



شبیه سازی اجزای محدود سه بعدی لوله تقویت شده با صفحه کامپوزیتی بافته شده از الیاف شیشه

محسن لوح موسوی^{۱*}، افشین بخشایی^۲، مهدی اخباری^۳

* نویسنده مسئول: loh-mousavi@iaukhsh.ac.ir

واژه‌های کلیدی

شبیه سازی عددی، لوله آلومینیومی، کامپوزیت بافته شده از الیاف شیشه

چکیده

در دهه‌های اخیر با توجه به پیشرفت صنعت در همه جوانب آن و نیاز به سازه‌های سبک در عین حال مقاوم، استفاده از کامپوزیت‌ها به عنوان جاذب انرژی و یا تقویت کننده جاذب‌های انرژی در حال افزایش است. در این تحقیق به روش اجزای محدود جذب انرژی در لوله آلومینیومی تقویت شده با کامپوزیت ساخته شده از پارچه سه بعدی بافته شده از الیاف شیشه تحت بار شبه استاتیکی جانبی مطالعه و بررسی شده است. هدف اصلی در این تحقیق بررسی اثر این کامپوزیت در افزایش استحکام و ظرفیت جذب انرژی سازه است. در این کامپوزیت دو عرشه بالای و پایینی به روش مخمل بافی به صورت سه بعدی به یکدیگر بافته می‌شوند و پس از بافته شدن به رزین آغشته می‌شود. به منظور بررسی اثر کامپوزیت ساخته شده از پارچه سه بعدی بافته شده از الیاف بر جذب انرژی و استحکام، لوله بدون کامپوزیت نیز مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از آن با نتایج حاصل از تحلیل لوله تقویت شده با کامپوزیت مقایسه شده است. نتایج این تحقیق توسط نرم افزار تحلیلی آباکوس مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است و نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج تجربی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این کامپوزیت ظرفیت جذب انرژی لوله آلومینیومی را به اندازه ۴۰٪ افزایش داده است. همچنین استفاده از این کامپوزیت نسب نیروی بیشینه به وزن را به اندازه ۵۰٪ افزایش داده است که با توجه به یکسان بودن سطح زیر نیرو نشان می‌دهد که استفاده از این کامپوزیت استحکام لوله را افزایش داده است.

۱- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۳- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کاشان

