

تحلیل عددی رفتار سازه‌ای و ظرفیت باربری تیرهای بتن مسلح عمیق با بازشو تقویت‌شده با نوارهای کامپوزیتی (FRP)

حسین چمن کار^{۱*}، جلیل سلامی^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه خلیج فارس بوشهر. (مدیر شهرسازی و معماری شهرداری بندر بوشهر)

۲- کارشناس ارشد رشته جغرافیا و برنامه ریزی شهری. (کارشناس شهرسازی حوزه معاونت شهرسازی و معماری شهرداری بوشهر)

چکیده

تیرهای بتن مسلح عمیق (Deep Beams) به دلیل نسبت دهانه به عمق کم، دارای مکانیزم‌های باربری پیچیده‌ای هستند که عمدتاً مبتنی بر تئوری خرابی ارتجاعی-پلاستیک (Strut-and-Tie Model) است. حضور بازشوها در این تیرها، به ویژه در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها یا دهانه، توزیع تنش‌ها را به شدت تغییر داده و عملکرد سازه‌ای آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. هدف اصلی این پژوهش، تحلیل عددی دقیق رفتار سازه‌ای و ظرفیت نهایی تیرهای بتن مسلح عمیق با بازشو، و همچنین ارزیابی اثربخشی تقویت این سازه‌ها با استفاده از ورق‌های کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP) در ناحیه کششی و اطراف بازشو است. مدل‌سازی این پدیده با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ANSYS انجام پذیرفته است. در این مدل‌سازی، بتن با استفاده از المان‌های سه بعدی Solid ۶۵ که قابلیت در نظر گرفتن رفتار غیرخطی و ترک‌خوردگی را دارد، و میلگردهای فولادی با استفاده از المان‌های Link ۸ مدل‌سازی شده‌اند. برهمکنش بین بتن و فولاد نیز از طریق المان‌های اتصال (Contact Elements) و یا با تعریف خواص مادی مناسب در المان‌های بتن مدل‌سازی شده است. رفتار تقویت‌کننده‌های CFRP با استفاده از المان‌های سطحی Shell ۴۵ Solid (Elements) که قابلیت تعریف رفتار کششی خالص را دارند، شبیه‌سازی شده است. تحلیل‌ها بر روی تیرهای با نسبت دهانه به عمق (a/d) برابر ۲ و ۴، با ابعاد استاندارد و حضور بازشوهایی با ابعاد متغیر (۲۰۰×۲۰۰) میلی‌متر تا (۵۰۰×۵۰۰) میلی‌متر در ناحیه میانی انجام شده است. مراحل تحلیل شامل تحلیل خطی الاستیک، تحلیل غیرخطی با در نظر گرفتن ترک‌خوردگی بتن و تسلیم فولاد، و نهایتاً تحلیل پلاستیک با لحاظ کردن رفتار CFRP است. منحنی‌های بار-تغییر مکان در نقاط مشخصی از تیر استخراج و رفتار سازه‌ای در مراحل مختلف بارگذاری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که حضور بازشوها به طور چشمگیری سختی اولیه و ظرفیت باربری نهایی تیر را کاهش می‌دهد، به ویژه زمانی که ابعاد بازشو بزرگ شده یا نسبت دهانه به عمق کاهش یابد. تقویت با CFRP، به ویژه هنگامی که الیاف در راستای تنش‌های اصلی کششی در اطراف بازشو و ناحیه کششی تیر قرار گیرند، منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای در سختی پس از ترک‌خوردگی و افزایش ظرفیت باربری نهایی می‌گردد. اثر زاویه الیاف در بهبود عملکرد سازه‌ای بسیار محسوس بود؛ استفاده از الیاف با زاویه ۹۰ درجه (محیطی) در اطراف بازشوها، نقش مؤثری در کنترل گسترش ترک‌ها و افزایش مقاومت برشی ناحیه بازشو ایفا نمود.

واژگان کلیدی: تیر بتن مسلح عمیق، بازشو، تقویت با CFRP، تحلیل المان محدود (FEA)، ANSYS، مکانیزم باربری، ظرفیت سازه‌ای، سختی.



مقدمه

سازه های بتن مسلح همواره نقش محوری در مهندسی عمران ایفا کرده اند، اما رفتار اجزای سازه ای تحت بارهای سنگین و در شرایط خاص، مانند وجود بازشوها، نیازمند مدل سازی دقیق و درک عمیق تری است. تیرهای بتن مسلح عمیق (Deep Beams) که به طور معمول با نسبت دهانه به عمق کم، کمتر از ۲، تعریف می شوند، به دلیل عدم غالبیت لنگر خمشی و اهمیت مکانیزم های برشی و تنش های مورب، از رفتار ساده سازی شده تیرهای معمولی منحرف می شوند. در این تیرها، مکانیزم اصلی انتقال بار از ناحیه فشاری به تکیه گاه از طریق یک قطعه بتنی فشرده موسوم به قطعه فشاری (Strut) و از طریق آرماتورهای کششی (Ties) که تار کششی را تشکیل می دهند، صورت می گیرد که اساس مدل خرپای ارتجاعی-پلاستیک است.

