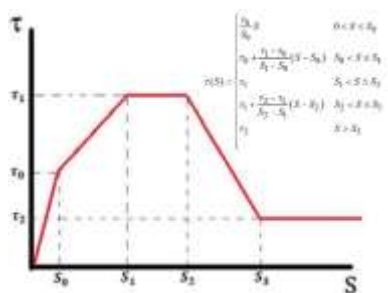
۳-۳- بارگذاری، شرایط مرزی و مش‌بندی

مدل عددی برای دو نوع سازه شبیه‌سازی شده است: نمونه آزمایش بیرون کشیدگی و ستون بتن مسلح تحت بارگذاری چرخه‌ای. در نمونه بیرون کشیدگی، میلگرد تحت بار کششی یک محوره قرار می‌گیرد تا لغزش کامل ایجاد شود و در ستون، بارگذاری چرخه‌ای وارده ادامه پیدا می‌کند تا در سازه مورد آزمایش شکست رخ دهد. شرایط مرزی به صورت ثابت در انتهای نمونه‌ها اعمال شده و در ستون، جابه‌جایی در تمام جهت‌ها به جز جهت بار اعمالی محدود گشته است. مش‌بندی برای هر دو سازه به صورت غیرهمگن انجام شده و در نواحی پیوند بین میلگرد و بتن، عناصر ریزتر برای افزایش دقت تحلیل استفاده گردیده است.

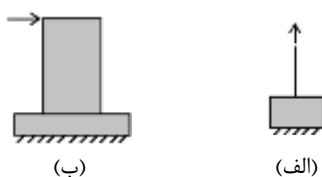
۳-۴- روش صحت‌سنجی مدل

به منظور ارزیابی دقت مدل عددی، نتایج شبیه‌سازی نمونه بیرون کشیدگی با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده توسط رولاند و همکاران [۱۳ و ۲۶] مقایسه شد. در شکل ۴، چیدمان آزمایش و ابعاد هندسی نمونه‌های به کار رفته به نمایش درآمده است. همچنین در جداول ۲ و ۳، مشخصات بتن استفاده شده در این آزمایش و نیز مشخصات مصالح GFRP ارائه گردیده است. گفتنی است که در جدول ۲، پارامترهای ν_{TT} ، ν_{LT} ، G_{LT} ، E_T ، E_L به ترتیب نشان‌دهنده مدول الاستیسیته طولی بتن، مدول الاستیسیته عرضی بتن، مدول برشی صفحه‌ای GFRP، ضریب پواسون اصلی بتن و ضریب پواسون عرضی بتن هستند. می‌توان افزود که در مدل‌سازی صورت گرفته در این بخش، منحنی تنش-لغزش در نظر گرفته شده مطابق با منحنی پیشنهادی رولاند و همکاران [۱۳] است. نتایج حاصل نشان

می‌دهد که منحنی‌های تنش - لغزش عددی تطابق مناسبی با داده‌های آزمایشگاهی دارند و حداکثر خطای نسبی کمتر از ۵ درصد است (شکل‌های ۵ و ۶-الف). این امر بیانگر قابلیت اعتماد مدل در شبیه‌سازی رفتار پیوند میلگردهای GFRP در بتن است. همچنین به منظور بررسی دقت مدل عددی ساخته شده و کفایت تعداد المان‌های در نظر گرفته شده، یک تحلیل حساسیت بر روی نحوه مش‌بندی مدل صورت گرفته است (شکل ۶-ب). در این تحلیل، اندازه المان مش به تدریج کاهش یافته و تغییرات تنش بیشینه در اتصال بحرانی ستون با فونداسیون در میلگردهای GFRP طولی بررسی می‌شود (جدول ۴). براساس داده‌های موجود در جدول ۴، مشاهده می‌شود که با کاهش اندازه مش و افزایش تعداد المان‌ها، تنش بیشینه محاسبه شده در میلگردهای GFRP افزایش یافته و در نهایت به یک مقدار ثابت همگرا می‌شود. نتایج نشان داد که برای اندازه مش ۴۰ میلی‌متر و کوچکتر، تغییرات مقادیر تنش آرماتورها قابل صرف‌نظر بوده، به گونه‌ای که اختلاف تنش بین مش‌هایی با اندازه ۴۰ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر کمتر از ۰/۲ درصد است (شکل ۶-ب). این امر نشان‌دهنده همگرایی مناسب مدل در این ناحیه است.



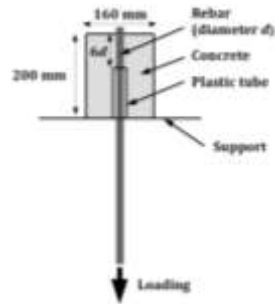
شکل ۱: منحنی تنش لغزش پیشنهادی برای مدل‌سازی رفتار پیوند GFRP با بتن [۷].