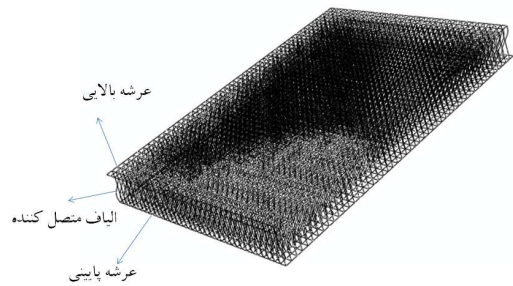
۱- مقدمه

با پیشرفت تکنولوژی در صنعت حمل و نقل هوایی و زمینی، تعداد وسایل نقلیه از جمله هواپیما، کشتی، قطار و سایر وسایل نیز افزایش قابل توجهی داشته است. جاذب‌های انرژی از جمله سازه‌های بسیار پرکاربرد در این صنایع هستند. این سازه‌ها معمولاً برای کاهش خسارت وارده بر سازه اصلی و همچنین کاهش آسیب به سرنشینان استفاده می‌شوند بنابراین این جاذب‌های باید در برابر نیروی وارده مقاومت قابل قبولی داشته باشد. پایین بودن وزن این سازه‌ها و همچنین سبک بودن آن‌ها اهمیت زیادی دارد. سازه‌های جاذب انرژی در حوزه‌های دیگر مهندسی مانند صنعت نفت، ساخت نفت کش‌ها، موشک‌سازی و انرژی اتمی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. لوله‌های آلومینیومی جدار نازک یکی از پرکاربردترین سازه‌ها در صنعت هستند. سازه‌های جدار نازک علی‌رغم دارا بودن وزن پایین مقاومت زیادی در برابر نیروهای خارجی ندارند و از استحکام کمی برخوردارند. از این رو تلاش‌های زیادی برای افزایش ظرفیت جذب انرژی این سازه‌ها انجام شده است تا در حالی، که وزن این سازه‌ها تغییر چندانی نمی‌کند این سازه‌ها قادر به تحمل نیروهای بیشتری باشند. یکی از این راه‌ها ترکیب این سازه‌ها با یکدیگر بوده است. رایدی و ردی تحقیقاتی را بر روی لوله فشرده شده توسط دو صفحه صلب انجام دادند و روابط تئوری برای رفتار این لوله‌ها تحت بار شبه استاتیکی ارائه دادند [۱]. در سال ۱۹۸۹ گوپتا و سینها به بررسی له شدگی در لوله‌های جاذب انرژی آلومینیومی و فولادی با سطح مقطع مربعی پرداختند. آن‌ها این لوله‌ها را به صورت افقی و در دو لایه بر روی یکدیگر قرار دادند و توسط دو صفحه صلب فشار دادند و نمودار نیرو-جابجایی برای این سیستم را بدست آوردند. آن‌ها همچنین بر اساس مطالعات تجربی و بر اساس حرکت لوله‌های پلاستیک رابطه تئوری نیز برای این سیستم ارائه دادند [۲]. تزریق فوم به داخل لوله از جمله دیگر راه‌های افزایش استحکام و ظرفیت جذب انرژی سازه‌ها است در سال ۲۰۱۲ نیک نژادی و همکاران به مطالعه تجربی بر روی لوله‌ای دایره‌ای از جنس برونز که داخل آن از فوم پر شده بود تحت بار لبه‌ای که توسط دو صفحه صلب فشرده می‌شد پرداختند [۳]. استفاده از کامپوزیت‌ها

به عنوان جاذب انرژی نیز مورد توجه محققان قرار دارد. در سال ۲۰۰۰ گوپتا و عباس به مطالعه تجربی بر روی لوله دایره‌ای کامپوزیتی که توسط دو صفحه صلب فشرده می‌شود پرداختند. آن‌ها این لوله‌ها را با قطرهای متفاوت مورد مطالعه قرار دادند و اثر قطر بر نیروی بیشینه را بررسی کردند و همچنین بر روی جذب انرژی این لوله‌ها نیز بحث کردند [۴]. صدیق مهدی و هانی الخادی به روش تجربی به بررسی رفتار لوله‌های بیضوی شکل از جنس کامپوزیت الیاف شیشه پرداختند و نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی خود را با نتایج حاصل از مدل شبکه عصبی، مقایسه کردند و نشان دادند که استفاده از این مدل شبکه عصبی برای پیشبینی رفتار این لوله‌ها قابل قبول است [۵]. مملس و همکاران [۶-۷] با استفاده از روش تجربی و المان محدود مطالعات گسترده‌ای بر روی پاسخ له شدگی کامپوزیت‌ها انجام دادند. مطالعات گذشته نشان می‌دهد که کامپوزیت‌ها دارای استحکام و توان جذب انرژی خوبی هستند. در سال‌های اخیر استفاده از کامپوزیت‌های پارچه سه بعدی بافته شده از شیشه گسترش یافته است. ون و ویر و همکارانش به مطالعه بر روی کامپوزیت‌های الیاف شیشه بافته شده سه بعدی پرداختند [۸]. آن‌ها استحکام پوسته این کامپوزیت‌ها را با ساندویچ پنل‌ها از جنس‌های مختلف دیگر مقایسه کردند و نشان دادند که پوسته این کامپوزیت از سایر ساندویچ پنل‌ها استحکام بهتری دارند. در تحقیق حاضر از کامپوزیت‌های الیاف شیشه‌ای بافته شده سه بعدی برای تقویت لوله آلومینیومی تحت بار شبه استاتیک لبه‌ای استفاده شده است. تا پیش از این، از این کامپوزیت به عنوان تقویت کننده لوله استفاده نشده بود. با توجه به مرجع [۱] که نیروی خمشی و فشاری نقش اصلی را در رفتار لوله فشرده شده توسط دو صفحه صلب بازی می‌کنند، این کامپوزیت به نوعی در لوله قرار داده شده است که توان تحمل نیروی خمشی و فشاری لوله را افزایش دهد.

