

ارزیابی عملکرد تیر کامپوزیتی با مقطع Hat-Shape و دال مسلح بتنی به روش اجزای محدود و آنالیز پارامترها

الهام علیزاده

دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مهدی دهستانی *

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

عبداله مسلمی ورکی

دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

چکیده

اکثر تیرهای مورد استفاده در پل‌ها از نوع بتن مسلح بوده که وزن زیادی داشته، مقاومت‌شان در قبال خوردگی تا حدودی پائین بوده و امکان اجرای آن‌ها به صورت پیش‌ساخته وجود ندارد. برای از بین بردن ضعف تیرهای بتن مسلح راه‌حل‌های مختلفی ارائه شده که یکی از آن‌ها استفاده از سیستم ترکیبی متشکل از مصالح متداول نظیر بتن و فولاد به همراه صفحات FRP می‌باشد که تحت عنوان تیرهای کامپوزیتی نیز شناخته می‌شود. تحقیق حاضر به بررسی تیر کامپوزیتی متشکل از مقطع Hat-Shape و دال بتنی اختصاص یافته است. با استفاده از روش اجزای محدود و تحلیل استاتیکی غیرخطی رفتار این تیر مورد ارزیابی قرار گرفته و با نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه و پس از حصول اطمینان از صحت مدل‌سازی تیر کامپوزیتی، تغییر پارامترهای مختلف نظیر به کارگیری فولاد در دال بتنی، تغییر زاویه جان مقطع Hat-Shape، مقایسه عملکرد تیر کامپوزیتی با تیر بتن مسلح، تغییر جنس مقطع Hat-Shape و صفحه GFRP به فولاد و آلومینیوم صورت پذیرفته است. نتایج حاصل از مطالعات عددی نشان می‌دهد که رفتار این نوع از تیرهای کامپوزیتی را می‌توان بدون انجام آزمایش‌های هزینه‌بر و به کمک روش‌های عددی برآورد نمود. مسلح نمودن دال بتنی سبب ارتقاء ظرفیت باربری تیر کامپوزیتی به میزان ۴۵ درصد شده است. تغییر زاویه جان مقطع Hat-Shape تأثیر چندانی بر عملکرد تیر نداشته و تغییر جنس مصالح از GFRP به آلومینیوم سبب افزایش نسبت ظرفیت باربری به وزن سازه به میزان ۵۱ درصد شده است.

واژه‌های کلیدی: تیر کامپوزیتی، مقطع Hat-Shape، روش اجزای محدود غیرخطی، مقاطع FRP.

* نویسنده مسئول: dehestani@gmail.com

۱- مقدمه و هدف

وزن عرشه نسبت به عرشه‌های بتنی بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته بود [۱۰]. باکری و ساندر در سال ۱۹۹۰ عملکرد سازه‌ای عرشه کامپوزیتی متشکل از پوسته‌ای منحنی شکل از FRP که محفظه‌ی داخلی آن با بتن پر شده را به روش اجزا محدود مورد ارزیابی قرار دادند [۱۱]. سعیدی در سال ۱۹۹۴ مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی روی تیرهای ساخته شده از مقاطع CFRP با پوشش دال بتن مسلح را انجام داد. در نمونه‌های آزمایشگاهی از چسب اپوکسی برای اتصال بتن و CFRP استفاده شده است. ایشان نتیجه گرفتند که بهتر است علاوه بر چسب از برشگیرهایی برای افزایش عملکرد مرکب دال بتنی و CFRP استفاده شود [۱۲].

دسکویک و همکاران نیز در سال ۱۹۹۵ تیرهایی با مقطع مربعی از جنس GFRP ساختند که ناحیه‌ی فشاری آن‌ها با بتن پر شده و از یک لایه نازک CFRP در کشش استفاده شده بود. برشگیرهایی نیز بین بتن و مقطع GFRP قرار داده شده بود. آزمایش‌های تجربی حاکی از عملکرد سازه‌ای بسیار مناسب و هزینه‌ی مقرون به صرفه این تیرها بوده‌اند [۱۳]. کیتان و عارف در سال ۲۰۰۴ تیرهایی با مقطع دوزنقه‌ای از جنس GFRP ساخته و آزمایش‌های خستگی و بارگذاری استاتیکی را بر روی آن انجام دادند. در تیرهای مورد بررسی از یک لایه بتن در ناحیه‌ی فشاری استفاده شده به گونه‌ای که با استفاده از این لایه تغییرشکل‌های محلی تیر نسبت به تیرهایی که کاملاً از FRP ساخته شدند، کاهش یافته بودند [۱۴]. توماس کلر و همکاران در سال ۲۰۰۷ عملکرد تیر کامپوزیتی که شامل صفحه‌ای از جنس FRP در ناحیه کششی، بتن سبک به عنوان هسته و یک لایه بتن با مقاومت بالا در ناحیه فشاری بوده را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. برشگیرهای T شکلی روی صفحه FRP قرار داده شده بود و در برخی از نمونه‌ها سطح صفحه FRP و برشگیرها آغشته به چسب اپوکسی نیز شده بود. گسیختگی نمونه‌های حاوی چسب به صورت ناگهانی، ترد و شکننده بوده و نمونه بدون چسب نیز رفتاری کاملاً شکل‌پذیر را نشان داده‌اند. از طرفی وزن نمونه‌ها حدود ۴۶ درصد وزن تیرهای بتنی معمولی با ضخامت یکسان بوده‌اند [۱۵]. عملکرد تیر کامپوزیتی با مقطع U شکل و هسته توخالی داخلی از جنس HPTRCC و بتن توسط ساتر و همکاران در

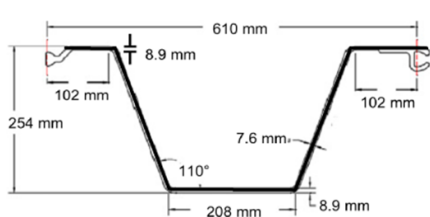
یکی از عوامل مهم در ساخت پل‌ها، کاهش وزن تیرها و عرشه‌ها و افزایش سرعت ساخت آن‌ها می‌باشد. در صورت اجرای تیرها به صورت پیش ساخته، زمان احداث پل و مشکلات مربوط به اجرای آن می‌تواند تا اندازه‌ی زیادی کاهش یابد. اجرای عرشه‌های بتن مسلح به صورت پیش ساخته به علت وزن و ضخامت زیاد آن‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد [۲۱ و ۲۰]. عرشه‌های بتنی-پروفیل فولادی وزن و ضخامت کمتری نسبت به عرشه‌های بتن مسلح معمولی دارند، بنابراین می‌توان آن‌ها را در دهانه‌های بلندتری اجرا نمود. در این گونه عرشه‌ها بتن و فولاد به گونه‌ای در کنار هم قرار می‌گیرند که از ویژگی‌های هر یک از مصالح، حداکثر استفاده به عمل آید [۳ و ۴]. با وجود برتری‌های فوق نسبت به عرشه‌های بتن مسلح، مقاومت این عرشه‌ها در قبال خوردگی نسبت به برخی از عوامل محیطی پایین تر بوده و هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن‌ها بالا می‌باشد. به طور کلی با توجه به موقعیت قرارگیری تیرها و عرشه‌ها در پل‌ها در صورتی که مسئله‌ی خوردگی حائز اهمیت باشد و وزن عرشه نیز بسیار پایین باشد، می‌توان از عرشه‌هایی با مقاطعی از جنس FRP استفاده نمود.

