



دوازدهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ تیرماه ۱۴۰۰
دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران



بررسی ویژگی‌های کششی مصالح SMA-FRP تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای

سعید ایل بیگی قلعه‌نی^۱، محمد رضا توکلی زاده^۲

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

drt@um.ac.ir

خلاصه

پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP) رایج در مهندسی سازه، به دلیل شکننده بودن اکثر الیاف مورد استفاده، رفتار تردی داشته و در سازه‌هایی که نیاز به شکل‌پذیری بالا دارند، نمی‌توانند کارآیی مناسبی از خود نشان دهند. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) علاوه بر شکل‌پذیری و جذب انرژی بالا، در برابر خوردگی نیز مقاومت مناسبی دارند. بنابراین استفاده از الیاف SMA در تهیه FRP‌ها می‌تواند راه حل مناسبی برای رفع مشکل رفتار ترد FRP‌های رایج باشد. الیاف SMA می‌تواند به تنهایی یا در کنار دیگر الیاف رایج، به وسیله‌ی رزین‌ها با یکدیگر یکپارچه شده و مصالح جدیدی به نام SMA-FRP ایجاد کند. در این پژوهش، هدف بررسی رفتار مصالح SMA-FRP است که با استفاده از نسبت‌های گوناگون الیاف شیشه و الیاف نیکل-تیتانیوم (NiTi) در حالت سوپرلاستیک برای رسیدن به یک ضریب کشسانی مشخص طراحی شده‌اند. این مصالح با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود OPENSEES مدل‌سازی شده و تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای کششی قرار می‌گیرند. با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل، می‌توان تاثیر نسبت حجمی الیاف NiTi بر رفتار چرخه‌ای شامل: تنش بیشینه ایجاد شده، کرنش پسماند و قابلیت جذب و استهلاک انرژی آن‌ها را مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل نشان می‌دهد با استفاده از الیاف SMA در مصالح SMA-FRP قابلیت استهلاک انرژی این مصالح افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، SMA-FRP، روش اجزای محدود، ویژگی‌های کششی، بارگذاری چرخه‌ای

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از مصالح سبک‌تر، قوی‌تر و هوشمندتر برای کاربردهای مختلف در علم هوا فضا، علوم نظامی، صنایع حمل و نقل و ساخت سازه‌های مختلف افزایش یافته است [۱]. از پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP) به دلیل نسبت مقاومت به وزن بالا، مقاومت بالا در برابر خوردگی و ماندگاری مناسب، به طور گسترده در کاربردهای مهندسی استفاده می‌گردد [۲]. با این وجود FRP‌های رایج با الیاف شیشه‌ای و کربنی (CFRP و GFRP)، تا لحظه گسیختگی، رفتار تنش-کرنش نسبتاً خطی دارند. بنابراین در لحظه گسیختگی، رفتار تردی از خود نشان می‌دهند و در نتیجه توانایی کمی در استهلاک انرژی داشته و در سازه‌هایی که نیاز به شکل‌پذیری بالا دارند، رفتار مناسبی از خود نشان نمی‌دهند [۳،۴].

آلیاژهای حافظه‌دار شکلی (SMA) یک گروه از آلیاژهای فلزی هستند که می‌توانند مقادیر بزرگی از کرنش‌ها را در هنگام باربرداری بازیابی کنند. SMAها در برابر خوردگی مقاومت بسیار خوبی دارند، در برابر خستگی رفتار مناسبی از خود نشان می‌دهند و قابلیت استهلاک انرژی خوبی دارند، زیرا مسیرهای بارگذاری و باربرداری بر یکدیگر منطبق نبوده و چرخه‌های هیستریزس را پدید می‌آورند. این خاصیت منحصر به فرد SMAها آن‌ها را به یک انتخاب جذاب برای توسعه‌ی مصالح هوشمند تبدیل کرده است [۵،۶]. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی دو خصوصیت منحصر به فرد نشان می‌دهند: خاصیت حافظه‌ی شکلی (SME) و خاصیت فوق‌الاستیک (SE). در خاصیت حافظه‌ی شکلی، بازیابی کرنش‌های ایجاد شده پس از باربرداری به صورت حرارتی و در خاصیت فوق‌الاستیک



بازیابی کرنش‌های ایجاد شده پس از باربرداری به صورت مکانیکی است. هر دوی این خصوصیات به درجه‌ی حرارت ماده بستگی دارد. در دماهای نسبتاً بالا، آلیاژ در حالت آستونیت قرار داشته و در نتیجه رفتار فوق‌الاستیک دارد، در حالی که در دماهای نسبتاً پایین، آلیاژ در حالت مارتنزیت قرار داشته و رفتار حافظه‌ی شکلی از خود نشان می‌دهد [۴ و ۷]. آلیاژهای حافظه‌دار شکلی، در زمینه‌های مختلف مثل پزشکی، هوافضا، خودرو و سازه‌های عمرانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال سیم‌های SMA در سیستم‌های استهلاک انرژی و همچنین در سیستم‌های جداساز لرزه‌ای و بهسازی سازه‌ها استفاده شده است. میلگردهای SMA در سیستم‌های بادبندی مقاوم در برابر کماتش برای استهلاک انرژی و همچنین در روش نصب در نزدیکی سطح به عنوان جایگزینی برای FRPها در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی استفاده می‌شود [۳].

