Kateb
Scientific–Research Journal of Technology and Engineering
Vol.1 | No.1 | Autumn & Winter 2025–2026
پوهنتون کاتب
Kateb University
Email: kjte@kateb.edu.af | Homepage: kjte.kateb.edu.af

Performance Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Sheets in the Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Beam–Column Joints: A Comparison of Different Fiber Configurations and Orientations

Zaher Rezaie[1]✉, **Ali Reza Alizadeh**[2]

1. Faculty Member, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kateb University, Kabul, Afghanistan. (Corresponding Author) Email: zaher.rezaie@kateb.edu.af
2. Visiting Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kateb University, Kabul, Afghanistan.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 31/01/2026
Received in revised form: 03/02/2026
Accepted: 11/03/2026
Available online: 19/03/2026

Keywords:
Seismic Retrofitting, Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP), Beam–Column Joints, Finite Element Analysis, ABAQUS, Fiber Orientation, Nonlinear Behavior

ABSTRACT

This study was conducted to comparatively evaluate the seismic performance of reinforced concrete beam–column joints strengthened with Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) sheets, with a particular focus on the effects of fiber configuration and orientation. To achieve this objective, nonlinear analyses were carried out using the Finite Element Method (FEM) in ABAQUS software. Two principal CFRP configurations, namely cross-ply and unidirectional layouts, along with three different fiber orientations (0°, 90°, and ±45°), were investigated. The numerical models were first validated through comparison with reliable experimental data. The results revealed that the cross-ply CFRP configuration with ±45° fiber orientation was the most effective strengthening scheme, increasing the ultimate load-carrying capacity of the joint by up to 38% compared with the unstrengthened specimen, while also providing a significant improvement in ductility. In contrast, the unidirectional ±45° configuration achieved a 28% increase in strength and was identified as an optimal solution from a practical and implementation-oriented perspective for projects with operational constraints. The findings indicate that the seismic performance of beam–column joints is highly sensitive to both the configuration and, more importantly, the orientation of CFRP fibers. This study provides a scientific basis for the informed selection of strengthening strategies and offers a framework for the development of technical guidelines aimed at the safe and cost-effective seismic retrofit of vulnerable structural joints in earthquake-prone regions.

Cite this article: Rezaie, Z. & Alizadeh, A. (2026). Performance Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Sheets in the Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Beam–Column Joints: A Comparison of Different Fiber Configurations and Orientations, *Kateb Scientific-Research Journal of Technology and Engineering*, 1 (1), 65-84.

© The Author(s). Publisher: Kateb University.

مجله علمی-تحقیقی
تکنالوژی و انجنیری کاتب
سال اول | شماره اول | خزان و زمستان ۱۴۰۴
Email: kjte@kateb.edu.af | Homepage: kjte.kateb.edu.af

ارزیابی عملکرد ورق‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن در بهسازی لرزه‌ای اتصالات تیر ــ ستون آهن کانکریتی مقایسهٔ پیکربندی‌ها و جهت‌های مختلف الیاف

ظاهر رضایی[۱] ✉، علی‌رضا علیزاده[۲]

۱. عضو کادر علمی دیپارتمنت انجنیری سیول، پوهنځی انجنیری، پوهنتون کاتب، کابل، افغانستان. (نویسنده مسئول).
ایمیل: zaher.rezaie@kateb.edu.af
۲. استاد قراردادی دیپارتمنت انجنیری سیول، پوهنځی انجنیری، پوهنتون کاتب، کابل، افغانستان.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله تحقیقی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱
تاریخ ارزیابی: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۸

واژه‌های کلیدی:
بهسازی لرزه‌ای، تقویت با CFRP، اتصالات تیر-ستون، تحلیل اجزای محدود، ABAQUS، جهت‌گیری الیاف، رفتار غیرخطی

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر–ستون بتن‌آرمهٔ تقویت‌شده با ورق‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن و با تمرکز بر تأثیر چیدمان و جهت‌گیری الیاف انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، تحلیل‌های غیرخطی با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس انجام گرفت. دو پیکربندی اصلی CFRP (آرایش متقاطع و تک‌جهته) و سه جهت‌گیری گوناگون الیاف (۰°، ۹۰° و ±۴۵°) بررسی شد. صحت مدل‌های عددی نخست با مقایسهٔ نتایج با داده‌های آزمایشگاهی معتبر تأیید گردید. مهم‌ترین یافته‌ها نشان داد که آرایش متقاطع CFRP با الیاف ±۴۵° مؤثرترین پیکربندی است که ظرفیت باربری نهایی اتصال را تا ۳۸٪ نسبت به حالت تقویت‌نشده افزایش داده و بهبود قابل‌توجهی در شکل‌پذیری ایجاد می‌کند. در برابر، آرایش تک‌جهتهٔ ±۴۵° با افزایش ۲۸٪ در مقاومت، به‌عنوان گزینه‌ای بهینه از نظر فنی‌اجرایی برای پروژه‌های با محدودیت‌های عملیاتی معرفی می‌شود. در پایان می‌توان نتیجه گرفت که انتقال‌پذیری عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر ـ ستون به‌طور حساسی وابسته به چیدمان و به‌ویژه جهت الیاف CFRP است. یافته‌های این مطالعه مبنای علمی برای انتخاب آگاهانهٔ روش تقویت و چارچوبی برای تدوین دستورالعمل‌های فنی به‌منظور بهسازی ایمن و اقتصادی اتصالات آسیب‌پذیر در مناطق زلزله‌خیز فراهم می‌آورد.

استناد: رضایی، ظاهر، و علیزاده، علی رضا (۱۴۰۴). ارزیابی عملکرد ورق‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن در بهسازی لرزه‌ای اتصالات تیر ـ ستون آهن کانکریتی مقایسهٔ پیکربندی‌ها و جهت‌های مختلف الیاف. *مجله علمی – تحقیقی تکنالوژی و انجنیری کاتب*، ۱ (۱)، ۸۴–۶۵.

ناشر: پوهنتون کاتب.
© نویسندگان.

مقدمه

سازه‌های بتن‌آرمه به‌عنوان یکی از رایج‌ترین انواع سازه‌ها در سراسر جهان، به‌مرور زمان و حتی پیش از پایان عمر مفید خود، در معرض آسیب‌های گوناگونی قرار می‌گیرند. زلزله‌های مخرب، خوردگی آرماتورها، تغییر کاربری ساختمان و افزایش بارهای بهره‌برداری، تغییر در آیین‌نامه‌های طراحی و نیز نواقص اجرایی از جملهٔ عامل‌هایی هستند که لزوم بهسازی و مقاوم‌سازی این سازه‌ها را ناگزیر می‌سازند. در این‌میان، اتصالات تیر-ستون به‌عنوان بحرانی‌ترین ناحیه در قاب‌های خمشی بتن‌آرمه شناخته می‌شوند. این اتصالات نقش اصلی در انتقال بارهای ثقلی و لنگرهای ناشی از زلزله را بر عهده دارند و هرگونه ضعف در طراحی، جزئیات آرماتورگذاری یا اجرای این ناحیه، می‌تواند به گسیختگی زودرس و حتی فروپاشی کامل سازه انجامد؛ حتی زمانی که سایر اعضا از مقاومت کافی برخوردار باشند [۱, ۲].

با توجه به اهمیت حیاتی اتصالات، روش‌های متعددی برای مقاوم‌سازی آن‌ها توسعه یافته است. استفاده از ژاکت‌های فولادی و بتن‌آرمه، مؤثر است اما با معایبی همچون افزایش چشم‌گیر ابعاد عضو، وزن مردهٔ سازه، هزینه‌های بالا و دشواری اجرا همراه است [۳]. در دو دههٔ اخیر، کاربرد پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف[1] به‌ویژه نوع کربنی آن (CFRP)، به‌عنوان یک راهکار نوین، کارآمد و اقتصادی مورد توجه گستردهٔ پژوهشگران و مهندسان قرار گرفته است. نسبت مقاومت به وزن فوق‌العاده، مدول الاستیسیتهٔ بالا، مقاومت عالی در برابر خوردگی، انعطاف‌پذیری در اجرا و کمترین اختلال در بهره‌برداری از سازه، از جملهٔ مزایای بارز این مواد نسبت به روش‌های سنتی است [۴, ۵].