عرشه‌های ساخته شده از FRP علاوه بر مقاومت بالا در برابر خوردگی و وزن کم به صورت پیش ساخته نیز قابل اجرا می‌باشند. به منظور کاهش میزان مصرف FRP، این گونه عرشه‌ها را می‌توان به صورت چند سلولی با مقاطع مختلف مثلثی، دوزنقه‌ای، مربعی و غیره تولید نمود [۵]. در دو دهه‌ی اخیر عرشه‌های کامپوزیتی که کاملاً از FRP ساخته می‌شوند، بسیار مورد توجه پژوهشگران و طراحان قرار گرفته‌اند [۶، ۷، ۸ و ۹]. قیمت اولیه‌ی عرشه و تیرهایی که کاملاً از FRP ساخته می‌شوند، بسیار بالا بوده و کماتش زود هنگام جان این گونه عرشه‌ها آن‌ها را در معرض ناپایداری قرار داده و از نقاط ضعف آن‌ها محسوب می‌شود. FRP موجود در ناحیه‌ی فشاری آن‌ها نیز ممکن است دچار کماتش محلی و خردشدگی گردد. بنابراین محققان پیشنهاد می‌کنند که صفحات FRP به صورت ترکیب با مصالح متداول مانند بتن و فولاد به کار گرفته شود. ایده ترکیب FRP و بتن در اعضای خمشی سیستم‌های سازه‌ای اولین بار هیلمن و موری در سال ۱۹۹۰ ارائه کردند. آن‌ها از ترکیب مقاطع پیش ساخته‌ی FRP و بتن برای ساخت عرشه استفاده کردند، به گونه‌ای که

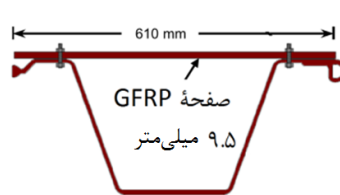
۲-۱- نمونه آزمایشگاهی تیر کامپوزیتی

عملکرد تیر جدیدی با مقطع Hat-Shape از جنس GFRP به همراه صفحه‌ای از جنس GFRP و دال بتنی در سال ۲۰۱۰ توسط فم و همکاران به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت [۱۷]. دو نمونه تیر کامپوزیتی در آزمایشگاه ساخته شده که در آن‌ها نمونه G1 دارای دال بتنی در قسمت فوقانی صفحه GFRP بوده ولی نمونه G2 فاقد دال بتنی می‌باشد. در نمونه‌های مورد بررسی اتصال بین صفحه GFRP و مقطع Hat-Shape و اتصال بین دال بتنی و صفحه GFRP با گل میخ و چسب بوده است. ارتفاع مقطع Hat-Shape، ۲۵۴ میلی‌متر و عرض آن در ناحیه‌ی فوقانی و تحتانی به ترتیب ۶۱۰ و ۲۰۸ میلی‌متر بوده‌اند. ضخامت بال‌های فوقانی و تحتانی مقطع ۸/۹ میلی‌متر و زاویه شیب جان مقطع نسبت به راستای قائم ۲۰ درجه بوده و ضخامت آن نیز ۷/۶ میلی‌متر می‌باشد. در قسمت فوقانی مقطع Hat-Shape از صفحه‌ای به ضخامت ۹/۵ میلی‌متر استفاده شده که با قرارگیری آن مقطع سلولی دوزنقه‌ای شکلی تشکیل گردید. روی صفحه GFRP از دال بتنی به ضخامت ۶۰ میلی‌متر و مقاومت فشاری ۵۲/۲ مگاپاسکال استفاده شده است. شکل ۱ مقطع تیر را نشان داده و خصوصیات مکانیکی مقطع Hat-Shape و صفحه GFRP نیز در جدول ۱ آمده است.

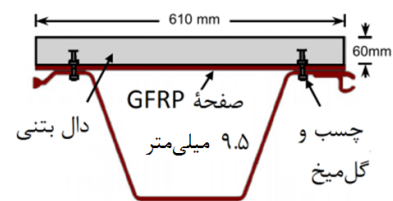
کل مقطع تیر کامپوزیتی در نواحی تکیه‌گاهی و به طول ۲۵۰ میلی‌متر با دوغاب سیمان پر شده که مقاومت فشاری آن ۳۶ مگاپاسکال می‌باشد [۱۷]. طول تیر کامپوزیتی ۳۳۵۰ میلی‌متر و فاصله بین تکیه‌گاه‌ها ۳۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. بارگذاری به صورت ۴ نقطه‌ای بوده و فاصله بین دو نقطه اعمال بار نیز ۴۰۰ میلی‌متر می‌باشد. نحوه بارگذاری استاتیکی نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. دو کرنش‌سنج در وسط دهانه تیر و در ناحیه فوقانی و تحتانی و یک تغییرمکان‌سنج نیز در ناحیه تحتانی وسط دهانه تیر نصب شده‌اند.



ابعاد مقطع Hat-Shape



مقطع تیر فاقد دال بتنی



مقطع تیر دارای دال بتنی

شکل (۱) - مقطع تیر کامپوزیتی [۱۷]

سال ۲۰۱۴ به صورت تحلیلی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در ناحیه تحتانی مقطع U شکل و مقطع توخالی داخلی از یک لایه CFRP استفاده شده و از بتنی با مقاومت بالا برای پر کردن مقطع U شکل و از بتنی با سختی و مدول الاستیسیته بالا نیز برای پر کردن ناحیه فوقانی المان داخلی استفاده شده بود. وزن تیر کامپوزیتی حدود ۲۸ درصد کمتر از وزن تیر بتن مسلح متداول بوده و ظرفیت باربری آن نیز حدود ۸۷ درصد بیشتر از تیر بتن مسلح متداول می‌باشد [۱۶].

همان‌گونه که پیشتر بیان شد، اکثر مطالعاتی که پیرامون تیرهای کامپوزیتی صورت پذیرفته به صورت آزمایشگاهی می‌باشد. به دلیل هزینه‌های بالای مطالعات آزمایشگاهی و زمان‌بر بودن آن‌ها، استفاده از روش اجزای محدود برای بررسی رفتار این نوع سازه‌ها پیشنهاد شده تا بتوان با برآورد دقیق‌تری هزینه‌های انجام آزمایش را کاهش داد. هدف اصلی تحقیق حاضر مدل‌سازی عددی تیر کامپوزیتی با استفاده از روش اجزای محدود و مقایسه‌ی نتایج حاصل از مدل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط دیگر محققین می‌باشد به گونه‌ای که بتوان با تشخیص پارامترهای مؤثر، رفتار این نوع از تیرها را بدون انجام آزمایش‌های هزینه‌بر و به کمک روش‌های عددی برآورد نمود.

۲-۲- مدل‌سازی تیر کامپوزیتی

به منظور تحلیل تیرهای کامپوزیتی به روش عددی اجزای محدود، ابتدا مدلی از تیر کامپوزیتی که نمونه‌ی آزمایشگاهی آن توسط فم و همکاران [۱۷] اجرا و تحت بار استاتیکی مورد آزمایش قرار گرفته بود تهیه و پس از مقایسه‌ی نتایج مدل عددی این تحقیق و نتایج آزمایشگاهی مذکور و اطمینان از صحت مدل عددی، نتایج حاصل برای سایر حالات تحلیل عددی ارائه می‌گردد.

جدول (۱) - خصوصیات مکانیکی مقطع Hat-Shape و صفحه از جنس GFRP [۱۷]

		مقطع Hat-Shape		صفحه GFRP	
		طولی	عرضی	طولی	عرضی
مدول الاستیسیته (GPa)	کششی	۲۶/۲	۱۱	۲۰/۶	۱۱/۴۴
	فشاری	۲۶/۲	۱۱	۲۰/۶	۱۱/۴۴
مقاومت نهایی (MPa)	کششی	۵۱۷	۱۳۸	۱۳۷/۵	۶۸/۷
	فشاری	۳۴۵	۱۷۲	۱۶۵	۱۱۰

استفاده از گزینه غیرخطی هندسی در Abaqus در نظر گرفته شده است. شکل ۳ مدل عددی تیر با دال بتنی را نشان می‌دهد. نحوه مدل سازی و مش بندی تیر بدون دال بتنی نیز کاملاً مشابه نمونه با دال بتنی می‌باشد. آنالیز حساسیت برای مش بندی تیر مورد نظر انجام شده و پس از انتخاب یک سیستم مش بندی مناسب از المان‌هایی به ابعاد $0.05 \times 0.05 \times 0.01$ متر استفاده شده است. نحوه مش بندی تیر در شکل ۴ نشان داده شده است.

