



بررسی عددی رفتار تغییر شکل تیرهای آلومینیومی تقویت شده با فوم آلومینیوم

صادق سلطانی^۱، حامد دیلمی عضدی^{۲*}، سید حسین الهی^۳

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: hdazodi@arakut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۱ مهر ۱۴۰۲

پذیرش: ۱ آبان ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

فوم فلزی

خمش سه نقطه

مقاومت خمشی

جذب انرژی

تحلیل اجزا محدود

چکیده

در این مقاله به بررسی رفتار مکانیکی پروفیل‌ها و لوله‌های با مقاطع مربعی و دایره‌ای به صورت توخالی و پر شده از فوم، تحت خمش سه نقطه با استفاده از روش اجزای محدود پرداخته شده است. تیرهای مرکب پر شده از فوم نیز در دو حالت توپر و توخالی (استفاده از دو لوله) بررسی شده است. آلومینیوم AA6063-T6 و فوم AlSi7، به ترتیب به عنوان جنس پروفیل و فوم در نظر گرفته شده است. میزان تغییر شکل، مقاومت خمشی، جذب انرژی پروفیل‌ها با شرایط مختلف، بررسی و با یکدیگر مقایسه شد و در نهایت، مقاطعی با بالاترین مقاومت خمشی و ظرفیت جذب انرژی تعیین شد. نتایج نشان داد قرار دادن فوم در لوله‌ها باعث افزایش مقاومت در برابر خمش می‌شود؛ همچنین مقاومت خمشی در حین بارگذاری بعد از اولین آسیب حفظ شد، حتی روندی افزایشی داشت. تیرهای دوتایی پر شده از فوم (تیر مرکب پر شده از فوم توخالی) با وجود وزن کمتر نسبت به تیرهای تکی پر شده از فوم (تیر مرکب توپر)، مقاومت خمشی بالاتری از خود نشان دادند، همچنین جذب انرژی در آن‌ها نسبت به تیرهای تکی پر شده از فوم بیشتر بوده است. بالاترین میزان مقاومت خمشی در تیرهای پر شده از فوم با مقطع مربعی مشاهده شد.

Numerical investigation of deformation behavior of aluminum beams reinforced with aluminum foam

Sadegh Soltani¹, Hamed Deilami Azodi^{2*}, Seyed Hossein Elahi³

1- MSc Graduate, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

3- Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

* Corresponding Author's Email: hdazodi@arakut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 23 September 2023

Accepted: 23 October 2023

Keywords:

Metallic Foam

Three-point Bending

Bending Strength

Energy Absorption

Finite Element Analysis

Abstract

In this paper, the mechanical behaviors of beams with square and circular cross-sections that are hollow and filled with foam have been studied under three-point bending using finite element analysis. Aluminum alloy AA6063-T6 and AlSi7 foam are considered tube materials and foam, respectively. The amount of deformation, bending strength, and energy absorption of the beams under different conditions were investigated and compared with each other; finally, sections with the highest bending strength and energy absorption capacity were determined. The results showed that in foam-filled beams, the bending strength has increased compared with hollow ones; also, the bending strength during loading is preserved after the first damage, even increasing. Double beams filled with foam (hollow composite beams) showed higher bending strength as well as energy absorption compared to solid composite beams, in spite of their lower weight. The highest amount of bending strength was observed in square-section beams filled with foam.