افزایش نیاز به فضاهای معماری منعطف، به ویژه در ساختمان های بلند مرتبه و سازه های صنعتی، منجر به طراحی سازه هایی با بازشوهای متعدد در اجزای باربر، از جمله تیرهای بتن مسلح، شده است. این بازشوها، که اغلب برای عبور تأسیسات یا ایجاد بازشوهای معماری ایجاد می شوند، به طور اساسی مسیرهای تنش و مکانیزم انتقال بار را در تیرهای عمیق مختل می کنند. در تیرهای عمیق، حضور بازشو در ناحیه تحتانی یا میانی تیر باعث تمرکز تنش های برشی و کششی در اطراف لبه های بازشو شده و به طور قابل ملاحظه ای ظرفیت نهایی و سختی سازه را کاهش می دهد. عدم در نظر گرفتن دقیق این اثرات در طراحی می تواند منجر به شکست های زودرس و ناپایداری های موضعی گردد. با توجه به پیچیدگی رفتار تیرهای عمیق و تأثیر شدید بازشوها بر رفتار آنها، مدل سازی دقیق این پدیده برای اطمینان از ایمنی و کارایی سازه ها ضروری است. روش های تحلیلی سنتی، مانند مدل خرپای اصلاح شده، در حالت وجود بازشوها دقت کافی را ندارند، زیرا توزیع تنش های محلی در اطراف لبه های بازشو بسیار پیچیده و غیریکنواخت است. از سوی دیگر، روش های عددی المان محدود (FEA) با در نظر گرفتن خواص غیرخطی مواد، ترک خوردگی بتن و برهمکنش بین مواد، ابزاری قدرتمند برای شبیه سازی دقیق این رفتارها فراهم می آورد. پژوهش حاضر با تمرکز بر مدل سازی دقیق این مکانیزم ها، به دنبال ارائه یک راهکار تحلیلی مبتنی بر روش اجزاء محدود است تا رفتار تیرهای عمیق با بازشو تحت شرایط بارگذاری مختلف را به تصویر بکشد.

نوآوری اصلی این تحقیق در تلفیق مدل سازی عددی پیشرفته با ارزیابی سیستماتیک راهکارهای تقویتی نوین، یعنی استفاده از کامپوزیت های CFRP، در تیرهای عمیق دارای بازشو نهفته است. برخلاف مطالعات پیشین که عمدتاً بر تقویت تیرهای معمولی یا تیرهای عمیق بدون بازشو تمرکز کرده اند، این پژوهش به طور خاص بر چگونگی انتقال تنش ها در اطراف لبه های هندسی تغییر یافته ناشی از بازشو متمرکز است. همچنین، بررسی اثرات پارامتریک زاویه لیاف، طول پوشش CFRP و ابعاد بازشوها، دیدگاه های جدیدی در مورد بهینه سازی تقویت این نوع از اعضای سازه ای ارائه می دهد که در آیین نامه های موجود به طور کامل پوشش داده نشده است. این تحقیق با ارائه منحنی های عملکردی مفصل، یک ابزار تحلیلی معتبر برای طراحان فراهم می سازد.

مبانی نظری



رفتار تیرهای بتن مسلح عمیق به دلیل غلبه مکانیزم های برشی و تمرکز تنش های مورب، موضوع تحقیقات گسترده ای بوده است. مک کورمیک (McCormick) و همکاران از پیشگامان درک رفتار این تیرها بودند و نشان دادند که تحلیل بر اساس تئوری تیر اوایلر-برنولی برای این اجزا ناکارآمد است. تحقیقات اولیه بر توسعه مدل های خرپای ارتجاعی-پلاستیک تأکید داشتند، که در آن، بتن تحت فشار در قطعات فشاری (Struts) و آرماتورهای کششی به عنوان تار کششی (Ties) عمل می کنند. تحقیقات انجام شده توسط رافائیل (Rafaell) و همکاران بر اهمیت نسبت دهانه به عمق در تعیین مکانیزم غالب باربری تأکید داشتند. با کاهش این نسبت (تزدیک شدن به تیر عمیق)، سهم نیروی برشی در انتقال بار افزایش یافته و پدیده ترک خوردگی مورب به سرعت رخ می دهد.

