J. Analysis of Structure and Earthquake
Volum 22, Issue 1, spring 2025
Issn: 2821-0999
وبگاه مجله: www.civil-strj.maragheh.iau.ir
آنالیز سازه - زلزله
فصلنامه علمی
دوره ۲۲، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴

Investigating the Behavior of Steel Beams Reinforced with CFRP and GFRP

Mehdi Khanloo
Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Cha.C., Islamic Azad University, Chaloos, Iran
Heydar Dashti Naserabadi *
Assistant professor, Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Cha.C., Islamic Azad University, Chaloos, Iran
Morteza Jamshidi
Assistant professor, Ph.D. student, Department of Civil Engineering, Cha.C, Islamic Azad University, Chaloos, Iran
Heydardashti.n@gmail.com

Keywords
Strengthening,
steel beams,
polymer fibers,
numerical study,
ABAQUS

Abstract
In order to strengthen damaged steel beams, fiber-reinforced materials particularly carbon and glass fibers are utilized to enhance their flexural capacity and stiffness while delaying yielding. These materials are effective for repairing damaged beams, mitigating corrosion effects, and extending structural service life. Carbon fibers are more suitable for flange strengthening, whereas glass fibers are preferable for web reinforcement. The primary focus of this study is the seismic performance assessment of steel beams numerically strengthened with Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites using the finite element software ABAQUS. In this research, seven IPE (I-beam) sections commonly used in Iran were analyzed. The FRP fibers were applied in three different configurations: beneath the bottom flange, on both sides of the web, and a combination of both. These configurations were examined and analyzed accordingly. The results of the study indicate that FRP reinforcement has a limited effect on initial stiffness (increasing it by 3% to 10%), but significantly enhances post-yield stiffness. Installing fibers beneath the tensile flange leads to more nonlinear beam behavior, while installation on both web sides results in a more linear response. Furthermore, the findings reveal that after yielding, the beam stiffness reduces by 80% to 97%, with carbon fiber composites experiencing a greater reduction compared to glass fibers. Ductility of beams reinforced with FRP composites decreased by 11% to 16%, with web-side reinforcement exhibiting higher ductility than other configurations. The combined reinforcement (flange + web) yields the highest post-yield stiffness, where glass FRP composites outperform carbon FRP in this configuration. From an economic perspective, the study exhibits that carbon FRP is up to 55% more expensive than glass FRP. The reinforcement costs in the three configurations—under the bottom flange, on both web sides, and combined—were estimated to be 54%, 48%, and 45% higher, respectively, compared to glass FRP alternatives.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
(این نشریه تحت قانون بین المللی کپی رایت Creative Commons: BY-NC می‌باشد).

* Corresponding Author

فصلنامه علمی
آنالیز سازه-زلزله
دوره ۲۲، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴

ارزیابی لرزه‌ای تیرهای فولادی تقویت شده با GFRP و CFRP

مهدی خانلو
دانشجوی دکتری گروه عمران،واحد چالوس،دانشگاه آزاد اسلامی،چالوس،ایران
حیدر دشتی ناصرآبادی*
استادیار گروه عمران،واحد چالوس،دانشگاه آزاد اسلامی،چالوس،ایران
مرتضی جمشیدی
استادیار گروه عمران،واحد چالوس،دانشگاه آزاد اسلامی،چالوس،ایران
Heydardashti.n@gmail.com

تاریخ دریافت : ۲۸ اسفند ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: ۲۱ خرداد ۱۴۰۴

چکیده

برای تقویت تیرهای فولادی آسیب‌دیده از الیاف تقویتی، به‌ویژه کربنی و شیشه‌ای، استفاده می‌شود تا ظرفیت خمشی و سختی آن‌ها افزایش یابد و تسلیم تأخیر بیفتد. این مواد برای تعمیر تیرهای آسیب‌دیده، مقابله با خوردگی و افزایش عمر سازه مؤثرند. الیاف کربنی برای تقویت بال و الیاف شیشه‌ای برای تقویت جان تیر مناسب‌ترند. موضوع اصلی این تحقیق ارزیابی لرزه‌ای تیرهای فولادی تقویت شده به صورت عددی با نرم‌افزار المان محدود آباکوس می‌باشد. به منظور بررسی نحوه اثرگذاری تقویت تیرها با الیاف‌های کامپوزیت پلیمری کربنی و شیشه‌ای در این پژوهش، از ۷ تیر نیمه پهن متداول در ایران استفاده شده است. الیاف‌ها نیز در سه موقعیت: زیر بال تحتانی و دوطرف جان تیر و یا همزمان در هر دو، نصب و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تقویت تیر فولادی با الیاف تقویتی تأثیر کمی بر سختی اولیه (۳ تا ۱۰ درصد) دارد اما سختی ثانویه را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. نصب الیاف زیر بال کششی، رفتار تیر را غیرخطی‌تر و نصب در دو طرف جان، رفتار آن را خطی‌تر می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که پس از تسلیم، سختی تیر ۸۰ تا ۹۷ درصد کاهش می‌یابد که این کاهش در کامپوزیت پلیمری کربنی بیشتر از شیشه‌ای است. ضمنا، شکل‌پذیری تیر با کامپوزیت پلیمری بین ۱۱ تا ۱۶ درصد کاهش می‌یابد و نصب الیاف در دو طرف جان، شکل‌پذیری بیشتری نسبت به سایر حالات دارد. تقویت ترکیبی (بال + جان)، بیشترین سختی ثانویه را ایجاد می‌کند که در این حالت، کامپوزیت پلیمری شیشه‌ای عملکرد بهتری نسبت به کربنی دارد. نتایج از نظر جنبه اقتصادی نشان می‌دهد که کامپوزیت پلیمری کربنی تا ۵۵ درصد گران‌تر از شیشه‌ای است و هزینه تقویت در سه حالت زیر بال، دو طرف جان و ترکیبی، به‌ترتیب ۵۴٪، ۴۸٪ و ۴۵٪ بیشتر از شیشه‌ای برآورد شده است.

واژگان کلیدی: مقاوم‌سازی ،تیرهای فولادی، الیاف پلیمری، مطالعه عددی، آباکوس

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

بیشتر سازه‌های فولادی از اعضای فولادی جدار نازک ساخته می‌شوند که با مشکلاتی مانند خوردگی، فرورفتگی و ترک مواجه هستند. خوردگی موجب کاهش ضخامت اعضای سازه می‌شود و جایگزینی این ساختارها هزینه زیادی دارد، بنابراین نیاز به توسعه روش‌های کارآمد برای تعمیر و نگهداری آنها در حال افزایش است [۱]. استفاده از الیاف پلیمرهای تقویت‌شده[1] برای تعمیر اعضای فولادی در سال‌های اخیر رشد زیادی داشته است. این تکنیک از مواد پلیمری تقویت‌شده، مانند الیاف کربنی[2] و شیشه‌ای[3]، برای افزایش ظرفیت خمشی مقطع بهره می‌برد. استحکام الیاف کربنی تا ۱۰ برابر استحکام فولاد نرم و تقریباً ۳/۵ برابر استحکام الیاف شیشه‌ای است. ورق‌های الیاف کربنی نه تنها ظرفیت خمشی تیرهای فولادی را افزایش می‌دهند بلکه با افزایش سختی خمشی، تسلیم تیر را نیز به تأخیر می‌اندازند [۱].

توصیه‌های اجرایی برای تقویت لرزه‌ای تیرهای فولادی با الیاف کربنی و شیشه ای شامل انتخاب الیاف متناسب با شرایط محیطی، آماده‌سازی دقیق سطح سازه، استفاده از رزین‌های مقاوم، رعایت اصول نصب و فشار کافی برای فشردگی الیاف، انجام آزمایش‌های کنترل کیفیت و نظارت دقیق بر مراحل اجرا است. در موارد بحرانی، استفاده از روش‌های تقویتی چندلایه و پوشش‌های ضدآب و ضدخوردگی پیشنهاد می‌شود [۳]. همچنین، استفاده همزمان از الیاف کربنی و شیشه‌ای برای تقویت تیر فولادی باعث بهینه‌سازی عملکرد سازه‌ای می‌شود. الیاف کربنی برای تقویت بال تیر و الیاف شیشه‌ای برای تقویت جان تیر مناسب است. این ترکیب ظرفیت باربری را افزایش داده، تغییر شکل‌ها را کاهش می‌دهد و رفتار شکست تیر را به یک شکست تدریجی و کنترل‌شده تغییر می‌دهد [۴].

تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از صفحات الیاف پلیمرتقویت‌شده در تیرهای فولادی در سال‌های اخیر به منظور بهبود خواص مکانیکی آن‌ها در چهار مورد اصلی زیر است:

۱) تعمیر و تقویت تیرهای فولادی آسیب‌دیده با شکاف
۲) مقابله با خوردگی ناشی از عمر طولانی و شرایط محیطی
۳) برطرف کردن خستگی تیرهای فولادی همراه با ترک‌خوردگی
۴) تقویت تیرهای فولادی حتی در شرایطی که بازشو عمدی دارند.

به طوری که دنگ و همکاران[4] [۵] یک راه‌حل یکپارچه برای به‌دست‌آوردن تنش‌های برشی در تیرهای فولادی با شکاف و تقویت شده با صفحات الیاف کربنی ارائه دادند و نشان دادند که با افزایش ضخامت چسب، حداکثر تنش‌ها کاهش می‌یابد. همچنین، در مطالعات مشابه دیگر [۶] متوجه شدند که بار نهایی و شکل‌پذیری با افزایش عمق شکاف کاهش می‌یابد. مطالعه جاگتپ و همکاران[5] [۷] نشان داد که استفاده از ورق‌های الیاف کربنی ظرفیت تحمل بار و ظرفیت تسلیم تیرهای خورده شده را بهبود می‌بخشد. یو و همکاران[6] [۸] نیز نشان دادند که استفاده از ورق‌های الیاف کربنی موجب تاخیر در انتشار ترک و افزایش عمر خستگی تیرهای فولادی معیوب می‌شود. آلتئیی و همکاران[7] [۹] نیز دریافتند که استحکام تیرهای فولادی با بازشو پس از تقویت با صفحات الیاف کربنی معادل تیرهای بدون بازشو است.

تحقیقات مختلف بر پیوند بین فولاد و صفحات الیاف کربنی در شرایط محیطی تأکید دارند. تحقیقات غلامی و همکاران[8] [۱۰] نشان داد که عملکرد سیستم به رفتار لایه چسب وابسته است. مطالعه لی و همکاران[9] [۱۱] تأثیر خستگی و رطوبت-گرما بر چسبندگی را نشان داد. در تقویت تیرهای فولادی، تکنیک تبدیل مقطع باز به مقطع بسته با صفحات الیاف کربنی برای افزایش ظرفیت استحکام و سختی خمشی-پیچشی مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات مدهون و همکاران[10] [۱۲] و سلواراج و همکاران[11] [۱۳] نشان دادند که این تقویت می‌تواند ظرفیت لنگر خمشی را به طور قابل توجهی بهبود دهد. مطالعه الخابیری و همکاران[1] [۲] نشان داد که ورق‌های الیاف کربنی در تیرهای فولادی تحت خمش به استحکام نهایی خود می‌رسند، اگر طول پیوند به اندازه کافی تضمین شود. همچنین، تحقیقات کاتری زاده و همکاران[2] [۱۴] نشان دادند که تیرهای تقویت‌شده با صفحات الیاف کربنی بدون بست مکانیکی ممکن است دچار شکست‌های زودرس شوند، ولی استفاده از بست مکانیکی می‌تواند خرابی‌ها را تأخیر انداخته یا از بین ببرد. پژوهش باستانی و همکاران[3] [۱۵] نشان داد که

---

1 FRP
2 CFRP
3 GFRP

4 Deng et al
5 Jagtap et al
6 Yu et al
7 Altaee et al
8 Gholami et al
9 Li et al
10 Madahavan et al
11 Selvaraj et al

استفاده از لایه‌های الیاف تقویتی می‌تواند ظرفیت تسلیم و بار نهایی تیرهای آسیب‌دیده را به سطح تیر سالم بازگرداند.

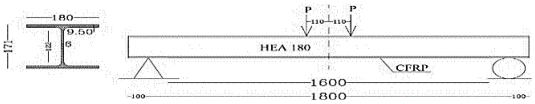
این مطالعه شبیه‌سازی‌های عددی را با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی المان محدود توسط نرم افزار آباکوس، برای تجزیه و تحلیل تیر فولادی تقویت‌شده با ورقهای الیاف تقویتی تحت بار افزایشی یکنواخت را ارائه می‌کند تا رفتار آن‌ها را پیش‌بینی کند. در این مطالعه بعد از صحت سنجی، ۷ نمونه تیر فولادی نیم پهن[4](نمره های ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴ و ۲۷) به طول ۲ متر که با الیاف کربنی و شیشه ای به طول ۱/۶ متر در سه موقعیت زیر بال تحتانی و دوطرف جان تیر و یا همزمان در هر دو موقعیت، تحت خمش دو نقطه ای آزمایش می شوند. نتایج نمودار بار- جابه جایی تحت تجزیه و تحلیل های مختلف قرار می‌گیرد و در خصوص نقاط تسلیم تیر فولادی، سختی اولیه و ثانویه، شکل‌پذیری به طور مفصل در ادامه تحقیق بحث می‌شود.

۲-صحت سنجی پژوهش

در پژوهش‌هایی بر پایه مطالعات عددی، می‌بایست داده‌ها و نتایج نمونه عددی در کار مطالعات عددی با داده‌ها و نتایج حداقل یک نمونه آزمایشگاهی منطبق شود که در این خصوص از نمونه آزمایشگاهی در تحقیقات الامرانی و همکاران[5] [۱۶] استفاده شده است، نمونه آزمایشگاهی شامل تیر فولادی به طول آزاد ۲ متر و طول تکیه‌گاهی ۱/۸ متر مطابق شکل[1] ۱ می‌باشد، تیر با مقطع بال پهن[6] ۱۸۰ با دو بار متمرکز قائم جهت اعمال بار به صورت کنترل- جابه جایی در وسط دهانه تیر قرار دارند.

البته اعمال دو بار با فاصله‌های مساوی از تکیه‌گاه‌ها به‌منظور ایجاد ناحیه خمش خالص انجام شده است که این شرایط امکان ارزیابی دقیق‌تر تأثیر تقویت بر رفتار خمشی تیر را فراهم می‌کند. این روش، که به بارگذاری چهار نقطه‌ای معروف است (زیرا شامل دو بار ناشی از بارگذاری و دو عکس العمل بار در تکیه‌گاه‌ها می‌شود)، باعث حذف یا کاهش تأثیر نیروهای برشی در ناحیه میانی تیر شده و تمرکز تحلیل را بر روی عملکرد خمشی و تأثیر صفحات الیاف کربنی و شیشه‌ای در بهبود ظرفیت و رفتار تیر در شرایط خمش خالص قرار می‌دهد. بارگذاری چهار نقطه‌ای یک روش استاندارد برای آزمایش رفتار خمشی تیرها است که دقت بالاتری در ارزیابی خواص مکانیکی و ظرفیت خمشی تیرها فراهم می‌کند. این روش با ایجاد ناحیه خمش خالص و حذف نیروهای برشی، تنها لنگر خمشی را بر تیر اعمال می‌کند. تحقیقات ژانگ و همکاران [۱۷] نشان داده‌اند که استفاده از صفحات الیاف کربنی و شیشه‌ای در ناحیه خمش خالص باعث افزایش ظرفیت خمشی، بهبود شکل‌پذیری و جلوگیری از گسیختگی ترد می‌شود. ضمنا، این روش در تحلیل‌های عددی و تجربی برای ارزیابی رفتار تیرها تحت بارهای واقعی و نیروهای پیچیده کاربرد دارد.