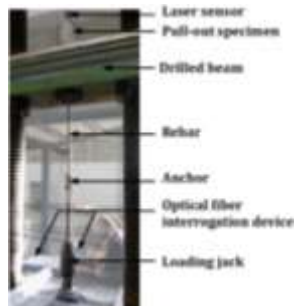
شکل ۲: نمایش بارگذاری و شرایط مرزی: (الف) نمونه تست بیرون کشیدگی و (ب) ستون بتنی.



شکل ۳: پیکربندی مش‌بندی سازه‌ها: (الف) نمونه تست بیرون کشیدگی و (ب) ستون بتنی.

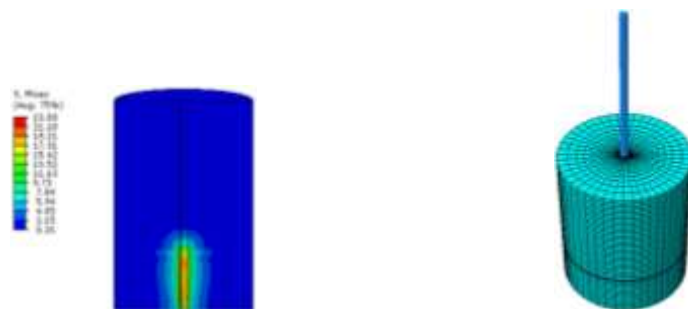


(ب)



(الف)

شکل ۴: نمایش: (الف) چیدمان آزمایش و (ب) ابعاد هندسی نمونه [۱۳ و ۲۶].



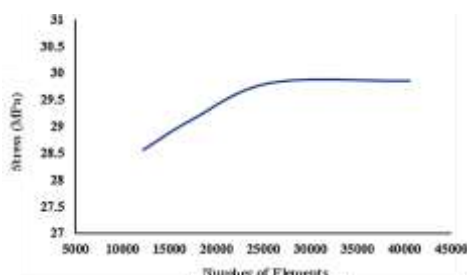
(ب) توزیع تنش فون مایز در گام پایانی

(الف) نمایش جزئیات مدل و پیکربندی مش‌بندی آن

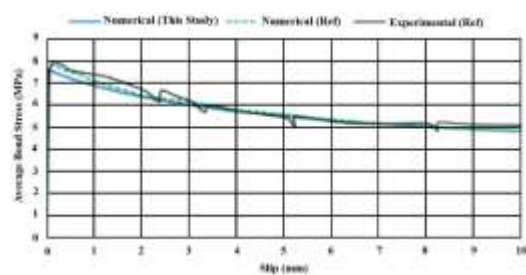


(ج) توزیع کرنش‌های پلاستیک معادل (PEEQ) در گام پایانی (د) توزیع آسیب کششی بتن (DAMAGE) در گام پایانی

شکل ۵: شبیه‌سازی عددی تست بیرون کشیدگی توسط رولاند و همکاران [۱۳].



(ب)



(الف)

شکل ۶: (الف) مقایسه میان منحنی تنش - کرنش به دست آمده از آزمایش و منحنی استخراج شده از شبیه‌سازی عددی [۱۳] و (ب) نمودار تحلیل حساسیت مش.

جدول ۱: مشخصات پلاستیک بتن برگرفته از مطالعه طبیعی و همکاران [۲۷].

پارامتر	ψ	m	f	K	η
مقدار	30.5°	۰٫۱	۱٫۱۶	۰٫۶۶۷	۰٫۰۰۱

جدول ۲: مشخصات بتن مورد استفاده در مطالعه آزمایشگاهی [۱۳].

پارامتر	E_L (GPa)	E_T (GPa)	G_{LT} (GPa)	ν_{LT}	ν_{TT}
مقدار	۳۴	۳۴	۱۴٫۲	۰٫۲	۰٫۲

جدول ۳: مشخصات آرماتورهای GFRP مورد استفاده در مطالعه آزمایشگاهی [۱۳].

پارامتر	قطر آرماتور (mm)	بار نهایی (kN)	مقاومت کششی (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)		
مقدار	۹٫۵	۸۱±۳	۱۱۳۷±۴۸	۵۳±۲		
پارامتر	V_f	E_L (GPa)	E_T (GPa)	G_{LT} (GPa)	ν_{LT}	ν_{TT}
مقدار	۰٫۶۹	۵۱	۷۳	۰٫۲	۰٫۳	۲۲

جدول ۴: تغییرات تنش بیشینه در اتصال بحرانی ستون با فونداسیون در میلگردهای GFRP طولی.

