

# مطالعه آزمایشگاهی و عددی عرشه‌های هیبریدی فولاد-FRP تحت بارهای خمشی

سجاد جمی<sup>۱</sup>، حامد خضرزاده<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران (سازه)، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

\*khezrzadeh@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۱۲/۲۷

تاریخ دریافت ۱۴۰۰/۱۲/۱۱

## چکیده

در طی چند دهه گذشته استفاده از مصالح نوین افزایش قابل توجهی در ساخت و ساز بسیاری از سازه‌ها داشته‌اند. در این پژوهش یک عرشه نوین ساختمانی ارائه شده و به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. در تمامی عرشه‌ها از چسب وینیل استر برای اتصال پروفیل‌های FRFP به یکدیگر استفاده شده است. در عرشه‌های هیبریدی مقاطع سرد نورد توسط چسب به مقاطع FRFP و توسط تسمه‌های فولادی به یکدیگر متصل شده‌اند. برای تعیین مشخصات مکانیکی مصالح از آزمایش‌های خمش سه نقطه‌ای، فشاری و کششی برای مصالح FRFP، آزمایش کشش برای ورق فولاد، و آزمایش کشش و برش برای چسب اپوکسی استفاده شده است. پس از انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت مصالح، ظرفیت خمشی چهار نمونه عرشه مورد بررسی قرار گرفته است. متغیرهای اصلی آزمایش عرشه‌ها شامل طول عرشه، اثر مقطع سرد نورد و تعداد مقطع‌های FRFP بوده است. با بررسی نتایج آزمایشگاهی مشخص شد که شکست ترد بین مقطع‌های FRFP در ناحیه چسب (برای عرشه‌های فاقد مقطع فولادی) رخ داده است، خرابی‌های موضعی قابل توجه بوده و جدایش بین لایه‌ای نیز در مقطع‌های FRFP در بار نهایی مشاهده شده است. افزودن مقطع سرد نورد شده آثار چشمگیری در بهبود ظرفیت خمشی و سختی عرشه‌های کامپوزیت داشته‌اند و باعث جلوگیری از جدایش در لایه‌های چسب شده که باعث یکپارچگی عملکرد عرشه شده است. علاوه بر این افزایش شکل پذیری باعث بهبود قابلیت اعتماد عرشه‌های هیبرید در مقایسه با عرشه‌های ساخته شده از FRP شده است. همان‌گونه که اشاره شد ظرفیت باربری عرشه‌ها نیز به میزان مناسبی افزایش یافته است. پس از انجام آزمایش‌های ذکر شده، عرشه‌های آزمایش شده با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی شده‌اند و نتایج بدست آمده از مدل‌سازی و آزمایش‌های انجام شده با یکدیگر مطابقت مناسبی دارند. همچنین خرابی‌های مشاهده شده در آزمایش‌های انجام شده مشابه با خرابی‌های پیش‌بینی شده در مدل‌سازی بوده است. پس از درستی آزمایشی نتایج آزمایشگاهی و عددی مطالعه پارامتریک برای پیش‌بینی تاثیر پارامترهای مختلف روی رفتار عرشه‌ها صورت پذیرفته است.

واژگان کلیدی: سازه‌های کامپوزیتی، عرشه‌های کامپوزیتی هیبرید، کامپوزیت‌های FRP، مطالعه آزمایشگاهی، وزن سازه، روش اجزاء محدود

تحلیل غیرخطی.

## ۱ - مقدمه و تاریخچه تحقیقات

پیشرفت‌های چشمگیر در تولید مصالح جدید با عملکرد بالا باعث کاربرد آنها در ساخت سازه‌های جدید و تغییر روش‌های متداول ساخت شده است. مقاطع FRP به عنوان مصالحی که دارای مقاومت و دوام بالا و وزن کم هستند کاربردهای وسیعی در صنعت ساخت پیدا کرده‌اند. یکی از کاربردهای این مقاطع ساخت عرشه‌های سبک است. این عرشه‌ها در ساخت پل‌ها، کف سازه‌های دریایی و کف ساختمان‌های مسکونی قابل استفاده هستند، که جایگزینی عرشه‌های متداول با آنها باعث افزایش سرعت ساخت و امکان ساخت قطعه‌ای می‌شود. علاوه بر این دوام عرشه‌های ساخته شده از مواد کامپوزیت در برابر عوامل مخرب جوی بسیار بالا است. یکی دیگر از دلایل استفاده از این عرشه‌ها وزن کم آنها است که در هنگام زلزله موجب کاهش وزن موثر لرزه‌ای سازه‌ها می‌شود و منجر به کاهش آثار مخرب زلزله بر سازه‌ها می‌شود.

مصالح کامپوزیت رفتار متفاوتی نسبت به مصالح همگن دارند و بیشتر روابط پیچیده‌تری لازم است تا رفتار این نوع مصالح را تعیین کرد. متناسب با نوع ماده کامپوزیت روش‌های متعددی برای تعیین مشخصات مکانیکی مصالح کامپوزیت معرفی شده‌اند. این روش‌ها روش‌های تحلیلی مبتنی بر شبیه‌سازی دقیق ریزساختار [1, 2] تا روش‌های آزمایشگاهی [3-5] را در بر می‌گیرند.

در دو دهه گذشته، استفاده از عرشه‌های کامپوزیت FRP در سازه‌ها روند رو به رشدی داشته است. عرشه‌های کامپوزیت FRP وزن کمی دارند، به علاوه آن مقاومت بالایی در برابر خمش از خود نشان می‌دهند. نصب عرشه‌های کامپوزیت FRP بسیار آسان بوده و با سرعت بیشتری حتی نسبت به عرشه‌های پیش ساخته بتنی قابل اجرا هستند [6-10]. عرشه‌های کامپوزیت نوین به مرور در ساخت پل‌های بزرگراهی استفاده شده و جایگزین عرشه‌های متداول می‌شوند. آیین‌نامه‌های مختلفی برای طراحی این عرشه‌ها گردآوری شده تا مهندسين بتوانند این عرشه‌ها را با سهولت بیشتری طراحی کنند و همچنین ایمنی آنها را کنترل کنند که یکی از آنها CEN Euro code 5 [11] است. به همین خاطر لازم است که عملکرد عرشه‌های کامپوزیت با

استفاده از روش‌های مختلف بررسی شود. روش‌هایی همچون روش‌های آزمایشگاهی عملکرد عرشه‌های کامپوزیت را به خوبی نشان می‌دهد. روش دیگری نیز که بسیار کارآمد است روش اجزاءمحدود است که با استفاده از این روش بسیاری از عرشه‌های کامپوزیت دارای هندسه و بارگذاری پیچیده هستند را می‌توان مورد بررسی قرار داد. در بسیاری از پژوهش‌های گذشته نتایج بدست آمده از روش اجزاءمحدود هماهنگی مناسبی با نتایج بدست آمده از آزمایش‌های انجام شده داشته‌اند [12-15]. در تحقیقات دیگر عرشه‌های کامپوزیت برای بهسازی در پل‌های ساخته شده استفاده شده است. عرشه‌های کامپوزیت مورد نظر جایگزین عرشه‌های فرسوده بتنی پل شده است. در گزارش‌های ارائه شده نشان داده شده است که وزن عرشه‌های کامپوزیت استفاده شده در این پل ۸۰ درصد کمتر از وزن عرشه بتنی فرسوده بوده است. این کاهش وزن موجب کاهش وزن مرده پل مورد نظر شده و باعث افزایش عمر اسکلت اصلی سازه از جمله ستون‌ها و خرپای‌های انتقال دهنده بار می‌شود. پس از جایگزینی عرشه‌های کامپوزیت ذکر شده با عرشه بتنی فرسوده، با استفاده از بارگذاری استاتیکی آزمایش‌های مختلفی روی پل بازسازی شده انجام شده است تا طراحی‌های انجام شده درستی آزمایی شود [16, 17].

در دیگر تحقیقات انجام شده، به بررسی عرشه‌های کامپوزیت هیبریدی تشکیل شده از بتن و FRP پرداخته شده است. این عرشه‌ها دارای ضخامت کم بوده و با استفاده از مقطع‌های FRP بال‌پهن I شکل ساخته شده که با توجه به گزارش‌های داده شده از نظر هزینه‌های ساخت مقرون به صرفه بوده و نسبت وزن عرشه ذکر شده به مقاومت آن بسیار کم بوده که نشان از کارایی بالای این عرشه‌ها در ساخت سازه است. در این تحقیق با استفاده از روش‌های ذکر شده، لغزش بین بتن و مقطع FRP می‌تواند به حداقل برسد که در صورت کم شدن لغزش در این عرشه‌ها یکپارچگی کامل در سیستم برقرار می‌شود که این موجب افزایش ظرفیت باربری عرشه می‌شود. در این پژوهش با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی لغزش میان بتن و مقطع FRP بررسی شده است و برای کم کردن لغزش در سیستم از پیچ‌های فولادی رزوه شده استفاده شده است [18-20].

در سال ۲۰۰۴ در تحقیقات بررسی شده به عرشه‌های سه لایه پرداخته شده است، که هر یک از لایه‌ها کاربرد منحصر به فرد خود را دارند. یک لایه FRP کامپوزیت در ناحیه کششی عرشه استفاده شده است زیرا این مصالح در کشش مقاومت بالایی دارند، در لایه میانی عرشه از بتن سبک استفاده شده است که بیشتر این مصالح برای پر کردن ناحیه میانی عرشه بوده و سختی مناسبی به سیستم می‌دهد، و در انتها در ناحیه فشاری عرشه مورد نظر یک لایه بتن مسلح UHPFRC با مقاومت بالا در برابر نیروی فشاری استفاده شده است تا در فشار عرشه ساخته شده عملکرد مناسبی داشته باشد. نتایج نشان داده است که عرشه‌های ساخته شده ظرفیت مناسبی داشته‌اند و یکپارچگی در سیستم به خوبی برقرار شده است [21-26].