عطاری و همکاران (۲۰۱۹) با مطالعهٔ تجربی سیستم‌های گوناگون FRP، نشان دادند که ورق‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه[2] تأثیر قابل‌توجهی در بهبود عملکرد اتصالات نداشته و در برابر، CFRP عملکرد برتری از خود نشان می‌دهد [۴]. پروین و وو (۲۰۲۲) با استفاده از تحلیل اجزای محدود، به بررسی تأثیر زاویهٔ لایه‌های CFRP پرداختند و به این نتیجه رسیدند که جهت‌گیری ۴۵± ° بهینه‌ترین حالت برای بهبود ظرفیت برشی و شکل‌پذیری اتصال زیر بارگذاری ترکیبی محوری و چرخه‌ای است [۶]. فیاض و همکاران (۲۰۲۴) اثر هم‌زمان CFRP و بتن فوق‌مقاوم تقویت‌شده با الیاف[3] را به‌صورت عددی مطالعه کردند و بهبود سختی، مقاومت و جذب انرژی را گزارش دادند [۷].

در یک مطالعهٔ تجربی، کارایانیس و گولیاس (۲۰۲۴) از نوارهای CFRP به‌صورت آرایش ضربدری در پیرامون اتصال بهره گرفتند و افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در استحکام اتصال مشاهده کردند. آن‌ها افزایش مقاومتی حدود ۴۰٪ را برای این پیکربندی گزارش دادند [۸]. بونجوم و همکاران (۲۰۲۴) با مدل‌سازی عددی نشان دادند که ورق‌های CFRP به‌طور مؤثری ظرفیت باربری و شکل‌پذیری اتصالات را افزایش می‌دهند و مقاومت در برابر تنش‌های برشی و خمشی را بهبود می‌بخشند [۵]. الوبایدی و الزهیری (۲۰۲۴) بر کاهش قابل‌توجه تغییر شکل زیر بار و در نتیجه افزایش سختی و پایداری سازه در اثر کاربرد CFRP تأکید کردند [۹]. تفسیروژیمن و همکاران (۲۰۲۴) به‌گونه‌ای مشخص بر اهمیت حیاتی جهت‌گیری و

1. Fiber Reinforced Polymer (FRP)
2. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)
3. Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)

لایه‌بندی CFRP برای بهینه‌سازی ویژگی‌های مکانیکی سازه‌های بتن‌آرمه صحه گذاشتند [۱۰]. ازسوی‌دیگر، کماروزامان و یحیی (۲۰۲۴) هشدار دادند که با وجود عملکرد مطلوب CFRP، مدیریت پیوند میان CFRP و بتن در شرایط بحرانی از چالش‌های اساسی این روش است [۲]. در پایان، کازاکو و همکاران (۲۰۲۴) بر لزوم توجه به مقرون‌به‌صرفه بودن و توجیه اقتصادی کاربرد گستردهٔ CFRP تأکید کردند [۱۱].

جدول ۱– خلاصهٔ پژوهش‌های مرتبط با مقاوم‌سازی اتصالات تیر–ستون (بر اساس مراجع ذکرشده در متن)

مرجع	تمرکز مطالعه	روش‌شناسی	یافته‌های کلیدی	ارتباط با مطالعهٔ حاضر
عطاری و همکاران (Attari et al., 2019)	سیستم‌های FRP ترکیبی	آزمایشگاهی	عدم کارایی GFRP؛ برتری CFRP	تأیید مادهٔ بهینه (CFRP)
پروین و وو (Karayannis & Golias, 2022)	جهت‌گیری لایه‌های CFRP	تحلیل المان محدود	زاویه ±۴۵° برای بهینه‌سازی برش/شکل‌پذیری	پشتیبانی از بررسی زاویهٔ الیاف
فیاض و همکاران (Bounjoum et al., 2024)	ترکیب CFRP و UHPFRC	عددی	بهبود عملکرد کامپوزیت	زمینه‌ای برای ترکیب مواد
کارایانیس و گولیاس (Alobaidi & Al-Zuhairi, 2024)	چیدمان ضربدری CFRP	آزمایشگاهی	افزایش ٪۴۰ مقاومت	مبنا برای پیکربندی ضربدری
بونجوم (Tafsirojjaman et al., 2024)	اثربخشی ورق‌های CFRP	عددی	بهبود ٪۴۰–۳۵ ظرفیت باربری	تأیید رویکرد مدل‌سازی
الوبایدی و الزهیری (Kamaruzaman & Yahya, 2024)	بهبود سختی	آزمایشگاهی	کاهش ٪۶۰ تغییر شکل	معیار ثانویهٔ عملکرد
تفسیروژیمن و همکاران (Cazacu et al., 2024)	بهینه‌سازی جهت الیاف	تحلیلی	اهمیت حیاتی جهت‌گیری	پایهٔ نظری
کماروزامان و یحیی (Singh et al., 2014)	رفتار فصل مشترک	آزمایشگاهی	ریسک جدایش	ملاحظات دیزاین
کازاکو و همکاران (Mander et al., 1988)	تحلیل هزینه - فایده	مطالعهٔ موردی	مزایای اقتصادی	عوامل اجرایی

مرور پژوهش‌های پیشین (جدول ۱) نشان می‌دهد که با وجود تأکید برخی پژوهشگران بر اهمیت زاویهٔ الیاف و چیدمان ورق‌ها، مطالعات موجود بیشتر به بررسی یک پیکربندی ویژه محدود شده‌اند. از این‌رو، انجام پژوهشی که به مقایسهٔ مستقیم و هم‌زمان چیدمان‌های گوناگون و جهت‌گیری الیاف بپردازد، ضروری به نظر می‌رسد.

۱. چارچوب نظری پژوهش

۱_۱. بیان مسأله

اتصالات تیر–ستون در سازه‌های بتن‌آرمه به‌عنوان بحرانی‌ترین ناحیه در قاب‌های خمشی شناخته می‌شوند. این اتصالات نقشی اساسی در انتقال هم‌زمان نیروهای برشی، لنگرهای خمشی و نیروهای

محوری ایفا می‌کنند. تجربه‌های زلزله‌های گذشته و مطالعات آزمایشگاهی متعدد نشان داده‌اند که شکل‌پذیری ناکافی، ظرفیت برشی محدود و جزئیات ضعیف آرماتورگذاری در ناحیهٔ اتصال، از عوامل اصلی گسیختگی زودرس و حتی فروپاشی کامل سازه‌ها هستند [۱, ۲].

با وجود پیشرفت‌های چشم‌گیر در آیین‌نامه‌های طراحی، هنوز بسیاری از سازه‌های موجود که پیش از تدوین ضوابط لرزه‌ای دقیق ساخته شده‌اند، فاقد مقاومت و شکل‌پذیری کافی در اتصالات خود می‌باشند. از این‌رو، بهسازی لرزه‌ای اتصالات موجود به یک نیاز فوری و ناگزیر در مهندسی زلزله تبدیل شده است. در این‌میان، استفاده از ورق‌های پلیمری CFRP به‌دلیل نسبت مقاومت به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی و سهولت اجرا، به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارهای مقاوم‌سازی مطرح گردیده است.

با این‌حال، مسألهٔ اساسی آن است که اگرچه پژوهش‌های متعدد اثربخشی کلی CFRP را تأیید کرده‌اند، هنوز یک چارچوب نظام‌مند و قطعی برای انتخاب بهینهٔ «چیدمان» و «جهت‌گیری الیاف» CFRP در اتصالات تیر–ستون وجود ندارد. مهندسان طراح با انبوهی از گزینه‌های پیش رو مواجه هستند: آیا از آرایش متقاطع استفاده کنند یا تک‌جهته؟ الیاف در چه زاویه‌ای قرار گیرند؟ کدام ترکیب بیشترین بهبود را در مقاومت و شکل‌پذیری ایجاد می‌کند؟ و مهم‌تر آن‌که آیا می‌توان با انتخاب بهینهٔ جهت الیاف در یک چیدمان ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر، به عملکردی نزدیک به چیدمان پیچیده‌تر دست یافت؟ پاسخ به این پرسش‌ها نیازمند یک بررسی مقایسه‌ای نظام‌مند است که متأسفانه در ادبیات فنی موجود به‌گونه‌ای جامع به آن پرداخته نشده است.