همچنین تیر مذکور با الیاف کربنی به طول ۱/۶ متر در لبه بیرونی بال پایینی (بال کششی) تقویت شده است. تیر مرجع دارای مقاومت تسلیم ۳۳۰ مگاپاسکال و مدول الاستیسیته ۲۱۲ گیگاپاسکال می باشد .



شکل۱-تعریف ابعادی نمونه بکاررفته در آزمایش الامرانی و همکاران

تحلیل المان محدود این پژوهش به‌صورت استاتیکی و غیرخطی انجام شده است. اجزای فولادی با استفاده از المان C3D8R و ورق‌های تقویتی پلیمری از نوع المان S4R مدل‌سازی شده‌اند. تمامی مدل‌ها برای ایجاد قطعه‌های مختلف اعضا در ماژول پارت طراحی شده و سپس در ماژول اسمبلی نرم‌افزار آباکوس، قطعه‌ها در کنار یکدیگر و در نقاط پیش‌بینی‌شده قرار گرفته‌اند. در ماژول بارگذاری، نوع تکیه‌گاه‌ها به صورت غلتکی و مفصلی تعریف شد. همچنین در ماژول مش‌بندی نرم‌افزار، دقت مش با ابعاد بهینه ۱ سانتی‌متر انتخاب شده و در تمام نمونه‌ها به‌کار گرفته شد.

در نرم‌افزار آباکوس، مدلسازی چسب اپوکسی جهت پیش‌بینی پدیده جداشدگی[2] بین تیر فولادی و الیاف تقویتی معمولاً با سه روش انجام می‌شود: مدل پیوسته، مدل رابط چسبنده (CZM)، و مدل تماس با اصطکاک. روش متداول CZM شامل تعریف المان‌های چسبنده یا رفتار چسبندگی سطحی است [۱۸].

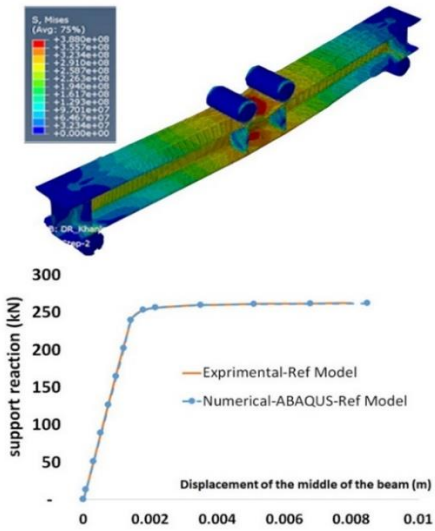
در این تحقیق، با توجه به نمونه آزمایشگاهی جهت صحت‌سنجی، از چسب آرالدیت ۴۲۰[3] با ضخامت دو میلی‌متر استفاده شده است و برای مدل‌سازی آن با روش CZM و المان چسبنده، یک المان سه‌بعدی توپر با ابعاد مناسب ایجاد و در ماژول اسمبلی بین تیر فولادی و لمینت تقویتی قرار داده شده است. همچنین در ماژول خصوصیات مواد، چسب به‌عنوان ماده‌ای الاستیک به صورت کششی سطحی[4] با سختی نرمال[1] و برشی[2] ۱۰۰ کیلو نیوتن بر

1 Elkhabeery et al
2 Katrizadeh et al
3 Bastani et al
4 IPE
5 Al-Emrani et al
6 IPB

2 Debonding
3 Araldite 420
4 Traction

میلی‌متر مکعب تعریف شده و معیارهای تکامل آسیب[3] و جدایش[4] اعمال می‌شود. آستانه تنش بحرانی نرمال ۲۵ و برشی ۴۰ مگاپاسکال برای شروع آسیب تعیین شده و تکامل آسیب به‌صورت انرژی-محور یا جابجایی-محور قابل تعریف است که برای چسب اپوکسی روش انرژی-محور مناسب‌تر است زیرا چقرمگی شکست نرمال و برشی یک کیلونیوتن در میلیمتر را در نظر می گیرد، ضمنا تابع نرم‌شدگی[5] به دلیل واقع‌گرایی بیشتر انتخاب می‌شود. در رفتار مد ترکیبی، از مدل پاور لوو[6] برای توزیع انرژی شکست استفاده شده و میزان جدایش آسیب نرمال[7] و برشی[8] برابر ۰/۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین، برای جلوگیری از مشکلات همگرایی، ضریب ویسکوزیته مقدار بسیار کوچک در نظر گرفته شده است. در ادامه، مقطع چسب اپوکسی با المان‌های چسبنده تعریف شده و به آن اختصاص داده می‌شود. برای مش‌بندی نیز از المان‌های COH3D8 با نسبت ابعادی مناسب استفاده می‌شود تا رفتار چسب به‌درستی شبیه‌سازی شود. همچنین، برای توزیع صحیح تنش‌ها، در ضخامت چسب حداقل دو المان در راستای عمودی در نظر گرفته شده و سطوح چسبنده با قید گیردار[9] به پروفیل فولادی و لمینت متصل می‌شوند.

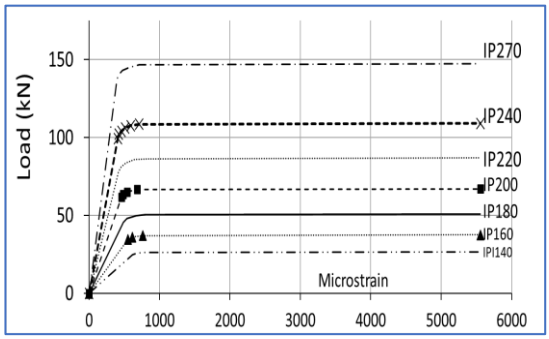
با انجام تحلیل و مقایسه نتایج منحنی نیرو-تغییر مکان نمونه‌های عددی و آزمایشگاهی، تطابق نسبتاً خوبی بین نمودار حاصل شده که در شکل ۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۲ – مقایسه و صحت سنجی بین دو نمودار بار – جابه‌جایی آزمایشگاهی [۱۷] و نمونه عددی این تحقیق.

۳- معرفی مقاطع نیمه پهن و اعمال بارگذاری در تیرهای تقویت شده

در این بخش از مطالعه و به منظور توسعه عددی، ۷ تیر نیمه پهن با نمره‌های ۱۴۰، ۱۶۰، ۱۸۰، ۲۰۰، ۲۲۰، ۲۴۰ و ۲۷۰، مطابق با مقاطع نیمه پهن متداول در ایران و به طول آزاد ۲ متر، مدل‌سازی شدند. با اعمال بارگذاری قائم مشابه نمونه صحت‌سنجی شده، نتایج نیرو-جابه‌جایی به دست آمد که در شکل ۳، نتایج بارگذاری قائم ۷ تیر نیمه پهن مورد مطالعه نمایش داده شده است. همچنین، جدول ۱ خواص مواد به‌کار رفته در این مطالعه آزمایشگاهی و عددی شامل فولاد، ورق‌های مختلف تقویتی و پرایمر اپوکسی [۱۷] را نشان می‌دهد.



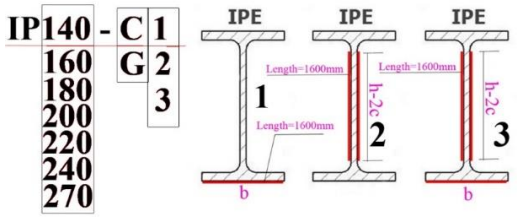
شکل ۳ – نتایج بارگذاری نیرو-جابه جایی مقاطع نیمه پهن.

1 Knn
2 Ktt
3 Damage Evolution
4 Damage Stabilization
5 Exponential
6 Power Law
7 δ_n
8 δ_t
9 Tie

جدول ۱ – خواص مواد به کار رفته در آزمایش شامل فولاد، ورقه‌های مختلف تقویتی و پرایمر اپوکسی[۱۷].