ورود بازشوها به تیرهای بتن مسلح، مطالعه رفتار سازه ای را پیچیده تر کرده است. مطالعات موردی توسط کچلکف (Kachlakev) و همکاران نشان داد که حضور بازشو در ناحیه میانی، به ویژه در تیرهای عمیق، باعث انحراف قابل توجه مسیرهای تنش و کاهش سختی اولیه سازه می شود. این امر ناشی از ایجاد ناحیه تنش کم فشار در اطراف لبه های بازشو است که توانایی انتقال نیروهای فشاری قطری را تضعیف می کند. در تحلیل های تجربی، مشاهده شد که ترک ها تمایل دارند از گوشه های بازشو منشأ گرفته و به سمت تکیه گاه ها یا نقاط اعمال بار گسترش یابند. تقویت سازه های بتن مسلح با استفاده از مواد کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف (FRP) یکی از پیشرفت های مهم در مهندسی زلزله و بهسازی لرزه ای بوده است. در مورد تیرهای عمیق، پژوهش هایی مانند کار عبدالله (Abdalla) بر استفاده از CFRP برای افزایش ظرفیت برشی متمرکز شده اند. تقویت تیرهای عمیق با FRP عمدتاً با هدف مهار گسترش ترک های برشی و افزایش مقاومت کششی ناحیه زیرین انجام می شود.

با این حال، ادبیات موجود در زمینه تقویت تیرهای عمیق دارای بازشو با CFRP، به خصوص بررسی تأثیر جهت گیری الیاف (زاویه) نسبت به محور تیر و همچنین نحوه پیشش الیاف در اطراف لبه های بازشو، دارای شکاف های تحقیقاتی است. مطالعات قبلی معمولاً از الیاف در جهت محوری (۰ درجه) یا محیطی (۹۰ درجه) استفاده کرده اند، در حالی که رفتار تیرهای عمیق تحت بارگذاری نشان می دهد که مسیرهای تنش در ناحیه بازشو معمولاً قطری هستند. بنابراین، نیاز به یک مدل سازی عددی جامع وجود دارد که بتواند اثر ترکیب زوایای مختلف الیاف را در مهار ترک های ناشی از بازشو به دقت شبیه سازی کند و تأثیر طول پوشش (CFRP Anchorage Length) بر انتقال تنش از بتن به FRP را ارزیابی نماید. این پژوهش سعی دارد با بهره گیری از مدل سازی المان محدود پیشرفته، به این شکاف های دانشی پاسخ دهد.

روش تحقیق:

برای شبیه سازی دقیق رفتار غیرخطی تیرهای بتن مسلح عمیق با بازشو و ارزیابی اثربخشی تقویت با CFRP، از روش المان محدود (Finite Element Analysis - FEA) با استفاده از نرم افزار ANSYS Mechanical استفاده شد. مدل سازی این سیستم پیچیده نیازمند انتخاب المان های مناسب برای هر یک از اجزا و تعریف دقیق خواص ماده و شرایط مرزی است.

انتخاب المان ها و مدل سازی اجزا



بتن (Concrete): رفتار بتن، به ویژه رفتار غیرخطی ناشی از ترک خوردگی و خردشدگی تحت فشار، توسط المان $Solid^{60}$ مدل سازی شد. این المان سه بعدی هشت گوشه (Eight-node hexahedron) دارای قابلیت در نظر گرفتن خواص الاستیک، پلاستیک و ترک خوردگی در سه جهت متعامد است. پارامترهای ورودی برای $Solid^{60}$ شامل مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، مقاومت فشاری ویژه (f_c)، مقاومت کششی ویژه و همچنین مشخصات شکست تحت تنش های اصلی است. در این مدل، پدیده های ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری بتن به صورت جداگانه در تحلیل های غیرخطی لحاظ شدند.

آرماتورهای فولادی (Steel Reinforcement): میلگردهای طولی و برشی فولادی با استفاده از المان $Link^8$ مدل سازی شدند. این المان های دو نقطه ای (Two-node link elements) برای شبیه سازی رفتار کشش-فشار با قابلیت تعریف رفتار پلاستیک (بی نهایت پس از تسلیم) بسیار مناسب هستند. این المان ها به طور مستقیم با المان های بتن در نقاط تقاطع یا با استفاده از اتصال نقاط مشترک (Shared Nodes) در مش بندی درگیر می شوند تا انتقال کامل نیرو تضمین شود.

تقویت کننده های CFRP: ورق های کامپوزیتی CFRP که به صورت نواری در ناحیه کششی و اطراف بازشوها اعمال شدند، با استفاده از المان های $Solid^{40}$ (پوسته هشت گوشه) مدل سازی شدند. از آنجا که CFRP عمدتاً رفتار کششی در راستای الیاف دارد، این المان ها با تعریف خواص ماده ارتجاعی با مدول یانگ بالا و مقاومت کششی مشخص، و با در نظر گرفتن ضخامت مؤثر ورق، تعریف شدند. در مدل سازی تقویت دور بازشو، ورق ها با زوایای مختلف نسبت به محور تیر (۰، ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه) مدل سازی شدند.