در سال‌های اخیر، استفاده از سیم‌های SMA به عنوان الیاف در اپوکسی‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. SMA-FRP شامل رزین‌های پلیمری است که توسط الیاف SMA فوق‌الاستیک با قطر کم تقویت شده‌اند؛ ممکن است با حضور الیاف تقویتی رایج ساخته شوند یا بدون الیاف تقویتی رایج. رزین‌ها به عنوان جزء اتصال دهنده‌ی الیاف تقویتی عمل کرده و الیاف SMA و دیگر گونه‌های الیاف را به صورت یکپارچه به یکدیگر اتصال می‌دهند [۷]. شکل ۱ طرحی شماتیک از یک ماده مرکب SMA-FRP را نشان می‌دهد.

جانگ و همکاران [۸] در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که قرار دادن سیم‌های نیتینول درون کامپوزیت‌های CFRP، مقاومت کششی آن‌ها را از ۱۳۰۰ به ۱۱۰۰ مگاپاسکال کاهش می‌دهد و این مقدار می‌تواند با توجه به جهت لایه‌های CFRP و سیم‌های نیکل-تیتانیوم (NiTi) تا ۱۰۵۰ مگاپاسکال کاهش پیدا کند. دلیل کاهش اینگونه بیان شد که قرار دادن سیم‌های NiTi درون کامپوزیت‌های CFRP، در مصالح نقص ایجاد کرده و منجر به کاهش مقاومت کششی کامپوزیت‌ها می‌گردد. یکی دیگر از تحقیقات بر روی کامپوزیت‌های SMA که نتایج ضعیفی را به دنبال داشت توسط ژو و همکاران [۹] انجام شد. دلیل این ضعف به سطح تماس ضعیف سیم‌های SMA با رزین به دلیل وجود حفره‌های هوا در اطراف سیم‌های SMA درون کامپوزیت نسبت داده شد. در مطالعات دیگری که توسط ژو و همکاران [۱۰] انجام شد، استفاده از سیم‌های SMA با قطر کم برای بهبود سطح تماس در کامپوزیت‌های SMA به همراه الیاف کربن بررسی گردید. با توجه به نتایج این تحقیق مشاهده شد که استفاده از سیم‌های SMA با قطر خیلی کم تقریباً حفره‌های نزدیک سیم‌های SMA را حذف می‌کند. در پژوهشی دیگر، آندراس و همکاران [۱۱] از سیم‌های SMA و الیاف شیشه در کامپوزیت‌های GFRP استفاده کرده و نشان دادند استفاده از سیم‌های SMA می‌تواند مقدار شکل‌پذیری کامپوزیت‌های استفاده شده را افزایش دهد. نسبل و همکاران [۱۲] سیم‌های SMA در حالت سوپر‌الاستیک را به همراه کامپوزیت‌های رایج FRP استفاده کردند تا از انتشار خسارت در کامپوزیت‌ها جلوگیری کنند. شریفی و همکاران [۱۳] یک کامپوزیت هوشمند FRP تهیه کردند که از دو لایه تشکیل شده است. یک لایه با الیاف یک جهته کربن تقویت شد و لایه دیگر با استفاده از سیم‌های SMA. در این بررسی، نمونه‌های نامتقارن مقاومت کششی خیلی کمی از خود نشان دادند. علاوه بر استفاده از سیم‌های SMA به همراه الیاف رایج در ساخت مواد مرکب، استفاده از سیم‌های SMA، به عنوان تنها الیاف تقویتی در تولید کامپوزیت‌های SMA-FRP نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. آندراس و همکاران [۱۴] مطالعات آزمایشگاهی را بر روی قطعات SMA-FRP انجام دادند. اگرچه درصد SMA استفاده شده در کامپوزیت‌ها پایین بود، اما نتایج نشان داد که SMA-FRPها شکل‌پذیری بالایی از خود نشان می‌دهند. پاینده و همکاران [۱۵] تأثیر استفاده از سیم‌های SMA را بر رفتار کلی کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها کامپوزیت‌هایی با سیم‌های نیتینول را در دماهای مختلف و تحت اثر بارگذاری کششی یک طرفه مورد بررسی قرار دادند.

در این پژوهش تأثیر استفاده از نسبت‌های گوناگون الیاف شیشه و الیاف NiTi در حالت سوپر‌الاستیک بر رفتار مصالح SMA-FRP که تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای کششی قرار دارند مورد بررسی قرار گرفته است. نمونه‌ها برای رسیدن به یک ضریب کشسانی مشخص طراحی شده‌اند. سیم‌های NiTi فوق‌الاستیک به قطر ۰/۵ میلی‌متر به همراه الیاف شیشه برای ساخت SMA-FRPها استفاده شدند. نمونه‌های ساخته شده تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای کششی قرار گرفته و پس از به دست آمدن نمودارهای تنش-کرنش هر یک از نمونه‌ها تحت اثر بارهای وارد، نتایج بر حسب تنش بیشینه ایجاد شده، کرنش پسماند و قابلیت جذب و استهلاک انرژی مورد بحث و بررسی قرار گرفتند. در این پژوهش ویژگی‌های الیاف SMA، الیاف شیشه، ماتریس و سطح مقطع عضو مرکب در تمام نمونه‌های مورد بررسی ثابت در نظر گرفته شد (جدول ۱).