اندازه عمومی مش (mm)	تعداد المان	تنش بیشینه در محل میلگرد GFRP در اتصال ستون با فونداسیون (MPa) در میلگردهای GFRP طولی
۶۰	۱۲۲۲۹	۲۸٫۵۶
۵۰	۱۷۳۶۷	۲۹٫۱۲
۴۰	۲۵۷۶۸	۲۹٫۸۱
۳۰	۴۰۵۵۹	۲۹٫۸۵

۴- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی ستون بتنی با در نظر گرفتن رفتار پیوند بین میلگردهای GFRP و بتن ارائه و تحلیل می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، در این پژوهش ستون مورد آزمایش در پژوهش یوآن و همکاران [۱۶] جهت ارزیابی عددی انتخاب گردیده است و ضمناً تمرکز اصلی بر بررسی دو منحنی پسماند و بار افزون در ارزیابی رفتار چرخه‌ای این نمونه بتن مسلح است. شایان ذکر است که نمونه مرجع متشکل از یک ستون مربعی با ابعاد مقطع ۲۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۱۷۵۰ میلی‌متر به یک پی به ابعاد متصل ۱۰۵۰×۹۰۰×۴۵۰ میلی‌متر است (شکل ۷). در چیدمان آزمایشگاهی، آرماتورهای طولی متشکل از میلگردهای فولادی و GFRP، هر دو به قطر ۱۶ میلی‌متر و همچنین آرماتورهای عرضی متشکل از خاموت‌های فولادی با قطر ۸ میلی‌متر و فواصل ۱۰۰ میلی‌متر بودند. در جداول ۵ و ۶ به ترتیب مشخصات بتن مورد استفاده و میلگردهای GFRP و فولادی به کار رفته در این نمونه ارائه گردیده است. لازم به یادآوری است که در این مطالعه، از منحنی تنش-لغزش پیشنهادی توسط ابراهیمی و خالو جهت مدل‌سازی رفتار پیوند میلگردهای GFRP استفاده شده که جزئیات آن برای نمونه مورد نظر در شکل ۸ نمایش داده شده است. باید توجه داشت که اتصال میان میلگردهای فولادی با بتن در این مطالعه به صورت بدون لغزش در نظر گرفته شده است [۱۸].

در یک نگاه کلی با مقایسه یافته‌های حاصل از مدل عددی با داده‌های تجربی، می‌توان دریافت که نتایج ارائه شده از اعتبار قابل قبولی برخوردار هستند و مجموعاً می‌توان اذعان داشت که با لحاظ اثر پیوند میان میلگرد GFRP و بتن امکان شبیه‌سازی رفتار اعضای بتن مسلح به طور واقع‌بینانه‌تر مهیا می‌شود (شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱). لازم به ذکر است که در مطالعه عددی انجام شده توسط توکل و حاجی‌کاظمی [۱۸] که نتایج آن در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ منعکس شده است، علاوه بر میلگردهای فولادی، اتصال میان میلگردهای GFRP نیز با بتن به صورت غیر قابل لغزش در نظر گرفته شده است. در ادامه به طور جزئی‌تر به تحلیل نتایج به‌دست آمده پرداخته می‌شود. در این پژوهش، سه شاخص اصلی سنجش کیفیت (SSE، MARE و R^2) برای ارزیابی خطای تنش و خطای لغزش در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که عملکرد مدل‌ها یکنواخت نیست و هر یک تنها بخشی از رفتار واقعی را بازنمایی می‌کند. برخی مدل‌ها در پیش‌بینی تنش دقت قابل قبولی داشتند اما لغزش متناظر را به‌درستی بازنمایی نکردند و برخی دیگر در بخش افت مقاومت پیوند دچار خطا شدند. در نهایت، مدل پیشنهادی معرفی شده، دقیق‌ترین مدل بود و توانست هم در پیش‌بینی تنش و هم در پیش‌بینی لغزش عملکرد برتری داشته باشد.

در شبیه‌سازی ستون بتن مسلح تحت بارگذاری چرخه‌ای، منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی استخراج و رفتار چرخه‌ای ستون تحلیل شد. نتایج حاصل نشان داد که با افزایش تعداد چرخه‌ها، کاهش تدریجی سختی و افت ظرفیت باربری رخ می‌دهد که ناشی از توسعه ترک‌های کششی و فشاری در بتن و کاهش کارایی پیوند بین میلگرد و بتن است. مدل CDP توانست ترک‌خوردگی و خردشدگی را به خوبی شبیه‌سازی کند. از طرفی میلگرد GFRP در مراحل آخر باعث تمرکز تنش در انتهای مهار می‌شود. مدل آسیب پلاستیک بتن توانست پدیده‌های کلیدی نظیر تخریب تدریجی بتن، کاهش سختی و بازیابی جزئی سختی در بارگذاری معکوس را به خوبی شبیه‌سازی کند. همچنین مشاهده شد که میلگردهای GFRP به دلیل رفتار الاستیک خطی، در مراحل اولیه بارگذاری توزیع نسبتاً یکنواخت تنش را فراهم می‌کنند، اما در مراحل نزدیک به شکست، تمرکز تنش در نواحی انتهایی طول مهار افزایش می‌یابد که می‌تواند منجر به افت موضعی ظرفیت پیوند شود.