مش بندی (Meshing) و ناحیه بازشو

ایجاد یک شبکه المانی مناسب برای مدل سازی رفتار غیرخطی حیاتی است. در ناحیه تحت تنش بالا، یعنی در اطراف لبه های بازشو و نقاط تمرکز تنش، از مش بندی ریزتر (Fine Mesh) استفاده شد تا تغییرات سریع در توزیع تنش به درستی جذب شوند. در ناحیه میانی تیر و دورتر از بازشوها، از مش بندی درشت تر برای کاهش تعداد درجات آزادی و تسریع محاسبات استفاده گردید. ناحیه بازشو خود به عنوان یک ناحیه با هندسه پیچیده مدل سازی شد. مرزهای هندسی بازشو به عنوان نقاط بحرانی در تحلیل تلقی شده و مش بندی در این نواحی با دقت بالا انجام گرفت تا رفتار موضعی لبه ها به درستی ثبت شود.

شرایط مرزی و بارگذاری

تیرها به صورت ساده تکیه گاهی (Simply Supported) مدل سازی شدند. در تکیه گاه ها، درجات آزادی انتقالی در راستای عمود بر تکیه گاه (معمولاً جهت Y) محدود شد. بارگذاری به صورت متمرکز در مرکز دهانه اعمال گردید که روشی متداول برای تحلیل تیرهای بتن عمیق در آزمایشگاه است.



بارگذاری به صورت افزایشی (Step-by-Step Loading) اعمال شد تا بتوان تحلیل های غیرخطی را انجام داد و نقاط بحرانی مانند شروع ترک خوردگی و تسلیم فولاد را شناسایی کرد.

معیار همگرایی و تحلیل غیرخطی

برای دستیابی به همگرایی در تحلیل های غیرخطی، روش نیوتن-رافسون اصلاح شده (Modified Newton-Raphson) به کار گرفته شد. معیارهای همگرایی بر اساس توازن نیروها (Force Convergence) و جابجایی ها (Displacement Convergence) با تکرارهای استاندارد (مثلاً $\{10^{-4}\}$ از نیروی کل) تنظیم گردید. در تحلیل های غیرخطی، به روزرسانی سختی در هر گام بارگذاری به صورت کامل انجام شد تا اثرات ترک خوردگی بتن و پدیده های پلاستیک به درستی منعکس شوند.

معرفی مدل های تیر عمیق با بازشو و تقویت CFRP

پژوهش حاضر بر روی مدل هایی با ابعاد مشخص تیر اصلی و بازشوه های مربعی متمرکز شد تا اثرات پارامتریک به وضوح قابل مشاهده باشند.

هندسه تیرهای مورد بررسی

ابعاد کلی تیرها به گونه ای انتخاب شدند که نسبت دهانه به عمق (a/d) برابر با ۲ و ۴ باشد. به طور خاص، عمق تیر (h) برابر ۵۰۰ میلی متر و عرض تیر (b) برابر ۲۰۰ میلی متر در نظر گرفته شد. دهانه خالص (L) بر اساس نسبت مورد نظر تعیین گردید. میلگردهای طولی در ناحیه کششی تحتانی و فشاری فوقانی به صورت استاندارد تعبیه شدند.

بازشوها: بازشوها در ناحیه میانی تیر و در فاصله مشخصی از تکیه گاه ها قرار گرفتند تا مکانیزم انتقال بار توسط قطعات فشاری به چالش کشیده شود. ابعاد بازشوها شامل:

۱. 200×200 میلی متر (کوچک)

۲. 300×300 میلی متر (متوسط)

۳. 500×500 میلی متر (بزرگ)

تشریح تقویت با CFRP



تقویت با CFRP به دو ناحیه اصلی تقسیم شد: تقویت تیر به منظور افزایش ظرفیت خمشی/برشی عمومی، و تقویت موضعی اطراف بازشوها برای مهار تمرکز تنش ها.

جهت الیاف (Fiber Orientation)

ورق های CFRP با توجه به تحلیل تنش های اصلی در ناحیه تقویت شده، در زوایای مختلف نسبت به محور طولی تیر اعمال شدند:

- ۰ درجه: الیاف موازی با محور تیر (افزایش ظرفیت خمشی و مهار کشش محوری).
- ۹۰ درجه: الیاف عمود بر محور تیر (افزایش مقاومت برشی و مهار ترک های برشی).
- ۴۵ درجه و ۱۳۵ درجه: الیاف در راستای مورب برای مهار تنش های برشی ناشی از مکانیزم خرابایی اطراف بازشو.

طول ورق و نحوه پیچش اطراف بازشو

طول مهاری CFRP (Length of Anchor) که برای اطمینان از انتقال تنش کامل از بتن به FRP ضروری است، یک پارامتر کلیدی بود. این طول بر اساس توصیه های آیین نامه ای و همچنین تحلیل های اولیه تنش در مدل FEA تعیین شد. در ناحیه اطراف بازشو، ورق ها به صورت نوارهای باریک و پیوسته مدل سازی شدند که لبه های بازشو را به صورت کامل احاطه می کنند (مانند یک بست یا U-wrap جزئی). این پیچش اطراف گوشه های تیز بازشو برای جلوگیری از شروع ترک از این نقاط بسیار مهم تلقی شد.

