رویکردهای نوین در مهندسی عمران، دوره هشتم، شماره چهارم ۱۴۰۳، صفحه: ۱-۱۴

ارزیابی عملکرد مواد کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف برای ساخت عرشه پل

آسو بهجت حسن شیخان [۱*]، پنام زرفام [۲]، آرمین عظیمی نژاد [۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران*

[۲] استادیار گروه مهندسی عمران واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(aso.93.shah@gmail.com)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۱۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵)

چکیده

عرشه‌های پل نقش حیاتی در عملکرد کلی سازه‌های پل ایفا می‌کنند و استفاده از مواد نوین مانند کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه می‌تواند چالش‌های مرتبط با وزن زیاد، خوردگی و هزینه‌های تعمیر و نگهداری مصالح سنتی مانند بتن و فولاد را کاهش دهد. این پژوهش با هدف بررسی عملکرد مکانیکی عرشه های پل پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه تحت شرایط بارگذاری مختلف، به روش عددی انجام شده است. برای این منظور، مدل‌سازی‌های سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام گرفته و رفتار عرشه‌ها تحت بارگذاری گسترده و متحرک تحلیل شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی نشان داد که عرشه‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه در مقایسه با مصالح سنتی توزیع بار بهتری داشته و تغییر شکل آن‌ها در محدوده مجاز آیین‌نامه‌ای قرار دارد (.(L/250همچنین، الگوی توزیع تنش نشان داد که نواحی مختلف عرشه تحت تأثیر بارگذاری، رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند، به‌طوری که بخش‌هایی تحت کشش و بخش‌هایی دیگر تحت فشار قرار می‌گیرند. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهند که بهینه‌سازی جهت‌گیری الیاف و استفاده از ترکیب مواد هیبریدی می‌تواند تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد سازه‌ای داشته باشد. این تحقیق نشان می‌دهد که عرشه‌های پل ساخته‌شده از کامپوزیت های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه ، گزینه‌ای سبک، مقاوم و اقتصادی برای استفاده در پل‌های مدرن محسوب می‌شوند. همچنین، پیشنهاد می‌شود که پایش سلامت سازه‌ای با استفاده از حسگرهای تعبیه‌شده برای نظارت مستمر بر عملکرد عرشه‌ها مورد استفاده قرار گیرد تا ایمنی و دوام آن‌ها در طول عمر بهره‌برداری افزایش یابد.

کلمات کلیدی

پل های مدرن، عرشه پل، مواد کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف، دوام و خستگی، شبیه‌سازی عددی.

Performance Evaluation of Fiber-Reinforced Polymer Composite Materials for Bridge Deck Construction

Aso Behjat Hassan Shaikhan [1*], Panam Zarfam, [2], Armin Aziminejad [2]

[1] Master of Science student in Structural Engineering, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran*

[2] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(aso.93.shah@gmail.com)

(Date of received: 15/09/2024, Date of accepted: 31/12/2024)

ABSTRACT

Bridge decks play a vital role in the overall performance of bridge structures, and the use of novel materials such as glass fiber reinforced polymer composites can reduce the challenges associated with high weight, corrosion, and maintenance costs of traditional materials such as concrete and steel. This study aims to numerically investigate the mechanical performance of glass fiber reinforced polymer bridge decks under different loading conditions. For this purpose, 3D modeling was performed using ABAQUS software and the behavior of the decks under extended and dynamic loading was analyzed. The results of numerical analyses showed that glass fiber reinforced polymer decks have better load distribution compared to traditional materials and their deformation is within the permissible range of regulations (L/250). Also, the stress distribution pattern showed that different areas of the deck behave differently under loading, with some parts under tension and others under compression. The research findings show that optimizing fiber orientation and using hybrid material combinations can have a significant impact on improving structural performance. This research shows that bridge decks made of glass fiber reinforced polymer composites are a lightweight, robust, and economical option for use in modern bridges. It is also suggested that structural health monitoring using embedded sensors be used to continuously monitor the performance of the decks to increase their safety and durability throughout their service life.

Keywords:

Modern bridges, Bridge deck, Fiber-reinforced polymer composite materials, Durability and fatigue, Numerical simulation.