۲_۱. شکاف پژوهشی

مرور نظام‌مند ادبیات پژوهش (جدول ۱) به‌روشنی نشان می‌دهد که:

۱. مطالعات پیشین بیشتر بر یک پیکربندی ویژه متمرکز بوده‌اند. بیشتر پژوهش‌های تجربی و عددی، یا تنها به بررسی آرایش ضربدری [۶, ۸] و یا تنها به ارزیابی چیدمان تک‌جهته [۵] پرداخته‌اند. مقایسهٔ مستقیم این دو چیدمان در یک مطالعهٔ واحد با شرایط یکسان، تاکنون انجام نشده است.

۲. جهت‌گیری الیاف به‌عنوان متغیر مستقل در کنار چیدمان بررسی نشده است. اگرچه برخی پژوهشگران اهمیت زاویهٔ الیاف را تأکید کرده‌اند [۱۰, ۶]، هیچ پژوهشی تأثیر هم‌زمان «چیدمان» و «جهت الیاف» را به‌گونهٔ نظام‌مند مورد کنکاش قرار نداده است. به‌عبارت‌دیگر، معلوم نیست که آیا جهت بهینهٔ الیاف در یک چیدمان، به‌طور حتمی در چیدمان دیگر نیز بهینه است یا نه.

۳. دانش موجود بیشتر در سطح اثبات کارایی کلی CFRP متوقف شده و چارچوبی برای تصمیم‌گیری مهندسان بر پایهٔ اولویت‌های فنی (بیشینهٔ مقاومت) در برابر اولویت‌های اجرایی (سهولت و اقتصاد) ارائه نداده است.

بنابراین، شکاف پژوهشی که این پژوهش سعی در پر کردن آن دارد عبارت است از «عدم وجود یک مطالعهٔ مقایسه‌ای نظام‌مند که تأثیر توأمان دو چیدمان اصلی CFRP (متقاطع و تک‌جهته) و سه جهت‌گیری گوناگون الیاف (۰°، ۹۰° و ۴۵±°) را بر عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر–ستون بتن‌آرمه ارزیابی و ترکیب بهینه را بر پایهٔ معیارهای فنی و اجرایی معرفی کند».

۳_۱. پرسش‌های پژوهش

بر پایهٔ مسألهٔ پژوهش و شکاف دانش شناسایی‌شده، این پژوهش به دنبال پاسخگویی به پرسش‌های اصلی زیر است:

۱. پرسش نخست (مقایسه‌ای): هریک از چیدمان‌های متقاطع و تک‌جهتهٔ CFRP چه تأثیری بر ظرفیت باربری نهایی و شکل‌پذیری اتصالات تیر–ستون بتن‌آرمه دارند و کدام‌یک عملکرد برتری ارائه می‌دهد؟

۲. پرسش دوم (جهت‌گیری): جهت‌گیری الیاف (CFRP°۰، °۹۰ و °۴۵±) در هریک از چیدمان‌ها چه تأثیری بر رفتار اتصال دارد و آیا جهت بهینه در هر دو چیدمان یکسان است؟

۳. پرسش سوم (بهینه‌سازی): ترکیب بهینهٔ «چیدمان ـجهت الیاف» از دیدگاه بیشینه‌سازی مقاومت کدام است و آیا ترکیب بهینه از دیدگاه ملاحظات اجرایی و اقتصادی با آن متفاوت است؟

۴. پرسش چهارم (مقایسه با ادبیات): یافته‌های این پژوهش تا چه اندازه با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد و چه یافته‌های تازه‌ای را به دانش موجود می‌افزاید؟

۴_۱. اهداف و فرضیه‌های پژوهش

هدف اصلی این پژوهش، پر کردن شکاف دانش یادشده از راه یک تحلیل مقایسه‌ای و نظام‌مند با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS است. اهداف ویژهٔ این مطالعه عبارت‌اند از:

۱. مدل‌سازی و صحت‌سنجی رفتار اتصال تیر ـ ستون بتن‌آرمه در دو حالت تقویت‌نشده و تقویت‌شده با CFRP بر پایهٔ داده‌های تجربی معتبر [۲].

۲. بررسی و مقایسهٔ عملکرد دو چیدمان اصلی تقویت (آرایش متقاطع و آرایش تک‌جهته).

۳. ارزیابی تأثیر سه جهت‌گیری گوناگون الیاف (CFRP°۰، °۹۰ و °۴۵±) بر رفتار اتصال در هر یک از چیدمان‌های یادشده.

۴. تعیین ترکیب بهینهٔ «چیدمان–جهت الیاف» که بیشینهٔ بهبود را در ظرفیت باربری نهایی، شکل‌پذیری و جذب انرژی ایجاد می‌کند.

۵. ارائهٔ راهنمایی‌های کاربردی و مبتنی بر شواهد برای انتخاب روش بهینهٔ تقویت بر پایهٔ توأمان معیارهای فنی و ملاحظات اجرایی و اقتصادی.

این پژوهش بر فرضیه‌های اصلی زیر استوار است:

۱. استفاده از ورق‌های CFRP به‌طور کلی به بهبود معنادار رفتار لرزه‌ای اتصال تیر–ستون می‌انجامد.

۲. چیدمان ورق‌های CFRP یک پارامتر تعیین‌کننده در میزان این بهبود بوده و چیدمان متقاطع به‌دلیل ایجاد سیستم مقاومتی سه‌بعدی و یکپارچه، عملکرد برتری نسبت به چیدمان تک‌جهته ارائه می‌دهد.

۳. جهت‌گیری الیاف CFRP در هر چیدمان، پارامتری حیاتی و تأثیرگذار بر کارایی نهایی سیستم تقویت است.

۴. جهت‌گیری ۴۵±° الیاف، صرف‌نظر از گونهٔ چیدمان، به‌دلیل هم‌راستایی مطلوب با راه‌های اصلی تنش‌های برشی و کششی قطری در ناحیهٔ اتصال، مؤثرترین زاویه برای بهبود ظرفیت باربری و شکل‌پذیری خواهد بود.

۵. چیدمان تک‌جهته با الیاف ۴۵±° با وجود عملکرد پایین‌تر نسبت به حالت متقاطع، به‌دلیل سهولت اجرا و هزینهٔ کمتر، می‌تواند به‌عنوان گزینهٔ بهینهٔ فنی‌اجرایی در پروژه‌های با محدودیت عملیاتی مطرح گردد.

۲. نوآوری پژوهش

نوآوری این مطالعه در چهار محور زیر خلاصه می‌شود:

۱. مقایسهٔ مستقیم و هم‌زمان دو چیدمان اصلی CFRP در یک مطالعهٔ واحد با شرایط مرزی، بارگذاری و ویژگی‌های مواد یکسان که امکان قضاوت بی‌طرفانه و دقیق را فراهم می‌آورد.

۲. بررسی تأثیر متقابل «چیدمان» و «جهت الیاف» به‌عنوان دو متغیر مستقل و تعیین ترکیب بهینه برای هریک از معیارهای عملکردی.

۳. ارائهٔ دو سطح بهینگی شامل «بیشینهٔ عملکرد» و «بهینهٔ فنی‌اجرایی» که برای نخستین‌بار در این حوزه، شکاف میان پژوهش‌های آکادمیک و نیازهای عملی مهندسان را پوشش می‌دهد.

۴. توسعهٔ چارچوبی برای تدوین دستورالعمل‌های طراحی بر پایهٔ اولویت‌های پروژه که می‌تواند مبنایی برای آیین‌نامه‌های بهسازی لرزه‌ای قرار گیرد.

بر این‌اساس، در این پژوهش با بهره‌گیری از روش اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS، مدل‌های عددی اتصال تیر‌ـستون برای دو چیدمان اصلی CFRP و سه جهت‌گیری گوناگون الیاف ساخته می‌شود و عملکرد لرزه‌ای آن‌ها به‌گونهٔ مقایسه‌ای ارزیابی می‌گردد.