در سال ۲۰۰۶ به بررسی سیستم کامپوزیت متشکل از عرشه FRP و شاهتیر فولادی پرداخته شده، که اتصال این دو با چسب انجام شده است. عرشه FRP چسب شده به شاهتیر فولادی به عنوان بال بالایی عرشه پل استفاده شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داده که استفاده از این سیستم باعث افزایش قابل توجه سختی عرشه پل شده است. باتوجه به گزارش‌های داده شده در زمان شکست عرشه‌های مورد نظر تحت بارگذاری استاتیکی بال پایینی شاهتیر فولادی به تسلیم رسیده است. همچنین باتوجه به مشاهدات انجام شده هیچگونه خرابی باتوجه به بارگذاری خستگی در سازه مورد نظر مشاهده نشده است. نتایج نشان داده است که همانطور که استفاده از برشگیرها در طراحی عرشه‌های بتنی حائز اهمیت است، باید اتصالات در عرشه‌های کامپوزیت FRP نیز بدقت انجام شود [27].

تحقیقات دیگری برای بررسی یکپارچگی عرشه‌های کامپوزیت با شاهتیر تیر پل‌ها انجام شده است که در این تحقیق عرشه‌های ذکر شده با استفاده از مقطع‌های پالترورژن FRP ساخته شده است. هندسه عرشه‌های ساخته شده از بهم پیوستن چشمه‌های دوزنقه‌ای تشکیل شده است. آزمایش‌های انجام شده نشان داده است که عرشه‌های کامپوزیت قرار گرفته در بال بالایی شاهتیر فولادی پل توانسته‌اند در برابر فشار اعمال شده به دلیل خمش‌های اعمال شده به سازه مقاومت مناسبی را نشان دهند. این نتیجه نشان دهنده مقاومت بالای عرشه‌های کامپوزیت در

برابر فشار درون صفحه‌ای و مقاومت برشی بالایی آن‌ها است. آثار هندسه و جهت‌گیری الیاف در مقطع‌های FRP نیز بررسی شده است که نتایج نشان دهنده آن است که قرار دادن الیاف در راستای طولی عرشه باعث نتایج مناسبتری شده، و همچنین چشمه‌های دوزنقه‌ای هندسه مناسبی برای ساخت جان این عرشه بوده‌اند [28, 29].

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی و عددی عرشه‌های کامپوزیت پرداخته شده است. عرشه‌های ارائه شده با پیوستن مقطع‌های GFRP جعبه‌ای ساخته شده‌اند که اتصال مقطع‌های GFRP با استفاده از چسب پرمقاومت انجام شده است. دو عرشه ابتدایی بدون مقطع سرد نورد فولادی ساخته شده تا مقاومت مقاطع به تنهایی بررسی شود. مقاطع سرد نورد فولادی نیز با چسب به مقطع‌های GFRP متصل شده و توسط تسمه‌های فولادی به یکدیگر متصل شده‌اند. پس از آن تمامی عرشه‌ها مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته‌اند. عرشه‌های آزمایش شده با استفاده از روش عددی نیز مدل‌سازی شده‌اند و نتایج مدل‌سازی‌ها با نتایج آزمایش‌های انجام شده درستی آزمایی شده‌اند که از این مدل‌های عددی برای بررسی پارامتریک رفتار عرشه‌های هیبرید استفاده شده است. در بخش نتیجه‌گیری، مشخصات مکانیکی مصالح و همچنین نتایج بدست آمده از آزمایش و مدل‌سازی عرشه‌ها ارائه شده است. در پایان جمع‌بندی و نتیجه‌گیری آورده شده است.

## ۲- ارزیابی آزمایشگاهی

### ۲-۱- مشخصات عرشه‌های ارائه شده

در این تحقیق چهار عرشه هیبریدی کامپوزیت با عملکرد یکطرفه ساخته و تحت بارگذاری خمشی استاتیکی آزمایش شده است. پارامترهای بررسی شده شامل آثار مقطع سرد نورد فولادی و طول عرشه‌ها بوده است. مصالح استفاده شده در عرشه‌ها مقاطع قوطی GFRP بوده که به عنوان هسته اصلی عرشه‌ها استفاده شده است. عرشه‌های ساخته شده به اختصار از D1 تا D4 نامگذاری شده‌اند (Deck). در جدول (۱) جزئیات عرشه‌ها ارائه شده است که شامل استفاده از مقطع سرد نورد فولادی، تعداد مقطع‌های GFRP و طول آن‌ها هست. عرشه‌های آزمایش شده برای

بررسی مقاومت برشی پانچ و ظرفیت خمشی خالص آزمایش شده‌اند. نمونه‌های آزمایش شده برای بدست آوردن ظرفیت خمشی خالص آزمایش شده‌اند و از هرگونه وقوع نیروهای برشی در مقطع عرشه جلوگیری شده است.

جدول ۱. مشخصات اولیه عرشه‌های آزمایش شده.

Deck Label	Number of GFRP profiles	Using -Cold form Channel	Deck length (m)
D1	3	No	0.8
D2	3	No	1
D3	4	Yes	1
D4	5	Yes	1.5

Table 1. Parameters of the deck specimens.

شکل ۳. مصالح آزمایش شده (a: نمونه‌ی فشاری و b) نمونه‌های کششی.

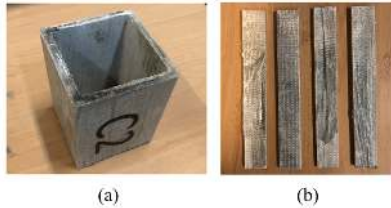


Fig. 3. GFRP tested materials: a) compression specimens and b) tension specimens.

شکل ۴. مصالح آزمایش شده چسب: (a) نمونه‌های کششی و (b) نمونه‌ی برشی.

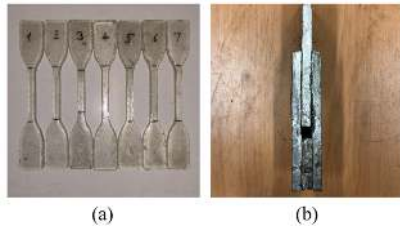


Fig. 4. Adhesive tested materials: a) tension specimens and b) shear specimens.

### ۲-۱- نمونه‌ها و روش‌های آزمایش

برای آزمایش نمونه‌های GFRP، در مجموع ۲۰ عدد نمونه با چهار مقطع عرضی مختلف بررسی شده است.

جدول ۲. مشخصات هندسی و روش آزمایش‌های مصالح GFRP.

Test specimen	Testing method	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)	Thickness (mm)
Cubic	Compression	100	76.2	76.2	6.35
Sheet	Three point bending	200	30	-	6.35
Box profile	Three point bending	340	76.2	76.2	6.35
Tension specimen	Direct tension	180	40	-	6.35

Table 2. Geometry properties and test procedures of GFRP.

مشخصات هر یک از نمونه‌ها در جدول (۲) نشان داده شده است. نمونه‌های فشاری هر یک به طول ۱۰۰ میلی متر بریده شده‌اند، برای اینکه از وقوع هرگونه کماتشی جلوگیری شود. نمونه‌های خمشی نیز به طول ۲۰۰ میلی متر بریده شده‌اند تا خمش کامل

شکل ۱. عرشه‌های ساخته شده: (a) D1، (b) D2، (c) D3.

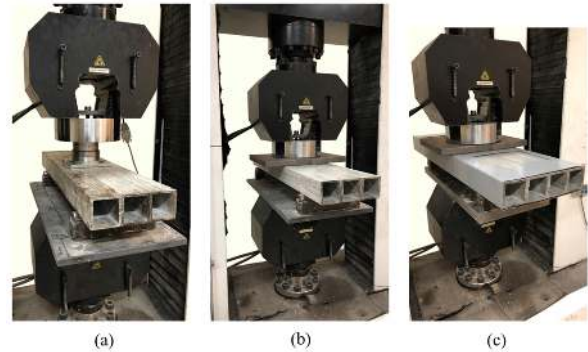


Fig. 1. Deck specimens: a) D1, b) D2, c) D3.

شکل ۲. بارگذاری نمونه‌ی D4.

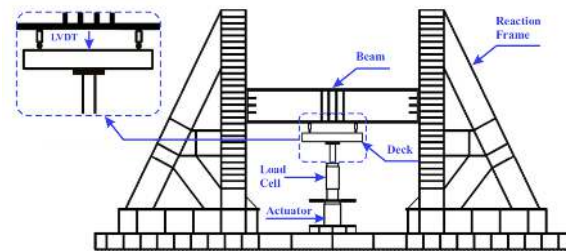


Fig. 2. Setup of D4 specimen.

### ۲-۲- مصالح عرشه

از پروفیل‌های GFRP برای ساخت عرشه‌های مختلف استفاده شده است. چسب وینیل استر استفاده شده شامل، رزین وینیل استر ۹۲۲، کبالت MEKP ۱۰ درصد، دی‌آمین و شتاب دهنده است. ورق فولاد استفاده شده از نوع St37 بوده و دارای

در این نمونه‌ها بوجود آید و از وقوع نیروی برشی در نمونه‌ها جلوگیری شود.

در این نمونه‌ها بوجود آید و از وقوع نیروی برشی در نمونه‌ها جلوگیری شود.