Please cite this article using:

Soltani S, Deilami Azodi H, Elahi SH. Numerical investigation of deformation behavior of aluminum beams reinforced with aluminum foam. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 March 21;10(1):49-58. doi: 10.22034/IJME.2023.417702.1834 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

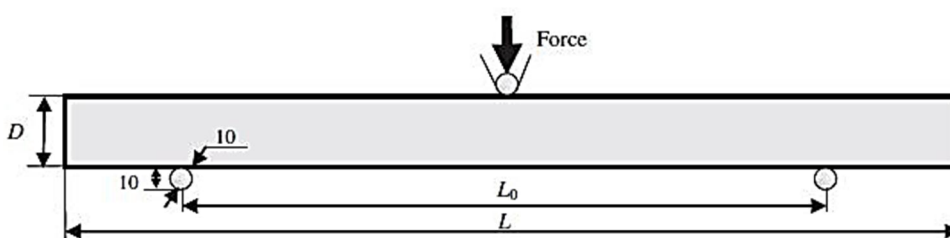
در طول دو دهه‌ی گذشته، تحقیقات زیادی برای مطالعه‌ی رفتار تغییر شکل در تیرها به عنوان جاذب انرژی و مقاومت در برابر نیروهای خمشی برای بهبود عملکرد انجام شده است. سازه‌های لوله‌ای و مربعی به کار رفته در بسیاری از مطالعات توخالی بوده و برای تحمل بارهای خمشی سه‌نقطه‌ای مناسب نیستند. به دلیل مقاومت بسیار کم آن‌ها در برابر فرورفتگی به منظور دستیابی به مقاومت خمشی بالاتر و بهبود جذب انرژی از پرکننده‌های فلزی و سبک مانند فوم‌های آلومینیومی استفاده می‌شود [۱، ۲].

یکی از عوامل موثر در افزایش مقاومت خمشی تیرهای توخالی، بکارگیری فوم‌های فلزی بخصوص فوم آلومینیومی، به عنوان پرکننده می‌باشد. فوم‌ها با پرکردن محفظه‌ی توخالی تیر، به عنوان تقویت کننده عمل کرده و با جذب انرژی، مقاومت خمشی تیر را افزایش می‌دهند [۳]. محققان با بکارگیری فوم‌های آلومینیومی به عنوان یک عامل تقویت کننده به نتایج مختلفی دست یافته‌اند؛ بیلستون و همکاران [۴] به بررسی میزان مقاومت خمشی در تیرهای آلومینیومی با مقاطع مختلف توخالی و تقویت شده با تیرهای داخلی پرداختند. آن‌ها نشان دادند تیرهای تقویت شده با تیرهای داخلی تاثیر بسزایی در افزایش مقاومت خمشی و راندمان جذب انرژی دارند، همچنین میزان جذب انرژی در تیرهای توخالی با مقطع مربعی بالاتر از تیرهایی با مقاطع دایره‌ای بود. سمپس و همکاران [۵] نیز به بررسی لوله‌های تو خالی و پر شده از فوم آلومینیوم تحت بار خمش سه نقطه پرداختند و مشخص گردید لوله‌های پر شده از فوم، مقاومت خمشی بالاتری نسبت به لوله‌های توخالی داشته و جاذب انرژی بهتری هستند. زارعی و همکاران [۶] به بررسی میزان مقاومت خمشی و جذب انرژی تحت خمش سه نقطه دینامیکی تیرهای آلومینیومی پرداختند و مشخص شد تیرهای تقویت شده با فوم آلومینیوم مقاومت خمشی و جذب انرژی بالاتری نسبت به تیرهای توخالی دارند همچنین با بهینه‌سازی تیرها توانستند وزن تیرها را به حداقل برسانند. لی و همکاران [۷] به بررسی آزمایشگاهی مقاومت خمشی و میزان جذب انرژی در لوله‌های توخالی، لوله‌های تکی پر شده از فوم و لوله‌های دوتایی پر شده از فوم پرداختند و مشخص شد لوله‌های پر شده از فوم نتیجه‌ی بهتری نسبت به لوله توخالی دارند. لوله‌های دوتایی پر شده از فوم، عملکرد بهتری در برابر ضربه از خود نشان دادند همچنین نحوه آسیب نیز در هر یک متفاوت است. کروپی و همکاران [۸] نیز به مطالعه‌ی نرخ کرنش، اتلاف انرژی و نحوه‌ی آسیب ساندویچ پنل‌های فومی تحت خمش سه نقطه در حالت استاتیکی و دینامیکی پرداختند. سانتوسا و همکاران [۹] تیرهایی از جنس فولاد زنگ نزن را به صورت تو خالی و پر شده از فوم آلومینیوم تحت خمش سه نقطه قرار داده و میزان آسیب و جذب انرژی در آن‌ها را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. شجاعی فرد و همکاران [۱۰] برای بررسی میزان جذب انرژی و حد شکست تیرهای تو خالی و پر شده از فوم با مقاطع متفاوت را تحت خمش سه نقطه قرار دادند. همچنین عان و همکاران [۱۱] اثر تقویتی فوم آلومینیوم در لوله‌هایی از جنس آلومینیوم را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند و به شرایط بهینه برای استفاده در بدنه خودروها دست یافتند. لی و همکاران [۱۲] لوله‌هایی با مقاطع مربعی و دایره‌ای توخالی و پر شده از فوم آلومینیوم را تحت بار خمش سه نقطه‌ای قرار دادند و مشخص گردید لوله‌های پر شده از فوم مقاومت خمشی و جذب انرژی بالاتری نسبت به لوله‌های تو خالی دارند و در برابر ضربه مقاوم‌تر هستند. یو و همکاران [۱۳] به بررسی رفتار تغییرشکل و شکست سازه‌های ساندویچی مقاوم شده با فوم فلزی پرداختند. آن‌ها سازه‌های ساندویچی را تحت خمش سه نقطه در حالت استاتیکی و شبه استاتیکی مورد بررسی قرار دادند. مشخص شد سازه‌های ساندویچی مقاومت نسبتاً بالایی در برابر نیروهای ضربه‌ای و خمشی دارند. گو و همکاران [۱۴] در مقاله‌ای به بررسی میزان مقاومت خمشی و جذب انرژی در پروفیل‌های آلومینیومی با مقطع مربعی به صورت توخالی، تک پروفیل پر شده از فوم آلومینیوم و پروفیل دوتایی پر شده از فوم پرداختند. مشخص شد وجود پروفیل به عنوان تقویت کننده و پروفیل داخلی، علاوه بر افزایش مقاومت خمشی نسبت به تک پروفیل‌های پر شده از فوم، افزایش جذب انرژی را نیز در پی دارند.