۳. روش تحقیق

این پژوهش یک مطالعهٔ عددی سیستماتیک مبتنی بر روش اجزای محدود[1] با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS است. انتخاب روش عددی به‌دلیل قابلیت شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح، کنترل دقیق متغیرها، کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و امکان بررسی سناریوهای متعدد در شرایط یکسان انجام شده است. در این بخش، همهٔ مراحل شامل طرح آزمایش، متغیرها، نمونه‌ها، کنترل‌ها، تکرارها، استانداردها، مدل‌سازی عددی و صحت‌سنجی به‌گونهٔ گام‌به‌گام تشریح می‌شود.

۳_۱. طرح آزمایش و متغیرهای پژوهش

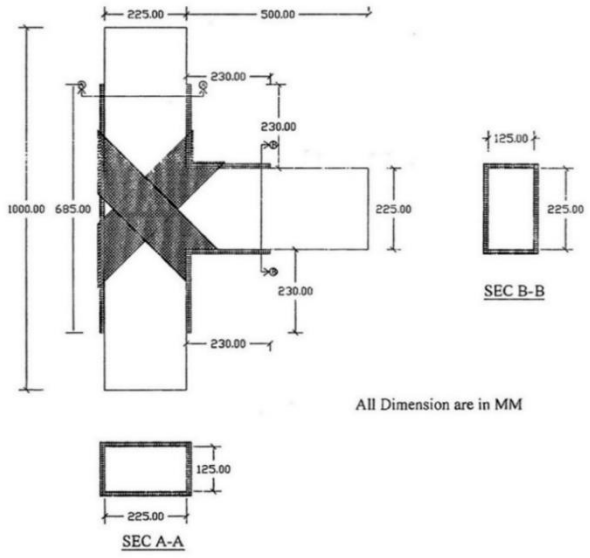
این مطالعه از نوع تحلیل عاملی کامل[2] با دو عامل اصلی است. دلیل انتخاب این طرح، قابلیت بررسی هم‌زمان اثرهای اصلی و اثرهای متقابل متغیرها بر پاسخ نهایی است.

1. FEM
2. Full Factorial Design

۱_۱_۳. متغیرهای مستقل

دو متغیر مستقل در این پژوهش وجود دارد:

۱. چیدمان ورق‌های CFRP: این متغیر در دو سطح تعریف شده است. سطح نخست، چیدمان متقاطع (ضربدری) است که برابر پژوهش مرجع [۲] به‌گونهٔ پوشش هم‌زمان ناحیهٔ اتصال در دو جهت مایل اجرا می‌شود (شکل ۱). این چیدمان به‌دلیل ایجاد شبکهٔ مقاومتی سه‌بعدی و توزیع یکنواخت تنش در ناحیهٔ اتصال شناخته شده است. سطح دوم، چیدمان تک‌جهته (موازی) است که به‌عنوان چیدمان پیشنهادی این پژوهش برای کاهش پیچیدگی اجرا و هزینه‌ها تعریف شده و ورق‌ها به‌گونهٔ موازی با محور تیر و ستون در ناحیهٔ اتصال اعمال می‌شوند (شکل ۳-ب).



شکل ۱- نحوه پوشش‌دهی اتصالات تیر-ستون با ورق‌های CFRP [برگرفته از ۲]

۲. جهت‌گیری الیاف CFRP: این متغیر در سه سطح ۰°، ۹۰° و ۴۵±° تعریف شده است. زاویهٔ ۰° به معنای هم‌راستایی الیاف با محور طولی تیر، زاویهٔ ۹۰° به معنای عمود بودن الیاف بر محور تیر، و زاویهٔ ۴۵±° به معنای قرارگیری متقارن الیاف در دو جهت مایل است.

۲_۱_۳. متغیر کنترل

یک نمونهٔ تقویت‌نشده (بدون CFRP) با مشخصات هندسی و آرماتورگذاری به‌طور کامل یکسان به‌عنوان نمونهٔ مبنا (کنترل) در نظر گرفته شد.

۳_۱_۳. متغیر وابسته

سه شاخص اصلی عملکرد لرزه‌ای شامل ظرفیت باربری نهایی، ضریب شکل‌پذیری و انرژی جذب‌شده به‌عنوان متغیرهای وابسته اندازه‌گیری و محاسبه می‌شوند.

تعداد کل مدل‌ها و تکرارها، با احتساب یک نمونهٔ کنترل و ۶ ترکیب حاصل از ۲×۳، ۷ مدل اصلی طراحی گردید. برای اطمینان از تکرارپذیری و کاهش خطای تصادفی، هر مدل دو بار مستقل با شرایط یکسان تحلیل شد.

۲_۳. مشخصات هندسی و جزئیات آرماتورگذاری

هندسهٔ اتصال تیر-ستون مورد مطالعه بر پایهٔ نمونهٔ استاندارد آزمایشگاهی پژوهش سینگ و همکاران [۲] انتخاب شده است. دلیل انتخاب این نمونه، وجود داده‌های تجربی معتبر برای صحت‌سنجی و همچنین نماینده بودن آن برای اتصالات رایج در سازه‌های بتن‌آرمهٔ موجود است. این نمونه برابر استاندارد IS ۴۵۶:۲۰۰۰ [۱۲] طراحی گردیده است. برابر مقالهٔ مرجع [۲]، ستون دارای مقطع مستطیلی ۲۲۵×۱۲۵ میلی‌متر با ارتفاع کلی ۱۰۰۰ میلی‌متر و تیر متصل به ستون نیز با مقطع مشابه ۲۲۵×۱۲۵ میلی‌متر و طول ۵۰۰ میلی‌متر (اندازه‌گیری‌شده از وجه ستون) مدل‌سازی شده است. جزئیات مشخصات هندسی اتصال در جدول ۲ ارائه شده است.

همچنین آرماتورهای طولی ستون شامل ۴ میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر (نسبت آرماتور ۱.۱۲٪) است. خاموت‌های ستون از میلگرد به قطر ۶ میلی‌متر با فاصلهٔ ۱۰۰ میلی‌متر در تمام ارتفاع ستون تعبیه شده‌اند. آرماتورهای طولی تیر نیز مشابه ستون، ۴ میلگرد به قطر ۱۰ میلی‌متر (نسبت آرماتور ۱.۱۲٪) است. خاموت‌های تیر با قطر ۸ میلی‌متر و فاصلهٔ ۱۰۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. پوشش بتن برای همهٔ وجوه ۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های مکانیکی میلگردهای فولادی برابر مقالهٔ مرجع [۲] در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۲ـ مشخصات هندسی اتصال (برحسب mm) [برگرفته از ۲]

جزء	مشخصه	مقدار
ستون	ابعاد مقطع	۱۲۵ × ۲۲۵
	ارتفاع	۱۰۰۰
	آرماتور طولی	۴φ۱۰
	خاموت	φ۶@۱۰۰
تیر	ابعاد مقطع	۱۲۵ × ۲۲۵
	طول	۵۰۰
	آرماتور طولی	۴φ۱۰
	خاموت	φ۸@۱۰۰
پوشش کانکریت	ضخامت	۲۵

۳_۳. ویژگی‌های مکانیکی مصالح

۳_۳_۱. بتن

برای مدل‌سازی رفتار بتن از مدل آسیب‌پلاستیک بتن[1] در ABAQUS استفاده شد. این مدل قابلیت شبیه‌سازی رفتار غیرخطی، ترک‌خوردگی زیر کشش، خردشدگی زیر فشار و کاهش سختی در باربرداری را دارا می‌باشد. پارامترهای مدل بر پایهٔ آیین‌نامهٔ ۲۶۲:۱۹۸۲IS [۱۳] و رابطهٔ مندر و همکاران [۱۱] تعیین گردید و جزئیات آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳ـ ویژگی‌های مکانیکی بتن [برگرفته از ۱۱]

پارامتر	مقدار	واحد
مقاومت فشاری مشخصه	۲۵	MPa
مقاومت کششی	۲.۲۵	MPa
مدول الاستیسیته	۲۵۰۰۰	MPa
نسبت پواسون	۰.۱۸	—
زاویهٔ اتساع	۳۶	degree
نسبت مقاومت دومحوره به تک‌محوره	۱.۱۶	—

۳_۳_۲. فولاد

میلگردهای فولادی با مدل الاستوپلاستیک سخت‌شونده و معیار تسلیم فون‌مایزس مدل‌سازی شدند. ویژگی‌های مکانیکی میلگردها بر پایهٔ نتایج آزمون کشش و برابر استاندارد ۴۵۶:۲۰۰۰IS [۱۲] ارائه‌شده در مقالهٔ مرجع [۲] تعریف گردید (جدول ۴). برابر مقالهٔ مرجع [۲]، مدول الاستیسیتهٔ میلگردهای فولادی برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته شد.