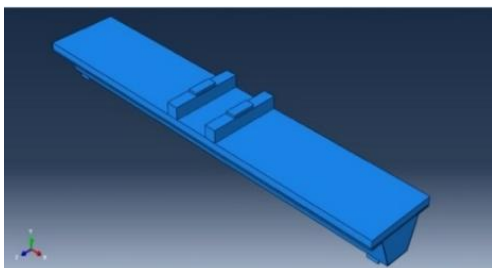


شکل (۲): نحوه بارگذاری استاتیکی، (الف) نمونه با دال بتنی، (ب)

نمونه فاقد دال بتنی [۱۷]

۲-۲- مدل سازی عددی عرشه کامپوزیتی

همان گونه که پیشتر بیان شد در تحقیق حاضر رفتار دو نمونه تیر G1 و G2 (دارای دال بتنی و فاقد دال بتنی) به روش اجزا محدود غیر خطی و با استفاده از نرم افزار Abaqus مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مطابق آزمایشگاه از صفحات بارگذاری به ابعاد $0.1 \times 0.1 \times 0.061$ و $0.2 \times 0.08 \times 0.02$ متر در نقاط بارگذاری و برای جلوگیری از تمرکز تنش نیز از صفحه‌ای به ابعاد $0.03 \times 0.1 \times 0.0208$ متر در نقاط تکیه گاهی استفاده شده‌اند. در نرم افزار برای مدل سازی بتن از مدل آسیب دیده پلاستیک استفاده شده که یک قابلیت کلی برای مدل سازی بتن و دیگر مواد شبه ترد را در انواع سازه‌ها فراهم می‌کند. این مدل بر پایه کارهای لابلینر در سال ۱۹۸۹ ارائه و توسط لی و فنوس در سال ۱۹۹۸ اصلاح و تکمیل شد [۱۸]. مدل ساختاری ارائه شده توسط چنج و مندر به عنوان رابطه تنش- کرنش برای رفتار بتن در فشار و برای مدل سازی رفتار نرم شدگی بتن در کشش نیز از رابطه نرم شدگی غیر خطی شیما استفاده شده است. فولاد با استفاده از مدل پلاستیک با سخت شوندگی ایزوتروپیک به صورت غیرخطی مدل شده و مصالح FRP نیز به صورت ارتوتروپ مدل شده‌اند. برای مدل سازی بتن، فولاد و FRP از المان‌های سه بعدی Solid استفاده شده، المان‌های به کار رفته ۸ گرهی (مرتبه اول) بوده و روش انتگرال گیری کامل برای محاسبه کمیت‌های مورد نیاز، انتخاب شده است. در تحقیق حاضر، اثر تغییر شکل‌های بزرگ با

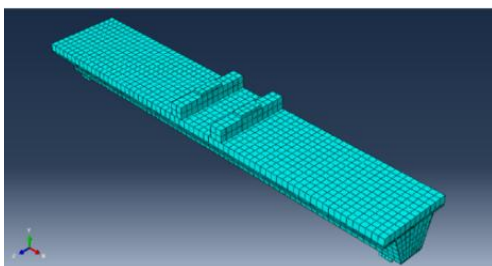


(الف)



(ب)

شکل (۳): مدل سازی عددی (الف) کل مدل (ب) مقطع تیر

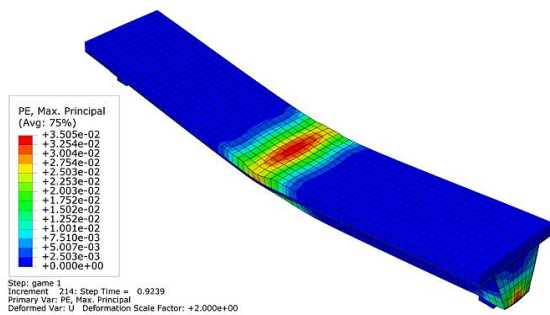


شکل (۴): مش بندی تیر کامپوزیتی

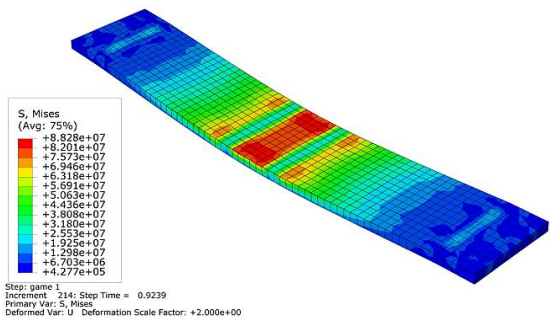
Hat-Shape) نصب شده‌اند. در نمونه عددی نیز مقادیر کرنش در نقاطی متناظر با نمونه آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و نمودار بار-کرنش در دو حالت آزمایشگاهی و عددی در شکل ۹ نشان داده شده که مطابق آن نتایج آزمایشگاهی و عددی تطابق خوبی با یکدیگر دارند.



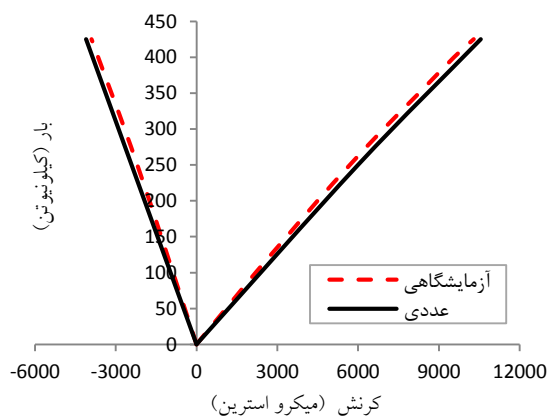
شکل (۶): نحوه گسیختگی تیر کامپوزیتی در آزمایشگاه [۱۷]



شکل (۷): نمایی از کرنش‌های پلاستیک و گسیختگی بتن در مدل عددی تنش معادل فون میسز نیز در لایه بتن در شکل ۸ نشان داده شده که مطابق آن بیشترین میزان تنش به نواحی میانی تیر اختصاص دارد.



شکل (۸): تنش معادل فون میسز در لایه بتن



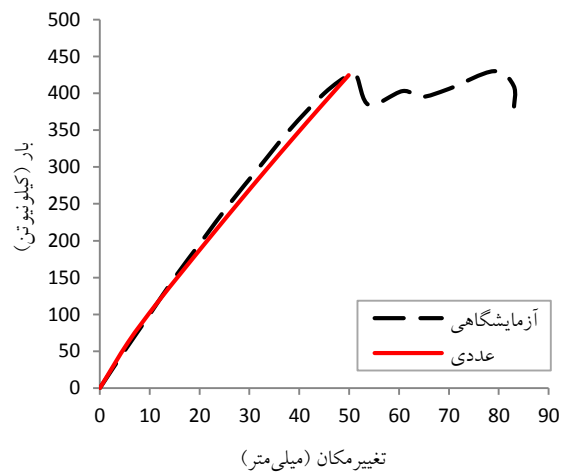
شکل (۹): نمودار بار - کرنش در وسط دهانه تیر کامپوزیتی

۳-۲- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عددی

رفتار سازه‌ای دو نمونه تیر کامپوزیتی Hat-Shape (دارای دال بتنی و فاقد دال بتنی) با استفاده از روش اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفته و در این بخش نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی تحقیق حاضر با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۷] مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲-۳-۱- صحت‌سنجی تیر کامپوزیتی Hat-Shape با دال بتنی

شکل ۵ نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه تیر کامپوزیتی دارای دال بتنی را در دو حالت آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهد که از لحاظ مقاومت نهایی و سختی تطابق خوبی با یکدیگر دارند.