در این تحقیق به روش اجزای محدود جذب انرژی در لوله آلومینیومی تقویت شده با کامپوزیت ساخته شده از پارچه سه بعدی بافته شده از الیاف شیشه تحت بار شبه استاتیکی جانبی مطالعه و بررسی می‌شود.

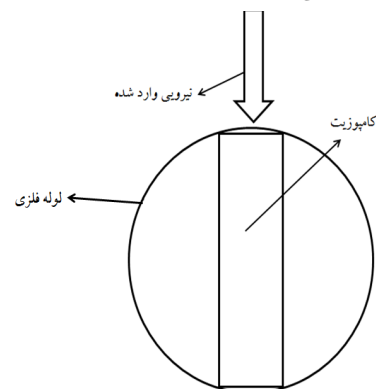
۲- شبیه سازی عددی



شکل (۲) کامپوزیت مدل شده برای انجام تحلیل در نرم افزار شبیه سازی آباکوس

برای مدلسازی کامپوزیت نیاز است تا خواص رزین الیاف و صفحات عرشه بالایی و پایینی برای آن تعریف شود. رزین به صورت ماده ایزوتروپیک عمل می کند. برای الیاف از المان تیر با سطح دایره به شعاع 0.5 mm و با مدول یانگ 3.3Gpa و ضریب پواسون 0.3 تعریف می شود. از المان پوسته برای رزین صفحات از المان پوسته استفاده می شود. 0.003 نقطه برای مش بندی و از مش منظم برای المان بندی استفاده می شود. با توجه به اینکه کامپوزیت به عنوان تقویت کننده باید در لوله قرار داده شود نیاز به شبیه سازی لوله آلومینیومی نیز می باشد. لوله با شعاع 8mm طول 100mm و ضخامت 2mm در محیط قطعه آباکوس مدل می شود و سپس در ماژول خصوصیات ماده مدول یانگ 68Gpa و ضریب پواسون 0.3 به لوله اضافه می شود برای تعریف خواص الاستیک و پلاستیک لوله از نمودار شکل ۳ استفاده می شود. این نمودار از تست کشش نمونه استخراج شده از لوله آلومینیومی و مطابق با استاندارد تست کشش بدست آمده است [۹]. المان پوسته با 0.003 نقطه نیز برای مش بندی لوله استفاده می شود و سپس کامپوزیت به داخل آن اضافه می شود (شکل ۴). فک متحرک و ثابت به صورت صلب و بدون نیاز به شبکه بندی مدل می شوند. به منظور بررسی اثر کامپوزیت لوله خالی نیز باید مدلسازی شود. با توجه به اینکه لوله آلومینیومی بدون کامپوزیت در طول فرآیند در جهت Z تغییر شکل نمی دهد بنابراین مسئله در طول فرآیند به صورت کرنش صفحه ای باقی می ماند. بنابراین لوله بدون کامپوزیت به صورت دو بعدی مدل می شود. المان با کد CPE4R و 0.001 تعداد نقطه برای شبیه سازی لوله دو بعدی استفاده می شود (شکل ۵).