۱- مقدمه

صنعت ساخت و ساز پیشرفت های قابل توجهی در علم مواد داشته است که منجر به توسعه کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف به عنوان جایگزینی امیدوارکننده برای مواد سنتی مانند فولاد و بتن شده است [۱]. کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف، متشکل از الیاف با استحکام بالا که در یک ماتریس پلیمری تعبیه شده اند، خواص مکانیکی عالی، مقاومت در برابر خوردگی و ویژگی های سبک وزن را ارائه می دهند [۲]. این ویژگی‌ها آن‌ها را برای کاربردهای عرشه پل، جایی که دوام، ظرفیت باربری و مقاومت در برابر شرایط محیطی حیاتی هستند، ایده‌آل می‌کند [۳]. مواد معمولی مانند بتن و فولاد در برابر خوردگی، خستگی و تخریب محیطی حساس هستند. کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف این چالش ها را با ارائه دوام بیشتر، کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری و طول عمر طولانی برطرف می کنند که آنها را به گزینه ای جذاب برای مهندسی پل تبدیل می کند [۴]. استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف در عرشه پل‌ها توسط عوامل متعددی از جمله محدودیت‌های مواد سنتی، تقاضا برای ساخت و ساز سریع و نیاز به زیرساخت های پایدار هدایت می‌شود. مواد سنتی، علیرغم مقاومت شان، سنگین، مستعد خوردگی هستند و نیاز به تعمیر و نگهداری مکرر دارند [۵]. در مقابل، کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف یک جایگزین سبک وزن و در عین حال قوی ارائه می کنند که کارایی ساختاری را افزایش می دهد و هزینه های طولانی مدت را کاهش می دهد [۶]. پیش ساخته عرشه پل پلیمری تقویت شده با الیاف امکان نصب سریعتر را فراهم می کند و اختلالات در محل را به حداقل می رساند. در محیط‌هایی با شرایط سخت، مانند مناطق ساحلی، طبیعت مقاوم در برابر خوردگی پلیمر تقویت‌شده با الیاف، عملکرد طولانی‌مدت را تضمین می‌کند [۳]. علاوه بر این، پایداری مواد پلیمری با تلاش‌های جهانی برای کاهش اثرات زیست‌محیطی همسو می‌شود، زیرا آنها به بهره‌وری انرژی و حفظ منابع کمک می‌کنند. در طول سال ها، تحقیقات گسترده ای در مورد کاربرد کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف در ساخت پل انجام شده است [۷]. مطالعات بر عملکرد مکانیکی، دوام تحت بارگذاری چرخه ای و مقاومت در برابر عوامل محیطی مانند نوسانات دما و قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی متمرکز شده است [۸]. علاوه بر این، محققان قابلیت اقتصادی عرشه های پل پلیمری تقویت شده با الیاف را بررسی کرده اند و پتانسیل آنها را برای کاهش هزینه های چرخه عمر برجسته کرده اند [۹]. با این حال، چندین شکاف در تحقیق باقی مانده است، از جمله نیاز به مطالعات تجربی و عددی جامع برای ارزیابی عملکرد بلندمدت عرشه‌های پل پلیمری تقویت‌شده با فیبر در شرایط واقعی و داده های محدودی در مورد رفتار آنها در سناریوهای شدید محیطی مانند چرخه های یخ–ذوب و فعالیت لرزه ای موجود است [۱۰]. علاوه بر این، فقدان دستورالعمل‌های طراحی استاندارد مانع پذیرش گسترده کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف در مهندسی پل می‌شود. پرداختن به این شکاف ها از طریق مطالعات دقیق و شبیه سازی های عددی برای تسهیل کاربرد گسترده تر مواد پلیمری تقویت شده با الیاف ضروری است. هدف این مطالعه ارزیابی عملکرد کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف برای کاربردهای عرشه پل، با تمرکز بر رفتار مکانیکی، دوام و کارایی ساختاری است. این تحقیق به دنبال ارائه یک درک جامع از مزایا و محدودیت های مواد پلیمری تقویت شده با الیاف در ساخت پل است. سوالات کلیدی تحقیق عبارتند از: خواص مکانیکی کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف در شرایط بارگذاری مختلف چیست؟ عوامل محیطی چگونه بر عملکرد بلند مدت آنها تأثیر می گذارد؟ عرشه پل پلیمری تقویت شده با الیاف چه مزایایی از نظر مقرون به صرفه بودن و عملکرد چرخه عمر در مقایسه با مواد سنتی ارائه می دهد؟ چگونه تکنیک‌های مدل‌سازی عددی، مانند تحلیل اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، می‌توانند رفتار عرشه‌های پل پلیمری تقویت‌شده با فیبر را پیش‌بینی کنند؟ پاسخ به این سوالات به دانش پایه کمک می کند و توصیه های عملی برای استفاده از کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف در مهندسی پل ارائه می دهد.

۲- پیشینه تحقیق

مواد کامپوزیت پلیمری از دو جزء اصلی تشکیل شده اند: الیاف و ماتریس پلیمری. الیاف که معمولاً از موادی مانند شیشه، کربن یا آرامید ساخته می شوند، استحکام و سختی کامپوزیت را فراهم می کنند، در حالی که ماتریس پلیمری، معمولاً رزین اپوکسی یا پلی استر، الیاف را به هم متصل می کند و بارها را بین آنها منتقل می کند [۱۱]. ترکیب این اجزا منجر به تولید ماده ای با خواص مکانیکی برتر مانند نسبت مقاومت به وزن بالا، مقاومت در برابر خستگی و دوام عالی در مقایسه با مصالح ساختمانی سنتی می شود [۱۲]. الیاف استحکام کششی و سختی را فراهم می کنند، در حالی که ماتریس پلیمری انتقال بار و حفاظت از محیط را تضمین میکند. رابط بین این دو جزء نقش مهمی در تعیین عملکرد کلی ماده کامپوزیت ایفا می کند [۱۳].

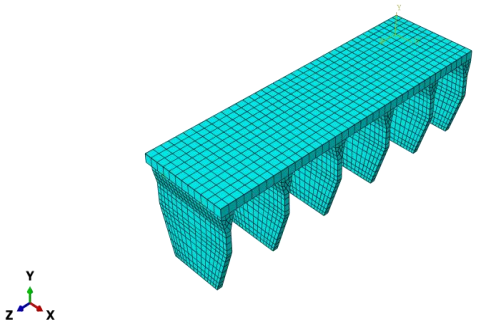
خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف آنها را برای کاربردهای عرشه پل بسیار مناسب، حیاتی و کاربردی می کند [۱۴]. این مواد دارای استحکام کششی بالا، چگالی کم و مقاومت در برابر خستگی عالی هستند [۱۵]. علاوه بر این، آنها مقاومت بالایی در برابر خوردگی، رطوبت و شرایط محیطی سخت از خود نشان می دهند که آنها را به جایگزینی جذاب برای فولاد و بتن تبدیل می کند [۱۶]. مطالعات نشان داده‌اند که کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف می‌توانند یکپارچگی مکانیکی خود را تحت شرایط بارگذاری چرخه‌ای حفظ کنند، که برای سازه‌های پل تحت بارهای ترافیکی مداوم بسیار مهم است. ماهیت سبک وزن آنها حمل و نصب آسان تر را تسهیل می کند و زمان ساخت و هزینه های کار را کاهش می دهد [۱۷]. علاوه بر این، کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف مقاومت بالایی در برابر ضربه دارند که باعث افزایش دوام آنها در کاربردهایی می شود که در بارگذاری دینامیکی یک نگرانی محسوب می شود. مطالعات متعددی برای بررسی امکان سنجی استفاده از کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف در ساخت عرشه پل انجام شده است. تحقیقات بر عملکرد ساختاری، سهولت نصب و مزایای اقتصادی آنها متمرکز شده است [۱۸]. بررسی‌های تجربی نشان داده‌اند که عرشه های پل پلیمری تقویت‌شده با الیاف می‌توانند بارهای قابل توجهی را تحمل کنند و در عین حال یکپارچگی ساختاری خود را در دوره‌های طولانی حفظ کنند [۱۹]. علاوه بر این، کاربردهای میدانی بینش های ارزشمندی را در مورد رفتار بلندمدت آنها تحت شرایط مختلف محیطی ارائه کرده اند. علی‌رغم این یافته‌های امیدوارکننده، چالش‌هایی مانند هزینه اولیه مواد و نیاز به تکنیک‌های نصب تخصصی به‌عنوان موانعی برای پذیرش گسترده شناسایی شده‌اند [۲۰]. نظارت طولانی مدت و ارزیابی عملکرد عرشه های پل پلیمری تقویت شده با الیاف موجود شواهدی از دوام آنها ارائه کرده است، اما مطالعات بیشتری برای بهینه سازی طراحی و کاربرد آنها مورد نیاز است. در مقایسه با مواد سنتی مانند بتن و فولاد، کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف چندین مزیت را ارائه می دهند. آنها به طور قابل توجهی سبک تر هستند که هزینه های حمل و نقل و نصب را کاهش می دهد. مقاومت آنها در برابر خوردگی و تخریب محیطی منجر به نیازهای تعمیر و نگهداری کمتر و عمر طولانی تر می شود [۲۱]. در مقابل، سازه های فولادی مستعد زنگ زدگی هستند و نیاز به تعمیر و نگهداری مکرر دارند، در حالی که بتن تحت سیکل های یخ-ذوب مستعد ترک خوردگی و زوال است. با این حال، مصالح سنتی سابقه خوبی دارند و به طور گسترده در دسترس هستند، که آنها را به انتخاب ارجح در بسیاری از پروژه های ساختمانی معمولی تبدیل می کند [۱۸]. چالش در نشان دادن مقرون به صرفه بودن و قابلیت اطمینان طولانی مدت کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف برای تشویق پذیرش گسترده تر آنها در صنعت ساخت و ساز است. علاوه بر این، مواد پلیمری تقویت‌شده با الیاف، عملکرد خستگی بالاتری را ارائه می‌کنند و آنها را برای کاربردهایی با چرخه بارگذاری مکرر ایده‌آل می‌کند، برخلاف فولاد که در طول زمان ممکن است از شکست ناشی از خستگی رنج ببرد.