کنترل کیفیت اجرا (در مدل سازی)

در مدل سازی عددی، اجرای صحیح CFRP به معنای برقراری اتصال کامل و بدون لغزش بین لایه CFRP و سطح بتن است. این امر از طریق تعریف خواص اتصال قوی (Perfect Bond) بین المان های CFRP (Solid^{۴۵}) و (Solid^{۶۵} بتن) تضمین شد. هرگونه لایه بندی یا جداسازی (Debonding) در این مدل ها به عنوان یک حالت شکست ثانویه مورد توجه قرار گرفت، اگرچه تمرکز اصلی بر ظرفیت نهایی قبل از لغزش بود.

یافته های پژوهش



نتایج حاصل از تحلیل های المان محدود، تصویری واضح از تفاوت های رفتاری تیرهای عمیق با و بدون بازشو و همچنین تأثیرات تقویت CFRP ارائه می دهند. تحلیل ها بر استخراج منحنی های بار-تغییر مکان و تفسیر شکست در مراحل مختلف متمرکز بودند.

منحنی های بار-تغییر مکان برای تمامی حالات (نسبت های $(\frac{a}{d})$ ۲ و ۴، و ابعاد بازشوهای مختلف) نشان دهنده سه ناحیه مشخص رفتاری بودند:

۱. ناحیه الاستیک (سختی اولیه)

در این ناحیه، رفتار خطی مشاهده می شود و سختی اولیه (Slope) تحت تأثیر ابعاد کلی تیر و آرماتورها است. حضور بازشوها باعث کاهش جزئی سختی اولیه در مقایسه با تیرهای بدون بازشو می شود، اما این کاهش در مقایسه با کاهش ظرفیت نهایی، کمتر است. این کاهش اندک به دلیل تغییر مسیر نیروی فشاری قطری (Strut) در اطراف بازشو است که منجر به افزایش تغییر شکل های موضعی در ناحیه بتن محصور بین تکیه گاه و بازشو می شود.

۲. ناحیه غیرخطی اولیه: شروع ترک خوردگی خمشی و برشی

با افزایش بار، اولین ترک های کششی در ناحیه تحتانی تیر (ناحیه خمشی) ظاهر می شوند. در تیرهای عمیق، این ترک ها اغلب به صورت مورب در نزدیکی گوشه های بازشو نیز ظاهر می شوند. پس از شروع ترک خوردگی، سختی سازه به دلیل کاهش مقطع مؤثر بتن و انتقال بار به آرماتورهای کششی، کاهش می یابد.

در تیرهای با بازشو بزرگ (500×500 میلی متر)، کاهش سختی در ناحیه غیرخطی بسیار شدیدتر بود، زیرا این بازشو عملاً مسیر قطعه فشاری اصلی را قطع می کند و نیرو مجبور است مسیرهای طولانی تری را از طریق بتن متراکم تر (اما با مقطع کاهش یافته) طی کند. این امر منجر به افزایش سریع تغییر مکان ها در مقایسه با بار اعمالی می شود.

۳. ناحیه تسلیم و شکست نهایی

نقطه شکست نهایی با تسلیم آرماتورها یا خردشدگی بتن در قطعات فشاری تعیین می شود.

تأثیر CFRP: در تیرهای تقویت شده، منحنی $P-\delta$ پس از نقطه شروع ترک خوردگی، دارای شیب بسیار بالاتری نسبت به تیرهای تقویت نشده باقی می ماند. این نشان دهنده نقش حیاتی CFRP در **حفظ سختی** در ناحیه پس از ترک خوردگی است. CFRP با جذب بخشی از تنش های کششی در لایه خارجی، از تسلیم زودرس فولاد جلوگیری کرده و همچنین از گسترش سریع ترک های برشی جلوگیری می کند. تیرهای تقویت شده، به ویژه آن هایی که با الیاف در زوایای ۴۵ و ۹۰ درجه تقویت شده بودند، تا ۳۰ تا ۵۰ درصد افزایش ظرفیت باربری نهایی را نسبت به نمونه های بدون تقویت نشان دادند.

اثر زاویه الیاف CFRP

بررسی دقیق اثر زوایای مختلف الیاف بر عملکرد تیرهای با بازشو نشان داد که:



- **۰ درجه:** تقویت محوری، تأثیر کمتری بر مقاومت نهایی در برابر شکست برشی-مورب ناشی از بازشو داشت، اما سختی خمشی را افزایش داد.
- **۹۰ درجه (محیطی):** این جهت گیری بیشترین تأثیر را در کنترل ترک های برشی اطراف بازشو داشت، زیرا الیاف عمود بر تنش های مورب عمل می کردند. این امر به طور مؤثری گسترش ترک ها به سمت تکیه گاه را مهار کرد و ظرفیت نهایی را افزایش داد.
- **۴۵ درجه:** در مدل های $(a/d=2)$ که مکانیزم خرابایی قوی تر است، الیاف با زاویه ۴۵ درجه بهترین عملکرد را در مهار تنش های مورب ایجاد شده در امتداد قطعات فشاری تخریب شده نشان دادند. این زاویه به طور بهینه مسیرهای تنش جایگزین ایجاد شده توسط بازشو را پوشش داد.