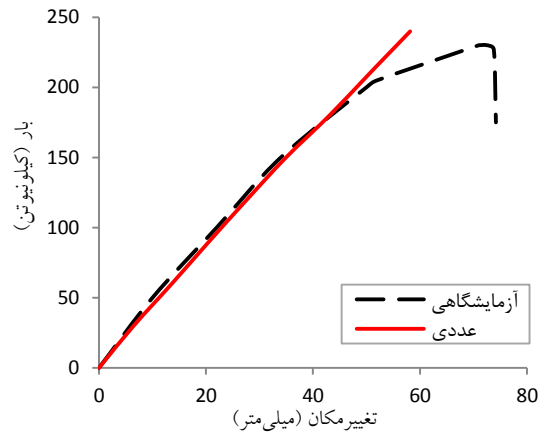
شکل (۵): نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه تیر کامپوزیتی دارای دال بتنی مطابق شکل ۶ گسیختگی نمونه آزمایشگاهی به دلیل خردشدگی بتن موجود در ناحیه وسط دهانه تیر کامپوزیتی می‌باشد [۱۷]. شکل ۷ نیز کرنش پلاستیک و گسیختگی بتن در نمونه عددی را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های مختلف کرنش پلاستیک (PE) و کرنش‌های پلاستیک اصلی، بهترین معیار برای بررسی میزان خرابی‌های کششی (ترک خوردگی) و فشاری (خرد شدگی) در مدل عددی بتن می‌باشد. مطابق شکل ۷ بیشترین مقدار کرنش‌های پلاستیک اصلی در نواحی وسط دهانه تیر و به میزان ۳/۵ درصد بوده که مقدار بسیار بزرگی است و نشان دهنده خردشدگی بتن و خسارت‌های گسترده آن می‌باشد. به طور کلی گسیختگی نمونه عددی مانند نمونه آزمایشگاهی به دلیل خردشدگی بتن می‌باشد.

همان‌گونه که پیش‌تر بیان شد در نمونه آزمایشگاهی کرنش‌سنج‌هایی در وسط دهانه تیر و در نواحی فوقانی و تحتانی (روی بتن و زیر مقطع

۲-۳-۲- صحت‌سنجی تیر کامپوزیتی Hat-Shape فاقد

دال بتنی

شکل ۱۰ نمودار بار- تغییر مکان وسط دهانه تیر کامپوزیتی فاقد دال بتنی را نشان می‌دهد. نمودار بار- تغییر مکان در دو حالت آزمایشگاهی و عددی از لحاظ مقاومت نهایی و سختی تطابق خوبی با یکدیگر دارند.



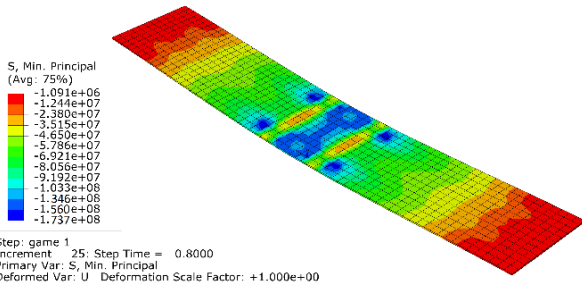
شکل (۱۰): نمودار بار - تغییر مکان وسط دهانه تیر کامپوزیتی فاقد

دال بتنی میلی متر

مطابق شکل ۱۱ گسیختگی نمونه آزمایشگاهی تیر فاقد دال بتنی به دلیل کماتش محلی و خردشدگی صفحه GFRP می‌باشد [۱۷]. شکل ۱۲ نیز تنش‌های اصلی فشاری صفحه GFRP را در مدل عددی نشان می‌دهد. تنش‌های اصلی فشاری صفحه GFRP در ناحیه وسط دهانه تیر و زیر صفحات بارگذاری به مقدار ۱۷۳ مگاپاسکال رسیده و از آنجایی که مقاومت نهایی فشاری صفحه GFRP مورد استفاده در آزمایشگاه نیز ۱۶۵ مگاپاسکال می‌باشد (جدول ۱)، بنابراین در نمونه عددی صفحه GFRP در نواحی وسط دهانه تیر و زیر صفحه بارگذاری دچار گسیختگی شده‌اند. به طور کلی گسیختگی نمونه عددی مانند نمونه آزمایشگاهی به دلیل خردشدگی و کماتش صفحه GFRP می‌باشد.



شکل (۱۱): گسیختگی نمونه آزمایشگاهی تیر فاقد دال بتنی [۱۷]



شکل (۱۲): تنش‌های اصلی فشاری صفحه GFRP در مدل عددی

همان‌گونه که در نمودارها و شکل‌های فوق نشان داده شده، تطابق خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و عددی از نظر مقاومت نهایی، سختی و نیز آسیب‌های به وجود آمده و در نتیجه رفتار وجود دارد، لذا می‌توان به نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی به کمک اجزا محدود انجام شده در این تحقیق اطمینان نمود. بنابراین از این پس می‌توان رفتار تیرهای کامپوزیتی Hat-Shape را با استفاده از روش‌های عددی و بدون انجام آزمایش‌های پرهزینه، مورد بررسی قرار داد.

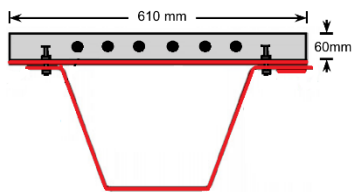
۳- مطالعه پارامتری

پس از اطمینان از صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی به روش اجزا محدود، تحلیل‌های پارامتریک پیرامون تیر کامپوزیتی Hat-Shape با به کارگیری میلگرد در دال بتنی، تغییر زاویه جان مقطع Hat-Shape، مقایسه عملکرد تیر کامپوزیتی با تیر بتن مسلح متداول، تغییر جنس مقطع Hat-Shape و صفحه GFRP به فولاد و آلومینیوم صورت پذیرفته است. تیر کامپوزیتی Hat-Shape با دال بتنی به عنوان نمونه کنترل عددی در نظر گرفته شده و در کلیه تحلیل‌ها نوع المان‌ها و نحوه مدل‌سازی به همان شیوه‌ای می‌باشد که در بخش صحت‌سنجی مد نظر قرار گرفته است.

۳-۱- بررسی میزان تأثیر به کارگیری میلگرد در دال

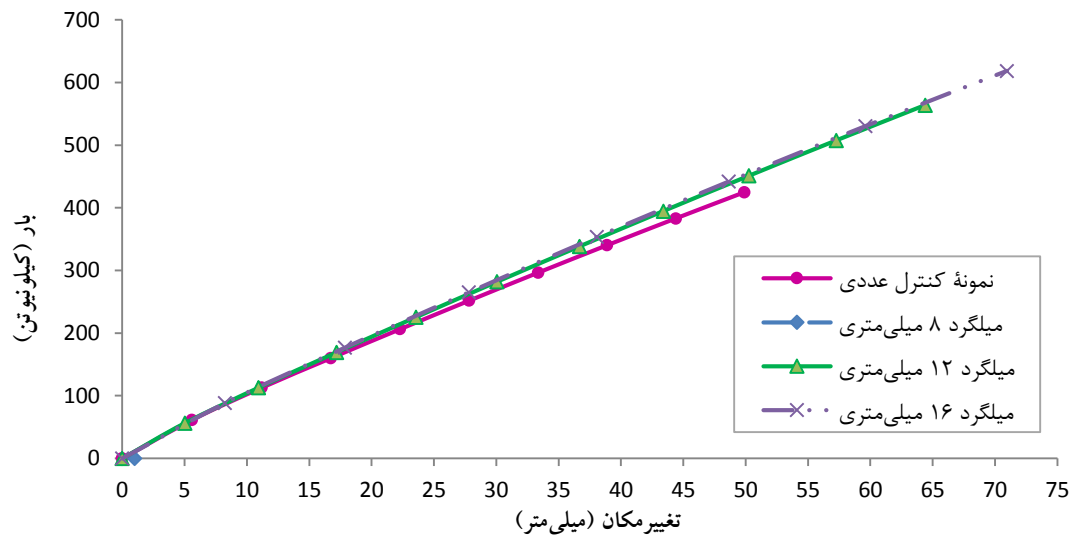
بتنی

به منظور بررسی میزان تأثیر به کارگیری میلگرد در دال بتنی ناحیه فوقانی بر عملکرد تیر کامپوزیتی، از ۷ میلگرد به قطر ۸ میلی‌متر ($p=1\%$)، ۷ میلگرد به قطر ۱۲ میلی‌متر ($p=2\%$) و ۶ میلگرد به قطر ۱۶ میلی‌متر ($p=3\%$) استفاده شده است. شکل ۱۳ نحوه قرارگیری میلگردها در دال بتنی را نشان می‌دهد.