۳- روش تحقیق

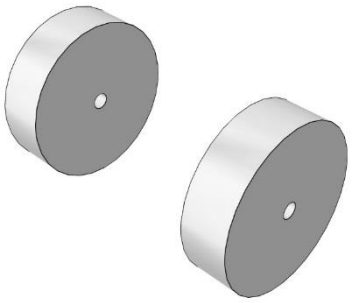
این مطالعه از تحلیل اجزای محدود برای ارزیابی عملکرد ساختاری مواد کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف در ساخت عرشه پل استفاده کرد. برای شبیه سازی و تحلیل رفتار این مواد در شرایط بارگذاری مختلف از نرم افزار تحلیل اجزا محدود (آباکوس) استفاده شد. قابلیت‌های آباکوس، از جمله پشتیبانی از تحلیل‌های خطی و غیرخطی، برای دستیابی به پیش‌بینی دقیق پاسخ‌های ساختاری مورد استفاده قرار گرفته است. هندسه عرشه پل بر اساس مشخصات طراحی با در نظر گرفتن پارامترهای کلیدی مانند طول، عرض و ضخامت تعریف شد. عرشه با استفاده از عناصر پوسته برای نشان دادن ساختار نسبتا نازک آن مدل‌سازی شد، در حالی که تیرهای نگهدارنده و سایر اجزای ساختاری با استفاده از عناصر جامد یا تیر مدل‌سازی شدند. ویژگی هایی مانند سطوح منحنی، اتصالات انبساط، و برهمکنش با تیرهای نگهدارنده و پایه ها با استفاده از ابزارهای مدل سازی پارامتریک موجود در آباکوس به طور دقیق نشان داده شد. ابعاد هندسی و پارامترهای مورد استفاده در فرآیند مدلسازی در جدول ۱ و مدل پل در شکل ۱ آروده شده است.

جدول ۱: تایید هندسه مدل شده در برابر مشخصات طراحی.

پارامتر	ابعاد مدل شده (متر)	ابعاد طراحی (متر)	خطا (درصد)
طول عرشه پل	۴۰,۰	۴۰,۲	۰,۵
عرض عرشه	۱۲,۰	۱۱,۸	۱,۷
ارتفاع تیر	۲,۵	۲,۴	۴,۲
عرض تیر	۱,۲	۱,۱	۹,۱



شکل ۱: نمونه ای از مدلسازی پل و عرشه پل.



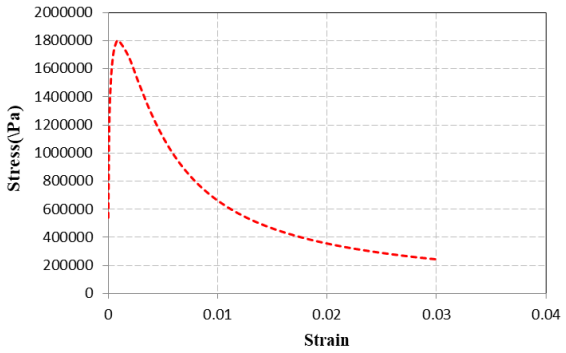
شکل ۲: شکل مدلسازی شده چرخ.

خواص مواد به اجزای مختلف مدل اختصاص داده شد و رفتار ناهمسانگرد کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف را در نظر گرفت. این مواد از یک ماتریس رزین و الیاف تقویت کننده تشکیل شده اند که هر کدام دارای خواص مکانیکی منحصر به فردی هستند. آباکوس برای تعریف جهت فیبر، ضخامت لایه و تعامل بین فیبر و ماتریس مجاز است. خواص مکانیکی مانند مدول یانگ، نسبت پواسون و استحکام کششی برای اطمینان از شبیه‌سازی واقعی رفتار مکانیکی تحت شرایط بارگذاری مختلف اختصاص داده شد.

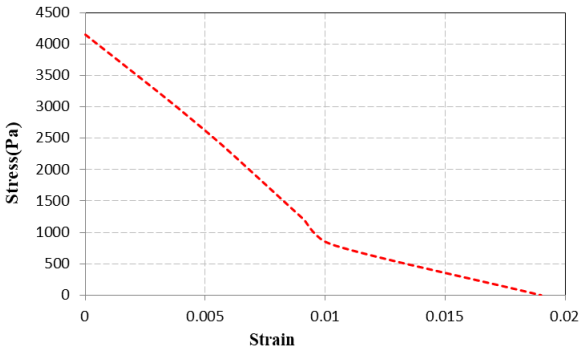
(ب) (الف)

شکل ۳: رابطه نیرو بر اساس جابجایی الف)حالت خطی ب)غیرخطی.