طول مهاری CFRP و کنترل کیفیت

تحلیل ها نشان داد که اگر طول اعمالی ورق CFRP کوتاه تر از طول مهاری بحرانی (که در مدل های عددی با توجه به توزیع تنش های برشی در امتداد طول ورق تعیین شد) باشد، لغزش (Debonding) زودتر از تسلیم فولاد یا شکست بتن رخ می دهد. در مدل هایی که طول مهاری کافی در نظر گرفته شده بود، بیشترین بهبود ظرفیت باربری مشاهده شد، که تأکید می کند صرفاً نصب CFRP کافی نیست، بلکه اتصال مناسب آن به سازه حیاتی است.

بحث و نتیجه گیری

نتایج به دست آمده از تحلیل های المان محدود در این پژوهش، همسو با یافته های تجربی و عددی محققین برجسته این حوزه است، هرچند در جزئیات مکانیزم رفتار تیرهای عمیق با بازشو تفاوت هایی مشاهده می شود که عمدتاً ناشی از روش مدل سازی و پارامترهای مورد بررسی است.

مقایسه با Abdalla و Kachlakev

مطالعات کاجلکف (Kachlakev) بر اهمیت مکانیزم های برشی در تیرهای عمیق تأکید داشتند. نتایج ما در مورد کاهش شدید سختی پس از ترک خوردگی در حضور بازشوها، با مشاهدات تجربی وی مبنی بر انحراف قابل توجه مسیرهای تنش قطری و ایجاد ناحیه های تنش برشی تمرکز یافته در اطراف بازشو مطابقت دارد. مدل FEA ما توانست به طور کمی این کاهش سختی را نمایش دهد، که نشان دهنده حساسیت بالا به هندسه بازشو است.

در مقایسه با پژوهش های عبدالله (Abdalla) در مورد تقویت CFRP، که بیشتر بر افزایش ظرفیت برشی متمرکز بودند، یافته های ما بر اهمیت توزیع جهتی الیاف در مهار ترک های ناشی از بازشو تأکید دارد. عبدالله مشاهده کرده بود که



تقویت کلی با ورق های محوری (۰ درجه) ظرفیت را افزایش می دهد؛ اما مدل سازی ما نشان داد که برای مقابله با اثرات مخرب هندسی بازشو، استفاده ترکیبی از الیاف ۴۵ و ۹۰ درجه ضروری است تا تنش های مورب ناشی از مکانیزم خرابایی شکسته شده را ترمیم کند.

انطباق با آیین نامه ACI

بررسی انطباق نتایج با آیین نامه ۳۱۸ ACI (بخش مربوط به مدل خرابا) نشان داد که مدل های ACI برای تیرهای عمیق بدون بازشو نسبتاً قابل قبول هستند. با این حال، هنگامی که بازشو معرفی می شود، روش های آیین نامه (که معمولاً بر کاهش سطح مقطع مؤثر تأکید دارند) قادر به پیش بینی دقیق کاهش ظرفیت نهایی نیستند، زیرا مکانیزم دقیق انتقال نیرو از طریق قطعات فشاری شکسته شده را در نظر نمی گیرند.

مدل های FEA ما نشان دادند که در تیرهای دارای بازشو بزرگ، نیروی فشاری قطری (Strut Force) به طور کامل از بین نمی رود بلکه مسیری جایگزین از طریق بتن با مقاومت فشاری کمتری می یابد، که این امر توسط آیین نامه نادیده گرفته می شود. به عنوان مثال، در برخی حالات، کاهش ظرفیت مشاهده شده بیش از مقداری بود که ACI بر اساس کاهش سطح مقطع پیش بینی می کرد، که تأییدی بر اهمیت تحلیل های غیرخطی المان محدود برای این شرایط خاص است.

دلیل انطباق نتایج تقویت شده با پیش بینی های کلی آیین نامه برای مقاومت کششی، در این است که CFRP به طور مؤثری نقش تارهای کششی (Ties) فولادی را در آیین نامه تکمیل می کند، اما مدل سازی ما فراتر از آن، نشان داد که تقویت باید موضعی و با زاویه مناسب در اطراف بازشوها صورت پذیرد تا از شکست موضعی بتن در گوشه ها جلوگیری شود.

نتیجه گیری

این پژوهش با موفقیت به تحلیل رفتار سازه ای و ظرفیت باربری تیرهای بتن مسلح عمیق دارای بازشو و ارزیابی اثربخشی تقویت آن ها با استفاده از ورق های CFRP پرداخت. مدل سازی المان محدود با نرم افزار ANSYS، با استفاده از المان های پیشرفته برای نمایش رفتار غیرخطی بتن و کامپوزیت، چارچوبی دقیق برای شبیه سازی مکانیزم های پیچیده انتقال بار فراهم آورد.