مطابق شکل ۱۴، با مسلح کردن دال بتنی ناحیه فوقانی تیر کامپوزیتی، تغییر چندانی در سختی آن رخ نداده و مقاومت نهایی تیر نیز در حالت‌های $\rho=1\%$ ، $\rho=2\%$ و $\rho=3\%$ به میزان به ترتیب ۱۹، ۳۲ و ۴۵ درصد افزایش یافته است.

شکل (۱۳): نحوه قرارگیری میلگردهایی به قطر ۱۶ میلی‌متر در دال بتنی

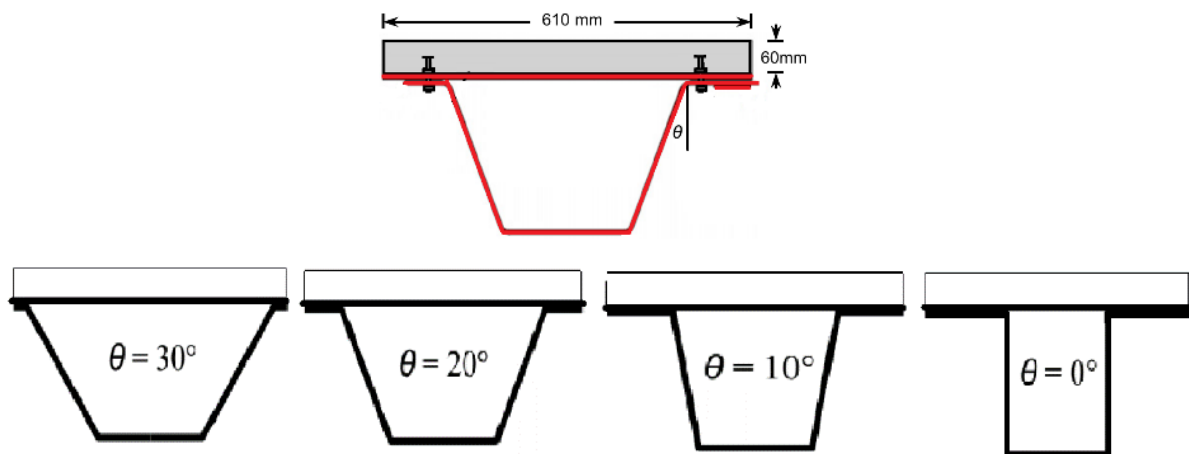


شکل (۱۴): نمودار بار-تغییر مکان میزان تأثیر مسلح کردن دال بتنی بر رفتار تیر

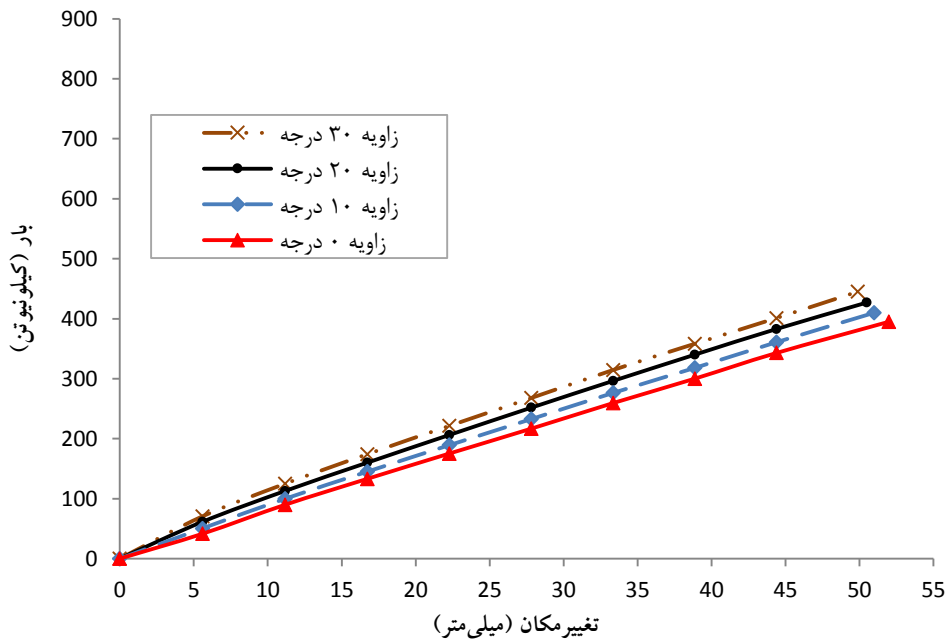
مختلف را نشان می‌دهد. تغییر زاویه جان مقطع Hat-Shape تأثیر چندانی بر عملکرد تیر ندارد. گسیختگی نمونه‌ها با زوایای گوناگون مانند نمونه اولیه به دلیل تخریب دال بتنی بوده و در سختی و مقاومت نهایی نمونه‌ها نیز تغییر چندانی رخ نداده است.

۲-۳- تغییر زاویه جان مقطع Hat-Shape

به منظور بررسی میزان تأثیر تغییر زاویه جان مقطع Hat-Shape بر عملکرد تیر کامپوزیتی، نمونه‌هایی با زوایای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه مدلسازی شده است. همان‌گونه در شکل ۱۵ نشان داده شده است، θ زاویه بین جان مایل تیر کامپوزیتی و راستای قائم می‌باشد. شکل ۱۶ نمودار بار-تغییر مکان تیر کامپوزیتی با زوایای



شکل (۱۵): مدلسازی نمونه‌های تیر کامپوزیتی با زوایای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه



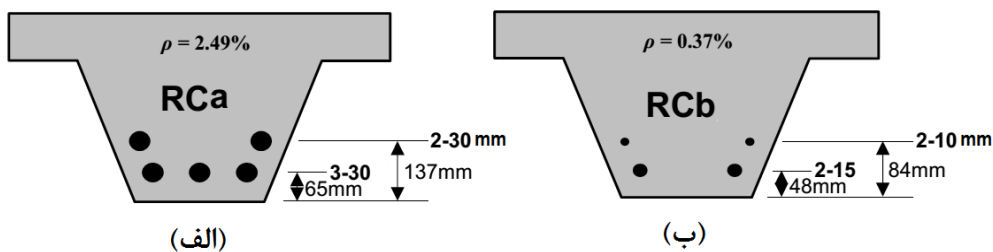
شکل (۱۶): نمودار بار - تغییر مکان نمونه‌های تیر کامپوزیتی با زوایای ۰، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درجه

میلگرد ۳۰ میلی‌متری به فاصله ۶۵ و ۱۳۷ میلی‌متر از ناحیه تحتانی تیر استفاده شده است. درصد فولاد نمونه مورد بحث نیز ۲/۴۹ درصد می‌باشد. همانطوری که در شکل ۱۷ (ب) نشان داده شده، از مقطع بتن مسلح با میلگردهایی به قطر ۱۰ و ۱۵ میلی‌متر برای دستیابی به سختی خمشی یکسانی با تیر کامپوزیتی استفاده شده است ($\rho=0.37\%$).