جدول ۱- ویژگی‌های مکانیکی مصالح مورد استفاده

مصالح	ویژگی	اندازه
ماتریس	ضریب کشسانی	$E_m=1.57 \text{ GPa}$
	تنش تسلیم	$F_{ym}=22 \text{ MPa}$
الیاف شیشه	ضریب کشسانی	$E_f= 86.7 \text{ GPa}$
	کرنش گسیختگی	$\varepsilon_{Glass}= 3.20\%$
SMA	ضریب کشسانی	$E_{SMA}= 63.50 \text{ GPa}$
	تنش آغاز تبدیل حالت آستنیت به مارتنزیت	$\sigma_{AMS}= 365 \text{ MPa}$
	تنش پایان تبدیل حالت آستنیت به مارتنزیت	$\sigma_{AMf}= 425 \text{ MPa}$
	تنش آغاز تبدیل حالت مارتنزیت به آستنیت	$\sigma_{MAS}= 102 \text{ MPa}$
	تنش پایان تبدیل حالت مارتنزیت به آستنیت	$\sigma_{MAf}= 50 \text{ MPa}$

۲. معرفی نمونه‌ها

NiTi به دلیل خواص فوق الاستیک عالی، حساسیت کمتر به تغییرات حرارت، مقاومت بالا در برابر خوردگی و مقاومت بالا در برابر خستگی، به عنوان رایج‌ترین SMA برای کاربردهای سازه‌ای در نظر گرفته شده است [۱۶ و ۱۷]. این در حالی است که آلیاژهای بر پایه مس و آهن در مقایسه با آن از نظر اقتصادی به صرفه‌تر است، اما ویژگی‌های حرارتی و مکانیکی آن‌ها در مقایسه با NiTi خیلی مناسب نبوده و کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۸]. هم‌چنین از آنجا که الیاف S-Glass در مقایسه با سایر الیاف تقویتی رایج، کرنش گسیختگی بالاتری دارند، جهت ساخت مصالح SMA-FRP در نظر گرفته شدند [۷]. برای بررسی تاثیر درصد الیاف SMA بر رفتار SMA-FRPها، ابتدا دو ترکیب که تنها دارای الیاف SMA با درصد حجمی متفاوت هستند مورد بررسی قرار می‌گیرند (SF1 و SF2). با توجه به اینکه نسبت درصد حجمی الیاف SMA و الیاف شیشه، ویژگی‌های مکانیکی مصالح را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد، مصالحی برای دست‌یابی به ویژگی‌های مدنظر باید طراحی شوند [۷]. طراحی مصالح SMA-FRP با هدف دست‌یابی به ضریب کشسانی مشخص (E_c) و با تغییر درصد حجمی الیاف شیشه و SMA انجام می‌شود. بنابراین ترکیبی که با ۲۰ درصد الیاف SMA و ویژگی‌های مکانیکی نشان داده شده در جدول ۲ ساخته شده است (SF2)، برای تنظیم سختی SMA-FRP استفاده شده است. در جدول ۲، نمونه‌های SMA-FRP با درصد حجمی متفاوت الیاف SMA و شیشه نشان داده شده است. رابطه‌ی زیر ارتباط این پارامترها را نشان می‌دهد:

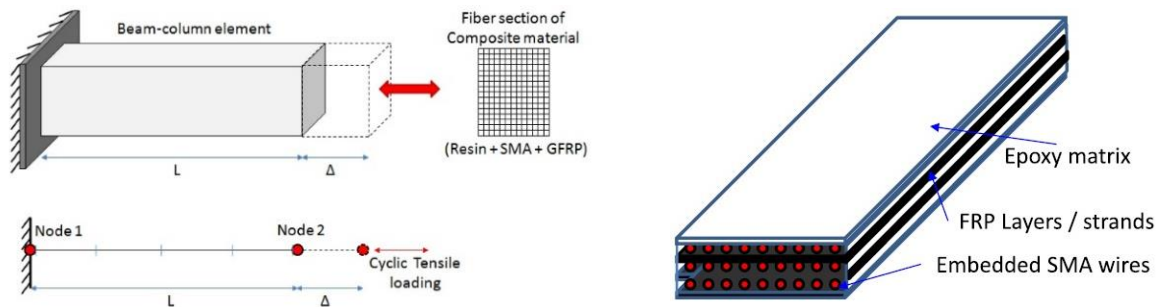
$$E_c = (E_f)(V_f) + (E_m)(V_m) + (E_{SMA})(V_{SMA}) \quad (1)$$

جدول ۲- معرفی خصوصیات کامپوزیت‌های SMA-FRP مورد بررسی

نام نمونه	تعداد سیم‌های SMA	مساحت سیم‌های SMA (میلی متر مربع)	درصد حجمی سیم‌های SMA	درصد حجمی الیاف شیشه	ضریب کشسانی (GPa)	ثابت‌های طراحی
SF-1	۳	۰/۵۸۹	۰/۰۸۷	-	۶/۶۷	Area of specimen = 6.77 mm ² $E_m=1.57 \text{ GPa}$ $E_f= 86.7 \text{ GPa}$ $E_{SMA}= 63.50 \text{ GPa}$
SF-2	۷	۱/۳۷۴	۰/۲۰۳	-	۱۳/۴۶	
SF-3	۳	۰/۵۸۹	۰/۰۸۷	۰/۰۸	۱۳/۴۸	
SF-4	۵	۰/۹۸۲	۰/۱۴۵	۰/۰۴	۱۳/۴۶	