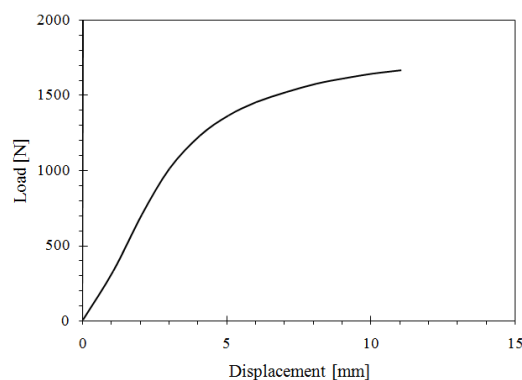
برای انجام شبیه سازی از نرم افزار آباکوس نسخه ۶.۱۲ استفاده شده است. این مسئله شامل یک فک متحرک می شود که نیرو به جسم اعمال می کند و یک فک ثابت که لوله بر روی آن قرار می گیرد. با توجه به متحرک بودن قالب از روش دینامیکی و حل صریح برای شبیه سازی استفاده می شود. کامپوزیت به نوعی در لوله قرار می گردد که بتواند در برابر نیروی فشاری و خمشی مقاومت کند شکل ۱ شماتیک قرارگیری کامپوزیت در لوله را نشان می دهد. برای مدلسازی الیاف باید به این نکته توجه کرد که به این علت که در این کامپوزیت الیاف پارچه قادر به تحمل نیروی خمشی و فشاری نیست و نقش اصلی را در این بارگذاری رزین بازی می کند. بنابراین در شبیه سازی الیاف نیاز به تعریف خواص پارچه نیست و فقط باید شکل هندسی آن ها مدل شود و پس از آن خواص رزین به آن اضافه شود. مدلسازی الیاف به عت سه بعدی بودن پارچه دارای حالت موجی شکل هستند که ابزار لازم برای طراحی آن ها در نرم افزار آباکوس وجود ندارد. به همین علت شکل هندسی پارچه بافته شده در نرم افزار کتیا مدل می شود و سپس در نرم افزار آباکوس فراخوانده می شود. صفحات بالای و پایینی در نرم افزار آباکوس و به صورت پوسته مدل می شود و پس از آن رشته الیاف ها با قید گره ای^۴ به آن متصل می شوند. شکل ۲ کامپوزیت مدل شده برای انجام تحلیل در نرم افزار را نشان می دهد.



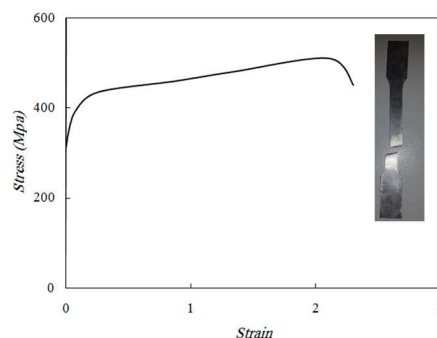
شکل (۱) شماتیک قرارگیری کامپوزیت در لوله آلومینیومی

خطی نیست تغییر شکل ها به صورت پلاستیک ایجاد می شود. در شکل ۷ نمودار نیرو-جابجایی برای لوله بدون کامپوزیت حاصل از شبیه سازی عددی با نمودار نیرو-جابجایی حاصل از تست تجربی [۹] مقایسه شده است. تست ها مطابق با استاندارد تست و مواد آمریکا انجام شده است. همانطور که در تصویر مشخص است نمودار نیرو-جابجایی برای شبیه سازی عددی، نمودار نیرو-جابجایی تست تجربی را تعقیب می کند و اختلاف خوبی بین اعداد وجود دارد. در شکل ۸ نمودار نیرو-جابجایی برای لوله تقویت شده با کامپوزیت پارچه سه بعدی بافته شده از الیاف شیشه نشان داده شده است. در این تصویر مشخص است که نیرو ابتدا با شیب زیادی افزایش پیدا می کند. علت این افزایش این است که کامپوزیت به علت نوع قرار گیری در ابتدای وارد شدن نیرو نسبت به نیروی فشاری واکنش نشان می دهد و این امر موجب افزایش نیرو با شیب بیشتری نسبت به حالت بدون کامپوزیت می شود. در شکل ۹ نمودار نیرو-جابجایی برای لوله تقویت شده با کامپوزیت در حالت تجربی [۹] و عددی مقایسه شده است. در تصویر مشخص است که نمودار عددی تقریباً نمودار تجربی را تعقیب می کند و اختلاف قابل قبولی بین نتایج برقرار است. در شکل ۱۰ نمودار نیرو-جابجایی برای لوله بدون کامپوزیت و لوله تقویت شده با کامپوزیت پارچه سه بعدی بافته شده از الیاف شیشه را نشان می دهد.