Materials	Dimensions/thickness (mm)	ft (MPa)	E (GPa)
Steel	IPE	330	200
CFRP	2.8	3300	212
GFRP	2.8	1000	60
Epoxy (Araldite 420)	2	30	4.5

در این قسمت از پژوهش می‌بایست الیاف‌های تقویتی را به مقاطع نیمه پهن اضافه نمود و نمونه تیر را با حالت‌های جدید مورد بارگذاری عددی قرار داد، برای این منظور سه حالت M1، M2 وM3 جهت نصب و تقویت الیاف پیش‌بینی شده است که در شکل ۴ این سه حالت به همراه نام گذاری نمونه‌ها ارائه شده است.



شکل ۴ – حالت‌های قرار گیری و نصب الیاف تقویتی بر روی مقاطع نیمه پهن به همراه نامگذاری مقاطع.

همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، در موقعیت ۱، الیاف فقط در زیر بال تحتانی تیر و به عرض بال تیر قرار گرفته‌اند. در موقعیت ۲، الیاف در دو طرف جان تیر قرار دارند و در موقعیت ۳، الیاف به صورت ترکیبی در بال تحتانی و جان تیر قرار گرفته‌اند. همچنین، در نام‌گذاری نمونه‌های تقویتی، "C" نشان‌دهنده استفاده از الیاف کربنی و "G" نشان‌دهنده استفاده از الیاف شیشه‌ای است. به‌طور مثال، نمونه مقطع نیم پهن ۱۴۰ با نماد C1 به معنای تیر با مقطع نیم پهن ۱۴۰ است که در موقعیت ۱ با الیاف کربنی تقویت شده است، و بقیه نمونه‌ها نیز به همین ترتیب نام‌گذاری شده‌اند. بنابراین، مجموعاً ۴۲ حالت مختلف برای تقویت تیر فولادی با این پیش‌فرض‌ها وجود دارد. پس از اعمال بارگذاری خمشی، نتایج نیرو–جابه‌جایی برای تیر با تقویت‌های معرفی‌شده با الیاف کربنی و شیشه‌ای به دست آمد. در شکل ۵، نتایج نمودار نیرو–جابه‌جایی تیر با تقویت‌های کربنی و شیشه ای در سه مقطع نیمه پهن ۱۴۰، ۱۶۰ و ۱۸۰ و در سه موقعیت تقویت نشان داده شده است. همچنین، شکل ۶ نتایج نمودار نیرو–جابه‌جایی تیر با تقویت‌های کربنی و شیشه ای در چهار مقطع نیمه پهن ۲۰۰، ۲۲۰، ۲۴۰ و ۲۷۰ در سه موقعیت تقویت را نمایش می‌دهد.

در اشکال ۵ و ۶ که نمودار بار– جابه‌جایی نمونه‌ها را نمایش می‌دهند، بار بر حسب کیلو نیوتن و جابه‌جایی بر حسب میکرو–کرنش است. تمامی نمونه‌ها در محدوده جابه‌جایی قائم بین ۴۰۰ تا ۷۵۰ میکرو–کرنش دچار تسلیم می‌شوند و روند خطی نمودار بار–جابه‌جایی تغییر کرده و شیب نمودار تغییر می‌کند. در این اشکال، هر نمودار شامل سه منحنی بار– جابه‌جایی است که مربوط به سه نمونه متفاوت می‌باشد: تیر فولادی بدون تقویت، تیر فولادی تقویت‌شده با الیاف کربنی و تیر فولادی تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای. این تقویت‌ها در موقعیت‌های مختلفی از الیاف قرار گرفته‌اند که نمودارها از بالا به پایین موقعیت‌های ۱، ۲ و ۳ را نشان می‌دهند.

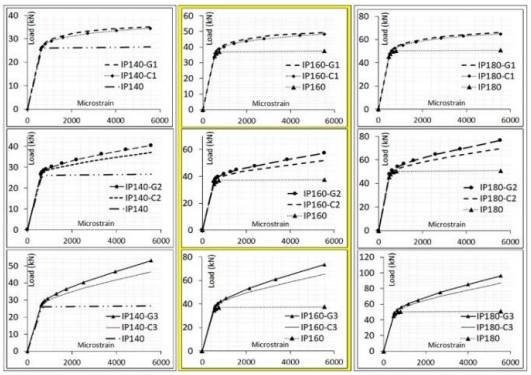
همانطور که در اشکال ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، نکات زیر قابل توجه است:

۱)شیب اولیه نمودار بار–جابه جایی که نشان‌دهنده سختی اولیه است، در تمامی نمونه‌ها تقریباً مشابه است، اما شیب ثانویه که نمایانگر سختی بعد از نقطه تسلیم است، در تیرهای تقویت‌شده متفاوت می‌باشد.

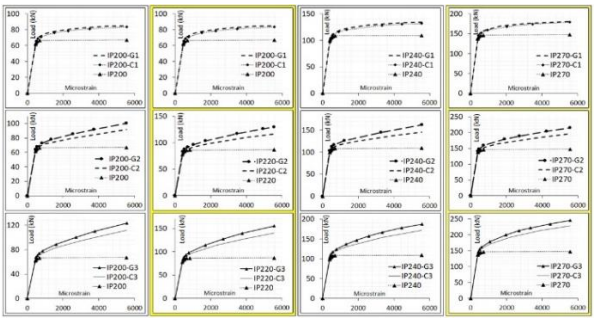
۲)در تیرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای یا کربنی که الیاف در بال تحتانی نصب شده‌اند، پس از نقطه تسلیم رفتار غیرخطی دیده می‌شود و شیب نمودار کاهش می‌یابد.

۳)در تیرهای تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای یا کربنی که الیاف در دو طرف جان تیر نصب شده‌اند، رفتار خطی تا نقطه تسلیم مشاهده می‌شود و در موقعیت نصب الیاف در دو طرف بال، رفتار نمودار ترکیبی از خطی و غیرخطی است.

۴)منحنی بار–جابه جایی در تیرهای تقویت‌شده با شیشه ای و کربنی که الیاف در بال تحتانی نصب شده‌اند، به هم نزدیک است، نشان‌دهنده این است که در این حالت تنها افزایش کمی در مقاومت دیده می‌شود و پس از نقطه تسلیم، تیر تغییر شکل پلاستیک می‌کند.



شکل ۵ – نمودار نیرو– جابه جایی تیر با الیاف‌های کربنی و شیشه‌ای در سه مقطع تیر: نیمه پهن ۱۴۰، ۱۶۰ و ۱۸۰ در سه موقعیت تقویت ۱، ۲ و ۳.



شکل ۶ – نتایج نمودار نیرو- جابه جایی تیر با الیاف های کربنی و شیشه‌ای در چهار مقطع تیر: نیمه پهن ۲۰۰، ۲۲۰، ۲۴۰ و ۲۷۰ در سه موقعیت تقویت ۱، ۲ و ۳.

٤-تجزیه و تحلیل یافته‌ها

در این بخش از پژوهش، پس از مشخص شدن نتایج نمودار بار-جابه‌جایی نمونه‌های تحقیق، می‌توان نتایج را از چند دیدگاه تجزیه و تحلیل کرد.

اولین نکته اینکه در این مدل‌سازی عددی تیرهای فولادی تقویت‌شده با الیاف کربنی و شیشه‌ای، در منحنی بار-جابجایی هیچ‌گونه گسیختگی مشاهده نشد، که می‌تواند به دلایل مختلفی زیر باشد که احتمال حالت سوم بیشتر است:

۱)در این تحلیل، برای شبیه‌سازی دقیق آسیب الیاف کربنی و شیشه ای، از معیارهای آسیب هاشین[1] استفاده شد که چهار حالت شکست فیبر کششی، فیبر فشاری، ماتریس کششی و ماتریس فشاری را بررسی می‌کند. تنظیم نادرست این معیارها یا عدم لحاظ مکانیزم نرم‌شوندگی[2] ممکن است منجر به نتایج غیرواقعی در نرم‌افزار آباکوس شود. اما در این مطالعه، معیارهای آسیب به‌درستی اعمال شده و تحلیل با نمونه صحت‌سنجی‌شده مطابقت دارد.