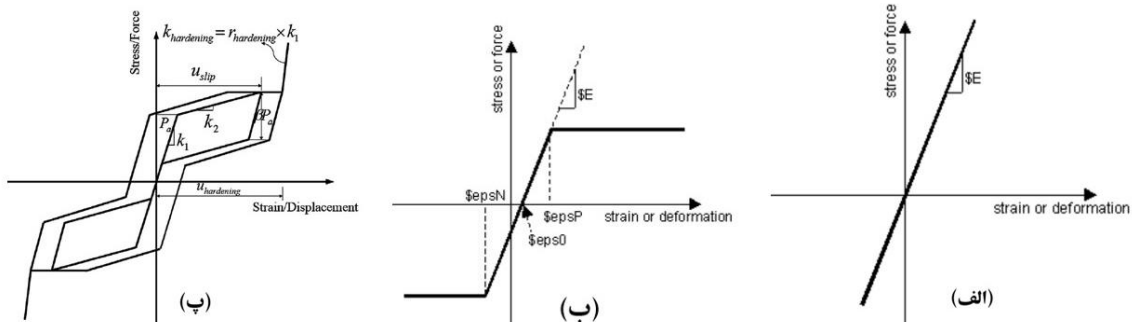
۳. مدل‌سازی عددی نمونه‌ها

برای مدل‌سازی کامپوزیت‌ها از نرم‌افزار اجزاء محدود Opensees استفاده شده است. برای مدل‌سازی مصالح مورد نظر، یک تیر طره با استفاده از المان تیر-ستون غیرخطی استفاده شده است. فرمولاسیون این المان بر اساس تعادل نیروها انجام شده و رفتار غیرخطی را در طول المان در نظر می‌گیرد. برای به دست آوردن نمودارهای تنش- کرنش کامپوزیت‌های مورد بررسی، از روش مقطع الیافی استفاده شده است. در این روش، سطح مقطع به چندین ناحیه تقسیم‌بندی شده و به هر ناحیه رفتار مصالح تشکیل‌دهنده کامپوزیت SMA-FRP اختصاص داده می‌شود. به علاوه در این روش، رفتار غیرخطی در طول المان در نظر گرفته می‌شود [۷]. در شکل ۲ المان تیر-ستون همراه با شرایط مرزی و همچنین شکل مربوط به روش مقطع الیافی نشان داده شده است.



شکل ۱- طرح شماتیک کامپوزیت SMA-FRP [۴] شکل ۲- المان تیر-ستون همراه با شرایط مرزی و شکل مربوط به روش مقطع الیافی [۷]

برای مدل‌سازی الیاف شیشه در نرم‌افزار Opensees از مدل مصالح یک‌محوری الاستیک استفاده می‌شود. نمودار تنش- کرنش این مصالح در شکل ۳- الف نشان داده شده است. برای مدل‌سازی رزین نیز از مدل مصالح الاستوپلاستیک کامل که نمودار تنش- کرنش آن در شکل ۳- ب نشان داده شده استفاده می‌شود. برای مدل‌سازی مصالح SMA در Opensees از مدل مصالح Self-Centering Material استفاده می‌شود. برای استفاده از این روش باید داده‌های مورد نیاز برای تعریف مدل پرچمی شکل نمودار تنش- کرنش مصالح SMA را به داده‌های مورد نیاز برای تعریف نمودار Self-Centering Material که در شکل ۳- پ نشان داده شده است تبدیل کرد. در این پژوهش نمونه‌ها تحت تاثیر بارگذاری چرخشی قرار گرفتند. پروتکل بارگذاری وارد بر نمونه‌های مورد بررسی، به صورت کرنش کنترل است، به این صورت که برای هر چرخه بارگذاری و باربرداری، مقدار کرنش ۱٪ افزایش پیدا می‌کند و این افزایش کرنش تا زمان رسیدن به کرنش ۳٪ ادامه پیدا می‌کند [۴].



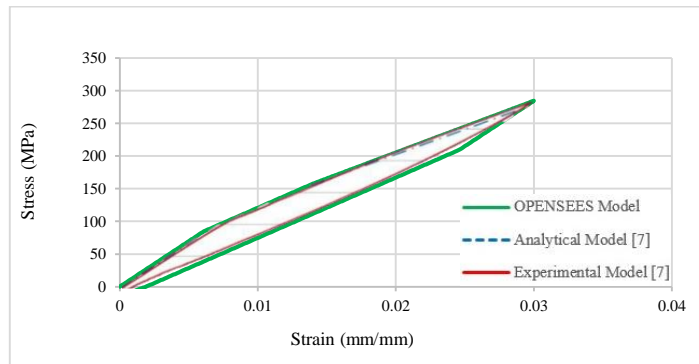
شکل ۳- نمودار تنش- کرنش مصالح خام مورد استفاده (الف) شیشه (ب) رزین (پ) SMA [۱۹]



برای پیوند دادن و یکپارچه کردن رزین، الیاف SMA و الیاف شیشه در مدلسازی کامپوزیت‌های SMA-FRP توسط نرم‌افزار، از اتصال موازی مصالح استفاده می‌شود. در حالت اتصال موازی، کرنش در تمام مصالح تشکیل دهنده ماده کامپوزیت یکسان است، در حالی که تنش‌ها و سختی‌ها، با یکدیگر جمع می‌شوند. برای صحت‌سنجی مدل‌سازی‌های عددی انجام شده در نرم‌افزار Opensees، از نتایج آزمایشگاهی استفاده می‌شود. مدل آزمایشگاهی که برای صحت‌سنجی انتخاب شده است، مدل PRC3 از پژوهش ظفر و همکاران [۷] است. مشخصات این مدل در جدول ۳ معرفی شده است. شکل ۴ نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار و مقایسه‌ی بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی عددی نمونه‌ی مورد بررسی را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد مدل‌های عددی استفاده شده در این پژوهش می‌تواند سختی اولیه، تنش‌ها و کرنش‌های انتقال (تبدیل حالت) و رفتار پس از تسلیم را به خوبی پیش‌بینی کند.