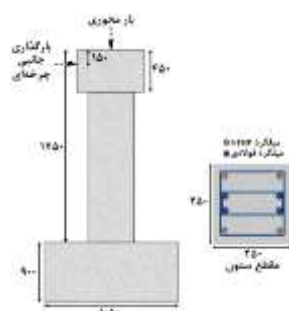
براساس نتایج حاصل شده در این بخش، می‌توان اذعان داشت که در نظر گرفتن رفتار واقعی پیوند برای میلگردهای GFRP، تأثیر قابل توجهی بر پاسخ سازه داشته و فرض اتصال کامل می‌تواند منجر به بیش‌برآورد ظرفیت و سختی اعضای بتن مسلح شود.

لازم به یادآوری است که در این شبیه‌سازی، میلگردهای GFRP به صورت کاملاً الاستیک و به عنوان المان‌های تیر دوگره‌ی خطی با شش درجه آزادی در هر گره (B31) و آرماتورهای فولادی به صورت الاستوپلاستیک و به عنوان المان‌های تیر خطی B31 فرض شدند. همچنین، پیوند بین بتن و آرماتورهای فولادی متعارف به شکل اتصال کامل مدل شده، درحالی‌که برای پیوند بین بتن و میلگردهای GFRP، رابطه چسبندگی - لغزش پیشنهادی به کار رفته است.

پس از انجام مجموعه‌ای از تحلیل‌ها، نخست در شکل ۹ مقایسه‌ای میان خرابی ایجاد شده در ستون بتنی در شبیه‌سازی عددی و نمونه آزمایشگاهی صورت گرفته است. در یک نگاه کلی، همان‌طور که مشاهده می‌شود، مدل عددی در پیش‌بینی الگوهای خرابی این سازه عملکرد مطلوبی داشته است. یکی از منحنی‌های کلیدی که بیانگر رفتار چرخه‌ای سازه است، منحنی پسماند است. در شکل ۱۰، منحنی پسماند بار - جابه‌جایی جانبی در دو مدل عددی با شرایط مختلف از منظر پیوند میان بتن و میلگرد GFRP با منحنی حاصله از داده‌های آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. به طور کلی، این شکل نشان‌دهنده تطابق قابل قبول میان نتایج آزمایشگاهی و عددی و حاکی از صحت فرضیات و شرایط اعمالی در فرآیند مدل‌سازی مطالعه حاضر است. در جدول ۷، مشخصه‌های کلیدی مربوط به منحنی‌های پسماند شکل ۱۰ استخراج شده و میزان دقت دو مدل عددی مورد بحث در پیش‌بینی نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی به صورت کمی مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. همان‌طور که از داده‌های حاصل مشخص است مدل‌سازی انجام شده در این پژوهش از دقت بهتری در قیاس با مدل عددی پژوهش توکل و حاجی کاظمی [۱۸] برخوردار است.

از دیگر منحنی‌های کلیدی در شناسایی رفتار سازه، نمودار بار افزون است که نقش مهمی در ارزیابی ظرفیت سازه دارد. برای استخراج نمودار بار افزون، ابتدا سازه مورد نظر در محیط نرم‌افزار مدل‌سازی می‌شود. در این مدل، رفتار مصالح شامل بتن و آرماتورهای مورد استفاده به صورت غیرخطی تعریف می‌گردد تا امکان شبیه‌سازی دقیق مراحل مختلف از رفتار الاستیک تا ناحیه شکست فراهم شود. پس از آماده‌سازی مدل، بار جانبی به سازه وارد شده و مقدار آن به صورت تدریجی و گام به گام افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که سازه از وضعیت خطی اولیه به تدریج وارد ناحیه غیرخطی شده و نهایتاً تا مرحله گسیختگی یا ناپایداری پیش برود. در طول فرآیند بارگذاری، در هر گام مقدار برش پایه و تغییرمکان جانبی شاخص (معمولاً در رأس سازه یا یک نقطه مرجع مشخص) ثبت می‌شود. با ترسیم مقادیر برش پایه برحسب تغییرمکان متناظر، منحنی بار افزون به دست می‌آید. در مواردی که داده‌های آزمایش چرخه‌ای در

دسترس باشد، می‌توان از هر چرخه بارگذاری، نقاط اوج نیرو - جابه‌جایی را استخراج و به یکدیگر متصل نمود. بدین ترتیب منحنی اسکلت یا بار افزون معادل حاصل می‌شود که بیانگر رفتار یک‌طرفه سازه بر مبنای نتایج چرخه‌ای است. در شکل ۱۱، مقایسه‌ای میان منحنی بار افزون حاصل از این مطالعه، مطالعه عددی توکل و حاجی کاظمی [۱۸] و مطالعه آزمایشگاهی یوان و همکاران [۲۲ و ۲۸] انجام شده است. در جدول ۸، براساس نتایج به‌دست آمده، مقایسه‌ای میان حداکثر نیرو در فشار و کشش که به کمک مدل‌های عددی و مطالعه آزمایشگاهی حاصل شده، صورت گرفته و میزان خطای نسبی مدل‌ها نیز محاسبه و ارائه گردیده که مؤید عملکرد بهتر شیوه مدل‌سازی عددی پیشنهادی در مطالعه حاضر است.