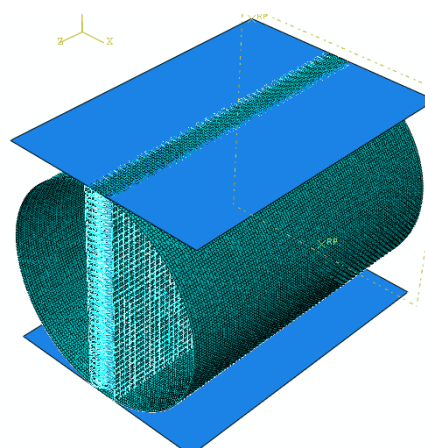
همانطور که در تصویر مشخص است نمودار نیرو-جابجایی برای لوله با کامپوزیت دارای مساحت بیشتری نسبت به لوله خالی است، این امر افزایش ظرفیت جذب انرژی را در لوله آلومینیومی تقویت شده با کامپوزیت را نشان می دهد. شبیه سازی عددی تا جابجایی ۱۰ mm یعنی قبل از شکستن کامپوزیت انجام شده است.



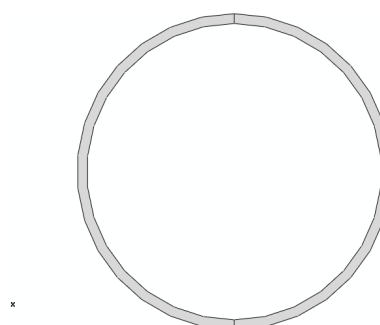
شکل (۶) نمودار نیرو-جابجایی برای لوله بدون کامپوزیت



شکل (۳) نمودار تنش- کرنش حاصل از تست کشش



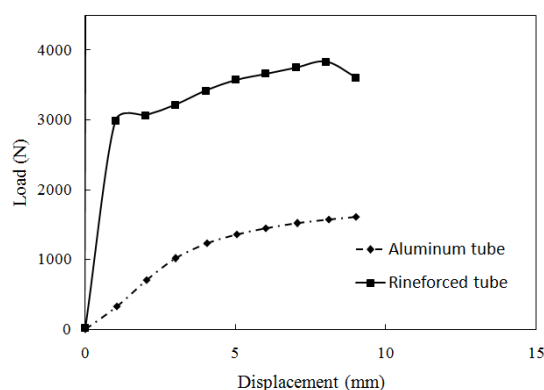
شکل (۴) مدل شبکه بندی شده لوله تقویت شده با کامپوزیت



شکل (۵) لوله دو بعدی مدلسازی شده در نرم افزار آباکوس

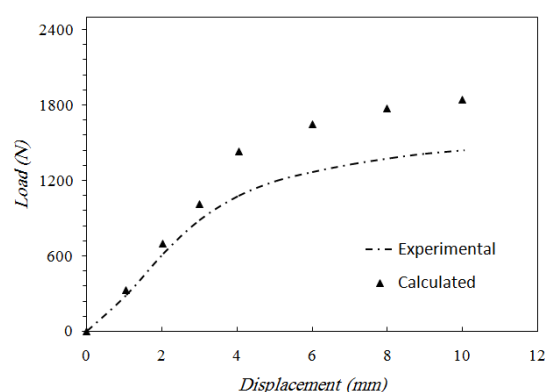
۳- نتایج و بحث

در شکل ۶ نمودار نیرو جابجایی برای لوله بدون کامپوزیت حاصل از شبیه سازی عددی نشان داده شده است. در رابطه با این تصویر مشخص است که در ابتدا نیرو با شیب خطی افزایش می یابد و پس از آن تغییر شیب دیگر به صورت خطی نیست. در قسمتی که نیرو با شیب تغییر می کند تغییر شکل های لوله در محدوده الاستیک باقی است اما در قسمت دوم که شیب دیگر

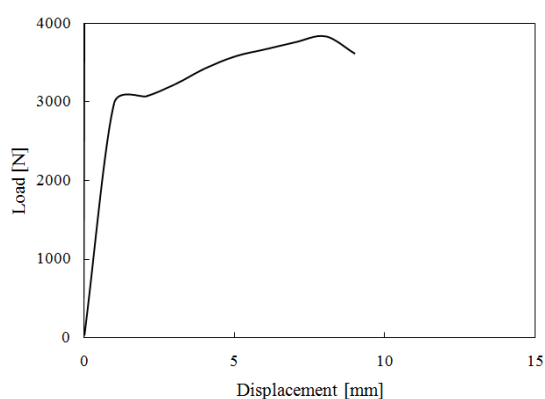


شکل (۱۰) مقایسه نمودار نیرو-جابجایی برای لوله بدون کامپوزیت و لوله تقویت شده با کامپوزیت