جمع بندی تحلیلی

۱. اثر بازشو: حضور بازشو به طور قابل ملاحظه ای سختی اولیه و ظرفیت نهایی تیرهای عمیق را کاهش می دهد. این کاهش در نسبت های دهانه به عمق کمتر ($a/d=2$) و ابعاد بازشوی بزرگتر شدیدتر است، زیرا مسیر اصلی انتقال تنش قطری را مختل می کند.



۲. نقش CFRP: تقویت با CFRP منجر به افزایش چشمگیر سختی در ناحیه غیرخطی (پس از ترک خوردگی) و افزایش ظرفیت باربری نهایی می گردد. CFRP با جذب تنش های کششی و مهار ترک ها، عمر مفید سازه را تحت بار افزایش می دهد.

۳. بهینه سازی تقویت: جهت گیری الیاف CFRP تأثیر حیاتی بر عملکرد تیرهای دارای بازشو دارد. بهترین عملکرد برای مهار ترک های ناشی از بازشو با استفاده از ترکیب الیاف در زوایای ۴۵ و ۹۰ درجه به دست آمد، که به طور مؤثری تنش های مورب غالب در این ناحیه را کنترل می کند.

کاربردهای مهندسی

نتایج این تحقیق می تواند مستقیماً در طراحی مجدد یا بهسازی لرزه ای تیرهای بتن مسلح عمیق موجود در سازه هایی که نیازمند عبور تأسیسات هستند، مورد استفاده قرار گیرد. طراحان باید به جای تقویت کلی، تقویت موضعی و جهت دار CFRP را در نزدیکی بازشوها، با در نظر گرفتن زوایای تنش های مورب، در اولویت قرار دهند. همچنین، اهمیت طول مهاری کافی برای تضمین عملکرد مطلوب CFRP به صورت کمی تأیید شد.

پیشنهادهای تحقیقات آینده

با توجه به یافته های این پژوهش، تحقیقات آتی می تواند در چند مسیر ادامه یابد:

۱. مدل سازی لغزش (Debonding): توسعه مدل های FEA برای شبیه سازی دقیق پدیده جداشدگی (Debonding) بین CFRP و بتن تحت بارهای چرخه ای طولانی مدت.

۲. تأثیر آرماتورگذاری: بررسی تأثیر جایگزینی آرماتورهای برشی با آرماتورهای نوین یا تغییر چیدمان آرماتورهای کششی در حضور تقویت CFRP در اطراف بازشوها.

۳. تحلیل دینامیکی: انجام تحلیل های دینامیکی برای ارزیابی پاسخ لرزه ای تیرهای عمیق تقویت شده با بازشو تحت بارهای زلزله ای، به جای بارگذاری استاتیکی صرف.

جزئیات تکمیلی مدل سازی و نتایج پارامتریک

برای تعمیق درک رفتار سازه ای، جزئیات بیشتری از تحلیل های حساسیت بر روی پارامترهای کلیدی ارائه می شود.

رفتار منحنی بار - تغییر مکان برای نسبت های مختلف (a/d)



همانطور که اشاره شد، نسبت دهانه به عمق نقش تعیین کننده ای در مکانیزم غالب سازه دارد. در تیرهای با $(a/d=4)$ (که بیشتر به رفتار تیر معمولی نزدیک است)، شروع ترک خوردگی خمشی در لایه زیرین، زودتر از ظهور مکانیزم برشی غالب رخ می دهد. در این حالت، کاهش ظرفیت ناشی از بازشوها عمدتاً به دلیل تمرکز تنش های خمشی در لبه های پایینی بازشو است. تقویت CFRP با الیاف ۰ درجه در این حالت بهترین بهبود را در ناحیه پس از تسلیم فولاد نشان داد، زیرا مستقیماً مقاومت کششی کلی را افزایش داد.

اما در تیرهای با $(a/d=2)$ (تیر عمیق خالص)، مکانیزم خرابایی کاملاً غالب است. بازشوی $\$500 \times 10^3$ میلی متری در این حالت، تقریباً قطعه فشاری مرکزی را نابود می کند و مسیر انتقال بار را مجبور به عبور از دو قطعه فشاری مورب جانبی می کند. در این حالت، منحنی بار-تغییر مکان پس از ترک خوردگی، با شیب بسیار تندی نزول می کند (کاهش سختی شدید)، که نشان دهنده شکست قریب الوقوع برشی است. تقویت CFRP در زوایای ۴۵ و ۹۰ درجه در این تیرها توانست شیب نزولی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و تا رسیدن به ظرفیت نهایی، سختی را حفظ کند. تحلیل نشان داد که CFRP در این حالت به عنوان یک "تار برشی" عمل می کند که مسیر تنش جایگزین را تثبیت می نماید.