جدول ۴ـ ویژگی‌های مکانیکی میلگردهای فولادی [برگرفته از ۲]

۳_۳_۳. ورق‌های CFRP

ورق‌های CFRP به‌عنوان مواد ارتوتروپیک خطی تا گسیختگی در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شدند و جزئیات ویژگی‌های مکانیکی این ورق‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به ماهیت شکنندهٔ الیاف کربن و رفتار الاستیک خطی آن‌ها تا نقطهٔ گسیختگی، این فرض با دقت بالایی رفتار واقعی را شبیه‌سازی می‌کند.

1. CONCRETE DAMAGE PLASTICITY

جدول ۵ـ ویژگی‌های مکانیکی ورق‌های CFRP [برگرفته از ۲]

جزء	قطر (mm)	مقاومت نهایی (MPa)	مقاومت تسلیم (MPa)	درصد کشیدگی
خاموت	φ۶	۶۱۲.۷	۴۴۲.۴	۳۲.۷
خاموت	φ۸	۶۷۶.۲	۵۵۷.۰	۲۵.۸
ستون / تیر	φ۱۰	۶۷۰.۰	۵۵۴.۰	۲۰.۵

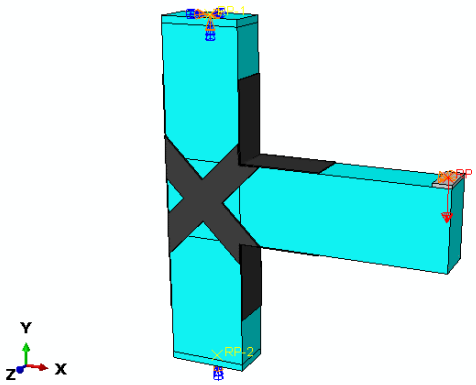
۴_۳. شرایط مرزی و پروتکل بارگذاری

۱_۴_۳. شرایط مرزی

برای شبیه‌سازی دقیق شرایط تکیه‌گاهی نمونهٔ آزمایشگاهی، دو انتهای ستون به‌گونهٔ گیردار کامل مفروض گردید. به این معنا که همهٔ درجات آزادی انتقالی و دورانی در این نقاط مقید شده‌اند (Ux=Uy=Uz=Rx=Ry=Rz=۰). این شرایط مرزی نمایندهٔ ستون‌های متصل به پی و دیافراگم صلب سقف در سازه‌های واقعی است. این شرایط در شکل ۲، که در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده، نشان داده شده است.

۳-۴-۲. پروتکل بارگذاری

بارگذاری به‌گونهٔ کنترل جابه‌جایی[1] با نرخ ثابت ۲ میلی‌متر بر گام تا جابه‌جایی نهایی ۵۰ میلی‌متر در انتهای تیر اعمال گردید. برای جلوگیری از تمرکز تنش، یک صفحهٔ صلب با المان R3D4 در انتهای تیر تعریف و بار به نقطهٔ مرجع و به‌گونهٔ یک‌جهته و رو به پایین آن اعمال شده و دو نقطهٔ مرجع در بالا و پایین ستون به نمایندگی از این دو سطح، درجات آزادی آن را بسته است (شکل ۲).

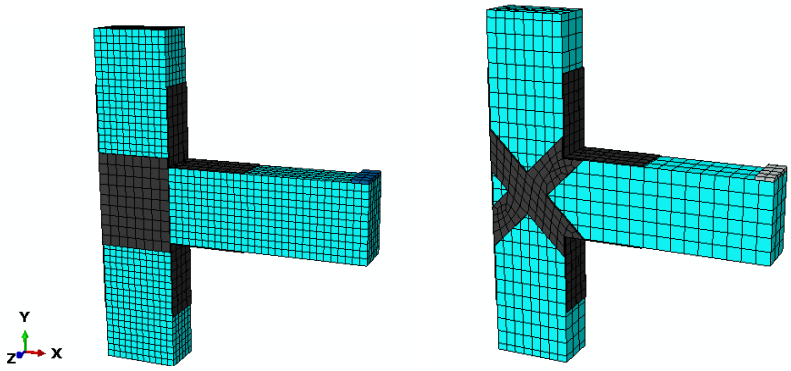


شکل ۲ـ شرایط مرزی و بارگذاری مدل اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS (خروجی نرم‌افزار ABAQUS، مدل‌سازی حاضر)

1. DISPLACEMENT-CONTROL

۵_۳. مدل‌سازی اجزای محدود

مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار ABAQUS انجام شد. شکل ۳ مدل‌های مش‌بندی‌شده را برای چیدمان نخست و دوم نشان می‌دهد.



(ب) (الف)

شکل ۳ـ مش‌بندی مدل اتصال تیرـستون تقویت‌شده با CFRP در چیدمان: الف) نخست و ب) دوم (خروجی نرم‌افزار ABAQUS، مدل‌سازی حاضر)

۱_۵_۳. گونهٔ المان‌ها

گونهٔ المان برای قطعهٔ بتنی، میلگردها، ورق‌های CFRP و صفحهٔ صلب در مدل‌سازی اتصال تیرـستون برابر جدول ۶ تعریف شد. لازم به ذکر است که الیاف کربن نیز از گونهٔ تک‌جهته تعریف شده‌اند.

جدول ۶ـ گونهٔ المان‌ها [برگرفته از ۲]

جزء	نوع المان	خانواده	تعداد المان
کانکریت	C3D8R	سه‌بعدی تنش	۴۵۲۸
میلگرد	C3D2	خرپا	۱۲۴۶
CFRP	S4R	پوسته	۸۲۴
صفحه صلب	R3D4	صلب	۳۲

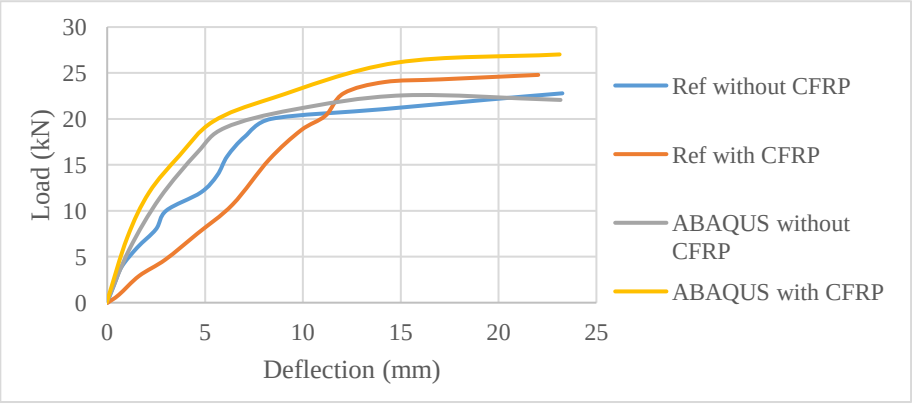
۲_۵_۳. تحلیل حساسیت مش

برای تعیین اندازهٔ بهینهٔ مش، تحلیل حساسیت با پنج اندازهٔ گوناگون (۳۰، ۲۵، ۲۰، ۱۵ و ۱۰ میلی‌متر) انجام شد. بدین‌گونه که نخست اندازه‌های مش بزرگ‌تری انتخاب گردید و نتایج با مقادیر به‌دست‌آمده از مقالهٔ مرجع [۲] مورد مقایسه قرار گرفت. سپس اندازهٔ مش کوچک‌تر تعریف و نتایج مقایسه شد. با توجه به مقایسه‌های انجام‌شده، نتایج نشان داد که کاهش اندازهٔ مش از ۲۰ به ۱۵ میلی‌متر، تنها ۲.۵٪ تغییر در نیروی نهایی ایجاد می‌کند، اما ۶۸٪ افزایش زمان تحلیل را به همراه دارد. از این‌رو، اندازهٔ مش ۲۰ میلی‌متر

به‌عنوان تعادل مطلوب میان دقت و هزینهٔ محاسباتی انتخاب گردید. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد، ویژگی‌های مواد و شرایط مدل‌سازی برابر مقالهٔ مرجع [۲] انجام شده است.