### ۲-۳-۱- آزمایش خمش سه نقطه‌ایی

در مجموع پنج نمونه خمشی باتوجه به استاندارد ASTM [38-40]، برای بدست آوردن مشخصات خمشی مصالح GFRP، آزمایش شده است. چهار نمونه آن شامل ورق‌های GFRP بوده است، که هریک از آن‌ها به طول ۲۰۰ میلی متر بریده شده است. یک نمونه دیگر نیز مقطع قوطی GFRP بوده است، که طول آن نمونه برابر ۳۵۰ میلی متر است. مشخصات نمونه‌ها و پروتکل آزمایش در جدول (۳) نشان داده شده است.

آزمایش کششی انجام شده روی ورق فولاد و بدست آوردن مشخصات مکانیکی آن با استفاده از چهار نمونه دمبلی<sup>۱</sup> که با برش لیزر انجام شده است، که جزئیات نمونه‌های کششی مطابق استاندارد ASTM [30-32] است. پروتکل آزمایش کششی ورق فولاد در شکل (۵) نشان داده شده است. پس از انجام آزمایش کششی ورق فولاد، ابعاد نمونه‌های گسیخته شده برای بدست آوردن نمودارهای تنش حقیقی-کرنش حقیقی، اندازه‌گیری شده است.

شکل ۵. بارگذاری نمونه‌های GFRP: (a) نمونه فشاری، (b) نمونه خمشی، (c) نمونه کششی.

جدول ۳. ابعاد نمونه‌های خمشی سه نقطه‌ایی (mm).

Specimen	Thickness	Width	Height	Loading span
Box profile	6.35	76.2	76.2	220
GFRP sheet	6.35	30	-	120

Table 3. Dimensions of three-point bending test setup (mm).

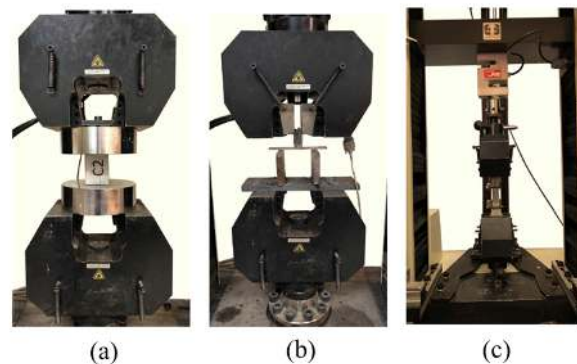


Fig. 5. Loading GFRP specimens: a) compression, b) flexural, and c) tension specimens.

### ۲-۳-۲- آزمایش فشاری

نمونه‌های فشاری GFRP نیز به طول ۱۰۰ میلی متر بریده شده است، این میزان طول نمونه‌های فشاری موجب جلوگیری از رخداد هرگونه کمانش در نمونه‌های فشاری می‌شود. برای بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها، چهار نمونه فشاری باتوجه به استاندارد ASTM [39-42]، در نظر گرفته شده است.

همچنین برای بدست آوردن مشخصات مکانیکی چسب نیز آزمایش‌های کششی و برشی چسب انجام شده است. نمونه‌های کششی آزمایش چسب به شکل دمبلی بوده و باتوجه به استاندارد ASTM [33-35] بدست آمده است.

### ۲-۳-۳- آزمایش کششی

نمونه‌های کششی GFRP، به دلیل دقت بالای برش واترجت، توسط این روش بریده شده است. همچنین نمونه‌های کششی GFRP باتوجه به استاندارد ASTM D3039 بدست آمده است. نتایج بدست آمده از آزمایش کششی با استفاده از اکستنسومتر بدست آمده است، به دلیل آنکه مشخصات الاستیک ورق‌های

### ۲-۳-۲- روش‌های آزمایش مصالح عرشه

تمامی آزمایش‌ها توسط دستگاه‌های با ظرفیت ۱۵۰ و ۱۰۰۰ کیلونیوتن انجام شده است. نیروی اعمال شده به نمونه‌ها با عملکرد کنترل جابه‌جایی انجام شده است و با نرخ سرعت ۱/۱

GFRP توسط چسب به یکدیگر متصل شده‌اند و راستای ساخت پالتروژن مقطع‌ها نیز در راستای طول عرشه قرار دارد. روی نمونه D1 بارگذاری سوراخ کننده انجام شده است. نمونه D2 توسط بارگذاری گسترده‌تر نسبت به نمونه D1 برای بررسی رفتار برش پانچ آزمایش شده است. در نمونه D3 از مقطع سرد نورد استفاده شده است، تا یکپارچگی میان مقطع‌ها به خوبی برقرار شود. مقطع سرد نورد توسط جوش آرگون جوش داده شده است تا دقت بالا در جوشکاری رعایت شود، و ضخامت ورق‌ها برابر ۲ میلی متر است. در نمونه D4 نیز از مقطع سرد نورد استفاده شده است با این تفاوت که طول بیشتری دارد تا اثر خمش به خوبی بررسی شود. عرض تسمه‌های اتصال دهنده ناودانی‌ها برابر ۱۰ سانتی متر است.

ورق‌های ناودانی شکل از طریق نورد سرد فرم داده شده است و ابعاد ۳۸ میلی متر در هر وجه بال و ۷۶ میلی متر در جان دارد. همچنین تمامی عرشه‌ها تحت بارگذاری استاتیکی آزمایش شده‌اند.

### ۳ — نتایج آزمایشگاهی و مدل‌سازی‌های انجام شده

#### ۳ — ۱ — نتایج آزمایشگاهی مصالح عرشه و مودهای خرابی

##### ۳-۱-۱- نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای

باتوجه به آزمایش خمش سه نقطه‌ای ورق‌ها و پروفیل GFRP، تغییر شکل در این نمونه‌ها به صورت انعطاف پذیر بوده و سپس شکست الیاف رخ داده است.

شکل ۷. نمودار نیرو-جاب‌جایی خمش سه نقطه‌ای مقطع قوطی.

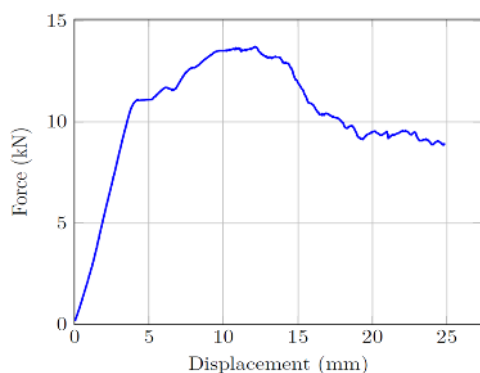


Fig. 7. Results from three-point bending tests of GFRP profile.

GFRP به طور دقیق بدست آید. مشخصات برشی نمونه چسب با استفاده از آزمایش برشی double-lap براساس استاندارد ASTM [41]، تعیین شده است.

### ۲-۴- نمونه عرشه‌ها و روش‌های آزمایش

باتوجه به جدول (۱) و شکل (۶)، چهار عرشه کامپوزیت ساخته شده است. یک عرشه با طول ۰/۸ متر طول، دو عرشه‌ی دیگر با طول ۱ متر و یک نمونه دیگر دارای ۱/۵ متر طول است. کوتاه‌ترین عرشه تحت بارگذاری سوراخ کننده آزمایش شده است. همچنین عرض و ارتفاع هریک از پروفیل‌های GFRP در شکل (۶) برابر ۷۶/۲ میلی متر است. آزمایش برشی چسب با استفاده از بارگذاری استاتیکی با سرعت خیلی کم (۰/۲ میلی متر بر دقیقه) انجام شده است. برای بدست آوردن انرژی شکست مصالح GFRP در حالت فشاری از آزمایش فشاری نمونه‌های مکعبی GFRP استفاده است.

شکل ۶. نمونه عرشه‌های ساخته شده: (a) D1، (b) D2، (c) D3، (d) D4.

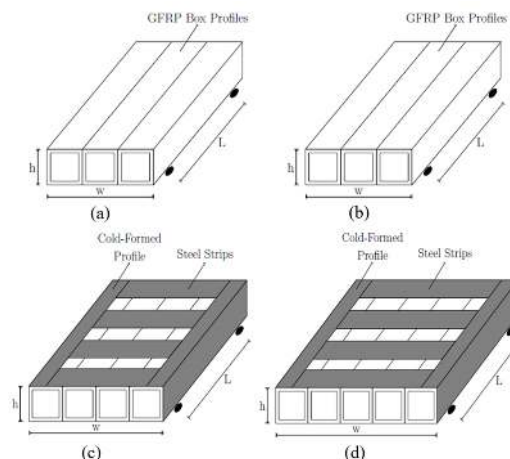


Fig. 6. Deck samples: a) D1, b) D2, c) D3, d) D4.

این آزمایش منجر به بدست آوردن مقاومت مقطع‌های GFRP در برابر بارگذاری سوراخ کننده شده است. دیگر عرشه‌ها برای بدست آوردن ظرفیت خمشی آن‌ها تحت بارگذاری فشاری، آزمایش‌ها انجام شده است. تکیه‌گاه عرشه‌ها به صورت ساده بوده و دوران در آن‌ها آزاد است. قطر تکیه‌گاه‌ها نیز برابر ۶۰ میلی متر است. عملکرد عرشه‌ها به صورت یکطرفه بوده و مقطع‌ها در جهت طولی عرشه‌ها قرار گرفته‌اند. مقطع‌های

شکل ۱۰. نمودار تنش- کرنش آزمایش کششی نمونه‌های GFRP.