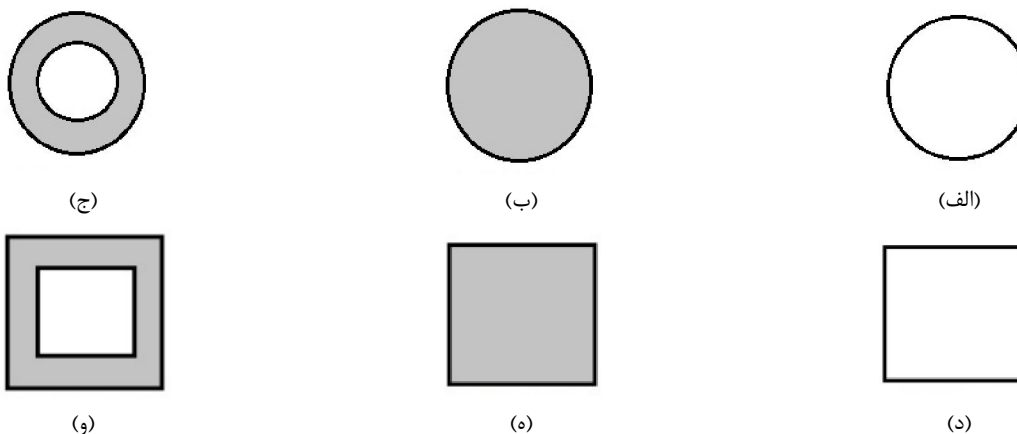
در بررسی حاضر پروفیل‌هایی با مقاطع مربعی و دایره‌ای توخالی تقویت شده با تیرهای داخلی و فوم آلومینیومی در نرم افزار آباکوس مدل و تحت خمش سه نقطه‌ای قرار گرفتند. جنس تیر و فوم با توجه به کاربردهای آلیاژ آلومینیوم به ترتیب AA6063 و AISi7 در نظر گرفته شد. همچنین خواص مکانیکی حاصل از خمش سه نقطه‌ای تیرهای با مقاطع مربعی و دایره‌ای توخالی و تقویت شده با فوم آلومینیوم از جمله میزان مقاومت خمشی و راندمان جذب انرژی بررسی شدند.