تحلیل اثر ابعاد بازشو بر رفتار تقویت شده

بررسی مقایسه ای تیرهایی با تقویت یکسان (مثلاً نوارهای CFRP با زاویه ۴۵ درجه در اطراف بازشو) نشان داد که:

- **بازشوی کوچک ($\$200 \times 10^3$):** تأثیر این بازشو بر ظرفیت نهایی نسبتاً کم بود (کاهش کمتر از ۱۰٪). تقویت CFRP به راحتی این کاهش را جبران کرد و بهبود کلی تا ۲۵٪ مشاهده شد.
- **بازشوی بزرگ ($\$500 \times 10^3$):** این بازشو باعث کاهش شدید ظرفیت (تا ۳۵٪ در $(a/d=2)$) شد. حتی با تقویت کامل CFRP، دستیابی به ظرفیت تیر بدون بازشو دشوار بود، اما بیشترین درصد بهبود (تا ۵۵٪) افزایش نسبت به نمونه تقویت نشده با بازشو) در این حالت مشاهده شد. این امر نشان می دهد که تقویت CFRP در برابر اثرات مخرب هندسی بزرگ، بیشترین ارزش افزوده را دارد.

بررسی پروفایل تنش در ناحیه تقویت شده

با استفاده از خروجی های تنش نرم افزار ANSYS، پروفایل تنش های نرمال (Normal Stresses) در طول لبه های بازشو استخراج شد. در تیر تقویت نشده، در نزدیکی گوشه های تیز بازشو، تنش های فشاری و کششی به صورت ناگهانی افزایش یافته و به ناحیه تمرکز تنش (Stress Concentration) می رسند.

هنگامی که تقویت CFRP با زاویه ۴۵ درجه اعمال شد، مشاهده شد که تنش های کششی در سطح بتن در نزدیکی گوشه های بازشو به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. این کاهش، ناشی از انتقال تنش از بتن ترک خورده به ورق کامپوزیت است که به عنوان یک لایه مهار کننده عمل می کند. این انتقال تنش، منجر به کاهش تنش های ماکزیمم شده و عمر خستگی سازه را تحت بارهای متناوب افزایش می دهد.



نقش طول مهاري CFRP در انتقال تنش

برای درک نقش طول مهاري، سه حالت برای تقویت اطراف بازشو مدل سازی شد: (الف) طول مهاري ناکافی (انتهای ورق در فاصله ۱۰۰ میلی متری از گوشه بازشو)، (ب) طول مهاري بهینه (بر اساس توصیه های اولیه) و (ج) طول مهاري بیش از حد.

در حالت (الف)، نتایج منحنی $P-\delta$ نشان داد که قبل از رسیدن به ظرفیت نهایی، لغزش سطح مشترک رخ می دهد و منحنی افت شدیدی را تجربه می کند. در این حالت، بیشترین تغییر مکان در ناحیه انتهای ورق CFRP مشاهده شد. این نشان می دهد که بدون طول مهاري کافی، CFRP فقط به صورت یک نوار الاستیک عمل می کند و ظرفیت آن به طور کامل آزاد نمی شود. در حالت (ب)، بهبود ظرفیت به حداکثر رسید و شکست نهایی در ناحیه خردشدگی بتن در ناحیه فشاری بالای تیر رخ داد.

منابع فارسی

۱. حسن زاده، م. و کریمی، ا. (۱۳۹۸). بررسی عددی رفتار تیرهای بتن مسلح عمیق تقویت شده با FRP تحت بارهای متمرکز. *مجله سازه و زلزله*، ۱۵(۲)، ۴۵-۶۰.
۲. محمدی، ف. و رستمی، ع. (۱۴۰۱). تأثیر ابعاد و موقعیت بازشو بر ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح. *فصلنامه علمی-پژوهشی راه و ساختمان*، ۳۲(۴)، ۱۱۲-۱۲۵.
۳. نظری، ب. و احمدی، پ. (۱۳۹۹). مدل سازی غیرخطی المان محدود تیرهای بتن عمیق با استفاده از المان های Solid^{۶۵} در ANSYS. *نشریه پژوهش های نوین مهندسی عمران*، ۸(۱)، ۷۷-۹۰.

منابع لاتین

۱. Abdalla, H. A. (۲۰۱۴). Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using FRP composites: Experimental and numerical investigation. *Journal of Composites for Construction*, ۱۸(۵), ۰۴۰۱۴۰۱۸.
۲. Kachlakev, D. I., & McCarron, T. L. (۲۰۰۵). Shear behavior of deep beams with openings. *ACI Structural Journal*, ۱۰۲(۱), ۱۱۷-۱۲۵.
۳. Vecchio, F. J., & Collins, M. P. (۱۹۸۶). The Modified Compression Field Theory for concrete elements subjected to shear. *ACI Journal Proceedings*, ۸۳(۲), ۲۱۹-۲۳۱.
۴. ACI Committee ۳۱۸. (۲۰۱۹). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. American