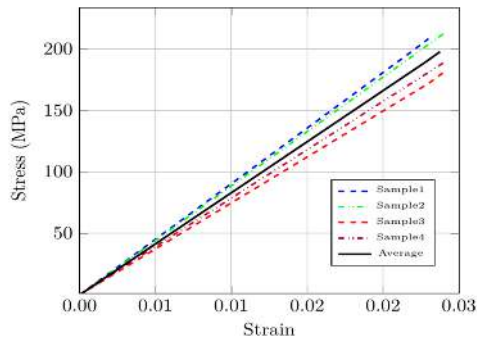


Fig. 10. Stress-strain curve from tensile tests of GFRP samples.

تمامی نمونه‌های آزمایش شده خرابی‌های مشابه را داشته‌اند. در شکل (۱۰) نمودار بدست آمده از آزمایش کششی GFRP نشان داده شده است. همچنین نتایج آزمایش کششی ورق فولادی در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

شکل ۱۱. نمودار تنش واقعی-کرنش واقعی نمونه‌های فولاد.

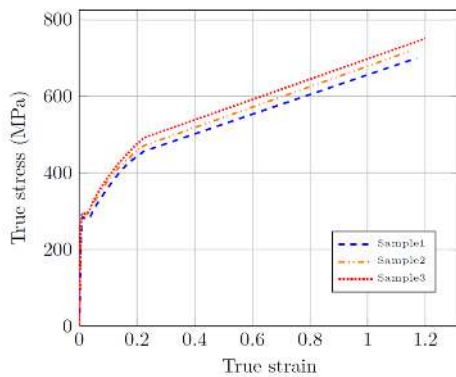


Fig. 11. True stress-true strain curves of steel plate.

چسب استفاده شده در عرشه‌ها نیز در دو حالت کششی و برشی آزمایش شده است. مود غالب شکست در آزمایش کششی چسب‌ها نیز شکست ترد بوده و شکل پذیری در آن مشاهده نشده است. نتایج آزمایش برشی چسب نیز در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

دلیل عمده این شکست آثار خمش بر تنش‌های کششی و فشاری در مقطع ورق بوده و تنش‌ها کاملاً در راستای الیاف اثر می‌کنند که این عامل سبب شکست در الیاف می‌شود.

شکل ۸. نمودار نیرو-جابجایی خمش سه نقطه‌ای ورق‌های GFRP.

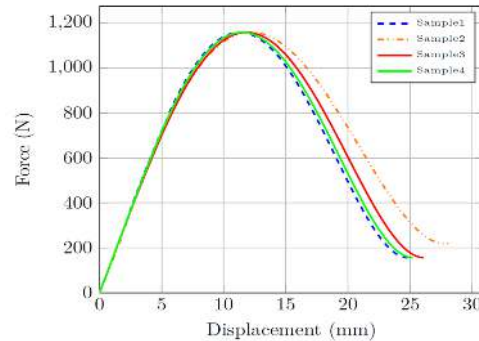


Fig. 8. Results from three-point bending tests of GFRP sheets.

شکل ۹. خرابی‌های موجود آمده در نمونه خمش سه نقطه‌ای مقطع قوطی.

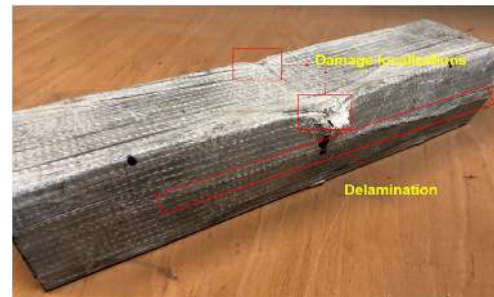


Fig. 9. Damages from three-point bending test of GFRP box.

همان‌گونه که در شکل‌های (۷ و ۸) نشان داده شده است، نمونه‌های GFRP ابتدا رفتار خطی داشته سپس وارد رفتار غیرخطی شده و در آن ناحیه خرابی‌ها و جدایش لایه‌های قابل توجهی مشاهده شده است که آسیب‌ها برای پروفیل در شکل شماره (۹) قابل مشاهده هستند.

### ۳-۱-۲- نتایج آزمایش کششی

در آزمایش کششی نمونه‌های دمبلی GFRP، مود غالب خرابی نمونه‌های شکست‌های بین الیافی طولی بوده است که دلیل عمده آن شکست رزین است.



می‌توان نتایج خمش ورق‌های GFRP را تحلیل کرد. با رجوع به مشخصات هندسی ورق‌ها در جدول (۳)، می‌توان از رابطه زیر برای کنترل مدول الاستیسیته بدست آمده از آزمایش‌های خمشی استفاده نمود.

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} \quad (1)$$

در رابطه  $I$  ممان اینرسی و  $\Delta$  تغییر مکان وسط دهانه ورق GFRP است و همچنین  $P$ ،  $L$  و  $E$  نیز به ترتیب نیروی قابل تحمل، طول و مدول الاستیسیته ورق GFRP است. برای تحلیل خرابی‌ها در پروفیل‌های GFRP از مدل آسیب هاشین استفاده شده است. این مدل با فرض گسیختگی در چهار مود مختلف کششی و فشاری الیاف و ماتریس تعریف شده است [42,43]. در این مدل نیاز به انرژی شکست برای وضعیتهای مختلف آسیب می‌باشد که انرژی شکست بدست آمده از مساحت زیر نمودار تنش-جابجایی آسیب کششی الیاف، فشاری الیاف، کششی ماتریس و فشاری ماتریس است.

جدول ۴. انرژی شکست مقطع‌های GFRP [۶] ( $\text{mJ}/\text{mm}^2$ ).

$G_{ft}^c$	250
$G_{fc}^c$	250
$G_{mt}^c$	100
$G_{mc}^c$	100

Table 4. Fracture energy of GFRP profiles ( $\text{mJ}/\text{mm}^2$ ).

جدول ۵. مشخصات مکانیکی مقطع‌های GFRP مگاپاسکال.

$E_1$	10000
$E_2$	5500
$G_{12}$	3100
$G_{23}$	2000
$X^T$	150
$Y^T$	48
$X^C$	130
$Y^C$	100
$S_{12}$	31

Table 5. Mechanical properties of GFRP profiles (MPa).

المان‌های استفاده شده برای مدل‌سازی چسب المان چسبنده<sup>۱</sup> هشت گره‌ای سه بعدی بوده است. همچنین برای مدل‌سازی پروفیل‌های اف آر پی از المان‌های S4R5 در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است که این المان‌ها از نوع المان Shell بوده است.

شکل ۱۲. نمودار نیرو-جابجایی آزمایش double-lap نمونه چسب.

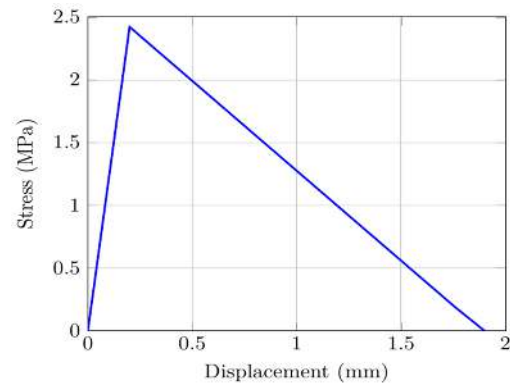


Fig. 12. Result from double-lap shear test curve.

### ۳-۱-۳ نتایج آزمایش فشاری

نمونه‌های GFRP فشاری نیز تحت آزمایش فشاری قرار گرفته تا مشخصات فشاری مقطع‌ها بدست آید. مود غالب خرابی مقطع‌ها کمانش‌های صورت گرفته در لبه ی آزاد مقطع بوده است که خرابی پافیلی نامگذاری شده است. دلیل اصلی این خرابی ضعیف بودن مقاومت لبه بریده شده و تمرکز تنش‌ها در آن ناحیه است که نتایج آزمایش‌های فشاری در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

شکل ۱۳. نمودار نیرو-جابجایی نمونه فشاری GFRP.

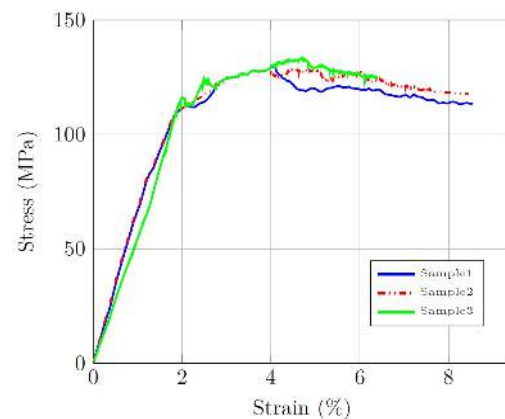


Fig. 13. Results from compressive tests of GFRP samples.

### ۳-۱-۴ تحلیل نتایج آزمایش‌های مصالح GFRP انجام شده و مدل‌های ساختاری

باتوجه به نتایج بدست آمده از آزمایش مصالح GFRP، مشخصات مصالح نیز با استفاده از روابط تحلیلی قابل کنترل است. با استفاده از روابط مقاومت مصالح مدول الاستیسیته مصالح GFRP قابل محاسبه بوده و با استفاده از روابط خمش



که در آن تنش کششی نرمال و  $\tau_s$  و  $\tau_t$  تنش‌های برشی هستند،  $n$  و  $t$  نیز به جهت تنش‌های مربوط می‌شود. معیار شکست Benzaggah-Kenane برای مدل‌سازی چسب در نظر گرفته شده است، که این مدل زمانی کاربردی است که تغییر شکل کاملاً در راستای اول و دوم برشی با یکدیگر برابر باشد یعنی  $G_s^C = G_t^C$  باشد که در نتیجه روابط زیر حاصل می‌شود:

$$G_n^C + (G_s^C - G_n^C) \left\{ \frac{G_s}{G_T} \right\}^\eta = G^C \quad (3)$$

که در آن،  $G_T = G_n + G_s$ ،  $G_s = G_s + G_t$  و  $\eta$  ثابت مصالح است.  $G_n$ ،  $G_s$  و  $G_t$  کار انجام شده توسط تنش به ترتیب در راستای نرمال، راستای برشی اول و دوم است.