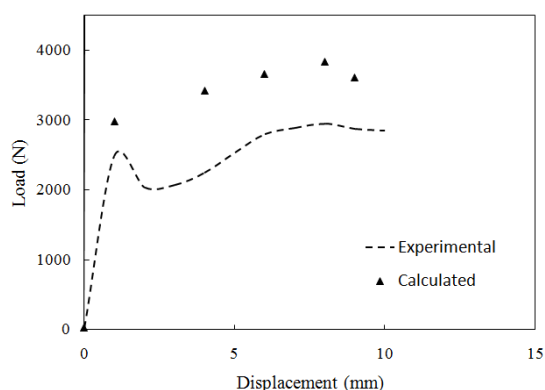
جدول ۱ ماکزیمم بار (P_{max}) نسبت بار بیشینه به وزن (P_{max}/W)، در رابطه با این جدول مشخص است که استفاده از کامپوزیت الیاف شیشه بافته شده سه بعدی بار بیشینه را افزایش داده است و با توجه به یکسان بودن سطح زیر بارگذاری برای لوله‌ای آلومینیومی، مشخص است که استحکام افزایش یافته است. مشخص است که استفاده از کامپوزیت الیاف شیشه نسبت نیروی بیشینه به وزن سازه را به اندازه ۵۰٪ افزایش داده است. مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی برابر است با انرژی جذب شده توسط سیستم. در واقع نیروی که باید صرف تغییر شکل‌های الاستیک پلاستیک شود به عنوان انرژی جذب شده توسط سیستم بیان می‌شود. همانطور که در جدول نشان داده شده است استفاده از این کامپوزیت جذب انرژی لوله آلومینیومی را افزایش داده است. این مسئله به صورت نمودار میله‌ای در شکل ۱۱ نشان داده شده است. یکی از پارامترهای مهم در جذب انرژی، ظرفیت ویژه جذب انرژی (SAE) است که از تقسیم انرژی جذب شده کل بر وزن سازه بدست می‌آید. همچنین وزن نمونه‌ها (W) برای لوله بدون کامپوزیت و لوله تقویت شده با کامپوزیت نیز در این جدول نشان داده شده است. در رابطه با این جدول مشخص است که استفاده از کامپوزیت الیاف شیشه‌ای انرژی جذب شده را به اندازه ۵۴٪ افزایش داده است در حالی که وزن به اندازه ۶٪ افزایش یافته است و مشخص است که درصد افزایش جذب انرژی بسیار بیشتر از درصد افزایش وزن بوده است. استفاده از این کامپوزیت ظرفیت ویژه جذب انرژی را به اندازه ۶۴٪ افزایش یافته است. شکل ۱۲ نمودار مقایسه انرژی ویژه جذب



شکل (۷) مقایسه نتایج تجربی و عددی نمودار نیرو-جابجایی برای لوله بدون کامپوزیت



شکل (۸) نمودار نیرو-جابجایی برای لوله تقویت شده با کامپوزیت پارچه سه بعدی بافته شده از الیاف شیشه



شکل (۹) مقایسه نتایج تجربی و عددی نمودار نیرو-جابجایی برای لوله تقویت شده با کامپوزیت

۴- نتیجه گیری

۱- با توجه به نزدیک بودن نتایج حاصل از تست تجربی و شبیه سازی عددی، استفاده از این روش در مدل سازی نرم افزار آباکوس مناسب است

۲- استفاده از کامپوزیت پارچه سه بعدی بافته شده از الیاف شیشه صفحه‌ای به طور کلی استحکام و ظرفیت جذب انرژی لوله آلومینیومی را افزایش می‌دهد

۳- استفاده از این کامپوزیت نسبت نیروی بیشینه به وزن را به اندازه ۵۰٪ افزایش داده است که با توجه به یکسان بودن سطح زیر نیرو منجر به افزایش استحکام شده است.

۴- این کامپوزیت جذب انرژی لوله را به اندازه ۴۰٪ و ظرفیت ویژه جذب انرژی را به اندازه ۶۴٪ افزایش داده است در حالی که وزن سازه افزایش چندانی نداشته است.