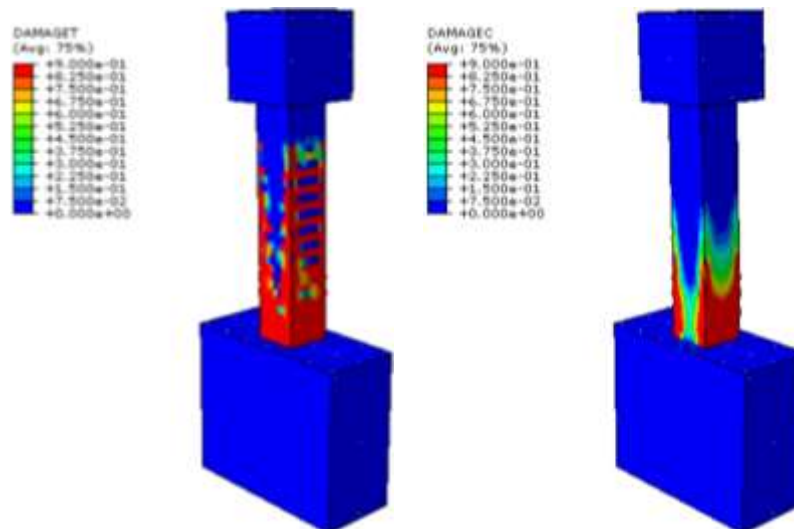
شکل ۷: جزئیات نمونه آزمایشگاهی بررسی شده توسط یوان و همکاران [۲۲].



شکل ۸: تعریف رابطه تنش - لغزش پیوند بین میلگردهای GFRP و بتن مطابق با مدل ساختاری پیشنهادی در این مطالعه.

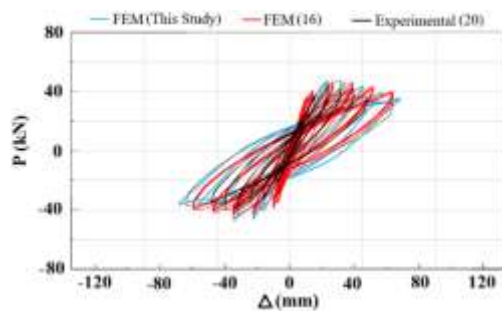


(الف) ناحیه شکست در نمونه آزمایشگاهی

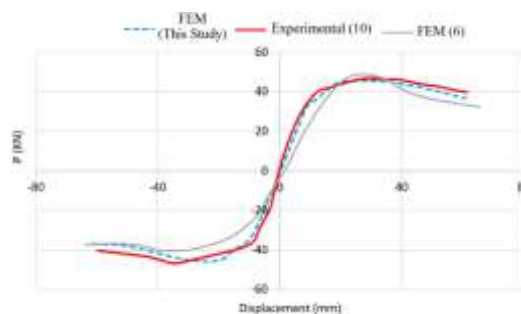


(ب) آسیب فشاری بتن (DAMAGEC) (ج) آسیب کششی بتن (DAMAGET)

شکل ۹: مقایسه آسیب در نمونه‌های آزمایشگاهی و عددی: (الف) ناحیه شکست نمونه آزمایشگاهی [۲۲]، (ب) آسیب فشاری در مدل عددی، (ج) آسیب کششی در مدل عددی.



شکل ۱۰: مقایسه منحنی‌های پسماند با مطالعه عددی توکل و حاجی‌کاظمی [۱۸] و مطالعه آزمایشگاهی یوان و همکاران [۲۲ و ۲۸].



شکل ۱۱: مقایسه منحنی‌های بار افزون با مطالعه عددی توکل و حاجی‌کاظمی [۱۸] و مطالعه آزمایشگاهی یوان و همکاران [۲۲ و ۲۸].

جدول ۵: مشخصات مکانیکی بتن مورد استفاده [۲۲].

خروج از مرکزیت	نسبت ثابت تنش ثانویه (KC)	نسبت تنش فشاری دوماحوره به یک‌محوره (f_{b0}/f_{c0})	زاویه اتساع	ویسکوزیته
۰٫۱	۰٫۶۶۷	۱٫۱۶	۲۰	۰٫۰۰۰۰۱

جدول ۶: مشخصات مکانیکی میلگردهای تقویتی GFRP و فولادی [۲۲].

نوع میلگرد	مدول الاستیسیته، E (GPa)	مقاومت نهایی، f_u (MPa)	مقاومت تسلیم، f_y (MPa)	قطر (mm)
GFRP	۴۲٫۳	۷۵۲	–	۱۶
فولاد	۲۰۳	۶۳۵	۵۲۸	۱۶

جدول ۷: مقایسه مقادیر مشخصه‌های منحنی پسماند حاصل از مدل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی.