۲)همچنین، اگر در مدل‌سازی اندرکنش بین فولاد و الیاف برای پدیده جداشدگی به درستی لحاظ نشود، ممکن است نمونه در تحلیل عددی، حتی بدون رسیدن به حد نهایی بارگذاری، دچار شکست نشود. در این تحلیل، برای رفع این مشکل، اندرکنش بین فولاد و الیاف با استفاده از المان چسب و روش CZM به‌درستی اعمال شده است. با این حال، باوجود تعریف پدیده جداشدگی، این پدیده در تحلیل‌ها مشاهده نشده است.

۳)علاوه بر این، ممکن است با وجود تعریف پدیده آسیب در الیاف و جداشدگی چسب، به دلیل کافی نبودن بار واردشده، هیچ‌کدام از این دو پدیده رخ نداده باشد. با این حال، این احتمال وجود داشت که با ادامه بارگذاری، یکی از این دو پدیده مشاهده شود.

بنابراین گزینه سوم محتمل تر می‌باشد. از طرفی همانطور که در بخش قبلی اشاره شد، تمامی نمودار منحنی نمونه‌ها در محدوده جابه‌جایی قائم بین ۴۰۰ تا ۷۵۰ میکرو-کرنش دچار تسلیم می‌شوند. بنابراین، رفتار سیستم در طول بارگذاری را می‌توان به دو قسمت از نقطه تسلیم و بعد از نقطه تسلیم تقسیم کرد.

همچنین، میزان سختی (شیب نمودار بار-جابه‌جایی) اولیه و ثانویه سیستم و میزان شکل‌پذیری (تقسیم جابه‌جایی نهایی به جابه‌جایی نقطه تسلیم) با مشخص کردن نقطه تسلیم تعیین می‌شود. با مشخص کردن سختی لحظه‌ای سیستم نیز می‌توان اطلاعات مناسبی از نحوه رفتار تیر فولادی تقویت‌شده با الیاف تقویتی به دست آورد. متمرکز شدن بر اشکال ۵ و ۶ نشان می‌دهد که شیب اولیه نمودارها تقریباً مشابه است، اما شیب ثانویه که معرف سختی ثانویه نمونه‌ها است، تغییر کرده و همانطور که مشاهده می‌شود، شیب ثانویه رابطه مستقیمی با حداکثر مقاومت تیر فولادی دارد و این موضوع می‌تواند حائز اهمیت باشد.

٤-۱- نقاط تسلیم، عملکرد سختی اولیه و شکل‌پذیری

یکی از نکات مهم در این تحقیق، بررسی رفتار نقاط تسلیم نمودار بار-جابه‌جایی است، زیرا تجزیه و تحلیل این نقاط می‌تواند در ارزیابی عملکرد سازه اهمیت زیادی داشته باشد. نقاط تسلیم تیر فولادی تقویت‌شده با الیاف کربنی در بارگذاری قائم، با دو خطی کردن نمودار بار-جابه‌جایی و استفاده از الگوی انرژی معادل به دست می‌آید. محاسبه این نقاط در جداول ۲ و ۳، به ترتیب ویژگی‌های "جابه‌جایی (Δy)" و "بار (Vy)" نقاط تسلیم را نشان می‌دهد. همچنین، جابه‌جایی حداکثر تمام نمونه‌ها (Δu) برابر با ۵۵۵۶ میکرو-کرنش است. نتایج جداول ۲ و ۳ نشان می‌دهند که با اعمال تقویت در تیر فولادی توسط الیاف کربنی، نقاط تسلیم در هر دو بعد جابه‌جایی و بار (مقاومت) بیشتر از نقاط تسلیم مقطع بدون تقویت هستند. به طور خاص، تقویت با الیاف شیشه‌ای نسبت به کربنی در تمام مقاطع مورد بررسی، جابه‌جایی‌های بالاتری ایجاد می‌کند. علاوه بر این، تقویت جان تیر (موقعیت نصب ۲) نسبت به دو موقعیت دیگر (۱ و ۳) رشد کمتری در میزان جابه‌جایی تسلیم نسبت به نمونه بدون تقویت نشان می‌دهد. همچنین، هر چه لاغری مقطع کمتر شود (یعنی مقاطع با نمره بالاتر)، میزان افزایش نسبت جابه‌جایی نقاط تسلیم در مقطع تقویت‌شده بیشتر می‌شود. در بعد بار (مقاومت) نقاط تسلیم نیز، تقویت با الیاف شیشه‌ای نسبت به کربنی در تمام مقاطع مورد بررسی، مقادیر بالاتری نشان می‌دهد، ولی تقویت جان تیر (موقعیت نصب ۲) رشد کمتری در میزان بار تسلیم نسبت به دو موقعیت دیگر دارد. به علاوه، در جداول ۲ و ۳ رابطه منظمی بین لاغری مقاطع و میزان بار نقاط تسلیم مشاهده نمی‌شود. بنابراین، برای درک دقیق‌تر رفتار

[1] Hashin Damage
[2] Softening

تیرها، نیاز است تا عملکرد سیستم در دو حوزه سختی اولیه و شکل‌پذیری که حاصل برآیند نقاط تسلیم بار و جابه‌جایی است، بررسی شود.

جدول ۲ – ویژگی جابه جایی (Δy) نقاط تسلیم در بارگذاری قائم در نمونه های تقویت شده با الیاف تقویتی و تقویت نشده.

Yield points displacement of IPE sections under bending loading (Microstrain)							
Section	Δy-(IPE)	Δy-(IPE-C1)	Δy-(IPE-C2)	Δy-(IPE-C3)	Δy-(IPE-G1)	Δy-(IPE-G2)	Δy-(IPE-G3)
IPE 140	653	710	670	688	731	700	736
IPE 160	590	646	602	620	661	617	660
IPE 180	537	588	551	591	612	574	593
IPE 200	496	533	514	541	555	521	577
IPE 220	464	509	475	514	524	507	547
IPE 240	445	485	469	485	487	475	513
IPE 270	420	453	442	477	474	460	499

جدول ۳ – ویژگی بار (مقاومت) (Vy) نقاط تسلیم در بارگذاری قائم در نمونه های تقویت شده با الیاف تقویتی و تقویت نشده.

Yield points load of IPE sections under bending loading (kN)							
Section	Vy-(IPE)	Vy-(IPE-C1)	Vy-(IPE-C2)	Vy-(IPE-C3)	Vy-(IPE-G1)	Vy-(IPE-G2)	Vy-(IPE-G3)
IPE 140	26	30	29	30	31	30	32
IPE 160	37	42	41	43	43	42	45
IPE 180	50	56	53	56	57	55	58
IPE 200	66	75	70	76	77	74	80
IPE 220	86	96	90	97	97	95	103
IPE 240	108	119	116	123	122	120	131
IPE 270	146	161	155	170	164	163	179

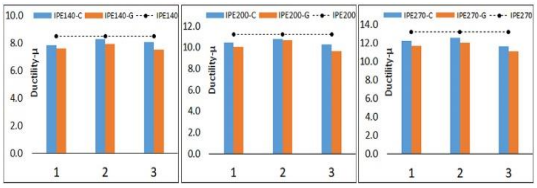
سختی اولیه ($K1$) سیستم با تقسیم مقاومت نقطه تسلیم (Vy) بر جابه‌جایی نقطه تسلیم (Δy) و شکل‌پذیری غیرالاستیک سیستم با تقسیم جابه‌جایی حداکثر (Δu) بر جابه‌جایی نقطه تسلیم محاسبه می‌شود. مقادیر این عملکردها برای تیر تقویت‌شده در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است. همچنین، شکل ۷ مقایسه کاهش شکل‌پذیری تقویت‌ها در سه مقطع و سه موقعیت نصب را نمایش می‌دهد.