جدول ۶. مشخصات مکانیکی لایه چسب بین مقطع‌های GFRP.

$\sigma_n^0$	3.51 (MPa)
$\tau_s^0$	2.4 (MPa)
$\tau_t^0$	2.4 (MPa)
$G_n^C$	83 (J/m <sup>2</sup> )
$G_s^C$	782 (J/m <sup>2</sup> )
$G_t^C$	782 (J/m <sup>2</sup> )
$\eta$	1.45

Table 6. Mechanical properties of cohesive layers.

مشخصات مکانیکی بدست آمده از آزمایش مصالح نیز در جداول (۴ الی ۶) نشان داده شده اند. نتایج جدول (۴) با استفاده از فرمولاسیون مکانیک شکست بدست آمده است که سطح زیر نمودار تنش-جابجایی در بارگذاری‌های کششی و فشاری است. با استفاده از نتایج آزمایش‌های کششی و فشاری نمونه‌های اف آر پی نتایج بدست آمده است. مشخصات جدول (۵) نیز با استفاده از آزمایش کششی و فشاری نمونه‌ها بدست آمده است و شیب تنش-کرنش نتایج آزمایشگاهی در ناحیه خطی الاستیک در نظر گرفته شده است.

نتایج بدست آمده در جدول (۶) با استفاده از آزمایش کششی و برشی چسب بدست آمده است که مشخصات الاستیک آن

المان‌های استفاده شده برای مدل‌سازی ورق فولاد نیز مشابه المان‌های پروفیل اف آر پی بوده است.

دو مدل مختلف برای بررسی لایه‌های چسب عرشه در نظر گرفته شده است، که شامل مدل با اتصال کامل، و دیگری مدل با اتصال چسب است. در مدل اتصال چسب، از مدل چسبنده استفاده شده است که از روابط تنش در برابر جدایش استفاده شده است. در شکل (۸) مدل تنش در برابر جدایش نشان داده شده است که در آن  $\tau$  ترکشن مؤثر و  $\delta$  بازشدگی مؤثر است.

شکل ۱۴. نمودار تنش-جدایش نمونه چسب.

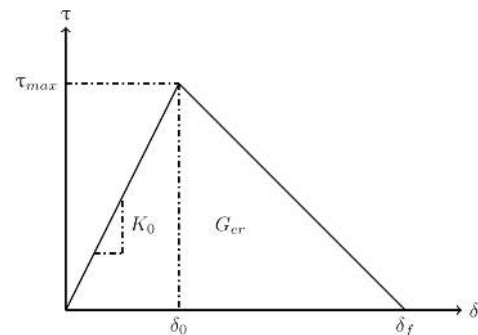


Fig. 14. Traction versus separation curve.

در این تحقیق، باتوجه به آزمایش‌های انجام شده، مقادیر مشخصات چسب استفاده شده در مدل‌سازی در جدول (۶) نشان داده شده است. همچنین در این تحقیق دو مدل مختلف در نظر گرفته شده است که مدل اول مود شکست را در حالت‌های برشی و نرمال در نظر می‌گیرد، و مدل دوم مستقل از مود شکست است. لازم به ذکر است که تفاوت چشمگیری میان این دو مدل وجود نداشته است و فقط زمان تحلیل در مدل اول به طرز قابل توجهی بیشتر از مدل دوم بوده است. در مدل دوم از مشخصات برشی چسب استفاده شده است زیرا چسب استفاده شده در عرشه بیشتر به مود شکست برشی نزدیک است. برای شروع آسیب در چسب لازم است معیار حداکثر مربع تنش‌ها به میزان واحد برسد، این معیار توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\left\{ \frac{\sigma_n}{\sigma_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_s}{\tau_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\tau_t}{\tau_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (2)$$

شیب تنش-کرنش است و انرژی شکست آن برابر سطح زیر نمودار تنش-جابجایی است.

### ۳-۲- نتایج آزمایش‌گاهی و عددی عرشه‌های کامپوزیت

پس از اتمام آزمایش‌های مصالح عرشه و بدست آوردن مشخصات مصالح، آزمایش عرشه‌های تحت بارگذاری استاتیکی انجام شده است. برای بررسی ظرفیت خمشی عرشه‌ها آزمایش نمونه‌ها تحت بارگذاری فشاری انجام شده است. با توجه به توضیحات قسمت‌های قبل، یک نمونه از عرشه‌ها تحت بارگذاری سوراخ‌کننده آزمایش شده است به دلیل آنکه ظرفیت مقاطع GFRP در برابر فشار سوراخ‌کننده و خرابی‌های موضعی بررسی شود، و دیگر عرشه‌ها تحت بارگذاری گسترده آزمایش شده‌اند تا از خرابی‌های موضعی جلوگیری شود. ابعاد صفحه بارگذاری سوراخ‌کننده برابر با ۱۵ سانتی‌متر در هر وجه بوده است و همچنین صفحه بارگذاری گسترده برابر با ۳۰ سانتی‌متر طول و ۴۰ سانتی‌متر عرض داشته است. نمونه D1 و D2 دو نمونه مشابه بوده با این تفاوت که سطح بارگذاری انجام شده روی نمونه D1 کمتر از نمونه D2 بوده تا اثر افت ظرفیت مقطع-های GFRP توسط بارگذاری پانچ بررسی شود. همچنین با استفاده از مقطع سرد نورد در عرشه‌های کامپوزیت، ظرفیت عرشه‌ها به میزان قابل توجهی افزایش پیدا کرده است، و همچنین فولاد نیز در محدوده غیر ارتجاعی تغییر شکل پیدا کرده است. نمودارهای نیرو-جابجایی عرشه‌ها توسط آزمایش بدست آمده و مقایسه شده است. در شکل (۱۵) نمودار عرشه D1 نشان داده شده است.

شایان ذکر است که در مدلسازی صورت گرفته، المان استفاده شده برای مدلسازی چسب المان چسبیده بوده و چسب مدلسازی شده با استفاده از المان‌های Solid با ضخامت

بسیار کم در حدود ۰/۰۰۱ میلی‌متر مدلسازی شده است. با توجه به المان‌های مختلف بررسی شده در خمش پروفیل باکس کامپوزیت المان S4R5 به عنوان المان مناسب برای مدلسازی پروفیل‌ها در نظر گرفته شده است. نمونه‌های آزمایش شده مختلف برای بررسی پارامترهای متفاوت در نظر گرفته شده‌اند. نمونه D1 برای بررسی بارگذاری سوراخ‌کننده عرشه در نظر گرفته شده است و تفاوت نمونه D1 و D2 در آن است که میزان افت ظرفیت باربری عرشه تحت بارگذاری سوراخ‌کننده محاسبه شود. همچنین تفاوت میان نمونه D2 و D3 استفاده از پروفیل سرد نورد فولاد است تا اثر آن پروفیل بر ظرفیت باربری عرشه بررسی شود. در انتها نمونه D4 طول بلندتری نسبت به نمونه D3 دارد تا خمش کامل در عرشه بررسی شود و همچنین تعداد پروفیل‌های اف آر پی استفاده شده در نمونه D4 از نمونه D3 بیشتر است تا افزایش ظرفیت باربری عرشه‌ها با توجه به تعداد پروفیل‌های اف آر پی بررسی شود. هدف از مدلسازی نشان دادن دقت روش عددی در مدلسازی سازه‌های پیچیده متشکل از مصالح مختلف است و همچنین نشان دادن کاربرد مدلسازی عددی در طراحی عرشه‌های کامپوزیتی است.

نمودار مورد نظر از بارگذاری سوراخ‌کننده با سطح کم بدست آمده است. هدف از انجام این آزمایش این است که بتوان ظرفیت مقاطع GFRP را در برابر بارگذاری سوراخ‌کننده بررسی کرد. نمونه‌های D2 و D3 نیز تحت بارگذاری گسترده آزمایش شده‌اند تا از بروز خرابی‌های موضعی در آن‌ها جلوگیری شود. در نمونه D2 از پروفیل‌های سرد نورد استفاده نشده است، اما در نمونه D3 از مقطع‌های سرد نورد استفاده شده است تا اثر آن‌ها در ظرفیت باربری عرشه‌ها بررسی شود. همان‌گونه که در شکل (۱۶ و ۱۷) می‌توان مشاهده نمود ظرفیت نمونه D3 نسبت به نمونه D2 افزایش ظرفیت باربری به میزان ۳۰ درصد داشته است.

جدول ۷. جزئیات نتایج آزمایش‌ها و تحلیل‌های عددی.