پارامتر	مدل آزمایشگاهی یوآن و همکاران [۲۲]	مدل عددی توکل و حاجی‌کاظمی [۱۸]	خطا (%)	مدل عددی مطالعه حاضر	خطا (%)
نسبت میرایی معادل	۰٫۱۸۶	۰٫۱۹۳	۳٫۶	۰٫۱۸۴	۱٫۱
انرژی تجمعی جذب شده (J)	۳۵۳	۲۹۶	۱۶٫۱	۳۲۷	۷٫۴
شاخص افت سختی	۰٫۱۷	۰٫۱۵	۱۱٫۷	۰٫۱۶	۵٫۹
شاخص افت ظرفیت باربری	۰٫۷۰	۰٫۸۷	۲۴٫۳	۰٫۷۶	۸٫۶

جدول ۸: مقایسه نیروهای بیشینه به‌دست آمده از مدل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی.

پارامتر	مدل آزمایشگاهی یوآن و همکاران [۲۲]	مدل عددی توکل و حاجی‌کاظمی [۱۸]	خطا (%)	مدل عددی مطالعه حاضر	خطا (%)
نیروی فشاری بیشینه (+)	۴۶٫۵۳	۴۷٫۵۴	۲٫۲	۴۶٫۵۰	۰٫۱
نیروی کششی بیشینه (-)	۴۶٫۵۴	۴۰٫۱۸	۱۳٫۷	۴۵٫۱۲	۳٫۱

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف اصلی از انجام این پژوهش، ارزیابی اهمیت در نظر گرفتن رفتار پیوند در بهبود دقت شبیه‌سازی‌های عددی اعضای بتن مسلح‌شده با GFRP است. بدین منظور، رفتار چرخه‌ای یک ستون بتنی مسلح‌شده با میلگردهای GFRP و میلگردهای فولادی متعارف به صورت عددی با در نظر گرفتن رفتار پیوند میلگردهای GFRP مدل‌سازی شد و نتایج آن با یافته‌های آزمایشگاهی و با نتایج عددی حاصل از مدل‌سازی ستون بتنی با فرض اتصال بدون لغزش مقایسه گردید. در ادامه به طور خلاصه، به دستاوردهای کمی کلیدی این مطالعه اشاره می‌شود:

- مدل‌سازی صریح پیوند بین GFRP و بتن، دقت شبیه‌سازی را به میزان قابل توجهی بهبود بخشید. منحنی‌های پسماند و بار افزون به‌دست آمده با استفاده از مدل پیشنهادی (با لحاظ اثر پیوند)، تطابق بیشتری با منحنی آزمایشگاهی نسبت به مدل فرض اتصال کامل داشتند. این امر کارایی بهتر مدل پیشنهادی را مؤید است.

- فرض اتصال کامل، ظرفیت نهایی را بیش‌برآورد می‌کند: در حالتی که رفتار پیوند میلگردهای GFRP نادیده گرفته شده و فرض اتصال کامل اعمال گردید، ظرفیت نهایی سازه تا حدود ۱۰ درصد بیش‌برآورد شد. در مقابل، با در نظر گرفتن رفتار چسبندگی-لغزش، این خطا به کمتر از ۵ درصد کاهش یافت. این یافته اهمیت مدل‌سازی دقیق رفتار پیوند را برای برآوردهای قابل اعتماد ظرفیت نهایی سازه برجسته می‌سازد.
 - تفاوت ماهوی رفتار پیوند GFRP با فولاد تأیید شد. نظر به تطابق مطلوب نتایج مدل پیشنهادی با داده‌های آزمایشگاهی و با توجه به این‌که در این مدل پیوند آرماتور فولادی برخلاف آرماتورهای GFRP به صورت بدون لغزش در نظر گرفته شد، می‌توان نتیجه گرفت که رفتار پیوند میلگردهای GFRP با بتن به طور قابل توجهی با رفتار آرماتورهای فولادی متفاوت است. لذا، برای به‌دست آوردن پیش‌بینی‌های دقیق و قابل اعتماد از عملکرد سازه‌ای، اثرات این رفتارها هر یک با توجه به ویژگی‌های خود (رفتار الاستیک GFRP و رفتار الاستوپلاستیک فولاد) باید مدنظر قرار گیرد.
 - قابلیت اعتماد مدل پیوند: صحت‌سنجی مدل پیوند بین GFRP و بتن با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی [۲۴]، حداکثر خطای نسبی کمتر از ۵ درصد در پیش‌بینی منحنی تنش-لغزش را نشان داد. این امر قابلیت اطمینان مدل در شبیه‌سازی رفتار پیوند میلگردهای GFRP در بتن را تأیید می‌کند.
- به طور خلاصه، می‌توان نتیجه گرفت که راهبرد مدل‌سازی توسعه‌یافته در این مطالعه برای شبیه‌سازی رفتار پیوند بین GFRP و بتن، نتایج بسیار دقیق و با خطای اندکی برای پارامترها و مؤلفه‌های کلیدی پاسخ سازه‌ای ارائه می‌دهد. محدودیت‌های مدل‌سازی در این پژوهش شامل موارد زیر است:
- (۱) کشسان بودن کامل میلگردهای GFRP: در مدل‌سازی حاضر، رفتار میلگردهای GFRP به عنوان یک ماده با ویژگی‌های کشسان کامل در نظر گرفته شده است. این فرض به‌گونه‌ای است که تغییرات غیرخطی و اثرات خستگی این میلگردها که ممکن است در شرایط واقعی به وقوع بپیوندد، نادیده گرفته شده است.