مطابق شکل ۱۸، تیر بتن مسلح با مقاومت نهایی مشابه با تیر کامپوزیتی (RCa)، سختی بیشتر و نمونه بتن مسلح که سختی آن با نمونه کامپوزیتی مطابقت دارد (RCb)، مقاومت نهایی کمتری نسبت به آن دارد.

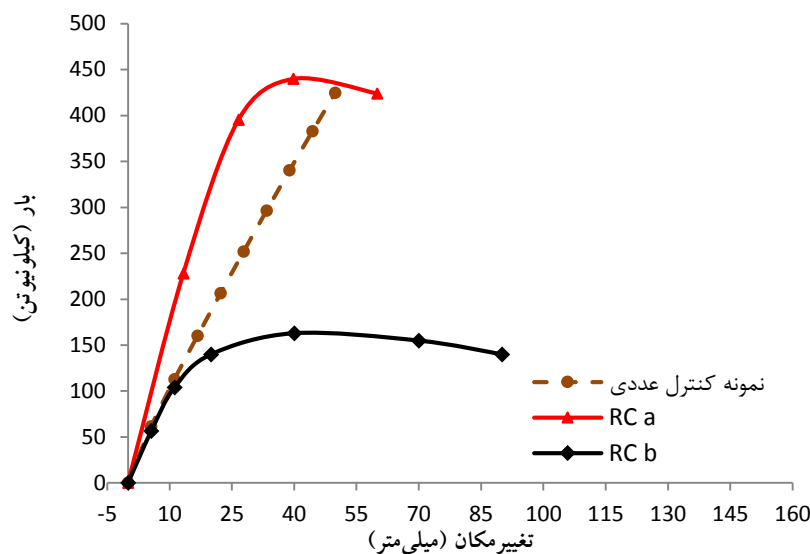
۳-۳- مقایسه عملکرد تیر کامپوزیتی با تیر بتن مسلح

در این بخش رفتار تیر کامپوزیتی Hat-Shape با تیر بتن مسلحی که مقاومت فشاری بتن، هندسه و شرایط تکیه گاهی یکسانی با نمونه کنترل عددی دارد، مورد مقایسه قرار گرفته است. هدف از این مطالعه دستیابی به درصد فولاد مقطع و محل قرارگیری میلگردها به گونه‌ای است که بتوان به مقاومت نهایی و سختی خمشی مشابه نمونه کنترل عددی دست یافت. مقاومت تسلیم و نهایی میلگردهای فولادی موجود در تیر بتن مسلح به ترتیب ۴۰۰ و ۶۰۰ مگاپاسکال می‌باشند. فاصله‌ای بیشتر از ۴۰ میلی‌متر به عنوان پوشش میلگردها در تیرهای بتن مسلح در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۱۷ (الف)، به منظور دستیابی به مقاومت نهایی تیر کامپوزیتی، از ۳ میلگرد ۳۰ میلی‌متری و ۲



شکل (۱۷): مقطع تیر بتن مسلح (RC)؛

(الف) مقطعی با مقاومتی مشابه با تیر کامپوزیتی (مقطعی با سختی مشابه با تیر کامپوزیتی)



شکل (۱۸): مقایسه رفتار تیر کامپوزیتی با RCa و RCb

همانطوری که از شکل ۲۰ برمی آید نمونه صفحه فولادی در اثر خردشدگی بتن و قبل از رسیدن فولاد مصرفی به مرحله پلاستیک گسیخته شده و نمودار بار- تغییر مکان آن تا بار نهایی تقریباً به صورت خطی پیش می‌رود. علت آن نیز حجم کم فولاد در این نمونه و نزدیک بودن صفحه GFRP به تار خشی بوده که رفتار سایر مصالح (GFRP و بتن) غالب شده است. حجم فولاد مصرفی در دو نمونه مقطع Hat-Shape فولادی و نمونه مقطع Hat-Shape و صفحه فولادی نسبت به نمونه صفحه فولادی بیشتر بوده و رفتار فولاد در آن‌ها غالب شده و سختی نمونه تا اندازه زیادی افزایش یافته است. فولاد مصرفی در این دو نمونه به نقطه تسلیم رسیده، وارد مرحله پلاستیک شده و در نهایت شکل-پذیری تیر کامپوزیتی نیز افزایش یافته است. گسیختگی نمونه‌ها به دلیل تسلیم فولاد، ورود آن به مرحله پلاستیک و خردشدگی بتن می‌باشد.

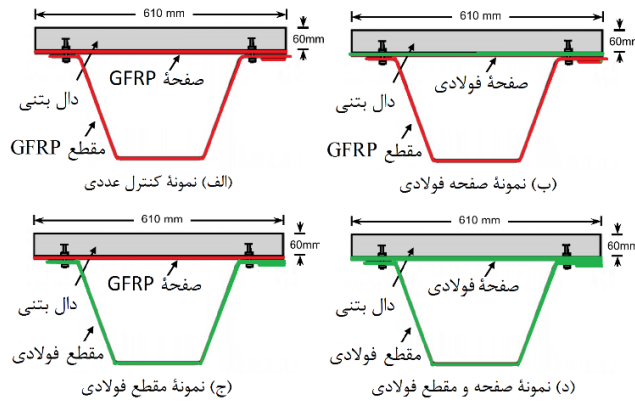
۳-۵- تغییر جنس مقطع Hat-Shape و صفحه GFRP به آلومینیوم

در این بخش جنس مقاطع GFRP به آلومینیوم نوع 6082-T6 تغییر داده شد، تا میزان تأثیر مصالح مصرفی بر رفتار تیر کامپوزیتی مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور مطابق شکل ۲۱، نخست صفحه GFRP به صفحه آلومینیومی، سپس مقطع Hat-

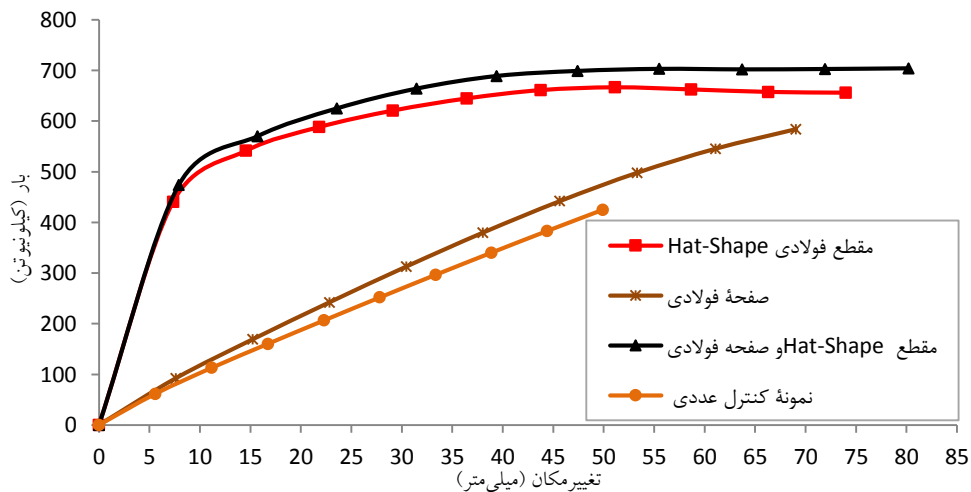
۳-۴- تغییر جنس مقطع Hat-Shape و صفحه GFRP به فولاد
در این بخش جنس مقاطع GFRP به فولاد تغییر داده شده تا میزان تأثیر مصالح مصرفی بر رفتار تیر کامپوزیتی مورد ارزیابی قرار گیرد. بدین منظور مطابق شکل ۱۹، نخست صفحه GFRP به صفحه فولادی، سپس مقطع Hat-Shape از جنس GFRP به فولاد و در نهایت صفحه GFRP و مقطع Hat-Shape به مقاطع فولادی تغییر جنس داده شده که به ترتیب به نمونه‌های صفحه فولادی، مقطع فولادی Hat-Shape و مقطع Hat-Shape و صفحه فولادی تغییر نام یافته‌اند. نمودار بار-تغییر مکان برای حالات مختلف تغییر جنس مقاطع از GFRP به فولاد در شکل ۲۰ نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که تغییر جنس صفحه GFRP که به تار خشی نیز بسیار نزدیک می‌باشد، تأثیر چندانی بر سختی تیر کامپوزیتی نداشته ولی ظرفیت باربری تیر را ۳۸ درصد افزایش می‌دهد. با تغییر جنس مقطع Hat-Shape و صفحه روی آن از GFRP به فولاد، سختی تیر کامپوزیتی و ظرفیت باربری آن به میزان ۶۶ درصد افزایش می‌یابد ولی با توجه به این که وزن تیری که مقطع Hat-Shape و صفحه روی آن از GFRP ساخته شده ۳۶۴ کیلوگرم و در نمونه‌ای که از فولاد ساخته شده ۶۴۴ کیلوگرم می‌باشد، می‌توان اظهار داشت که با تغییر جنس تیر از GFRP به فولاد، نسبت ظرفیت باربری به وزن حدود ۶ درصد کاهش می‌یابد.