جدول ۳- معرفی مشخصات نمونه‌ی آزمایشگاهی مورد استفاده [۷]

نام نمونه	درصد حجمی الیاف SMA	درصد حجمی الیاف شیشه	درصد حجمی رزین	مدول ارتجاعی SMA	مدول ارتجاعی الیاف شیشه	مدول ارتجاعی رزین
PRC3	0.08	0.09	0.83	60.12 GPa	86.70 GPa	1.57 GPa



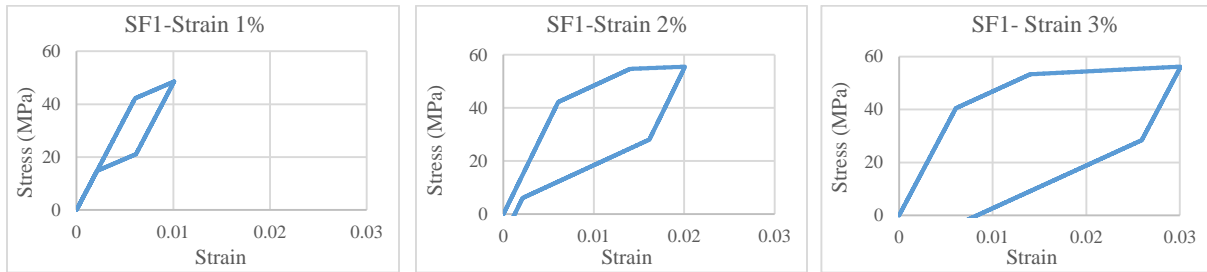
شکل ۴- مقایسه نمودار تنش-کرنش مدل آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی نرم‌افزار Opensees

۴. تحلیل نتایج

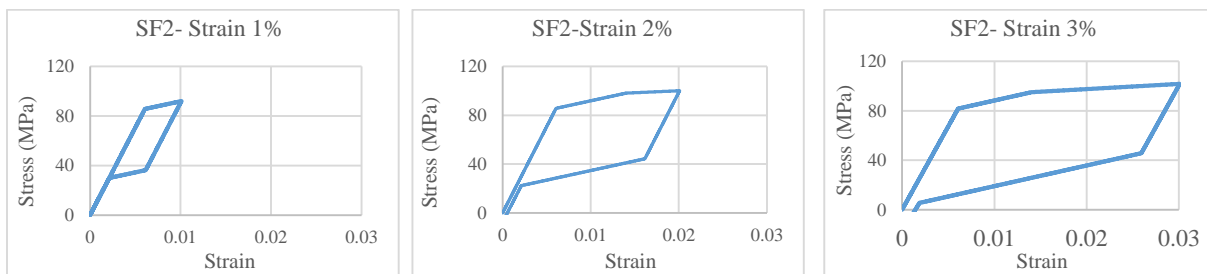
پس از تایید سازگاری نتایج مدل‌سازی‌های عددی انجام شده توسط نرم‌افزار Opensees با نتایج آزمایشگاهی، نمونه‌هایی که در جدول ۲ معرفی شده‌اند، توسط نرم‌افزار مدلسازی شده و تحت اثر پروتکل بارگذاری معرفی شده قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از تحلیل، به صورت نمودارهای هیستریزس تنش-کرنش مصالح کامپوزیت در شکل‌های ۵ تا ۸ نشان داده شده است. سپس برای ارزیابی نتایج به صورت کلی، کرنش پسماند، تنش حداکثر و انرژی مستهلک شده در هر چرخه بارگذاری و باربرداری محاسبه شده و نمودار تغییرات آنها در برابر کرنش‌های اعمال شده بررسی می‌گردد. مقادیر کرنش پسماند و هم‌چنین مقادیر تنش حداکثر ایجاد شده در نمونه‌های مورد بررسی در جدول ۴ نشان داده شده است. نمودار تغییرات کرنش پسماند با تغییر درصد حجمی الیاف شیشه و الیاف SMA در شکل ۹ و هم‌چنین نمودار تغییرات تنش حداکثر با تغییر درصد حجمی الیاف شیشه و الیاف SMA در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