۲) فرض اتصال کامل (Perfect Bond): در شبیه‌سازی‌های عددی، رفتار پیوند بین میلگردهای GFRP و بتن در اکثر موارد با فرض اتصال کامل مدل‌سازی شده است. این فرض می‌تواند منجر به پیش‌بینی‌های غیرواقعی از پاسخ سازه و ظرفیت نهایی آن شود.

۳) عدم در نظر گرفتن تأثیر بارهای محیطی: در مدل‌سازی حاضر، بارهای محیطی همچون دما، رطوبت و اثرات شیمیایی بر مواد نادیده گرفته شده‌اند. این عوامل می‌توانند ویژگی‌های مکانیکی و چسبندگی بین GFRP و بتن را تحت تأثیر قرار دهند و بر عملکرد کلی سازه تأثیر بگذارند.

۴) مدل آسیب پلاستیک بتن (CDP): اگرچه از این مدل برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن استفاده شده؛ این مدل ممکن است نتواند به طور کامل ویژگی‌های پیچیده شکست بتن را در تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای و لرزه‌ای شبیه‌سازی کند.

۵) سرعت تحلیل و زمان محاسبه: استفاده از نمونه‌های بزرگ و پیچیده برای شبیه‌سازی رفتار پیوند به معنای نیاز به زمان محاسبه طولانی و تقاضاهای بالای محاسباتی است.

گفتنی است که راهبرد پیشنهادی جهت شبیه‌سازی عناصر بتنی مسلح‌شده با میلگرد GFRP در مدل‌سازی انواع سازه‌های بتنی قابل استفاده بوده و لذا می‌توان در شبیه‌سازی انواع ستون‌ها، از جمله ستون‌های لاغر نیز این رویکرد را به کار برد.

در انتها با توجه به خلأهای پژوهشی موجود در این مطالعه پیشنهاداتی برای مطالعات آینده ارائه می‌گردد:

- گسترش پایگاه داده آزمایشگاهی با دامنه وسیع‌تری از مقاومت‌های بتن، قطرهای و بافت‌های سطحی میلگردهای GFRP، طول‌های مهاری و پروتکل‌های بارگذاری مختلف، به منظور بهبود کالیبراسیون و افزایش دقت و قابلیت اعتماد مدل‌های عددی در شرایط متنوع.
- به‌کارگیری راهبرد مدل‌سازی پیشنهادی در اعضای سازه‌ای متفاوت نظیر تیرها، دال‌ها و دیوارهای برشی، به منظور ارزیابی کارایی مدل در سازوکارهای گوناگون انتقال نیرو و سنجش تعمیم‌پذیری آن.
- گسترش تحلیل‌ها به سطح عضو یا سیستم سازه‌ای کامل تحت بارگذاری لرزه‌ای، با هدف بررسی پیامدهای مدل‌سازی صریح رفتار پیوند بر شکل‌پذیری، اتلاف انرژی، میرایی مؤثر و معیارهای عملکردی سازه.

- بررسی اثرات محیطی و عوامل وابسته به زمان از قبیل سیکل‌های یخ - ذوب، دما، محیط‌های خورنده، رطوبت متناوب، خزش و جمع‌شدگی بتن بر دوام و تکامل رفتار پیوند بین GFRP و بتن در بلندمدت و لحاظ کردن این پدیده‌ها در مدل‌های عددی پیشرفته.
- استخراج و ارائه روابط ساده طراحی و پیشنهاد اصلاحات آیین‌نامه‌ای مبتنی بر نتایج عددی و تجربی، به گونه‌ای که امکان استفاده مهندسان طراح از اثرات رفتار پیوند در قالب ضوابط و روابط کاربردی فراهم شده و پل مناسبی میان مطالعات پیشرفته و کاربردهای مهندسی ایجاد گردد.