جدول ۴ – مقایسه عملکرد سختی اولیه در نمونه های تیر تقویت شده با الیاف تقویتی و تقویت نشده تحت بارگذاری خمشی.

Initial Stiffness - K1 (kN/mm)							
Section	K1-(IPE)	K1-(IPE-C1)	K1-(IPE-C2)	K1-(IPE-C3)	K1-(IPE-G1)	K1-(IPE-G2)	K1-(IPE-G3)
IPE 140	40	42	43	44	42	43	44
IPE 160	63	65	67	69	66	68	69
IPE 180	93	95	96	95	94	96	97
IPE 200	134	140	137	140	139	142	139
IPE 220	186	189	190	188	186	188	188
IPE 240	244	245	247	254	250	253	256
IPE 270	348	355	351	356	347	355	360

جدول ۵ – مقایسه شکل‌پذیری در نمونه‌های تیر تقویت شده با الیاف تقویتی و تقویت نشده تحت بارگذاری خمشی.

Ductility-μ							
Section	μ-(IPE)	μ-(IPE-C1)	μ-(IPE-C2)	μ-(IPE-C3)	μ-(IPE-G1)	μ-(IPE-G2)	μ-(IPE-G3)
IPE 140	8.5	7.8	8.3	8.1	7.6	7.9	7.5
IPE 160	9.4	8.6	9.2	9.0	8.4	9.0	8.4
IPE 180	10.3	9.4	10.1	9.4	9.1	9.7	9.4
IPE 200	11.2	10.4	10.8	10.3	10.0	10.7	9.6
IPE 220	12.0	10.9	11.7	10.8	10.6	11.0	10.2
IPE 240	12.5	11.5	11.8	11.5	11.4	11.7	10.8
IPE 270	13.2	12.3	12.6	11.7	11.7	12.1	11.1



شکل ۷ – نتایج نمودار مقایسه‌ای کاهش شکل‌پذیری نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه تقویت نشده در سه مقطع تیر: نیمه پهن ۱۴۰، ۲۰۰ و ۲۷۰ در سه موقعیت تقویت ۱، ۲ و ۳.

نتایج جداول ۴ و ۵ و شکل ۷ نشان می‌دهد که با بارگذاری خمشی تیر فولادی، سختی اولیه در حالت تقویت در دو طرف جان مقطع (موقعیت ۲) بیشتر از حالت تقویت در زیر بال کششی (موقعیت ۱) است. همچنین، در حالت تقویت ترکیبی زیر بال کششی و جان (موقعیت ۳)، سختی اولیه بیشترین مقدار را دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهند که با کاهش لاغری تیر یا افزایش ارتفاع مقطع، سختی اولیه نسبی تیر تقویت‌شده کاهش می‌یابد.

در خصوص شکل‌پذیری تیر تقویت‌شده، نکات زیر قابل توجه است:

۱)شکل‌پذیری تیر تقویت‌شده در تمام حالات نسبت به تیر بدون تقویت کمتر است، که نشان می‌دهد تقویت با الیاف تقویتی باعث کاهش شکل‌پذیری می‌شود.

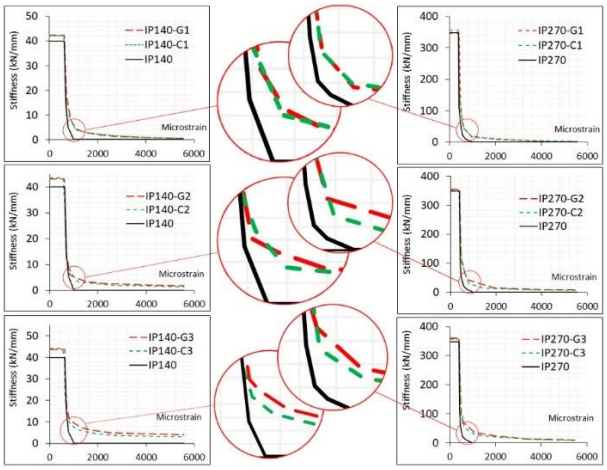
۲)استفاده از الیاف شیشه‌ای کاهش بیشتری در شکل‌پذیری نسبت به الیاف کربنی دارد.

۳)ترتیب کاهش شکل‌پذیری به این صورت است: موقعیت ۲ (تقویت در دو طرف جان) بیشترین شکل‌پذیری را نسبت به موقعیت‌های ۱ و ۳ دارد. نصب الیاف در بال و جان تیر باعث کاهش شدیدتر شکل‌پذیری می‌شود.

۴-۲- سختی لحظه‌ای

در این مطالعه، سختی لحظه‌ای تیر فولادی تقویت‌شده با الیاف تقویتی تحت بار خمشی تعریف شده است. سختی لحظه‌ای به تغییرات شیب نمودار بار–جابه‌جایی اشاره دارد؛ بدین معنا که اگر شیب ثابت باشد، سختی ثابت است و اگر شیب تغییر کند، سختی کاهش می‌یابد. این رفتار نشان‌دهنده خطی یا غیرخطی بودن تیر

تحت بارگذاری است. شکل ۸، سختی لحظه‌ای تیرهای فولادی با مقاطع نیمه پهن ۱۴۰ و ۲۷۰ را تحت بارگذاری خمشی نشان می‌دهد، که در آن سه حالت تقویت (۱، ۲، ۳) و دو نوع تقویت الیاف شیشه‌ای و کربنی مقایسه شده‌اند.



شکل ۸ – نتایج نمودار سختی لحظه‌ای (بر حسب جابه جایی تیر) در دو مقطع تیر نیمه پهن ۱۴۰ و ۲۷۰ در سه موقعیت تقویت ۱، ۲، ۳ و دو نوع تقویت الیاف شیشه ای و کربنی.

مطابق با شکل ۸، نکات زیر در رفتار سختی لحظه‌ای تیرهای فولادی نیمه پهن ۱۴۰ و ۲۷۰ با تقویت الیاف تقویتی در سه موقعیت و دو نوع الیاف شیشه‌ای و کربنی تحت بارگذاری خمشی مشاهده می‌شود:

۱)سختی تیر فولادی پس از ثابت ماندن، به دلیل رسیدن به نقطه تسلیم کاهش می‌یابد و در تقویت با الیاف تقویتی زیر بال کششی، سختی لحظه‌ای مشابه است.

۲)کاهش سختی لحظه‌ای بعد از نقطه تسلیم برای مقطع نیمه پهن ۱۴۰ حدود ۹۸٪ و برای نیمه پهن ۲۷۰ حدود ۹۷٪ است.

۳)با تقویت تیر فولادی با الیاف تقویتی، میزان کاهش سختی در نقطه تسلیم افزایش می‌یابد. الیاف شیشه ای کاهش کمتری در سختی لحظه‌ای نسبت به کربنی دارند.

۴)در تیر فولادی با مقطع نیمه پهن ۲۷۰ و تقویت با کربنی، کاهش سختی در موقعیت‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۸۷، ۹۱ و ۸۵٪ است. برای نیمه پهن ۱۴۰ این مقادیر به ترتیب ۸۹، ۹۰ و ۷۹٪ هستند.