شده است. تغییر جنس صفحه GFRP به صفحه آلومینیومی تأثیر چندانی بر سختی تیر کامپوزیتی نداشته ولی ظرفیت باربری را حدود ۳۲ درصد افزایش می دهد.

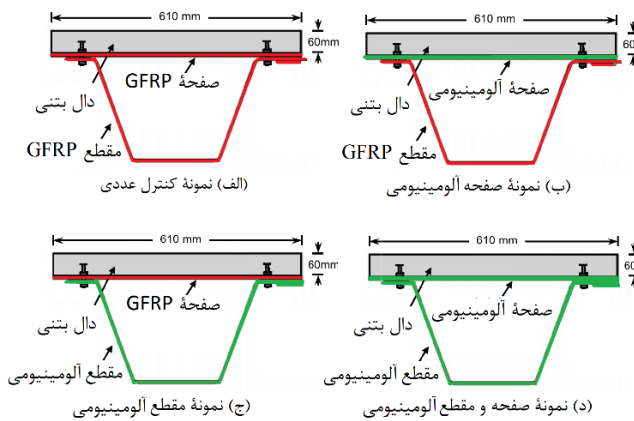
Shape از جنس GFRP به آلومینیوم و در نهایت صفحه GFRP و مقطع Hat-Shape به مقاطع آلومینیومی تغییر جنس داده شده اند. نمودار بار - تغییر مکان برای حالات مختلف تغییر جنس مقاطع از GFRP به آلومینیوم نیز در شکل ۲۲ نشان داده



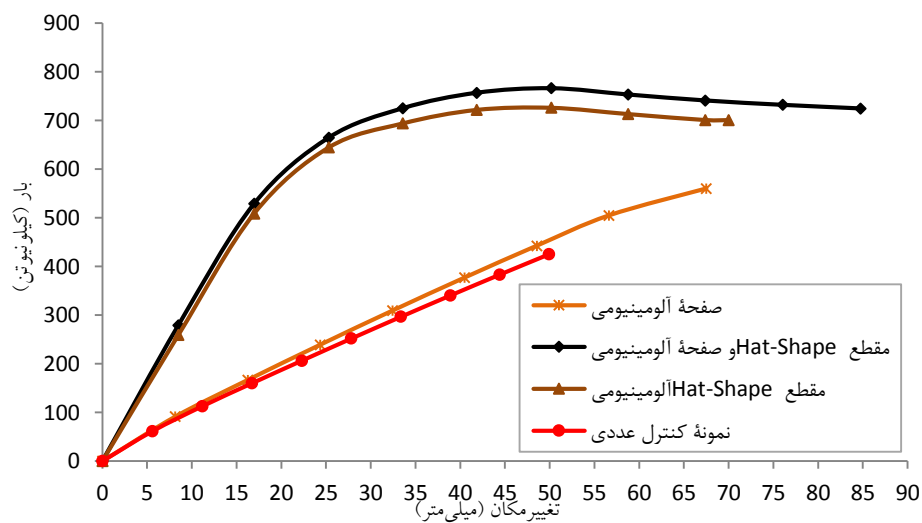
شکل (۱۹): تغییر جنس مقطع Hat-Shape و صفحه GFRP به فولاد



شکل (۲۰): نمودار بار - تغییر مکان مقطع Hat-Shape و صفحه GFRP به فولاد



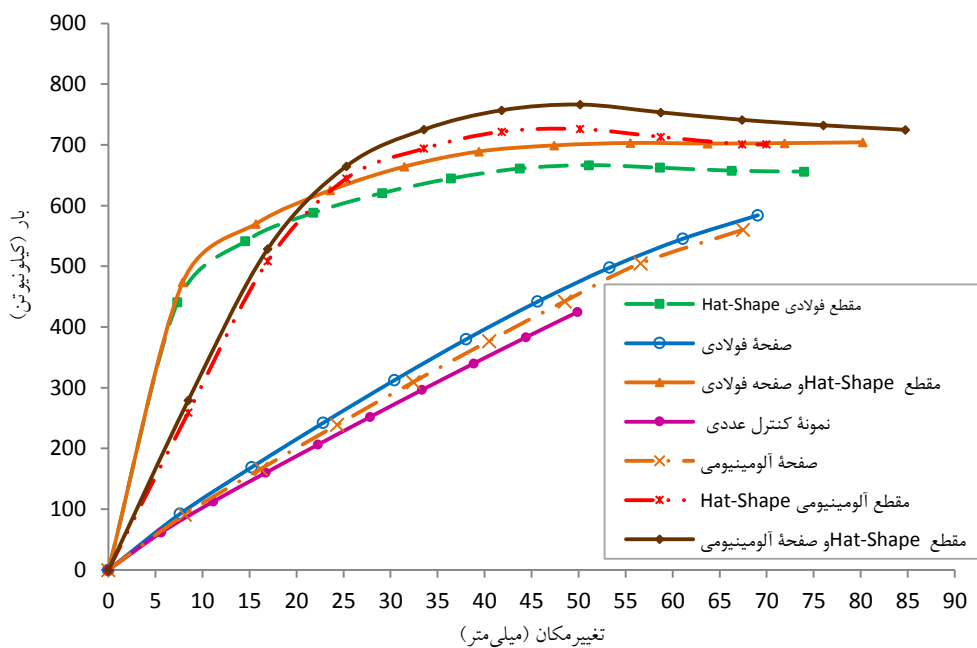
شکل (۲۱): تغییر جنس مقطع Hat-Shape و صفحه فوقانی از GFRP به آلومینیوم 6082-T6



شکل (۲۲): نمودار بار- تغییر مکان تغییر جنس مقطع Hat-Shape و صفحه فوقانی از GFRP به آلومینیوم 6082-T6

همچنین با تغییر جنس مقطع Hat-Shape و صفحه روی آن از GFRP به آلومینیوم، سختی تیر کامپوزیتی تا اندازه زیادی افزایش یافته و ظرفیت نهایی باربری نیز حدود ۷۰ درصد بالا رفته است. وزن تیری که مقطع Hat-Shape و صفحه روی آن از GFRP ساخته شده ۳۶۴ کیلوگرم و در نمونه‌ای که از آلومینیوم ساخته شده ۴۱۴ کیلوگرم می‌باشد. لذا می‌توان اظهار داشت که با تغییر جنس مصالح از GFRP به آلومینیوم نسبت ظرفیت باربری تیر به وزن آن، حدود ۵۱ درصد افزایش می‌یابد.