Deck label	Weight ( $kg/m^2$ )	Bending stiffness ( $EI$ ) ( $\times 10^9(N.mm^2)$ )	Experimental force $P_u$ (kN)	Numerical force $P_u$ (kN)	Experimental stiffness range ( $kN/mm$ )	Numerical stiffness range ( $kN/mm$ )	Experimental energy dissipation (kJ)	Numerical energy dissipation (kJ)
D1	38	9.4	76.4	79.1	8.4-2.1	6.3-1.8	2	1.8
D2	34.78	9.4	116.7	120.4	10.3-1.8	8.4-1.8	2.7	2.8
D3	61.29	220	211.4	205.1	14.7-4.4	10.5-3.9	4.8	4.9
D4	63.16	250	170.7	182.9	11.7-5.3	11.1-3.4	5.3	5.6
FED1S	49.45	203	-	110.54	-	6.8-1.1	-	2.9
FED2S	54.35	219	-	160.58	-	24.4-1.08	-	5.2
FED3W	36.94	12.4	-	125.45	-	8.61-1.23	-	2.8
FED4W	53.75	15.667	-	119.32	-	6.4-1.5	-	3.1

Table 7. Details of experimental and numerical results.

شکل ۱۵. نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه D1.

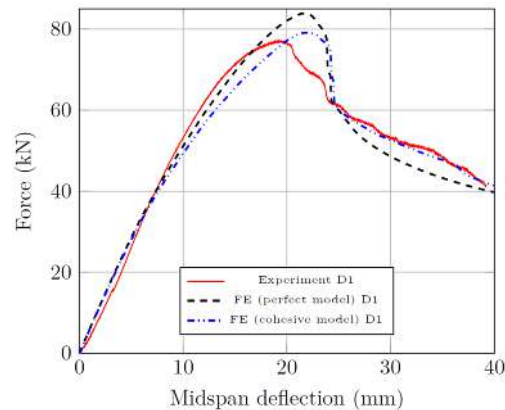


Fig. 15. Force-displacement curves of deck specimen D1.

شکل ۱۷. نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه D3.

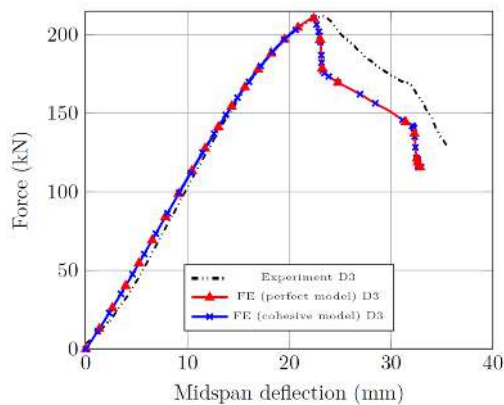


Fig. 17. Force-displacement curves of deck specimen D3.

شکل ۱۶. نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه D2.

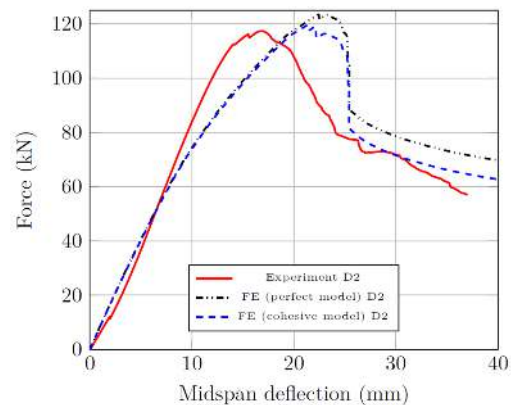


Fig. 16. Force-displacement curves of deck specimen D2.

باتوجه به شکلهای (۱۵ و ۱۶) می‌توان مشاهده کرد که میزان ظرفیت عرشه با افزایش سطح بارگذاری به میزان ۲۲ درصد نسبت به عرشه آزمایش شده تحت بارگذاری سوراخ کننده افزایش یافته است. همچنین باتوجه به شکل (۱۷) می‌توان مشاهده کرد که اثر مقطع سرد نورد باعث افزایش ظرفیت باربری قابل توجهی به میزان ۳۰ درصد نسبت به عرشه فاقد مقطع شده است.

نمونه D4 تحت خمش کامل آزمایش شده است و نمودار بدست آمده از آن آزمایش به صورت خمش-جاب‌جایی می‌باشد. اتصالات میان مقطع‌ها نیز با دو روش بررسی شده است تا آثار چسب نیز در عرشه‌ها بررسی شود. در روش اول اتصالات

شکل ۱۹. نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه D1.

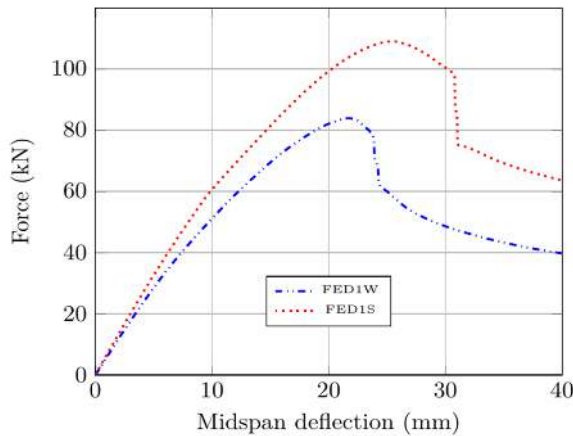


Fig. 19. Force-displacement curves of deck specimen D1.

شکل ۲۰. نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه D2.

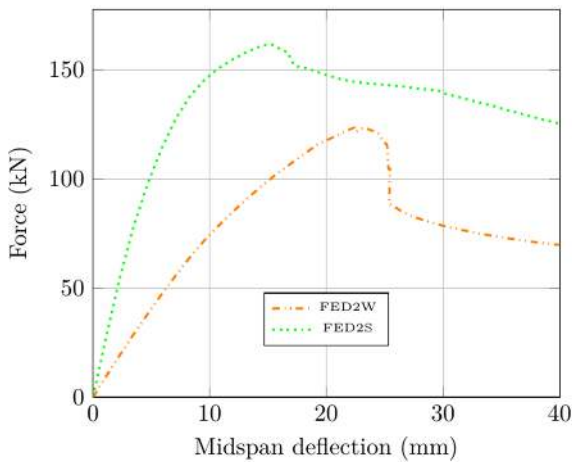


Fig. 20. Force-displacement curves of deck specimen D2.

در جدول (۷) می‌توان نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌های انجام شده را مشاهده نمود. همان‌گونه که در جدول (۷) نشان داده شده است سختی خمشی عرشه‌ها به ترتیب از نمونه D1 تا نمونه D4 افزایش پیدا کرده است. در ادامه روابط استفاده شده برای محاسبه سختی خمشی قابل مشاهده است. با استفاده از رابطه (۴) و مشخصات مکانیکی مصالح، مصالح مختلف در عرشه معادل مصالح GFRP شده و سپس تار ختنی در مقطع عرضی عرشه با استفاده از رابطه (۵) بدست آمده است.

$$n = \frac{E_1}{E_2}$$

به صورت کامل مدل‌سازی شده است و در روش دوم با استفاده از المان‌های چسب اتصالات مدل‌سازی شده است. المان چسب در نمونه‌هایی که غلاف فولادی در آن‌ها استفاده شده است اثری در نمودارهای نیرو-جاب‌جایی و خمش-جاب‌جایی نداشته است زیرا پس از شکست چسب در تغییر شکل‌های بزرگ، مقطع سرد نورد فولادی باعث جلوگیری از جدایش مقطع‌ها می‌شود. در مدل‌سازی‌ها نشان داده شده است که استفاده از المان چسب منجر به نتایج نزدیکتر به نتایج آزمایشگاهی شده است.

همانطور که در شکل (۱۸) نشان داده شده است نتایج مدل‌سازی عددی مشابه نتایج آزمایشگاهی بوده و آسیب‌ها در مقطع‌های GFRP به خوبی پیش‌بینی شده است که این نتیجه بیانگر پیش‌بینی دقیق مدل آسیب‌هاست.

شکل ۱۸. نمودار نیرو-جاب‌جایی نمونه D4 (باتوجه به تعداد المان‌های مختلف).

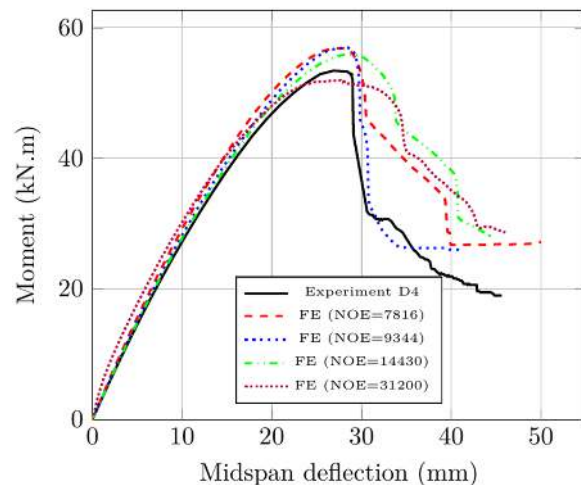


Fig. 18. Force-displacement curves of deck specimen D4 (For various Number of Elements (NOE)).

همان‌گونه که در شکل (۱۸) نشان داده شده است، عرشه D4 تحت اثر خمش خالص آزمایش شده است و خمشی به میزان ۵۸ کیلونیوتن در متر را تحمل کرده است که این میزان به نسبت وزن عرشه میزان قابل توجهی است. در مدل‌سازی عرشه D4 از تعداد المان‌های مختلف استفاده شده است تا حساسیت سنجی باتوجه به اندازه المان‌ها انجام شود. باتوجه به نتایج نشان داده (۴) شده، مدل‌سازی حساسیتی نسبت به اندازه المان‌ها داشته است.

نورد بوده ولی آزمایش آن نمونه بدون مقطع سردنورد به دلایل کمبود مصالح و هزینه‌های بالا امکان‌پذیر نبود. به همین دلیل می‌توان با استفاده از روش اجزاءمحدود این نمونه‌ها را بررسی کرد. در شکل (۱۹ الی ۲۲) نمودارهای بدست آمده از مدل‌سازی-های انجام شده نشان داده شده است.