مراجع:

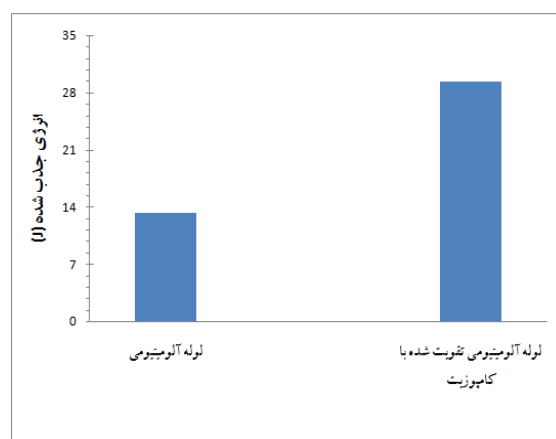
- [2] Pradhan S.C., Vibration suppression of FGM shells using embedded magnetostrictive layers, *International Journal of Solid and Structures*, 42, 2005, pp. 2465-2477.
- [1] Reid S. R., Yella Redy T., Effect of strain hardening on the lateral compression of tube between rigid plates, *international journal of solids and structures*, Vol. 14, pp.213-225, 1987
- [2] Gupta N. K., Sinha K., Lateral compression of crossed layers of square-section tubes, *international journal of mechanich sciencse*, Vol. 32 No.7, pp. 565-580, 1990.
- [3] Niknejad, M. Moeinifard, Theoretical and experimental studies of the external inversion process in the circular metal tubes, *Material Des*, Vol. 40, pp324-330, 2012
- [4] N.K. Gupta, H. Abbas, Lateral collapse of composite cylindrical tube between flat platens, *International journal of engineering*, Vol. 24, pp. 329-346, 2000
- [5] Sadigh Mahid E. I., kadi H. E., Crushing behavior of laterally compressed composite elliptical tubes: experiments and predictions using artificial neural networks, *Composite Structures*, Vol. 83, pp. 399-412, 2008.

شده توسط لوله بدون کامپوزیت و با کامپوزیت الیاف شیشه را نشان داده است. بنابراین مشخص است که استفاده از کامپوزیت الیاف شیشه بافته شده سه بعدی باعث افزایش استحکام و همچنین پارامترهای جذب انرژی شده است.

جدول (۱) پارامترهای جذب انرژی و استحکام بدست

آمده از شبیه سازی عددی

نمونه	Pmax (KN/)	Pmax/W (KN/Kgr)	Et(J)	SAE (J/Kgr)	W (gr)
لوله خالی	۱/۶۶	۱۲/۲۹	۱۳/۲۶	۹۸/۲۵	۱۳۵
لوله تقویت شده	۳/۸۳	۲۴/۷۰	۲۹/۳۱	۱۸۹/۰۹	۱۴۴



شکل (۱۱) مقایسه انرژی جذب شده برای لوله خالی و لوله تقویت شده با کامپوزیت الیاف شیشه بافته شده سه بعدی



شکل (۱۲) مقایسه ظرفیت ویژه انرژی جذب شده برای لوله بدون کامپوزیت و لوله تقویت شده با کامپوزیت الیاف شیشه

- [6] Mamalis A.G., Robinson M., Manolakos D. E., Demosthenous G.A., Ioannidis M.B., Carruthers J., Crashworthy capability of composite material structures, *Composite Structures*, Vol. 37, pp.109-134, 1997.
- [7] Mamalis A. G., Manolakos D. E., Ioannidis M., Papapostolou B., The static and dynamic axial collapse of CFRP square tubes: finite element mod, *Composite Structures*, Vol. 74, pp. 213-225, 2006.
- [8] Van Vuure A.W., Pflug J., Ivens J. A., Verpoest I., Modeling the core properties of composite panels based on woven sandwich-fabric performs, *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 1263-1276, 2000.

[۹] بخشایی ا، لوح موسوی م، تحلیل تحلیل عددی و تجربی جذب انرژی در سازه لوله‌ای جاذب انرژی تقویت شده با ساندویچ پنل شیشه‌ای، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر، ۱۳۹۴.