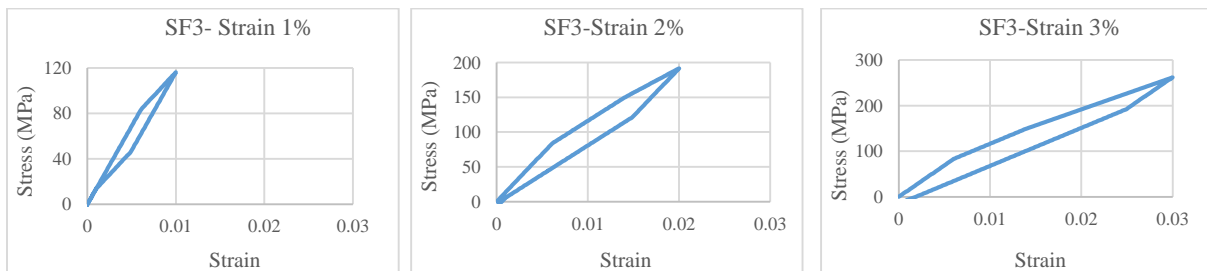
دوازدهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۲۱ تا ۲۳ تیرماه ۱۴۰۰
دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران



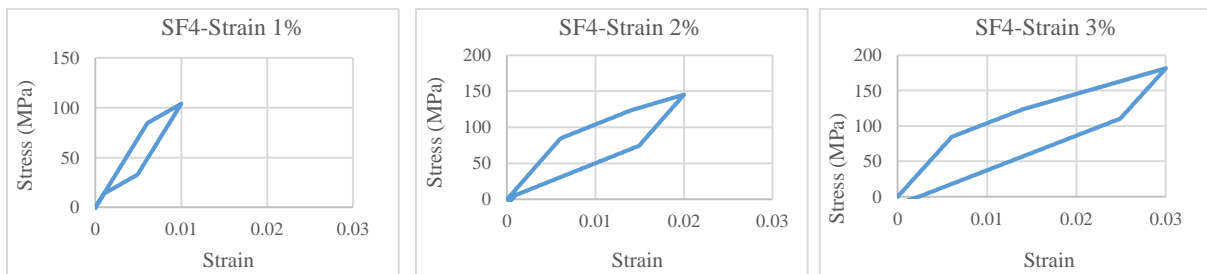
شکل ۵- نمودار تنش- کرنش کامپوزیت SF1 تحت تاثیر کرنش‌های ۱ تا ۳ درصد



شکل ۶- نمودار تنش- کرنش کامپوزیت SF2 تحت تاثیر کرنش‌های ۱ تا ۳ درصد



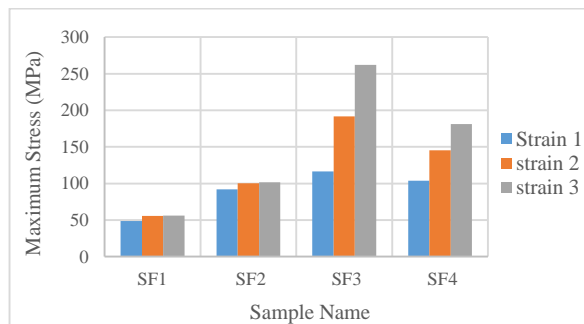
شکل ۷- نمودار تنش- کرنش کامپوزیت SF3 تحت تاثیر کرنش‌های ۱ تا ۳ درصد



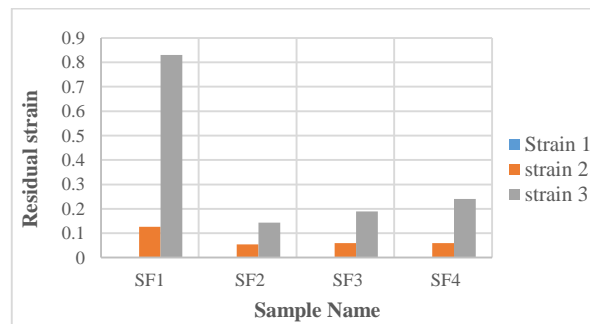
شکل ۸- نمودار تنش- کرنش کامپوزیت SF4 تحت تاثیر کرنش‌های ۱ تا ۳ درصد

جدول ۴- مقادیر کرنش پسماند و تنش حداکثر ایجاد شده در نمونه‌های مورد بررسی تحت تاثیر کرنش‌های ۱، ۲ و ۳ درصد

نام نمونه	کرنش پسماند (درصد)	تنش حداکثر (مگاپاسکال)	نام نمونه	کرنش پسماند (درصد)	تنش حداکثر (مگاپاسکال)
SF1	Strain 1%	۰	SF3	۰	۴۸/۵۴۶۴
	Strain 2%	۰/۱۲۶		۰/۱۲۶	۵۵/۵۳۷۸
	Strain 3%	۰/۸۳۱		۰/۸۳۱	۵۶/۱۹۴۸
SF2	Strain 1%	۰	SF4	۰	۹۲/۰۶۵۶
	Strain 2%	۰/۰۵۴		۰/۰۵۴	۱۰۰/۱۶۵۰
	Strain 3%	۰/۱۴۴		۰/۱۴۴	۱۰۱/۶۹۶۰



شکل ۱۰- نمودار تغییرات تنش حداکثر در نمونه‌های مورد بررسی



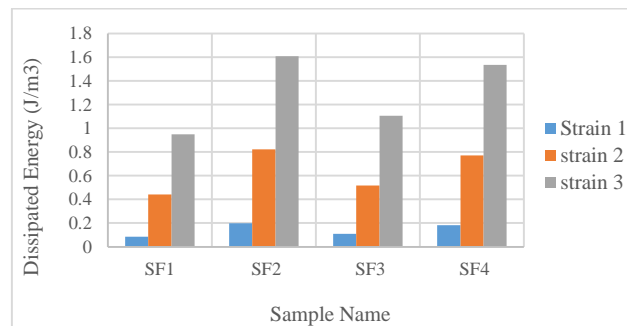
شکل ۹- نمودار تغییرات کرنش پسماند در نمونه‌های مورد بررسی