تحلیل هر دو رویکرد خطی و غیرخطی را در نظر گرفت. تحلیل خطی یک رابطه متناسب بین بارهای اعمال شده و پاسخ سیستم را فرض می کند که محاسبات ساده را امکان پذیر میکند. در مقابل، تجزیه و تحلیل غیرخطی تغییرات در سختی ناشی از تغییر شکل ساختاری را در نظر گرفت و نمایش دقیق تری از شرایط تجربی ارائه داد. تجزیه و تحلیل غیرخطی شامل غیرخطی بودن هندسی و مواد بود که در آن جابجایی های بزرگ، برهمکنش های تماسی و آسیب های پیشرونده در نظر گرفته شد.

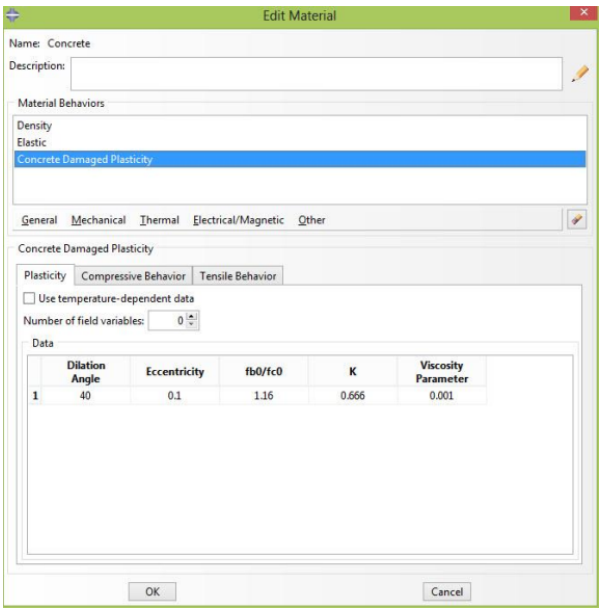


شکل ۴: نمودار تنش-کرنش فشاری بتن.



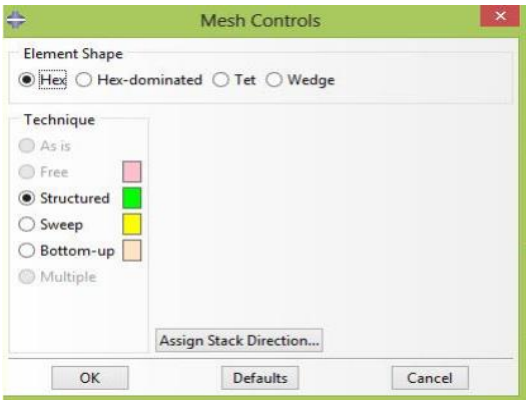
شکل ۵: نمودار تنش-کرنش کششی بتن.

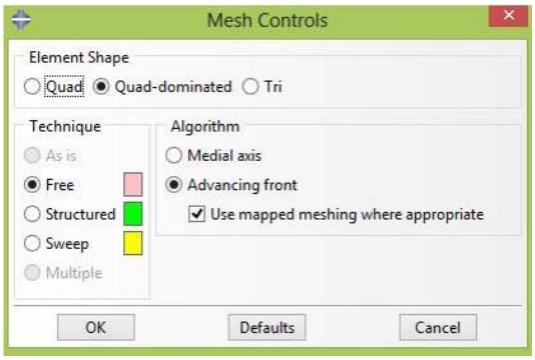
شرایط مرزی مناسب و سناریوهای بارگذاری برای تکرار شرایط تجربی اعمال شد. تکیه گاه های ثابت در تکیه گاه پل اعمال شد، در حالی که تکیه گاه های غلتکی یا لولا برای پایه های میانی استفاده شد. سناریوهای بارگذاری شامل بارهای مرده مانند وزن خود پل، بارهای زنده ناشی از ترافیک وسایل نقلیه، بارهای محیطی شامل تغییرات فشار باد و دما و بارهای لرزه ای ناشی از اثرات بالقوه زلزله بود. برای اطمینان از ارزیابی جامع، ترکیبات بار به دنبال کدها و استانداردهای طراحی مربوطه اعمال شد. جدول ۳ شرایط بارگذاری اعمال شده و محدودیت های مرزی مربوطه اجرا شده در شبیه سازی را نشان می دهد

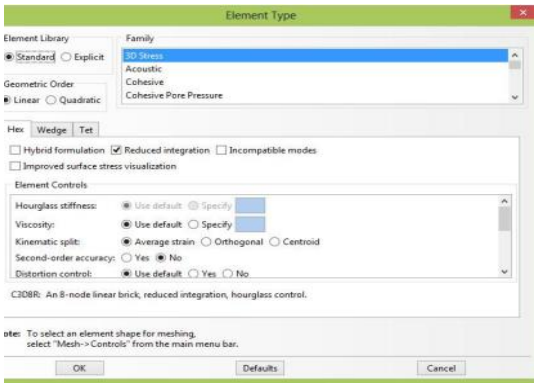


شکل ۶: نمونه ای از تعریف مشخصات مصالح در آباکوس.

یک استراتژی مش بندی ساختاریافته برای اطمینان از دقت محاسباتی اتخاذ شد. از عناصر پوسته برای عرشه پل استفاده شد، درحالیکه تیر برای سازه های پشتیبانی استفاده شد. یک مش ریزتر برای مناطق پر استرس مانند مناطق نزدیک تکیه گاه و مناطق ترافیک سنگین اعمال شد تا غلظت تنش را به طور دقیق ثبت کند. عنصر نوع C3D8I، که دارای هشت گره و سه درجه آزادی در هر گره است، برای ارائه یک نمایش دقیق از پاسخ سازه تحت شرایط بارگذاری مختلف استفاده شد.







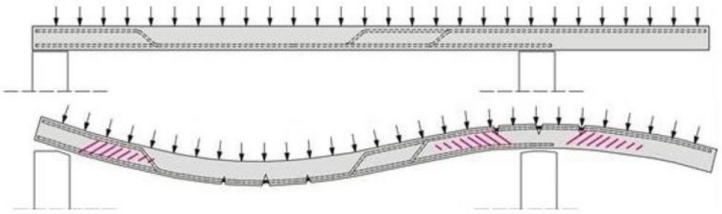
شکل۷: مراحل مش بندی در آباکوس.