گسیختگی نمونه‌ها به دلیل تسلیم آلومینیوم، ورود آن به مرحله پلاستیک و خردشدگی بتن می‌باشد. در نهایت نمودار تغییر جنس اجزاء مختلف تیر کامپوزیتی از GFRP به فولاد و آلومینیوم در شکل ۲۳ مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. سختی آلومینیوم مصرفی در این مطالعه نسبت به فولاد کمتر ولی نقطه تسلیم آن بالاتر بوده که این امر به وضوح در شکل ۲۳ مشهود است. نمونه‌های آلومینیومی سختی کمتری نسبت به نمونه‌های فولادی داشته ولی در بار بالاتری به نقطه تسلیم می‌رسند.



شکل (۲۳): نمودار بار- تغییر مکان تغییر جنس مقطع Hat-Shape و صفحه فوقانی از GFRP به فولاد و آلومینیوم

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر عملکرد تیرهای کامپوزیتی با تغییر پارامترهای مختلف تأثیرگذار به روش اجزا محدود مورد بررسی قرار گرفته و نتایج زیر حاصل گردید؛

- با به کارگیری میلگرد با درصد فولاد متفاوت در دال بتنی، تفاوت چندانی در سختی تیر کامپوزیتی ایجاد نشده ولی ظرفیت باربری آن افزایش یافته است.
- تغییر زاویه جان مقطع Hat-Shape تأثیر چندانی بر عملکرد تیر نداشته است.
- تیر بتن مسلح با مقاومت نهایی مشابه با تیر کامپوزیتی، سختی بیشتری نسبت به آن داشته و تیر بتن مسلح با سختی خمشی یکسان با تیر کامپوزیتی، ظرفیت باربری کمتری دارد.
- با تغییر جنس مقطع Hat-Shape و صفحه روی آن از GFRP به فولاد، سختی تیر کامپوزیتی و ظرفیت باربری آن تا اندازه زیادی افزایش و به دلیل افزایش وزن تیر کامپوزیتی، نسبت ظرفیت باربری به وزن کاهش یافته است. همچنین با تسلیم فولاد و ورود آن به مرحله پلاستیک، شکل پذیری تیر نسبت به نمونه کنترل عددی افزایش پیدا کرده است.
- با تغییر جنس مقطع Hat-Shape و صفحه روی آن از GFRP به آلومینیوم، سختی تیر کامپوزیتی، ظرفیت باربری، شکل پذیری و نسبت ظرفیت باربری به وزن تیر افزایش یافته است. مقایسه نمونه‌های فولادی و آلومینیومی حاکی از آن است که نمونه‌های آلومینیومی سختی کمتری داشته و در بار بالاتری نیز تسلیم می‌شوند.

۵- مراجع

- [3] Versace. J, Ramirez. J, "Implementation of Full-Width Bridge Deck Panels, A Synthesis", Publication FHWA/IN/JTRP, Joint Transportation Research program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, Paper 116, 2004.
- [4] Kim. H.Y, Jeong. Y. J, "Ultimate strength of a steel-concrete composite bridge deck slab with profiled sheeting". Engineering Structures Elsevier, 2009.
- [5] Ji. H. S, Son. B. J, Ma. Z, "Evaluation of Composite Sandwich Bridge Decks with Hybrid FRP-Steel Core". Journal of Bridge Engineering, Vol. 14, No. 1, 2009.
- [6] Gan. L. H, Ye. L, Mai. Y. W, "Design and evaluation of various section profiles for pultruded deck panels". Composite Structures 47, Elsevier, pp.719-725, 2000.
- [7] Reising. R, Shahrooz. B, "Close Look at Construction Issues and Performance of Four Fiber-Reinforced Polymer Composite Bridge Decks". Journal of Composite for Construction, 2004.
- [8] Zi. G, Kim. B. M, "An experimental study on static behavior of a GFRP bridge deck filled with a polyurethane foam". Journal of Composite Structures 82, pp. 257-268, 2008.
- [9] Brown. D. L, Berman. J. W, "Fatigue and Strength Evaluation of Two Glass Fiber-Reinforced Polymer Bridge Decks". Journal Of Bridge Engineering Asce, 2010.
- [10] Hillman, J. R., and Murray, T. M., "Innovative floor systems for steel framed buildings". International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich, Switzerland, Vol 60, pp. 672- 675, 1990.
- [11] Bakeri, P. A., and Sunder, S. S., "Concepts for hybrid FRP bridge deck systems". Serviceability and Durability of Construction Materials; Proc., 1st Materials Engineering congress , ASCE, New York, 2, pp. 1006 -1015, 1990.
- [12] Saiidi, M., Gordaninejad, F., and Wehbe, N., "Behavior of graphite/epoxy concrete composite beams". J. Struct. Eng, pp. 2958 -2976, 1994.
- [13] Deskovic. N, Meier. U, "Innovative design of FRP combined with concrete". Journal of structural engineering, Vol121, No 7, July 1995, pp.1069-1078, 1995.
- [14] Kitane. Y, Aref. A. J, Lee. G, "Static and Fatigue Testing of Hybrid Fiber-Rein forced Polymer -Concrete Bridge". Superstructure Journal of Composite for Construction, Vol 8, No.2, pp. 182-190, ASCE, 2004.
- [15] Keller. T, Schaumann. E, Valle. T, "Flexural behavior of a hybrid FRP and lightweight concrete
- [1] Kim. H.Y, Jeong. Y. J, "Experimental investigation on behaviour of steel-concrete composite bridge decks with perfobond ribs". Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, pp.463-471, 2006.
- [2] Brown. D. L, Berman. J. W, "Fatigue and Strength Evaluation of Two Glass Fiber-Reinforced Polymer Bridge Decks". Journal of bridge engineering, ASCE, Vol 14, pp.493-503, 2010.

sandwich bridge deck". Composites, Part A (38), pp.879–889, 2007.

[16] Sutter. S. De, Remy. O, Tysmans. T, Wastiels. J, "Development and experimental validation of a lightweight Stay-in-Place composite formwork for concrete beams". Journal of Construction and Building Materials, Vol. 63, pp.33-39, 2014.

[17] Fam. A, Honickman. H, "Built-up hybrid composite box girders fabricated and tested in flexure", Engineering Structures 32, PP. 1028-1037, 2010.

[18] ABAQUS Analysis user's manual, version 6.10.1, 2010.

Evaluation of GFRP Hat-Shape Composite Beam with Concrete Slab by Finite Element Method and Parametric Analysis

E. Alizadeh

PhD student. In Structural Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

M. Dehestani*

Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

A. Moslemi.V

PhD student. In Structural Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Abstract

Most of ordinary bridge decks are made of reinforced concrete and often deteriorate at a rapid rate in rough operational environments. The rapid deterioration of the deck often impacts other critical components of the bridge. Another disadvantage of the concrete deck is its increased weight in long-span bridges. Therefore, it is essential to examine new materials and innovative designs using hybrid system consisting conventional materials such as concrete and steel with FRP plates which is also known as composite deck. Since these decks are relatively new so it would be useful to evaluate their performances in more details. The present study is dedicated to Hat-Shape composite beam with concrete slab. The structural performance of deck was evaluated by nonlinear finite element method and numerical results have been compared with published experimental results where possible. After ensuring the validity of numerical modeling of composite deck, parametric studies has been done; such as using steel rebar in concrete slab, changing the angle of webs of Hat-Shape Section, modeling RC sections to match strength and stiffness of Hat-Shape composite beam and altering the GFRP Material into steel and aluminum. It was found that the behavior of this type of composite beams can be considered with numerical methods without executing costly experiments. Using rebar in concrete slab can increase ultimate load capacity of composite beam by 45 %. Also strength-to- weight ratio of the beam increased by changing the GFRP Material to aluminum by 51%.

Keywords: Composite beam, FRP, Hat-Shape, Nonlinear finite element analysis, FRP Sections.

*Corresponding author: dehestani@gmail.com