۲- روش تحقیق

مدل سازی و شبیه سازی المان محدود برای بررسی تنش، کرنش، حداکثر مقاومت خمشی و میزان جذب انرژی در نرم افزار آباکوس انجام شد. نمونه های با مقاطع مربعی و دایره ای توخالی در طول ۱۹۰ میلی متر و پر شده از فوم بصورت تکی و دوتایی، تحت خمش سه نقطه قرار گرفتند. سنبه و تکیه گاه های استفاده شده در شبیه سازی بصورت صلب در نظر گرفته شدند. شکل ۱ شماتیک کلی این شبیه سازی می باشد. سنبه و تکیه گاه ها به قطر ۱۰ و طول ۶۰ میلی متر در نظر گرفته شدند. L_0 فاصله بین دو تکیه گاه ها است که ۸۰ درصد از طول نمونه ها در نظر گرفته شده است. اندازه ی سطح مقطع لوله و پروفیل ۴۰ میلی متر و در سه ضخامت ۱، ۱/۵ و ۲ میلی متر می باشد. همچنین ضخامت لوله و پروفیل داخلی در نمونه های دوتایی ۰/۵ میلی متر می باشند. نمونه ها به سه دسته توخالی، تکی و دوتایی پر شده از فوم تقسیم می شوند که در نمونه های دوتایی یک تیر با ضخامت ۰/۵ میلی متر و طول ۱۹۰ میلی متر درون تیر خارجی قرار داده شده است و بین آن ها فوم قرار گرفته است (شکل ۲). اصطکاک موجود بین پروفیل، فوم، سنبه و تکیه گاه ها ۰/۲ و تماس بین سنبه، پروفیل و تکیه گاه در تماس جنس سخت بوده و نیروی تعریف شده برای اعمال بار از جنس جابجایی می باشد. جابجایی سنبه تا بوجود آمدن شکستگی کامل در نمونه ها ادامه پیدا می کند تا بتوان میزان مقاومت خمشی را بعد از بوجود آمدن شکست بررسی کرد.



شکل ۱ شماتیک آزمایش خمش سه نقطه



شکل ۲ مقاطع دایره ای و مربعی در حالت های توخالی، تکی پر شده از فوم و دوتایی پر شده از فوم، (الف) مقطع دایره ای تو خالی، (ب) مقطع دایره ای پر شده از فوم، (ج) مقطع دایره ای دوتایی پر شده از فوم، (د) مقطع مربعی تو خالی، (ه) مقطع مربعی پر شده از فوم، (و) مقطع مربعی دوتایی پر شده از فوم

جنس تمامی تیرها و فوم های مدل سازی شده به ترتیب از آلیاژ آلومینیوم AA6063-T6 و AlSi7 می باشد که خواص مکانیکی آن در جدول ۱ ذکر شده است. همچنین ضرایب مدل آسیب جانسون کوک مورد استفاده در شبیه سازی جهت پیش بینی آسیب در جدول ۲ ذکر شده است.