پس از تعریف هندسه، تخصیص خواص مواد، اعمال شرایط مرزی و تولید مش، آنالیز در چند مرحله اجرا شد. در ابتدا، تحلیل خطی استاتیکی برای ارزیابی یکپارچگی سازه تحت بارهای مرده و زنده انجام شد. پس از آن، تجزیه و تحلیل دینامیکی برای ارزیابی پاسخ به بارهای لرزه ای و ارتعاشات ناشی از ترافیک انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده از تجزیه و تحلیل، از جمله جابجایی، توزیع تنش، و حالت های شکست، برای ارائه بینشی در مورد عملکرد مواد کامپوزیت پلیمری تقویت‌شده با الیاف در کاربردهای عرشه پل، تجزیه و تحلیل شدند. یافته های این مطالعه به درک مزایای بالقوه و محدودیت‌های استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف در کاربردهای عرشه پل کمک می‌کند. نتایج می تواند به عنوان مبنایی برای بهینه سازی انتخاب مواد، طراحی سازه و استراتژی های تعمیر و نگهداری برای پروژه های پل آینده باشد.

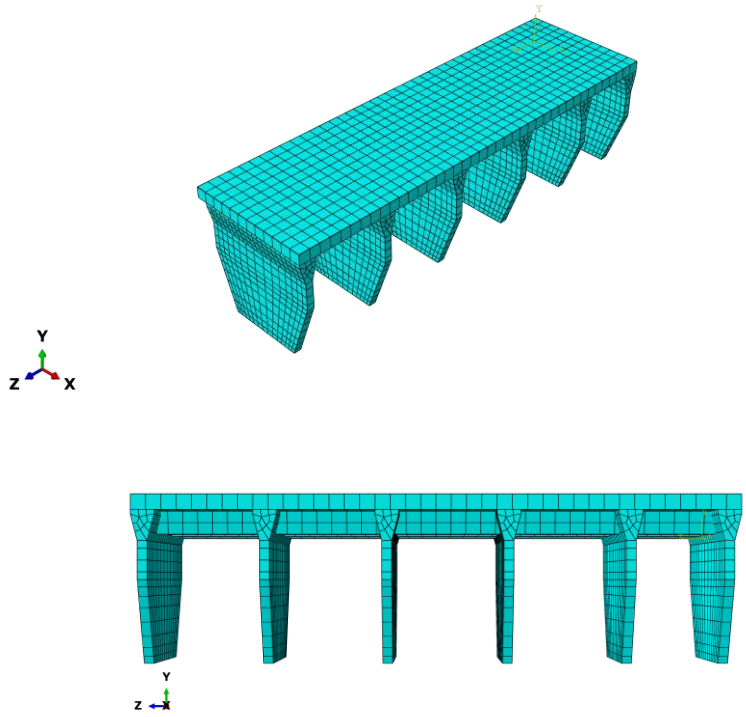
۴- نتایج و تحلیل داده ها

۴-۱-تغییر شکل مجاز عرشه پل

عرشه پل به انواع انعطاف پذیر و صلب طبقه بندی می شود. عرشه های انعطاف‌پذیر، که معمولاً از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف ساخته می‌شوند، به دلیل خواص مکانیکی پلیمرها و تقویت‌کننده‌هایی مانند الیاف شیشه، رفتار خمشی تحت بار از خود نشان می‌دهند. در مقابل، عرشه های صلب که از بتن یا فولاد تشکیل شده‌اند، به دلیل مدول الاستیسیته بالا، سختی بیشتری دارند. عرشه های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه به دلیل سبک وزن، مقاومت در برابر خوردگی بالا و ظرفیت باربری کارآمد به طور فزاینده ای در ساخت پل های مدرن استفاده می شوند. آنها توزیع بار یکنواخت و عملکرد مکانیکی بهبود یافته را ارائه می دهند. این مطالعه رفتار عرشه پل های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه را تحت شرایط بارگذاری مختلف با استفاده از روش‌های عددی در آباکوس تجزیه و تحلیل کرد. شبیه سازی ها شامل بارهای متحرک و ارزیابی تغییر شکل و توزیع تنش بود. یافته ها نشان می دهد که مواد پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه تحت سناریوهای بارگذاری مختلف عملکرد خوبی دارند.



شکل ۸: رفتار خمشی عرشه پل.

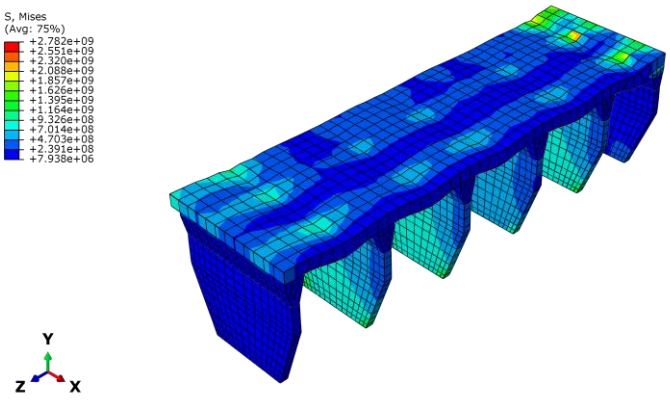


شکل ۹: مدلسازی عرشه پل در نرم افزار اباکوس.

اصول تجزیه و تحلیل دال چند لایه برای مدل‌سازی عرشه های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه تحت بارهای توزیع شده، با در نظر گرفتن خواص مواد و شرایط پشتیبانی اعمال شد. بخش‌های عرشه هم کشش و هم فشار را تجربه می‌کنند، با انحراف‌های مجاز که معمولاً L/250 تعریف می‌شوند. محدودیت انحراف برای عرشه پل در کدهای مهندسی بر اساس مواد و نوع بار مشخص شده است. طبق AASHTO و ACI، عرشه‌های فولادی و بتنی امکان انحراف بین L/800 و L/1000 را برای بارهای ترکیبی فراهم می‌کنند، در حالی که عرشه‌های کامپوزیتی مانند پلیمر های تقویت شده با الیاف شیشه از استانداردهای خاصی مانند ICC و ASTM پیروی می‌کنند، با محدودیت‌های عموماً بین L/500 و L/1000. این تحقیق پتانسیل کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه را در کاربردهای عرشه پل برجسته می‌کند و بهینه‌سازی جهت‌گیری فیبر، استفاده از لایه‌های ترکیبی ترکیبی و اجرای تکنیک‌های ساخت پیشرفته را توصیه می‌کند.