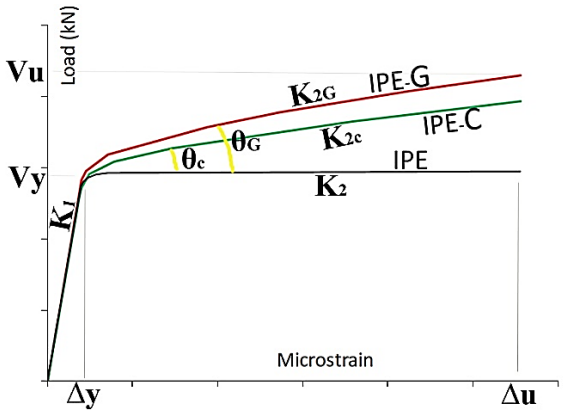
۵)در تیر فولادی با مقطع نیم پهن ۲۷۰ و تقویت با شیشه‌ای، کاهش سختی در موقعیت‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب ۸۷، ۹۰ و ۸۰٪ است. برای نیمه پهن ۱۴۰ این مقادیر به ترتیب ۸۹، ۸۸ و ۷۵٪ هستند.

۶)تیرهای فولادی با مقطع حداقل کاهش سختی لحظه‌ای کمتری نسبت به مقاطع حداکثر تجربه می‌کنند.

۷)موقعیت نصب الیاف در کاهش سختی لحظه‌ای موثر است؛ نصب الیاف ترکیبی در دو طرف جان و بال کششی (موقعیت ۳) کاهش سختی کمتری نسبت به دیگر موقعیت‌ها دارد.

۴-۳- سختی ثانویه

طبق نتایج نمودار بار–جابه‌جایی، شیب اولیه نمودارها تقریباً برابر است، اما شیب ثانویه که نشان‌دهنده سختی ثانویه است، تغییر می‌کند. شیب ثانویه ارتباط مستقیمی با حداکثر مقاومت تیر فولادی (Vu) دارد. شکل ۹، روابط شیب ثانویه در تیر فولادی تقویت‌شده با الیاف کربنی و شیشه ای را نشان می‌دهد. در این شکل، نماد θ_C اختلاف زاویه بین شیب ثانویه تیر فولادی بدون تقویت و با کربنی و نماد θ_G اختلاف زاویه بین شیب ثانویه تیر فولادی بدون تقویت و با شیشه ای است. همچنین، نماد K1 و K2 سختی اولیه و ثانویه تیر بدون تقویت و K_{2C} و K_{2G} سختی ثانویه تیر فولادی با تقویت الیاف کربنی و شیشه‌ای را نشان می‌دهند.



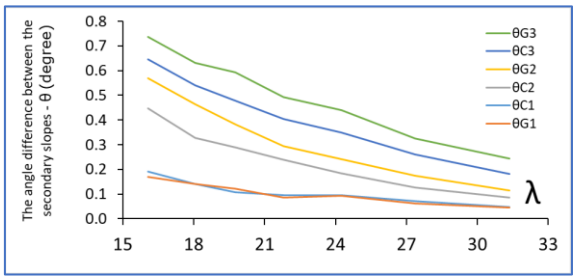
شکل ۹ – شکل شماتیک معرفی شیب ثانویه نمونه‌های تیر تقویت شده و نشده.

در صورتی که مقادیر شیب ثانویه برای تمام نمونه‌ها در سه موقعیت نصب الیاف ۱، ۲ و ۳ محاسبه شود، نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است..

جدول ۶ – مقایسه سختی ثانویه تیر تقویت‌نشده و اختلاف زاویه بین شیب ثانویه تیر فولادی بدون تقویت و با تقویت الیاف تقویتی.

Secondary stiffness -K2 (kN/mm) & The angle difference between the secondary slopes (Degree)							
Section	K2	θC1	θC2	θC3	θG1	θG2	θG3
IPE 140	0.108	0.048	0.086	0.183	0.045	0.114	0.243
IPE 160	0.114	0.071	0.126	0.260	0.062	0.174	0.326
IPE 180	0.127	0.095	0.183	0.349	0.092	0.242	0.440
IPE 200	0.132	0.096	0.239	0.404	0.086	0.293	0.492
IPE 220	0.145	0.107	0.288	0.479	0.121	0.383	0.593
IPE 240	0.169	0.141	0.328	0.542	0.140	0.465	0.631
IPE 270	0.231	0.192	0.448	0.646	0.170	0.568	0.737

طبق جدول ۶، سختی ثانویه با افزایش شماره مقطع در تیر فولادی بدون تقویت افزایش می‌یابد. اما برای مقایسه دقیق‌تر، باید به جای شماره مقطع، از میزان لاغری مقطع استفاده کرد. در این راستا، شکل ۱۰ اختلاف زاویه شیب ثانویه و میزان لاغری مقاطع را مقایسه می‌کند.



شکل ۱۰ – مقایسه اختلاف زاویه شیب ثانویه و میزان لاغری مقاطع در نمونه‌های تیر تقویت شده.

نتایج شکل ۱۰ نشان می‌دهند که با افزایش لاغری مقطع (کاهش ارتفاع)، اختلاف زاویه شیب ثانویه تیر تقویت‌شده نسبت به تیر تقویت‌نشده کاهش می‌یابد. نکات مهم عبارتند از:

۱)سختی اولیه برای تمام تیرهای تقویت‌شده تقریباً مشابه تیر تقویت‌نشده است، اما شیب ثانویه در نقطه تسلیم افزایش می‌یابد و بر معیار مقاومت تأثیر مستقیم دارد.

۲)اختلاف زاویه سختی ثانویه در موقعیت‌های θ_{C1} و θ_{G1} مشابه است، به این معنی که نصب الیاف تقویتی در زیر بال کششی، جدا از نوع الیاف، سختی ثانویه مشابهی دارد.

۳)موقعیت نصب ۳ (ترکیب بال کششی و دو طرف جان) بیشترین سختی ثانویه را دارد، سپس موقعیت ۲ (جان تیر) و موقعیت ۱ قرار دارند.

۴)در موقعیت‌های ۳ و ۲، شیب ثانویه برای نوع الیاف مختلف تفاوت دارد و الیاف شیشه ای سختی ثانویه بیشتری نسبت به کربنی دارند.

۵)با افزایش لاغری مقطع، زاویه شیب ثانویه کاهش می‌یابد و تیرهای با مقاطع کمتر ارتفاع، سختی ثانویه کمتری دارند.

۵- جنبه‌های اقتصادی

مطابق جدول ۷، نتیجه‌گیری اقتصادی استفاده از لمینت‌های تقویتی نشان می‌دهد که کربنی با وجود قیمت بالاتر، عملکرد بهتری در تقویت تیرهای فولادی و افزایش مقاومت خمشی و دوام در برابر خوردگی دارد. در مقابل، شیشه ای گزینه اقتصادی‌تر است، اما برای بارهای سنگین و شرایط خاص توصیه نمی‌شود. هزینه نصب لمینت کربنی بسته به روش استفاده متفاوت است؛ نصب در زیر بال کششی تیر هزینه کمتری دارد، در حالی که نصب در دو طرف جان تیر به دلیل استفاده از مواد بیشتر و نیاز به نیروی کار بیشتر، هزینه بالاتری دارد. در صورتی که هر دو روش به‌طور همزمان اجرا شود، هزینه بیشتری به ازای هر مترمربع خواهد داشت، اما این روش برای تقویت هر دو مقاومت خمشی و برشی مؤثر است. به‌طور کلی، انتخاب روش و نوع تقویتی بستگی به بودجه و نیاز سازه‌ای دارد؛ اگر هزینه مهم‌تر از عملکرد باشد، استفاده از شیشه‌ای یا نصب تنها در زیر بال کششی مناسب‌تر است، اما برای شرایط بحرانی، اجرای هر دو روش با کربنی عملکرد بهتری خواهد داشت. ضمنا مطابق جدول ۷ مقایسه تقریبی بین هزینه‌های تهیه مواد لمینت کربنی و شیشه‌ای، چسب اپوکسی، آماده سازی سطح و هزینه نصب در واحد دلار به ازای هر متر مربع در ابتدای سال ۲۰۲۵ انجام شده است، همچنین در جدول ۷ مقایسه ای بین هزینه های کل، روش‌های نصب در سه حالت (زیر بال کششی، دو طرف جان و ترکیبی) در دو لمینت کربنی و کربنی نیز انجام شده است.