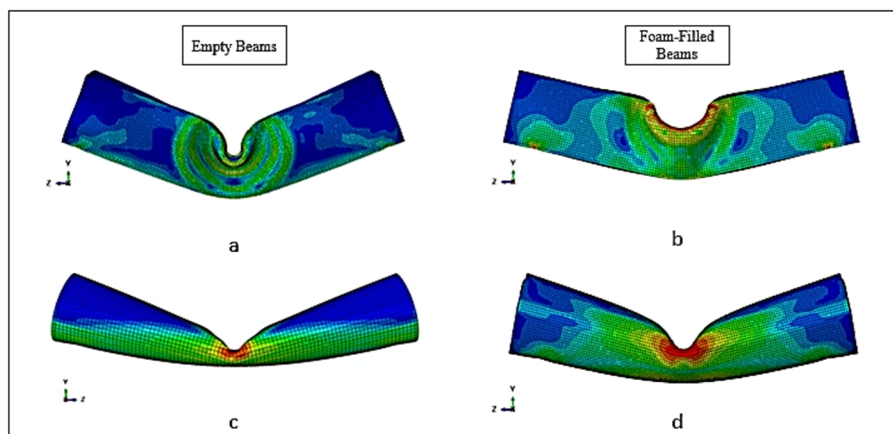
جدول ۱ خواص مکانیکی AA 6063-T6 و فوم AISi7 [۱۵,۱۶]

خواص مکانیکی	AISI7	۶۰۶۳-T۶
مدول یانگ (GPa)	۰/۳۵۴	۶۹
چگالی (Kg/m ³)	۳۶۰	۲۷۰۰
تنش تسلیم (MPa)	-	۱۸۰
ضریب استحکام (MPa)	-	۵۸۰
ضریب پواسون	۰/۳۳	۰/۳
نسبت تنش تسلیم فشاری	۱/۷۱	-
نسب تنش هیدرواستاتیک	۰/۰۱۳	-

جدول ۲ مدل آسیب جانسون کوک در آلومینیوم AA 6063-T6 [۱۶]

D1	D2	D3	D4	D5	Dmelt
-۰/۷۷	۱/۴۵	-۰/۴۷	۰	۱/۶	۹۲۵

میزان شکل پذیری و مقاومت به خمش نمونه‌های توخالی و پر شده از فوم نیز با یکدیگر متفاوت است در شکل ۳ توزیع تنش در پروفیل‌های تغییر شکل یافته تحت خمش سه نقطه‌ای و نحوه تغییر شکل پروفیل‌ها قابل مشاهده می‌باشد.

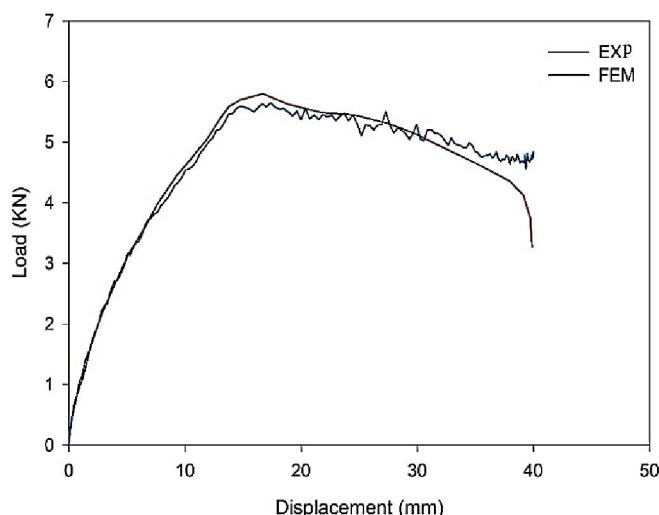


شکل ۳ نمونه‌های تغییر شکل یافته تحت خمش سه نقطه‌ای (a) SE (b) SFF (c) CE (d) CFF

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اعتبار سنجی

لی و همکاران [۴] به بررسی میزان مقاومت خمشی و جذب انرژی در تیرهایی با مقاطع دایره‌ای از جنس AA6063-T6 و پر شده از فوم AISi7 تحت خمش سه نقطه پرداختند؛ که برای اعتبار سنجی مدل اجزای محدود، نتایج شبیه‌سازی خمش سه نقطه‌ای لوله دوتایی پر شده از فوم با نتایج تجربی این مطالعه، مقایسه شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد، نتایج شبیه‌سازی عددی بسیار نزدیک به نتایج آزمایش تجربی می‌باشد.