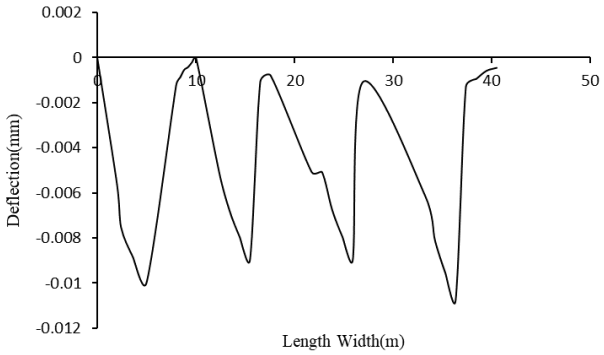
۴-۲-مدل های عددی و ارائه نتایج

شکل زیر تنش‌های وارد بر عرشه کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای را نشان می‌دهد که بارگذاری متحرک (چرخ‌ها) مطابق با شرایط بار وارده روی عرشه حرکت کرده‌اند. در این حالت، رفتار مکانیکی عرشه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه ، به‌ویژه توزیع تنش در زیر نقاط بارگذاری و نواحی اطراف، تحت تأثیر ویژگی‌های الاستیک و ایزوتروپیک کامپوزیت قرار دارد. این نوع مصالح با توزیع بار یکنواخت‌تر نسبت به عرشه‌های بتن پلیمری، امکان کاهش تمرکز تنش و عملکرد سازه‌ای بهتری را فراهم می‌کنند.



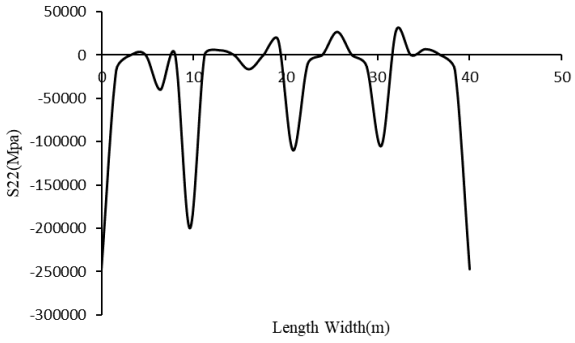
شکل ۱۰: تنش های عرشه پل.

شکل زیر نمودار تغییر شکل عرشه کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای در طول حرکت چرخ‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به تصویر، قسمت میانی عرشه به دلیل توزیع بار و فاصله از تکیه‌گاه‌ها، تغییر شکل بیشتری را تجربه کرده است. این رفتار نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری مناسب مواد پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و توانایی آن‌ها در جذب بارهای ترافیکی بدون کاهش عملکرد سازه‌ای است. علاوه بر این، این نوع تغییر شکل‌ها با توجه به طراحی لایه‌های کامپوزیتی و خواص الیاف شیشه می‌توانند بهینه شوند تا عملکرد سازه‌ای بهتری داشته باشند.

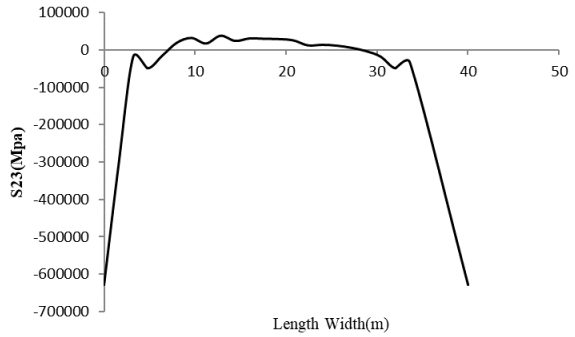


شکل ۱۱: نمودار تغییر شکل عرشه کامپوزیتی در طول حرکت چرخ‌ها

تغییرات تنش نرمال و تنش برشی روی سطح عرشه GFRP مطابق شکل زیر است. همان‌طور که نشان داده شده است، تنش نرمال و برشی به دلیل حرکت چرخ‌ها روی عرشه، ضربات نوسانی وارد می‌کند. همچنین، در ابتدا و انتهای سطح، به دلیل وجود تکیه‌گاه‌های گیردار، بیشترین مقادیر تنش مشاهده می‌شود. در طول مسیر حرکت چرخ‌ها نیز اعوجاج‌هایی از تنش به دلیل ویژگی‌های خاص مصالح کامپوزیتی و نحوه انتقال بار ایجاد می‌شود. این رفتار نشان‌دهنده کارایی الیاف شیشه در بهبود جذب تنش‌های ضربه‌ای و کاهش تمرکز تنش در نواحی بحرانی است. همچنین، طراحی مناسب لایه‌های کامپوزیت می‌تواند تأثیر این نوسانات را کاهش دهد و عملکرد بهینه‌تری در برابر بارهای ترافیکی ارائه دهد.



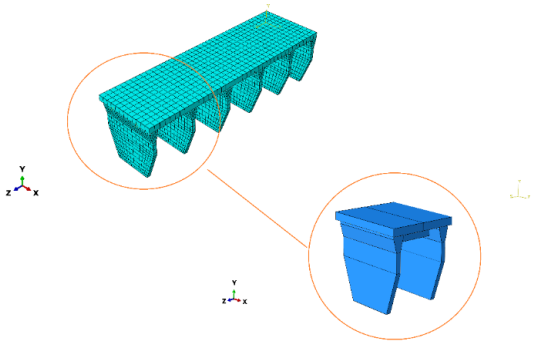
شکل ۱۲: نمودار تغییرات تنش نرمال رویه عرشه پل در طول حرکت چرخ ها.