۶_۳. صحت‌سنجی مدل عددی

شکل ۴ نمودار نیرو ـ جابه‌جایی را برای اتصال تیرـستون بدون CFRP و دارای CFRP در مرجع مورد بررسی [۲] به همراه نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی‌های این پژوهش در نرم‌افزار ABAQUS نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴، نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی‌های نمونهٔ بدون CFRP مطابقت خوبی با مرجع دارد. تفاوت نمونهٔ همراه با ورق‌های تقویت‌کنندهٔ CFRP در این است که چسباندن این ورق‌ها به نمونه باعث بهبود ویژگی‌های این اتصالات می‌شود. پس انتظار می‌رود که نمودار در سطح بالاتری قرار گیرد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی‌های عددی از دقت خوبی برخوردار است. برابر این نمودار، نیروی تسلیم در حالت مرجع بدون ورق CFRP برابر 20kN بوده است که در مدلسازی‌ها این مقدار در حدود 19kN به دست آمد. بیشترین نیروی قابل تحمل نیز در این حالت در مدلسازی‌ها برابر 22kN است. با وجود ورق CFRP نیروی تسلیم در مدل‌سازی حدود 21kN به دست آمد و در بیشترین مقدار خود به 27kN رسید که نشان‌دهندهٔ افزایش ۲۲.۷ درصدی در بار قابل تحمل خود است. لازم به ذکر است مقالهٔ مرجع که صحت‌سنجی شد، به‌عنوان چیدمان اول معرفی گردید. حال جهت‌گیری الیاف در چیدمان اول و چیدمان دوم مورد بررسی قرار می‌گیرد تا تأثیر همهٔ عوامل مشخص شود.



شکل ۴ـ مقایسهٔ نمودار نیرو ـ جابه‌جایی نتایج مدل‌سازی با داده‌های مرجع برای حالت‌های تقویت‌نشده و تقویت‌شده با CFRP

[تحلیل حاضر مبتنی بر داده‌های ۲]

۷_۳. روش انجام کار

در این پژوهش، مراحل انجام کار به‌ترتیب زیر صورت گرفته است:

۱_۷_۳. گام نخست: صحت‌سنجی مدل عددی

نخست مدل ارائه‌شده در مقالهٔ مرجع [۲] در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی گردید. این مدل شامل اتصال تیر–ستون تقویت‌نشده و تقویت‌شده با چیدمان متقاطع CFRP می‌باشد. نتایج تحلیل عددی با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه و صحت‌سنجی انجام شد.

۲_۷_۳. گام دوم: تعریف چیدمان دوم

پس از اطمینان از دقت مدل‌سازی، چیدمان دوم (تک‌جهته) معرفی گردید. در این چیدمان، ورق‌های CFRP به‌گونهٔ موازی با محور تیر و ستون در ناحیهٔ اتصال اعمال شدند تا تأثیر آرایش ورق‌ها بر رفتار اتصال بررسی گردد.

۳_۷_۳. گام سوم: اعمال جهت‌گیری‌های گوناگون الیاف

برای هریک از دو چیدمان (متقاطع و تک‌جهته)، سه جهت‌گیری گوناگون الیاف (۰°، ۹۰° و ±۴۵°) تعریف گردید. بدین ترتیب، ۶ مدل تقویت‌شده به همراه یک مدل کنترل (بدون تقویت) ایجاد شد.

۴_۷_۳. گام چهارم: انجام تحلیل‌ها

همهٔ مدل‌ها زیر بارگذاری یکسان استاتیکی (کنترل جابه‌جایی) تحلیل شدند. برای اطمینان از تکرارپذیری، هر مدل دو بار مستقل تحلیل گردید. نتایج شامل نمودارهای نیرو ـجابه‌جایی و مقادیر عددی شاخص‌های عملکرد استخراج شد.

۵_۷_۳. گام پنجم: استخراج و تحلیل نتایج

از نمودارهای نیرو ـجابه‌جایی، شاخص‌های عملکرد لرزه‌ای (ظرفیت باربری نهایی) محاسبه گردید. سپس تأثیر چیدمان و جهت‌گیری الیاف برای این شاخص‌ها ارزیابی شد.

۶_۷_۳. گام ششم: مقایسه و تعیین ترکیب بهینه

نتایج مدل‌های گوناگون با یکدیگر و با نمونهٔ کنترل مقایسه شد. در پایان ترکیب بهینه از دیدگاه بیشینه‌سازی مقاومت و همچنین از دیدگاه ملاحظات اجرایی تعیین گردید.

۴. نتایج و نمودارها

در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی اتصالات تیر–ستون تقویت‌شده با ورق‌های CFRP در دو چیدمان اصلی (متقاطع و تک‌جهته) و زیر سه جهت‌گیری گوناگون الیاف (۰°، ۹۰° و ±۴۵°) ارائه می‌گردد. شاخص اصلی ارزیابی، نمودارهای نیرو ـجابه‌جایی است که ظرفیت باربری، شکل‌پذیری و رفتار غیرخطی اتصالات را به‌گونهٔ کمی نشان می‌دهند. شکل‌های ۵ تا ۷ خلاصه‌ای گرافیکی از این رفتارها هستند.

۱_۴. بررسی چیدمان نخست

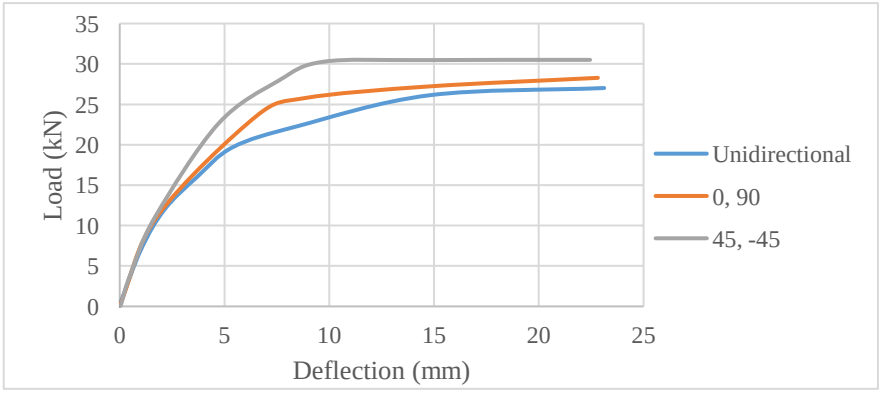
چیدمان نخست، منطبق بر پژوهش مرجع [۲]، به‌گونهٔ پوشش ضربدری ورق‌های CFRP در ناحیهٔ اتصال تعریف شد (شکل ۵). عملکرد این چیدمان زیر سه سناریوی جهت‌گیری الیاف بررسی گردید (شکل ۵):

۱. حالت تک‌جهته (°۰ در راستای طولی تیر): این حالت به‌عنوان مبنا در نظر گرفته شد. بیشترین نیروی قابل تحمل در این حالت ۲۷ کیلونیوتن و نیروی تسلیم حدود ۲۱ کیلونیوتن به دست آمد که نشان‌دهندهٔ بهبود نخستین نسبت به نمونهٔ تقویت‌نشده (۲۲ کیلونیوتن) است.