منابع

- [1] Habibi, O. , Khaloo, A. and Abdoos, H. (2021). Seismic behavior comparison of RC shear walls strengthened using FRP composites and steel elements. *Scientia Iranica*, 28(3), 1167-1181.
- [2] Gudonis, E., Kacianauskas, R., Gribniak, V., Weber, A., Jakubovskis, R., & Kaklauskas, G. (2014). Mechanical properties of the bond between gfrp reinforcing bars and concrete. *Mechanics of Composite Materials*, 50(4), 457-466.
- [3] Eligehausen R, Popov EP, and Bertero VV. (1983). Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations (Report No. UCB/EERC-83/23). *Earthq Eng Res Cent, University of California, Berkeley*.
- [4] Paulay T, and Priestley MJN. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. John Wiley & Sons.
- [5] Cosenza E, Manfredi G, and Realfonzo R. (1997). Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete. *J Compos Construct*, 1(2): 40-51.
- [6] Quayyum S. (2010). Bond behaviour of fibre reinforced polymer (FRP) reinforcing bars in concrete (Master's thesis, University of Waterloo), University of Waterloo Institutional Repository (UWspace).
- [7] Huang Z. (2010). Modelling the bond between concrete and reinforcing steel in a fire. *Eng Struct*, 32(11): 3660-3669.
- [8] Sezen H, and Moehle JP. (2004). Bond-slip behavior of reinforcing bars embedded in confined concrete under cyclic loading. *J Struct Eng*, 130(4), 661-670.
- [9] Murcia-Delso J, and Benson Shing P. (2015). Bond-slip model for detailed finite-element analysis of reinforced concrete structures. *J Struct Eng*, 141(4): 04014125.
- [10] Lin X, and Zhang YX. (2014). Evaluation of bond stress-slip models for FRP reinforcing bars in concrete. *Compos Struct*, 107: 131-141.
- [11] Rezazadeh M, Carvelli V, and Veljkovic A. (2017). Modelling bond of GFRP rebar and concrete. *Construct Build Mater*, 153: 102-116.

- [12] Veljkovic A, Carvelli V, and Rezazadeh M. (2020). *Modelling the bond in GFRP bar reinforced concrete thin structural members*. *Struct*, 24: 13-26.
- [13] Rolland A, Argoul P, Benzart K, Quiertant M, Chataigner S, and Khadour A. (2020). *Analytical and numerical modeling of the bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete*. *Construct Build Mater*, 231: 117160.
- [14] Nepomuceno E, Sena-Cruz J, Correia L, and D'Antino T. (2021). *Review on the bond behavior and durability of FRP bars to concrete*. *Construct Build Mater*, 287: 123042.
- [15] Waryosh WA, and Rasol B. (2022). *A review of bond behavior of steel and GFRP bars to concrete*. *Eurasian J Eng Technol*, 11: 112-127.
- [16] Lopes CCC, and Carvalho H. (2023). *Bond Behavior between helically wrapped FRP rebars and concrete*. *XLIV Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (Vol. 5, No. 05)*.
- [17] Arabi M. (2024). *Bond behaviour of FRP rebars embedded in concrete elements: Prediction of bond strength and the effect of embedment length (Master's thesis)*.
- [18] Tavakol M, and Haji Kazemi H. (2025). *Comparative assessment of concrete columns reinforced with hybrid steel-GFRP, GFRP, and steel bars under cyclic lateral loading*. *Struct*, 71: 108034.
- [19] FIB (International Federation for Structural Concrete). (2010). *FIB Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Sohn.
- [20] ACI Committee 440. (2015). *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars (ACI 440.1R-15)*. American Concrete Institute.
- [21] Manual, A. U. (2017). *ABAQUS theory guide, version 6.17*. Dassault Systèmes Simulia. Inc., Providence, RI.
- [22] Yuan F, Chen M, and Pan J. (2019). *Experimental study on seismic behaviours of hybrid FRP-steel-reinforced ECC-concrete composite columns*. *Compos Part B: Eng*, 174: 107272.
- [23] Mohemmy M, and Boroujerdian V. (2019). *Validated simulation of bond-slip between bar and concrete*. *Civ Eng Environ*, 50(4): 73-82.
- [24] Kent DC, and Park R. (1971). *Flexural members with confined concrete*. *J Struct Div*, 97(7): 1969-1990.
- [25] Park R, and Paulay T. (1975). *Reinforced concrete structures*. Toronto: John Wiley & Sons, 783.
- [26] Rolland A. (2015). *Comportement mécanique et durabilité de structures en béton renforcées par des armatures composites internes*. PhD, Université Paris-Est, Ifsttar, France (in French).
- [27] Tabiee M, Abdoos H, and Khaloo A. (2023). *Investigation of the shear-lag effects on the response of L-shaped RC shear walls*. *J Struct Construct Eng*, 10(3): 106-126.
- [28] Ebrahimi R. (2025). *Modeling of bond behavior between GFRP bars and Reinforced concrete structure (Master's thesis, Sharif University of Technology), Sharif University of Technology, International Campus, Kish Island*.