بررسی مقادیر کرنش پسماند در نمونه‌های SF1 و SF2 نشان می‌دهد در مصالحی که تنها از الیاف SMA ساخته شده‌اند، با افزایش درصد حجمی الیاف SMA، مقادیر کرنش پسماند به شکل قابل توجهی کاهش پیدا می‌کند. هم‌چنین بررسی مقادیر کرنش پسماند در نمونه‌های SF2، SF3 و SF4 (مصالح طراحی شده برای رسیدن به یک ضریب کشسانی یکسان) نشان می‌دهد که ترکیب SF2 نسبت به دو ترکیب دیگر کرنش پسماند کمتری دارد. بررسی مقادیر تنش حداکثر ایجاد شده در نمونه‌های SF1 و SF2 نشان می‌دهد در کامپوزیت‌هایی که فقط از الیاف SMA ساخته شده‌اند، با افزایش درصد حجمی الیاف SMA، مقادیر تنش حداکثر قابل تحمل توسط نمونه به شکل قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین بررسی و مقایسه‌ی مقادیر تنش حداکثر ایجاد شده در نمونه‌های SF2، SF3 و SF4 (مصالح طراحی شده برای رسیدن به یک ضریب کشسانی یکسان) نشان می‌دهد ترکیب SF2 نسبت به دو کامپوزیت SF3 و SF4 تنش کمتری را تحمل می‌کند. هم‌چنین مشاهده می‌گردد در نمونه‌ی SF3 که دارای درصد حجمی الیاف SMA کمتری (و در نتیجه دارای درصد حجمی الیاف شیشه بیشتر) نسبت به نمونه‌ی SF4 است، حداکثر تنش ایجاد شده به شکل قابل توجهی بیشتر است. مقادیر انرژی مستهلک شده در هر چرخه بارگذاری و باربرداری نمونه‌ها در جدول ۵ و نمودار تغییرات انرژی مستهلک شده با تغییر درصد حجمی الیاف شیشه و الیاف SMA در شکل ۱۱ نشان داده شده است. انرژی مستهلک شده در هر چرخه با محاسبه‌ی مساحت محصور شده بین شاخه‌های بارگذاری و باربرداری منحنی تنش-کرنش آن چرخه به دست می‌آید [۳].

بررسی مقادیر انرژی مستهلک شده در هر چرخه‌ی بارگذاری و باربرداری در نمونه‌های SF1 و SF2 نشان می‌دهد در کامپوزیت‌هایی که فقط از الیاف SMA ساخته شده‌اند، با افزایش درصد حجمی الیاف SMA، مقادیر انرژی مستهلک شده در هر چرخه‌ی بارگذاری و باربرداری نمونه به شکل قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین بررسی و مقایسه‌ی مقادیر انرژی مستهلک شده در نمونه‌های SF2، SF3 و SF4 (مصالح طراحی شده برای رسیدن به یک ضریب کشسانی یکسان) نشان می‌دهد کامپوزیت SF2 نسبت به دو کامپوزیت SF3 و SF4 مقدار انرژی بیشتری را مستهلک می‌کند. هم‌چنین مشاهده می‌گردد در نمونه‌ی SF4 که دارای درصد حجمی الیاف SMA بیشتری نسبت به نمونه‌ی SF3 است، مقدار انرژی مستهلک شده در هر چرخه‌ی بارگذاری و باربرداری بیشتر است.

جدول ۵- مقادیر انرژی مستهلک شده در نمونه‌های مورد بررسی تحت تاثیر کرنش‌های ۱، ۲ و ۳ درصد

انرژی مستهلک شده	نام نمونه	انرژی مستهلک شده	نام نمونه
۰/۱۰۸۹	Strain 1%	۰/۰۸۵۶	Strain 1%
۰/۵۱۶۶	Strain 2%	۰/۴۴۱۴	Strain 2%
۱/۱۰۵۲	Strain 3%	۰/۹۴۹۱	Strain 3%
۰/۱۸۱۳	Strain 1%	۰/۱۹۹۶	Strain 1%
۰/۷۷۰۲	Strain 2%	۰/۸۲۳۰	Strain 2%
۱/۵۳۴۸	Strain 3%	۱/۶۰۷۳	Strain 3%



شکل ۱۱- نمودار تغییرات انرژی مستهلک شده در نمونه‌های مورد بررسی تحت تاثیر کرنش‌های ۱، ۲ و ۳ درصد

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رفتار مواد مرکب SMA-FRP که با استفاده از نسبت‌های گوناگون الیاف شیشه و NiTi در حالت سوپر الاستیک طراحی شده‌اند مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل، تاثیر نسبت حجمی الیاف شیشه و نیتینول بر تنش بیشینه ایجاد شده، کرنش پسماند و قابلیت جذب و استهلاک انرژی کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان می‌دهد:

- زمانی که تنها از الیاف SMA استفاده می‌شود، با افزایش درصد الیاف، مقادیر کرنش پسماند به شکل قابل توجهی کاهش و مقادیر تنش حداکثر قابل تحمل توسط نمونه‌ها به شکل قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. هم‌چنین در این نمونه‌ها با افزایش درصد الیاف، مقادیر انرژی مستهلک شده توسط نمونه‌ها در هر چرخه‌ی بارگذاری و باربرداری افزایش قابل توجهی دارد.
- در نمونه‌ها با ضریب کشسانی یکسان، زمانی که تنها از الیاف SMA استفاده شود، کرنش پسماند کمتر بوده و مقدار تنش حداکثری که نمونه تحمل می‌کند نیز کمتر است. هم‌چنین در هر چرخه‌ی بارگذاری و باربرداری انرژی بیشتری مستهلک می‌شود.
- در نمونه‌ها با ضریب کشسانی یکسان، نمونه‌هایی که از ترکیب الیاف SMA و شیشه ساخته شده‌اند، نمونه‌ای که درصد الیاف SMA بیشتری داشته باشد، مقدار تنش حداکثری که تحمل می‌کند کمتر است در صورتی که در هر چرخه‌ی بارگذاری و باربرداری انرژی بیشتری را مستهلک می‌کند.

۶. مراجع

1. Alikhani, A., & Basaeri, A. (2021). "The effect of pre-strain and number of SMA wires on the compression properties of glass-epoxy conical grid composites," *Composite Structures Journal*, 262, pp 113624.
2. Van Den Einde, L., Zhao, L., & Seible, F. (2003). "Use of FRP composites in civil structural applications. *Construction and building materials*," 17(6-7), pp 389-403.



3. Daghash, S. M., & Ozbulut, O. E. (2016). "Characterization of superelastic shape memory alloy fiber-reinforced polymer composites under tensile cyclic loading," *Materials & Design Journal*, 111, pp 504-512.
4. Zafar, A., & Andrawes, B. (2014). "Fabrication and cyclic behavior of highly ductile superelastic shape memory composites. *Journal of materials in civil engineering*," 26(4), pp 622-632.
5. Ozbulut, O. E., Hurlebaus, S., & Desroches, R. (2011). "Seismic response control using shape memory alloys: a review," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 22(14), pp 1531-1549.
6. Naito, H., Sato, J., Funami, K., Matsuzaki, Y., & Ikeda, T. (2001). "Analytical study on training effect of pseudoelastic transformation of shape memory alloys in cyclic loading," *Journal of intelligent material systems and structures*, 12(4), pp 295-300.
7. Zafar, A. (2013). "Application of SMA fiber composite as seismic reinforcement for concrete moment resisting frames," (Doctoral dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign).
8. Jang, B. K., Koo, J. H., Toyama, N., Akimune, Y., & Kishi, T. (2001, August). "Influence of lamination direction on fracture behavior and mechanical properties of TiNi SMA wire-embedded CFRP smart composites," In *Smart Structures and Materials 2001: Modeling, Signal Processing, and Control in Smart Structures*, 4326, pp 188-197.
9. Xu, Y., Otsuka, K., Toyama, N., Yoshida, H., Jang, B. K., Nagai, H., & Kishi, T. (2002, July). "Fabrication of TiNi/CFRP smart composite using cold drawn TiNi wires," *Smart Structures and Materials 2002: Active Materials: Behavior and Mechanics*, 4699, pp. 564-574.
10. Xu, Y., Otsuka, K., Toyama, N., Yoshida, H., Nagai, H., & Kishi, T. (2003). "A novel technique for fabricating SMA/CFRP adaptive composites using ultrathin TiNi wires," *Smart materials and structures*, 13(1), 196.
11. Wierschem, N., & Andrawes, B. (2010). "Superelastic SMA-FRP composite reinforcement for concrete structures. *Smart materials and structures*," 19(2), pp 025011.
12. Nissle, S., Hübler, M., Gurka, M., Schmeer, S., & Voll, N. (2014, September). "Integration of shape memory alloy wires in fiber reinforced polymers for endless crash absorber structures," In *Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, 46155, p V002T04A005.
13. Sharifishourabi, G., Alebrahim, R., Sharifi, S., Ayob, A., Vrcelj, Z., & Yahya, M. Y. (2014). "Mechanical properties of potentially-smart carbon/epoxy composites with asymmetrically embedded shape memory wires," *Materials & Design*, 59, 486-493.
14. Wierschem, N. (2009). "Superelastic shape memory alloy composite bars for reinforcing concrete structures," (Ms.C dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign).
15. Payandeh, Y., Meraghni, F., Patoor, E., & Eberhardt, A. (2012). "Study of the martensitic transformation in NiTi-epoxy smart composite and its effect on the overall behavior," *Materials & Design*, 39, 104-110.
16. Buehler, W. J., & Wang, F. E. (1968). "A summary of recent research on the nitinol alloys and their potential application in ocean engineering," *Ocean Engineering*, 1(1), 105-120.
17. Verma, L., Andrew, J. J., Sivakumar, S. M., Balaganesan, G., Vedantam, S., & Dhakal, H. N. (2021). "Evaluation of quasi-static indentation response of superelastic shape memory alloy embedded GFRP laminates using AE monitoring" *Polymer Testing Journal*, 93, pp 106942.
18. Gangil, N., Siddiquee, A. N., & Maheshwari, S. (2020). "Towards applications, processing and advancements in shape memory alloy and its composites," *Journal of Manufacturing Processes*, 59, pp 205-222.
19. <https://opensees.berkeley.edu/>