۲. حالت دولایه با جهت‌های °۰ و °۹۰: افزودن لایهٔ دوم عمود بر لایهٔ نخست، به افزایش جزئی در ظرفیت نهایی انجامید. بیشترین نیرو به ۲۸.۲ کیلونیوتن رسید که نسبت به حالت تک‌جهته، افزایشی معادل ٪۴.۵ را نشان می‌دهد. این بهبود نشان می‌دهد که اضافه کردن مقاومت در جهت عمود، اگرچه مفید است، تأثیر تعیین‌کننده‌ای در این پیکربندی ندارد.

۳. حالت دولایه با جهت‌های °۴۵+ و °۴۵−: این جهت‌گیری، مؤثرترین عملکرد را در چیدمان متقاطع به نمایش گذاشت. نمودار نیرو ـجابه‌جایی (شکل ۵) شیب نخستین تندتر و ناحیهٔ پلاستیک گسترده‌تری را نشان داد. بیشترین نیروی قابل تحمل به ۳۰.۵ کیلونیوتن افزایش یافت که نسبت به حالت تک‌جهته، افزایش قابل‌توجه ٪۱۳ و نسبت به نمونهٔ تقویت‌نشده، افزایش چشم‌گیر ٪۳۸ را ثبت کرد. این جهت‌گیری به‌وضوح باعث جذب انرژی بیشتر و تأخیر در گسیختگی می‌شود.

نتیجهٔ کلیدی چیدمان نخست این است که در آرایش ضربدری، جهت‌گیری الیاف °۴۵± بهینه‌ترین حالت است که بیشینهٔ بهبود در ظرفیت باربری نهایی (٪۳۸) و شکل‌پذیری را فراهم می‌آورد.



شکل ۵ـ نمودار نیرو ـجابه‌جایی برای جهت‌گیری‌های گوناگون الیاف در چیدمان نخست (نتایج تحلیل عددی حاضر)

۲_۴. بررسی چیدمان دوم

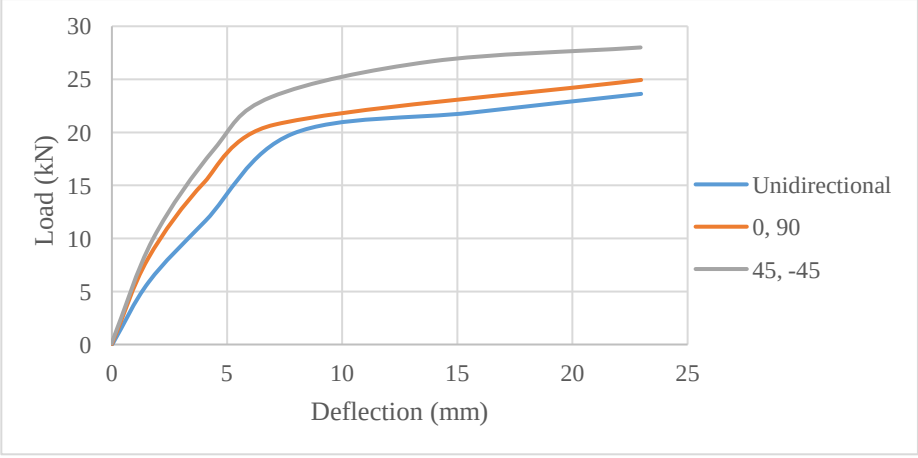
در چیدمان دوم، ورق‌های CFRP به‌گونهٔ موازی با محور تیر و ستون و بدون تقاطع، در ناحیهٔ اتصال اعمال شدند (شکل ۶). این چیدمان بیشتر برای بررسی قابلیت اجرا و هزینهٔ کمتر در نظر گرفته شده بود. همان سه سناریوی جهت‌گیری در این چیدمان نیز تحلیل شد (شکل ۶):

۱. حالت تک‌جهته (°۰): بیشترین نیرو در این حالت به ۲۳.۶ کیلونیوتن کاهش یافت. این مقدار حدود ٪۱۲.۵ کمتر از حالت مشابه در چیدمان متقاطع (۲۷ کیلونیوتن) است که نشان‌دهندهٔ نقش حیاتی هندسهٔ ضربدری در تحمل بارهای پیچیدهٔ اتصال می‌باشد.

۲. حالت دولایه با جهت‌های °۰ و °۹۰: عملکرد مشابهی با کاهش نسبی نشان داد. بیشترین نیرو به ۲۵ کیلونیوتن رسید که نسبت به حالت مشابه در چیدمان نخست (۲۸.۳ کیلونیوتن)، حدود ٪۱۱ افت داشت.

۳. حالت دولایه با جهت‌های °۴۵+ و °۴۵−: این جهت‌گیری دوباره بهترین عملکرد را در چیدمان دوم داشت و بیشترین نیرو را به ۲۸ کیلونیوتن رساند. اگرچه این مقدار از نقطهٔ اوج چیدمان متقاطع (°±۴۵) کمتر است، اما همچنان نشان‌دهندهٔ افزایش ٪۲۸ نسبت به نمونهٔ تقویت‌نشده است. مقایسه با حالت مشابه در چیدمان نخست، افت ٪۶.۶ را نشان می‌دهد.

نتیجهٔ کلیدی چیدمان دوم این است که حتی در یک چیدمان ساده‌تر (تک‌جهته)، انتخاب جهت بهینهٔ الیاف (°±۴۵) به بهبودی قابل قبول (٪۲۸) در مقاومت می‌انجامد. اگرچه از دیدگاه عددی از چیدمان متقاطع پایین‌تر است؛ از این‌رو از جنبهٔ عملی و اجرایی می‌تواند گزینهٔ مطلوبی باشد.

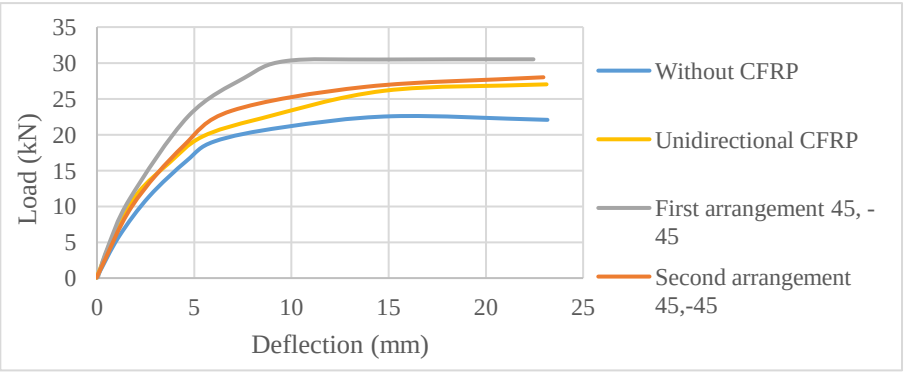


شکل ۶ـ نمودار نیرو ـجابه‌جایی برای جهت‌گیری‌های گوناگون الیاف در چیدمان دوم (نتایج تحلیل عددی حاضر)

۳_۴. مقایسهٔ جامع دو چیدمان و حالت مبنا

برای درک کامل تأثیر متغیرها، مقایسه‌ای کلی میان بهترین حالت‌های هر چیدمان و نمونهٔ تقویت‌نشده در شکل ۷ ارائه شده است. خلاصهٔ این مقایسه به شرح زیر است:

۱. نمونهٔ تقویت‌نشده: بیشترین بار ۲۲ کیلونیوتن.
۲. چیدمان متقاطع تک‌جهته (°۰): بیشترین بار ۲۷ کیلونیوتن (افزایش ۲۲.۷٪).
۳. چیدمان دوم با الیاف °۴۵±: بیشترین بار ۲۸ کیلونیوتن (افزایش ۲۸٪).
۴. چیدمان متقاطع با الیاف °۴۵±: بیشترین بار ۳۰.۵ کیلونیوتن (افزایش ۳۸٪).



شکل ۷ـ نمودار مقایسه‌ای نیرو ـجابه‌جایی برای حالت‌های بهینهٔ هر چیدمان و نمونهٔ تقویت‌نشده (نتایج تحلیل عددی حاضر)

این سلسله‌مراتب عددی به‌روشنی نشان می‌دهد که:

۱. هرگونه استفاده از CFRP به بهبود عملکرد می‌انجامد.