شکل ۲۲. نمودار لنگر-جابجایی نمونه D4.

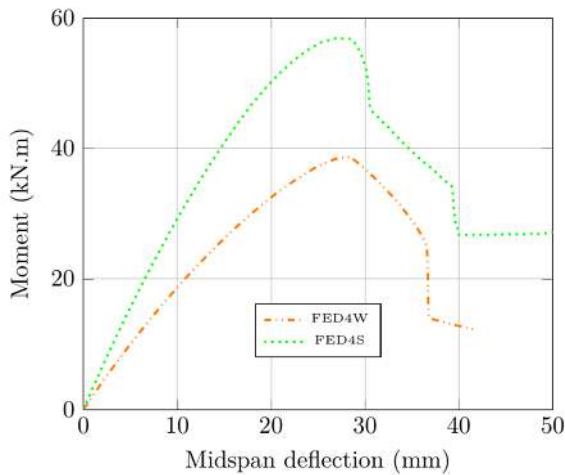


Fig. 22. Moment-displacement curves of deck specimen D4.

شکل ۲۳. خرابی‌های بوجود آمده در عرشه.

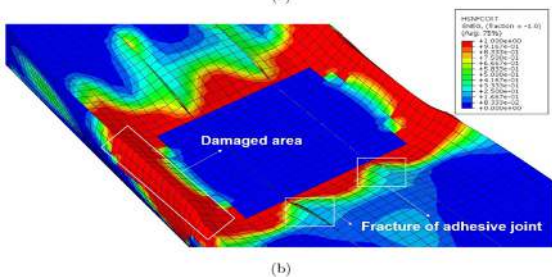
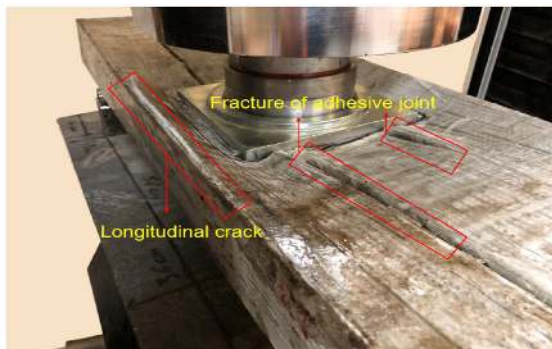


Fig. 23. Damages in deck.

$$\bar{y} = \frac{\sum \bar{y}_i \times A_i}{\sum A_i} \quad (5)$$

پس از بدست آمدن تارخنتی در مقطع عرضی عرشه، ممان اینرسی عرشه حول تارخنتی بدست آمده محاسبه شده است که با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I = \sum \frac{b_i \times h_i^3}{12} \quad (6)$$

سپس با استفاده از ضرب رابطه (۶) در مدول الاستیسیته GFRP سختی خمشی عرشه بدست خواهد آمد. در رابطه ذکر شده  $b$ ،  $h$  و  $I$  به ترتیب عرض، ارتفاع و ممان اینرسی ورق‌های GFRP هستند. در رابطه (۵)،  $A$  سطح مقطع جداگانه مصالح مختلف است که شامل مصالح GFRP، فولاد و فوم بتن است. باتوجه به جدول (۷) بیشترین نیروی قابل تحمل عرشه‌ها باتوجه به نتایج مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی مقادیر نزدیکی داشته است، همچنین بازه سختی‌های بدست آمده از آزمایش‌ها و مدل‌سازی‌های عددی نیز تفاوت‌های کمی داشته است.

شکل ۲۱. نمودار نیرو-جابجایی نمونه D3.

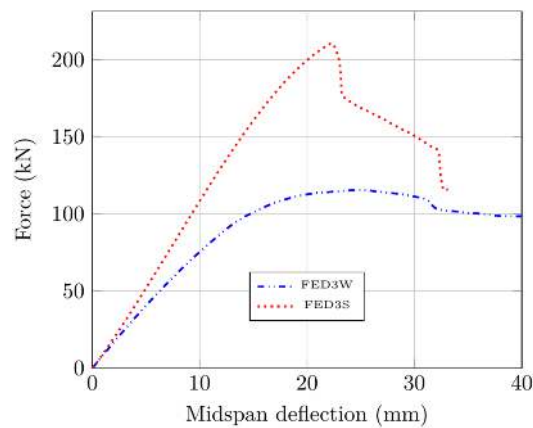


Fig. 21. Force-displacement curves of deck specimen D3.

در شکل (۱۹ الی ۲۲)، نام نمونه نمونه‌ها به این ترتیب است که FE و D به ترتیب مدل عددی و عرشه را بیان می‌کند و همچنین عدد میانی شماره نمونه است. باتوجه به درستی آزمایشی مدل‌های عددی ذکر شده، می‌توان شرایط مختلف عرشه‌ها را در مدل‌سازی عددی بررسی کرد. عرشه‌های آزمایش شده با مقطع‌های سرد نورد فولادی با ضخامت کم ترکیب شده‌اند، اما برخی از آنها بدون مقطع سرد نورد بوده یا عکس آن، نمونه دارای مقطع سرد

مقطع سردنورد به میزان ۳۳ درصد نسبت به نمونه دارای مقطع سرد نورد کاهش می‌یابد.

#### ۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

باتوجه به نتایج بدست آمده از عرشه‌های آزمایش شده، می‌توان نتیجه گرفت که آثار بارگذاری سوراخ‌کننده موجب خرابی‌های موضعی و تمرکز تنش شدید در مقطع‌های GFRP شده است که در نهایت ظرفیت عرشه را به میزان ۳۳ درصد نسبت به عرشه بارگذاری شده با بارگذاری گسترده کاهش داده است. همچنین با استفاده از مقطع‌های سرد نورد فولادی و تسمه‌های اتصال دهنده، ظرفیت عرشه به میزان قابل توجهی افزایش یافته است و همچنین قابلیت اعتماد عرشه‌های ساخته شده افزایش یافته است. با استفاده از این مصالح نوین در ساخت سازه‌ها، احتمال کاهش وزن سازه‌ها به میزان قابل توجهی وجود دارد. همچنین مقاومت و دوام مصالح پلیمری بسیار بالا است و سرعت ساخت بالاتری نسبت به مصالح متعارف دارد. نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده نیز هماهنگی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی داشته است، همچنین مدل‌سازی المان چسب نیز منجر به نتایج نزدیکتر به نتایج آزمایشگاهی شده است. همچنین در این تحقیق به بررسی پارامتریک عرشه‌ها با استفاده از مدل‌سازی عددی پرداخته شده است. دیگر نتایج بدست آمده از تحقیق مورد نظر به شرح زیر است:

۱- ظرفیت باربری عرشه بارگذاری شده تحت بار سوراخ‌کننده به میزان ۳۳ درصد نسبت به عرشه بارگذاری شده تحت بار گسترده کاهش پیدا کرده است، که دلیل اصلی آن تمرکز تنش‌ها در مقطع‌های GFRP بوده است. با این اتفاق عرشه به ظرفیت کامل خودش نرسیده است. بنابراین گسترش آسیب‌ها و گسترش ترک‌ها در ناحیه بارگذاری دلیل عمده مود خرابی عرشه شده است. همچنین با افزایش سطح بارگذاری سوراخ‌کننده میزان ظرفیت باربری نمونه‌ها افزایش یافته است که دلیل عمده آن اجتناب از خرابی‌های موضعی بوده است.

۲- استفاده از مقطع سرد نورد فولادی موجب افزایش ظرفیت باربری آن‌ها به میزان ۳۰ درصد نسبت به عرشه‌های فاقد مقطع

W و S به ترتیب نمونه فاقد مقطع سردنورد و دارای مقطع را نشان می‌دهد. باتوجه به شکل (۱۹) نمونه عرشه D1 با استفاده از مقطع سردنورد به میزان ۳۰ درصد نسبت به نمونه فاقد مقطع سردنورد افزایش ظرفیت باربری داشته است. همچنین نمونه D2 نیز با استفاده از مقطع سردنورد نسبت به نمونه فاقد مقطع افزایش ظرفیت باربری برابر با ۳۱ درصد داشته است. شکل ۲۴. خرابی‌های بوجود آمده در عرشه تحت بارگذاری پانچ.

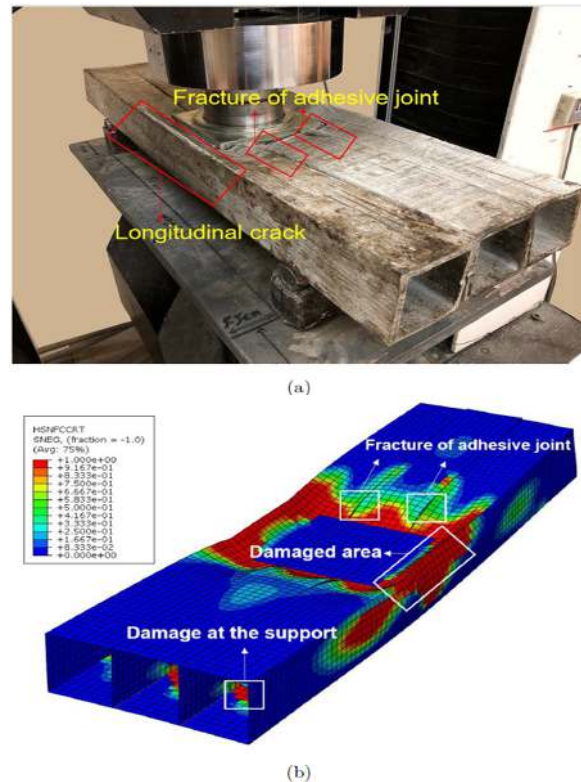


Fig. 24. Damages in deck under punch loading.