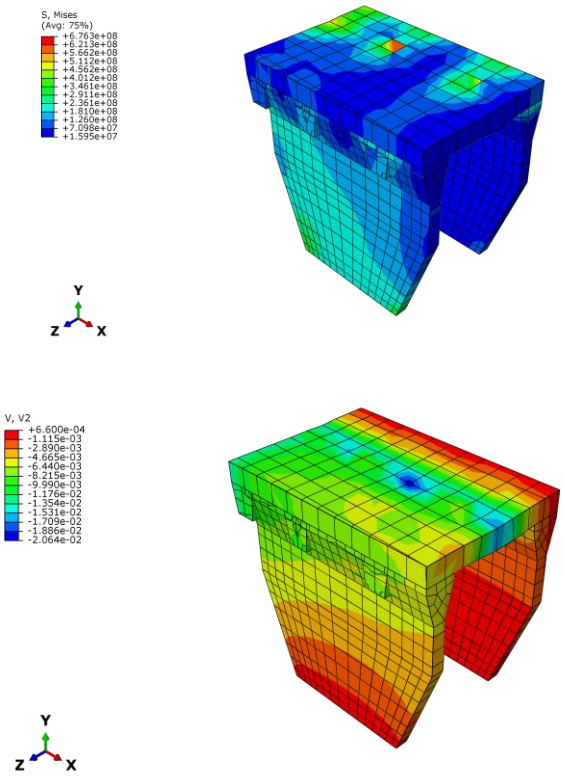
شکل ۱۳: نمودار تغییرات تنش برشی رویه عرشه پل در طول حرکت چرخ ها.

۴-۳- بررسی پارامترهای مختلف آرماتورهای GFRP در عرشه پل

در این قسمت، برای بررسی پارامترهای مختلف مرتبط با آرماتورهای GFRP در عرشه پل، یک دهانه از پل را به ابعاد ۱۰ متر و در عرض ۱۲ متر درنظر گرفته و مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. این پارامترها شامل فاصله آرماتورها از سطح عرشه، فاصله نسبی بین آرماتورها، زاویه چینش آرماتورها و تأثیر آن‌ها بر توزیع تنش و تغییر شکل عرشه است.



شکل۱۴: انتخاب یک دهانه از کل عرشه پل.



شکل ۱۵: اثر آرماتورهای پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه برای یک دهانه از عرشه پل

این پارامترها در شکل‌های زیر نشان داده شده‌اند. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که تنظیم دقیق این متغیرها می‌تواند نقش کلیدی در بهبود عملکرد سازه‌ای و کاهش تنش‌های موضعی در عرشه داشته باشد. همچنین، تغییرات در فاصله و زاویه چینش آرماتورها بر پایداری عرشه و رفتار دینامیکی آن در برابر بارگذاری متحرک تأثیر قابل توجهی دارد.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

یافته های این مطالعه تأیید می کند که عرشه های پل کامپوزیت پلیمری تقویت شده با فیبر شیشه ای مزایای قابل توجهی را در مقایسه با مواد معمولی مانند بتن و فولاد ارائه می دهند. این مزایا شامل کاهش وزن قابل توجهی ، مقاومت زیاد در برابر خوردگی و قابلیت های بارگذاری قابل تنظیم است. شبیه سازی های عددی انجام شده با استفاده از نرم افزار آباکوس نشان می دهد که عرشه های پلیمری تقویت شده با فیبر شیشه ای توزیع بار افزایش یافته و عملکرد ساختاری بهبود یافته تحت سناریوهای مختلف بارگیری را نشان می دهند. نتایج تجزیه و تحلیل نشان داد که حداکثر انحراف عرشه های پلیمری تقویت شده با فیبر شیشه ای در محدوده مجاز تعریف شده توسط کدهای طراحی مربوطه باقی مانده است ، به طور خاص دهانه تقسیم شده توسط دویست و پنجاه برای بارهای توزیع شده. علاوه بر این ، تجزیه و تحلیل توزیع استرس نشان داد که بخش های مهم عرشه نیروهای کششی را تجربه می کنند ، در حالی که سایر مناطق تحت نیروهای فشاری قرار می گیرند ، که با پیش بینی های نظری برای ساختارهای کامپوزیت چند لایه سازگار است. یکی از یافته های کلیدی این تحقیق تأثیر جهت گیری الیاف بر رفتار ساختاری کلی عرشه است. بهینه سازی تراز الیاف در لایه های کامپوزیت می تواند منجر به انتقال بار موثرتر و کاهش غلظت تنش شود. علاوه بر این، ترکیب پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه با سایر مواد تقویت‌کننده، مانند الیاف کربن یا بازالت، می‌تواند خواص مکانیکی عرشه، به ویژه مقاومت آن در برابر خستگی و دوام طولانی‌مدت را افزایش دهد. با توجه به معیارهای انحراف، این مطالعه عملکرد عرشه‌های پل پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای را با مواد سنتی بر اساس استانداردهای مهندسی به‌طور گسترده‌ای شناخته شده مقایسه کرد. عرشه پل های بتنی و فولادی معمولاً انحرافات را در محدوده دهانه تقسیم بر ۸۰۰ تا دهانه تقسیم بر ۱۰۰۰ برای شرایط بار ترکیبی، همانطور که توسط انجمن آمریکایی مقامات بزرگراه