۲. چیدمان (آرایش) ورق‌های CFRP تأثیر بسزایی دارد: آرایش ضربدری به‌گونهٔ سیستماتیک بر آرایش موازی برتری دارد، که می‌تواند ناشی از ایجاد یک سازوکار مقاومتی سه‌بعدی و یکپارچه‌تر باشد.

۳.جهت الیاف، عامل تعیین‌کننده در هر چیدمان است: جهت‌گیری °۴۵± در هر دو چیدمان بهترین نتایج را تولید کرد؛ زیرا به‌طور مؤثرتری در برابر تنش‌های برشی و کششی ترکیبی که در اتصال حاکم است، مقاومت می‌کند.

این نتایج کمی، پایهٔ مستحکمی برای تحلیل سازوکارهای مؤثر و مقایسه با یافته‌های دیگر پژوهشگران در بخش بعدی فراهم می‌آورد.

۵. بحث و تحلیل

نتایج این پژوهش به‌روشنی نشان می‌دهد که چیدمان و جهت‌گیری الیاف CFRP دو عامل تعیین‌کننده در عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر-ستون هستند. یافته‌های بخش نتایج حاکی از برتری چیدمان متقاطع با جهت‌گیری °۴۵± است که بیشینهٔ افزایش ۳۸٪ در ظرفیت باربری نهایی را نسبت به نمونهٔ تقویت‌نشده به همراه دارد. این یافته با نتایج مطالعات پیشین همسو است. برای نمونه، کارایانیس و گولیاس [۸] نیز بر مزیت زاویهٔ °۴۵± در بهبود رفتار برشی و شکل‌پذیری تأکید کرده‌اند. همچنین، الوبایدی و الزهیری [۹] افزایش ۴۰٪ مقاومت را برای چیدمان متقاطع گزارش کرده‌اند که تأییدی بر نتایج حاضر است.

ازسوی‌دیگر، بهبود ۲۸٪ مشاهده‌شده در چیدمان تک‌جهتهٔ °±۴۵ ـ اگرچه از دیدگاه عددی کمتر است ـ از جنبه‌های عملی و اجرایی اهمیت دارد. این موضوع نشان می‌دهد که در پروژه‌هایی با محدودیت‌های فضایی، هزینه‌ای یا اجرایی، می‌توان با بهینه‌سازی جهت الیاف حتی در یک چیدمان ساده‌تر، به بهبود چشم‌گیری دست یافت. این دیدگاه با نگرش کازاکو و همکاران [۱۱] در مورد لزوم توجه به ملاحظات اقتصادی در به‌کارگیری CFRP همخوانی دارد.

با این‌حال، برتری مکانیکی چیدمان متقاطع را نمی‌توان نادیده گرفت. این برتری می‌تواند ناشی از سامانهٔ مقاومتی یکپارچه و سه‌بعدی باشد که توسط آرایش ضربدری ایجاد می‌شود و به‌طور مؤثرتری تنش‌های پیچیده در ناحیهٔ اتصال را تحمل می‌کند. در برابر، چیدمان تک‌جهته بیشتر در یک راستا عمل می‌کند و ممکن است در کنترل همهٔ حالت‌های تنشی به یک اندازه مؤثر نباشد.

در پایان، این پژوهش بر یافته‌های مطالعاتی مانند تفسیروژیمن و همکاران [۱۰] که بر اهمیت حیاتی جهت‌گیری الیاف تأکید داشتند، صحه می‌گذارد و آن را با ارائهٔ یک مقایسهٔ سیستماتیک میان دو چیدمان رایج بسط می‌دهد. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی برای تدوین راهنماهای فنی دقیق‌تر در بهسازی اتصالات باشد.

۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این پژوهش به‌منظور ارزیابی مقایسه‌ای عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر–ستون تقویت‌شده با ورق‌های CFRP و با تمرکز بر تأثیر چیدمان و جهت‌گیری الیاف انجام شد. مهم‌ترین یافته‌ها به شرح زیر است:

۱. چیدمان متقاطع (ضربدری) با جهت‌گیری الیاف °±۴۵ به‌عنوان مؤثرترین پیکربندی شناسایی شد که ظرفیت باربری نهایی اتصال را تا ۳۸٪ نسبت به حالت تقویت‌نشده افزایش می‌دهد و بهبود قابل‌توجهی در شکل‌پذیری ایجاد می‌کند.

۲. چیدمان تک‌جهته با جهت‌گیری °±۴۵ نیز بهبود ۲۸٪ در مقاومت را نشان می‌دهد که از دیدگاه فنی‌اجرایی و در پروژه‌های با محدودیت‌های عملیاتی می‌تواند به‌عنوان گزینه‌ای بهینه مدنظر قرار گیرد.

۳. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که انتقال‌پذیری عملکرد لرزه‌ای اتصالات تیر–ستون به‌طور حساسی وابسته به چیدمان و به‌ویژه جهت الیاف CFRP است.

یافته‌های این پژوهش می‌تواند مبنای علمی برای انتخاب آگاهانهٔ روش تقویت و چارچوبی برای تدوین دستورالعمل‌های فنی به‌منظور بهسازی ایمن و اقتصادی اتصالات آسیب‌پذیر در مناطق زلزله‌خیز فراهم آورد.

منابع و مرجع‌ها

[1] A. Ghobarah, T. S. Aziz, and A. Biddah, "Rehabilitation of reinforced concrete frame connections using corrugated steel jacketing," Structural Journal, vol. 94, no. 3, pp. 282-294, 1997.

[2] V. Singh, P. P. Bansal, M. Kumar, and S. K. Kaushik, "Experimental studies on strength and ductility of CFRP jacketed reinforced concrete beam-column joints," Construction and Building Materials, vol. 55, pp. 194-201, 2014.

[3] S. M. Alcocer and J. O. Jirsa, "Strength of reinforced concrete frame connections rehabilitated by jacketing," ACI Structural Journal, vol. 90, no. 3, 1993.

[4] N. Attari, Y. S. Youcef, and S. Amziane, "Seismic performance of reinforced concrete beam--column joint strengthening by frp sheets," Structures, vol. 20, pp. 353-364, 2019.

[5] T. Tafsirojjaman, A. Miri, S. Noor-E-Khuda, A. Ahmed, A. B. M. S. Islam, and M. Khan, "Structural performance of CFRP strengthened SHS beam-column connections subjected to monotonic loading: A numerical simulation," Structures, vol. 61, p. 106030, 2024.

[6] C. G. Karayannis and E. Golias, "Full-scale experimental testing of RC beam-column joints strengthened using CFRP ropes as external reinforcement," Engineering Structures, vol. 250, p. 113305, 2022.

[7] Y. Bounjoum, O. Hamlaoui, M. K. Hajji, K. Essaadaoui, J. Chafiq, and M. Ait El Fqih, "Exploring Damage Patterns in CFRP Reinforcements: Insights from Simulation and Experimentation," Polymers, vol. 16, no. 14, p. 2057, 2024.

[8] H. E. Alobaidi and A. H. Al-Zuhairi, "Numerical Simulation of the Behaviour of RC T-Beams Strengthened by EB-CFRP Composites Under Bending and Shear Effects," Journal of Engineering, vol. 30, no. 07, pp. 59-76, 2024.

[9] F. S. Kamaruzaman and N. A. Yahya, "Numerical modelling of bearing strength of concrete strengthening with carbon fibre reinforced polymers (CFRP) wrapping for different thickness of CFRP Sheet," Journal of Sustainable Civil Engineering & Technology (JSCET), vol. 3, no. 1, pp. 114-132, 2024.

[10] C. E. Cazacu, C. Ștefan Dumitriu, and A. Bărbulescu, "Concrete CFRP-Reinforced Beam Performances, Tests and Simulations," Sustainability, vol. 16, no. 7, p. 2614, 2024.

[11] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park, "Theoretical stress-strain model for confined concrete," Journal of Structural Engineering, vol. 114, no. 8, pp. 1804-1826, 1988.

[12] I. Standard, "Plain and reinforced concrete-code of practice," New Delhi: Bureau of Indian Standards, 2000.

[13]Bureau of Indian Standards, IS 10262: Guidelines for concrete mix design proportioning, 2009