جدول ۷ – مقایسه بین هزینه ها در در سه حالت (زیر بال کششی، دو طرف جان و ترکیبی) در دو لمینت کربنی و کربنی.

Cost Factor	Approximate Cost ($/m²)
CFRP Laminate Cost	300 - 450
Epoxy Adhesive Cost	40 - 70
Surface Preparation Cost	70 - 120
Installation Cost	100 - 160
Combined Total Cost	510 - 800

Cost Factor	Approximate Cost ($/m²)
GFRP Laminate Cost	200 - 350
Epoxy Adhesive Cost	30 - 50
Surface Preparation Cost	50 - 100
Installation Cost	80 - 140
Combined Total Cost	360 - 640

Installation Method	CFRP ($/m²)	GFRP ($/m²)	Strengthening Purpose	Installation Complexity
Under Tension Flange	185 - 285	120 - 200	Flexural Strengthening	Medium
On Both Sides of Web	370 - 570	250 - 400	Shear & Stability Improvement	Harder
Combined (Flange + Web)	510 - 800	360 - 640	Combined Flexural & Shear Strengthening	More Complex

۶- نتیجه‌گیری

این تحقیق به بررسی نتایج مختلف تقویت تیر فولادی با الیاف تقویتی پرداخته و نتایج مهم آن به شرح زیر است:

۱)تمامی نمودار منحنی نمونه‌ها در محدوده جابه‌جایی قائم بین ۴۰۰ تا ۷۵۰ میکرو–کرنش دچار تسلیم شدند. همچنین مقاومت نقطه تسلیم نمونه ها بین ۲۶ تا ۱۷۹ کیلونیوتن مشاهده شده است.

۲)تقویت تیر فولادی با الیاف تقویتی تاثیر بسیار کمی بر سختی اولیه دارد (بین ۳ تا ۱۰ درصد) به طوری که تیر با لاغری بیشتر، افزایش سختی اولیه بالاتری دارد. از طرفی تاثیر اصلی تقویت تیر فولادی با الیاف تقویتی در سختی ثانویه است که رابطه مستقیمی با معیار مقاومت نهایی دارد.

۳)نصب الیاف زیر بال کششی تیر فولادی باعث غیرخطی شدن رفتار تیر پس از نقطه تسلیم می‌شود، در حالی که نصب الیاف در دو طرف جان، رفتار تیر را خطی می‌کند.

۴)پس از تسلیم، سختی تیر فولادی کاهش می‌یابد و تقویت با تقویتی این کاهش را تحت تأثیر قرار می‌دهد که این میزان معمولاً

در حدود ۸۰ تا ۹۷ درصد می‌باشد و کربنی کاهش سختی بیشتری نسبت به شیشه‌ای ایجاد می‌کند. همچنین، تیرهای با مقطع کوچک‌تر کاهش سختی کمتری تجربه می‌کنند و نصب الیاف در دو طرف جان و بال کششی (موقعیت ۳) کاهش سختی را به حداقل می‌رساند.

۵)با تقویت تیر فولادی، سختی اولیه افزایش می‌یابد، همچنین با کاهش لاغری تیر، سختی اولیه نسبی کاهش می‌یابد.

۶)کاهش فاکتور شکل‌پذیری با نصب الیاف تقویتی بین ۱۱ تا ۱۶ درصد می‌باشد و تحقیقات نشان می دهد که استفاده از الیاف شیشه ای بیشتر از کربنی کاهش می‌یابد و نصب الیاف در دو طرف جان تیر شکل‌پذیری بالاتری نسبت به حالات دیگر دارد.

۷)نصب الیاف ترکیبی بال و جان تیر سختی ثانویه بیشتری دارد و تیرهای تقویت‌شده با شیشه‌ای سختی ثانویه بیشتری نسبت به کربنی دارند. همچنین، با افزایش لاغری مقطع، سختی ثانویه تیر کاهش می‌یابد.

۸)الیاف کربنی به‌طور متوسط ۴۵ تا ۵۵ درصد گران‌تر از الیاف شیشه‌ای است. هزینه کربنی در نصب زیر بال کششی حدود ۵۴ درصد، در دو طرف جان تیر حدود ۴۸ درصد و در نصب ترکیبی حدود ۴۵ درصد بیشتر است. این اختلاف به دلیل مقاومت و دوام بالاتر کربنی نسبت به شیشه‌ای است، درحالی‌که شیشه‌ای گزینه‌ای اقتصادی‌تر اما با عملکرد ضعیف‌تر برای شرایط بحرانی محسوب می‌شود.

منابع

[1] Bastani A, Das S, Kenno S.Rehabilitation of carbon fabric in thin-walled structures.Thin-Walled Structures. 2019;143:106215. https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.10621

[2] Elkhabeery OH, Safar SS, Mourad SA. Flexural strength of steel I-beams reinforced with carbon sheets at tension flange. Journal of Constructional Steel Research. 2018; 148: 572-588. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.05.038.

[3] M'Bazaa I, Missihoun M, Labossiere P. Strengthening of reinforced concrete beams with carbon sheets. First International Conference on Composites in Infrastructure. 1996;1-17. https://doi.org/1022124/JCR.2023.23414.1606.

[4] Choi DU, Kang THK, Ha SS, Kim KH, Kim W. Flexural and bond behavior of concrete beams strengthened with hybrid carbon-glass fiber-reinforced polymer sheets. ACI Structural Journal. 2011; 108(1): 90. https://doi.org/10.14359/51664206.

[5] Deng J, Jia Y, Zheng H. Theoretical and experimental study on notched steel beams strengthened with carbon plate. Composite Structures. 2016; 136: 450–459. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.10.024.

[6] Deng J, Li J, Xie W. Numerical study on notched steel beams strengthened by carbon plates. Construction and Building Materials. 2018; 163: 622–633. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.110.

[7] Jagtap PR, Pore SM. Strengthening of fully corroded steel I-beam with carbon laminates. Materials Today: Proceedings. 2021; 43: 2170–2175. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.106.

[8] Yu QQ, Wu YF. Fatigue retrofitting of cracked steel beams with carbon laminates. Composite Structures. 2018;192:232-244. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.090.

[9] Altaee M, Cunningham LS. Practical application of carbon strengthening to steel floor beams with web openings: A numerical investigation. Journal of Constructional Steel Research. 2019; 155: 395–408. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.01.006.

[10] Gholami M, Mohd Sam AR, Marsono AK. Performance of steel beams strengthened with pultruded carbon plate under various exposures. Steel and Composite Structures. 2016; 20(5): 999–1022. https://doi.org/10.12989/scs.2016.20.5.999.

[11] Li J, Deng J, Wang Y. Experimental study of notched steel beams strengthened with a carbon plate subjected to overloading fatigue and wetting/drying cycles. Composite Structures. 2019; 209: 634–643. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.11.020.

[12] Madhavan M, Sanap V, Verma R. Flexural strengthening of structural steel angle sections using CFRP: Experimental investigation. Journal of Composites for Construction. 2016. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000578.

[13] Selvaraj S, Madhavan M. Carbon strengthened steel beams: Improvement in failure modes and performance analysis. Structures. 2017;120-131. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.08.008.

[14] Katrizadeh E, Narmashiri K. Experimental study on failure modes of MF-carbon strengthened steel beams. Journal of Constructional Steel Research. 2019; 158: 120–129. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.03.027.

[15] Bastani A, Das S, Lawn D. Rehabilitation of shear deficient steel beams using strengthening fabric. Structures. 2019; 19: 349–361. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.01.019.

[16] Al-Emrani M, Kliger R. Performance with carbon laminate – Part 1: Laboratory tests. Composites Part B. Engineering. 2010; 41(7): 509–515. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.07.002.

[17] Zhang D, Wang Q, Dong J. Simulation study on carbon strengthened reinforced concrete beam under four-point bending. Computers and Concrete. 2016; 17(3): 407–421. http://dx.doi.org/10.12989/cac.2016.17.3.407