شکل ۲۵. عرشه آزمایش شده D4.



Fig. 25. Tested D4 deck.

در نمونه D3 نیز در صورتی که در این نمونه از مقطع سردنورد استفاده نشود ۵۰ درصد ظرفیت باربری عرشه نسبت به عرشه دارای مقطع سرد نورد کاهش می‌یابد. در انتها نمونه D4 نیز بدون



9. S. Satasivam, Y. Bai, and X.L. Zhao, *Adhesively bonded modular GFRP web-flange sandwich for building floor construction*. Composite Structures, 2014: p. 381-392.
10. S. Satasivam, Y. Bai, and X.L. Zhao, *Characterization and structural performance of hybrid fiber-reinforced composite deck panels*. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2019: p. 115-124.
11. CEN. *Eurocode 5: Design of timber structures*. Brussels: European Committee for Standardisation (CEN). 2004.
12. W. Prachasaree and P. Sookmanee, Structural performance of light weight multicellular FRP composite bridge deck using finite element analysis. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2012: p. 115-124.
13. H. Y. Kim, et al., pultruded GFRP deck panel for temporary structures. Composite Structures, 2009. 92: p. 20-30.
14. M. Kulpa and T. Siwowski, Stiffness and strength evaluation of a novel FRP sandwich panel for bridge redecking. Composites Part B: Engineering, 2019. 207: p. 207-220.
15. S. Fawzia, X. L. Zhao, and R.A. Mahaidi, Bond-slip models for double strap joints strengthened by CFRP. Composite Structures, 2010. 184: p. 2137-2145.
16. E.A. Flores-Johnson and Q.M. Li, Structural behaviour of composite sandwich panels with plain and fibre-reinforced foamed concrete cores and corrugated steel faces. Composite Structures, 2012. 94: p. 1555-1563.
17. E.A. Flores-Johnson and Q.M. Li, Structural behaviour of composite sandwich panels with plain and fibre reinforced foamed concrete cores and corrugated steel faces. Composite Structures, 2012. 94: p. 1555-1563.
18. B. Mu, et al., FEA of complex bridge system with FRP composite deck. Composites for Construction, 2006. 10(1): p. 79-86.
19. S. Alampalli and J. Kunin, Load testing of an FRP bridge deck on a truss bridge. Applied Composite Materials, 2003. 10(2): p. 85-102.
20. J. Gong, X. Zou, and P. Xia, Experimental investigation of the natural bonding strength between stay-in-place form and concrete in FRP-concrete decks/beams. Applied Science, 2019. 9(5): p. 913.
21. T. Keller, Recent all-composite and hybrid fibre-reinforced polymer bridges and buildings. Progress in Structural Engineering and Materials, 1997. 3(2): p. 132-140.

سرد نورد شده است، همچنین مقطع‌های سرد نورد موجب افزایش یکپارچگی میان مقطع‌های GFRP شده است که باعث افزایش قابلیت اعتماد عرشه‌ها می‌شود زیرا شکست آنی پس از بارهای نهایی در این نمونه‌ها مشاهده نشده است. پس از بارنهایی عرشه‌های دارای مقطع سردنورد هیچگونه شکستی در ناحیه جوشکاری شده مقطع سرد نورد بوجود نیامده و ناپایداری آنی نیز در عرشه‌ها رخ نداده است.

۳- نتایج مدلسازی نیز هماهنگی نزدیکی با نتایج آزمایشگاهی داشته است، که با توجه به این نتایج استفاده از مدل ساختاری هاشین توانسته است به خوبی خرابی‌ها را پیشبینی کند.

## مراجع

1. Khezzadeh, H., *Overall properties of particulate composites with fractal distribution of fibers*. Mechanics of Materials, 2016. 96: p. 1-11.
2. Khezzadeh, H., *A statistical micromechanical multiscale method for determination of the mechanical properties of composites with periodic microstructure*. Composites Part B: Engineering, 2017. 115: p. 138-143.
3. M. Bazli, H. Ashrafi, and A.V. Oskouei, *Effect of harsh environments on mechanical properties of GFRP pultruded profiles*. Composites Part B: Engineering, 2016. 99: p. 203-215.
4. M. Bazli, et al., *Mechanical properties of pultruded GFRP profiles under seawater sea sand concrete environment coupled with uv radiation and moisture*. Construction and Building Materials, 2020. 258: p. 120-369.
5. H. Ashrafi, et al., *Tensile properties of GFRP laminates after exposure to elevated temperatures: Effect of fiber configuration, sample thickness, and time of exposure*. Composite Structures, 2020. 238: p. 111-971.
6. M. Dawood, E. Taylor, and S. Rizkalla, *Two-way bending behavior of 3-D GFRP sandwich panels with through-thickness fiber insertions*. Composite Structures, 2010. 92: p. 950-963.
7. Y. Gao, et al., *An advanced FRP floor panel system in buildings*. Composite Structures, 2013. 96: p. 683-690.
8. S. Satasivam, et al., *Mechanical performance of two-way modular FRP sandwich slabs*. Composite Structures, 2018. 184: p. 904-916.



- Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling (Ref. 7.2). 2006.
33. ASTM D695 - 15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.
  34. ASTM D897 - 08 Standard Test Method for Tensile Properties of Adhesive Bonds. 2016.
  35. ASTM C869 / C869M - 11 Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete. 2016.
  36. ASTM D3528 - 96 Standard Test Method for Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading. 2016.
  37. ASTM D790-17 Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
  38. ASTM D3039 / D3039M - 17 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
  39. ASTM A109 / A109M - 16 Standard Specification for Steel, Strip, Carbon (0.25 Maximum Percent), Cold Rolled. 2018.
  40. ASTM D1002 - 10 Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal). 2019.
  41. ASTM C796 / C796M - 19 Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam. 2019.
  42. Z.Hashin, *Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites*. Journal of Applied Mechanics, 1980. 47: p. 329–334.
  43. Z.Hashin and A. Rotem, *A Fatigue Criterion for Fiber-Reinforced Materials*. Journal of Composite Materials, 1973. 7: p. 448–464.
  22. T.Keller, Towards structural forms for composite fibre materials. Structural Engineering International 1999. 9(4): p. 297–300.
  23. T.Keller, E.Schaumann, and T.Valle, Flexural behavior of a hybrid FRP and lightweight concrete sandwich bridge deck. Composites: Part A, 2007. 38: p. 879–889.
  24. T.Keller and H.Gurtler, In-plane compression and shear performance of FRP bridge decks acting as top chord of bridge girders. Composite Structures, 2004. 72: p. 151–162.
  25. T.Keller and H.Gurtler, Quasi-static and fatigue performance of a cellular FRP bridge deck adhesively bonded to steel girders. Composite Structures, 2005. 70: p. 484–496.
  26. T.Keller and H.Gurtler, Design of hybrid bridge girders with adhesively bonded and compositely acting FRP deck. Composite Structures, 2006. 74: p. 202–212.
  27. H.Xin, et al., Analytical and experimental evaluation of flexural behavior of FRP pultruded composite profiles for bridge deck structural design. Construction and Building Materials, 2017. 150: p. 123–149.
  28. P.Kumar, K.Chandrashekhara, and A.Nanni, Structural performance of a FRP bridge deck. Construction and Building Materials, 2004. 18: p. 35–47.
  29. P.Qiao, J.F.Davalos, and B.Brown, A systematic analysis and design approach for single span FRP deck/stringer bridges. Composites: Part B 2000. 31: p. 593–609.
  30. ASTM C136 Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates. American Society for Testing and Materials. 2004.
  31. ASTM A37-17 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products (Ref. 7.1). 2006.
  32. ASTM A6-16 Standard Specification for General Requirements for Rolled Structural

# Experimental and Numerical Evaluation of Hybrid Steel-FRP Floor Panels under Flexural Loads

Sajad Jami<sup>1</sup>, Hamed Khezzadeh<sup>2\*</sup>

1- Master Student, Civil Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

## Abstract

In recent decades, new materials have had widespread applications in the construction industry. In the present research, a steel-FRP flooring system is proposed and tested. The implanted experiments are performed in two sections: at first, tests of constituent materials used in composite decks are done, and then full-scale tests of hybrid composite decks are performed. Mechanical tests, including three-point bending, compression, and tensile tests of GFRP profiles, tensile tests of steel plate, shear, and tensile tests of epoxy adhesives, are done with the aim of reaching mechanical properties. Next, flexural tests on four decks are performed. The main variables considered are the length of composite decks, the cold-formed steel channel effect, and the number of GFRP profiles. In examining the composite decks, the fracture between cohesive layers was observed, and damage localization and fracture in profiles occurred. It found that the use of the steel plate increases the stiffness and load-bearing capacity of the decks. The primary failure mode in the experimental work was debonding between profiles and adhesive fracturing in the decks without steel plates. In the decks which are used steel channels, the complete composite action of the structure was observed, resulting in suppressing the debonding phenomenon. The decks with cold-formed steel channels exhibit higher reliability as a result of their ductile behavior. After the tests of composite decks, the composite decks were modeled in the Abaqus software, and the results of the experiments and simulations were compared together. The results of numerical analysis have good agreement with experimental data.

**Keywords:** Hybrid Composite Decks, FRP Composites, Composite Structures, Experimental Evaluation, Finite Element Analysis, Nonlinear Analysis.