و حمل و نقل ایالتی و مؤسسه بتن آمریکا مشخص شده است، اجازه می دهد. در مقابل، عرشه های پلیمری از استانداردهای خاصی مانند شورای بین‌المللی کد و انجمن آمریکایی آزمایش و مواد پیروی می‌کنند، با انحراف‌های مجاز از تقسیم دهانه بر ۵۰۰ تا دهانه تقسیم بر ۱۰۰۰، بسته به شرایط بار و الزامات برنامه است. بر اساس این یافته‌ها، چندین توصیه طراحی برای بهینه‌سازی بیشتر عملکرد عرشه‌های پل کامپوزیتی پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه پیشنهاد شده‌اند. اولین توصیه، اصلاح فرآیند تولید برای دستیابی به یکنواختی بیشتر در خواص مواد و به حداقل رساندن عیوب احتمالی است که می تواند بر عملکرد طولانی مدت تأثیر بگذارد. توصیه دوم شامل اجرای استراتژی های تقویت ترکیبی است که می تواند استحکام و سختی بیشتری را برای عرشه فراهم کند. ثالثاً، نظارت منظم بر سلامت سازه باید با استفاده از فن‌آوری‌های پیشرفته حسگر تعبیه‌شده برای جمع‌آوری داده‌های بی‌درنگ در مورد رفتار عرشه، امکان تعمیر و نگهداری به موقع و حصول اطمینان از انطباق با استانداردهای طراحی به کار گرفته شود. تحقیقات آینده باید بر اعتبار تجربی یافته های عددی به دست آمده در این مطالعه تمرکز کند. انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی در مقیاس کامل و بررسی‌های میدانی در محل، بینش عمیق‌تری را در مورد عملکرد واقعی عرشه‌های پل پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای تحت شرایط مختلف محیطی، از جمله نوسانات دما، قرار گرفتن در معرض رطوبت، و اثرات بارگذاری پایدار ارائه می‌دهد. علاوه بر این، برنامه‌های نظارت بلندمدت می‌توانند به ارزیابی مکانیسم‌های تخریب بالقوه و پیش‌بینی عمر مفید کمک کنند. در نتیجه، این تحقیق پتانسیل کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه را به عنوان یک راه حل موثر و بادوام برای ساخت عرشه پل برجسته می کند. ترکیبی از ماهیت سبک وزن، نسبت برتر مقاومت به وزن و مقاومت استثنایی در برابر عوامل محیطی آنها را به جایگزینی جذاب برای مواد سنتی تبدیل کرده است. عرشه پل پلیمری تقویت شده با فیبر شیشه ای با ترکیب پیشرفت های طراحی توصیه شده و استراتژی های نظارتی می تواند به توسعه راه حل های زیرساختی پایدار و مقرون به صرفه کمک کند که نیازهای مهندسی پل مدرن را برآورده کند.

۶- مراجع

1-D. K. Rajak, D. D. Pagar, P. L. Menezes, and E. Linul, “Fiber-reinforced polymer composites: Manufacturing, properties, and applications,” Polymers (Basel)., vol. 11, no. 10, p. 1667, 2019.

2-M. I. Alam, K. M. Maraz, and R. A. Khan, “A review on the application of high-performance fiber-reinforced polymer composite materials,” GSC Adv. Res. Rev., vol. 10, no. 2, pp. 20–36, 2022.

3-H. T. Ali et al., “Fiber reinforced polymer composites in bridge industry,” in Structures, 2021, vol. 30, pp. 774–785.

4-A. Dinița et al., “Advancements in fiber-reinforced polymer composites: a comprehensive analysis,” Polymers (Basel)., vol. 16, no. 1, p. 2, 2023.

5-S. Navaratnam, K. Selvaranjan, D. Jayasooriya, P. Rajeev, and J. Sanjayan, “Applications of natural and synthetic fiber reinforced polymer in infrastructure: A suitability assessment,” J. Build. Eng., vol. 66, p. 105835, 2023.

6-S. Maiti, M. R. Islam, M. A. Uddin, S. Afroj, S. J. Eichhorn, and N. Karim, “Sustainable fiber-reinforced composites: a Review,” Adv. Sustain. Syst., vol. 6, no. 11, p. 2200258, 2022.

7-J. Wang, B. Cheng, X. Yan, K. Zhang, and Z. Zhou, “Structural analysis and optimization of an advanced all-GFRP highway bridge,” in Structures, 2021, vol. 34, pp. 3155–3171.

8-H. Xin, A. Mosallam, J. A. F. O. Correia, Y. Liu, J. He, and Y. Sun, “Material-structure integrated design optimization of GFRP bridge deck on steel girder,” in Structures, 2020, vol. 27, pp. 1222–1230.

9-R. Haghani, J. Yang, M. Gutierrez, C. D. Eamon, and J. Volz, “Fiber Reinforced Polymer Culvert Bridges—A Feasibility Study from Structural and LCC Points of View,” Infrastructures, vol. 6, no. 9, p. 128, 2021.

10-M. Abuassi and M. Bisharah, “Machine learning-based assessment of seismic performance in fiber-reinforced polymer (FRP) retrofitted bridges,” Asian J. Civ. Eng., pp. 1–13, 2025.

11-X. Zou, H. Lin, P. Feng, Y. Bao, and J. Wang, “A review on FRP-concrete hybrid sections for bridge applications,” Compos. Struct., vol. 262, p. 113336, 2021.

12-W. Hu, Y. Li, and H. Yuan, “Review of experimental studies on application of FRP for strengthening of bridge structures,” Adv. Mater. Sci. Eng., vol. 2020, pp. 1–21, 2020.
13-Y. J. Kim, “State of the practice of FRP composites in highway bridges,” Eng. Struct., vol. 179, pp. 1–8, 2019.
14-J. Naveen, M. Jawaid, P. Amuthakkannan, and M. Chandrasekar, “Mechanical and physical properties of sisal and hybrid sisal fiber-reinforced polymer composites,” in Mechanical and physical testing of biocomposites, fibre-reinforced composites and hybrid composites, Elsevier, 2019, pp. 427–440.
15-H. Jariwala and P. Jain, “A review on mechanical behavior of natural fiber reinforced polymer composites and its applications,” J. Reinf. Plast. Compos., vol. 38, no. 10, pp. 441–453, 2019.
16-K. Agarwal, S. K. Kuchipudi, B. Girard, and M. Houser, “Mechanical properties of fiber reinforced polymer composites: A comparative study of conventional and additive manufacturing methods,” J. Compos. Mater., vol. 52, no. 23, pp. 3173–3181, 2018.
17-G. Feng, D. Zhu, S. Guo, M. Z. Rahman, Z. Jin, and C. Shi, “A review on mechanical properties and deterioration mechanisms of FRP bars under severe environmental and loading conditions,” Cem. Concr. Compos., vol. 134, p. 104758, 2022.
18-P. G. Kossakowski and W. Wciślik, “Fiber-reinforced polymer composites in the construction of bridges: Opportunities, problems and challenges,” Fibers, vol. 10, no. 4, p. 37, 2022.
19-X. Wang, Z. Peng, Z. Wu, and S. Sun, “High-performance composite bridge deck with prestressed basalt fiber-reinforced polymer shell and concrete,” Eng. Struct., vol. 201, p. 109852, 2019.
20-J. Qureshi, “A review of fibre reinforced polymer bridges,” Fibers, vol. 11, no. 5, p. 40, 2023.
21-M. Y. Yuhazri, A. J. Zulfikar, and A. Ginting, “Fiber reinforced polymer composite as a strengthening of concrete structures: A review,” in *IOP* Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 1003, no. 1, p. 12135.