شکل ۴ مقایسه منحنی نیرو-جابجایی تجربی [۴] و عددی

۳-۲- مقاومت خمشی

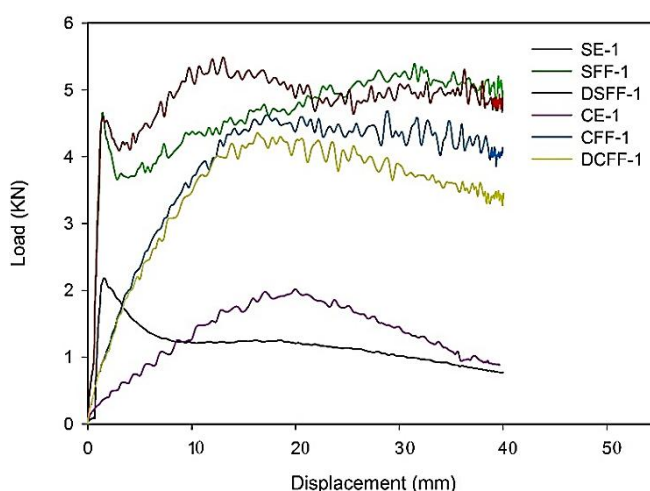
جهت بررسی عددی مقاومت خمشی تیرها و اثر فوم پرشده در مقاومت خمشی آن‌ها، نمونه‌های با ضخامت مختلف در وضعیت‌های توخالی و پر شده از فوم بصورت تکی و دوتایی مورد تحلیل قرار گرفتند. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۳ آورده شده است. در نمونه‌های SE و CE، حروف S و C به ترتیب نشان‌دهنده شکل سطح مقطع مربعی (Square)، دایره‌ای (Circular) و E نشان‌دهنده حالت توخالی (Empty) است. در نمونه‌های DCFF و DSFF حرف D نشان‌دهنده (Double) یا دوتایی و حروف FF نشان‌دهنده نمونه‌های پرشده از فوم (Foam Filled) می‌باشند. اعداد ۱، ۲، ۳ قرار داده شده بعد از حروف به ترتیب به معنای ضخامت‌های ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر می‌باشد. ضخامت‌های تیرهای داخلی به کار رفته در نمونه‌های دوتایی ۰/۵ میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۳ ابعاد نمونه‌های آزمون تحت آزمون خمش سه نقطه

انواع نمونه‌ها	Sample	L	t_{in}	t_{out}	D/B	D_{in}
پروفیل‌های توخالی	SE-۱	۱۹۰	-	۱	۴۰	-
تکی پرشده از فوم	SFF-۱	۱۹۰	-	۱	۴۰	-
دوتایی پرشده از فوم	DSFF-۱	۱۹۰	۰.۵	۱	۴۰	۲۰
لوله‌های توخالی	CE-۱	۱۹۰	-	۱	۴۰	-
تکی پرشده از فوم	CFF-۱	۱۹۰	-	۱	۴۰	-
دوتایی پرشده از فوم	DCFF-۱	۱۹۰	۰.۵	۱	۴۰	۲۰
پروفیل‌های توخالی	SE-۲	۱۹۰	-	۲	۴۰	-
تکی پرشده از فوم	SFF-۲	۱۹۰	-	۲	۴۰	-
دوتایی پرشده از فوم	DSFF-۲	۱۹۰	۰.۵	۲	۴۰	۲۰
لوله‌های توخالی	CE-۲	۱۹۰	-	۲	۴۰	-
تکی پرشده از فوم	CFF-۲	۱۹۰	-	۲	۴۰	-
دوتایی پرشده از فوم	DCFF-۲	۱۹۰	۰.۵	۲	۴۰	۲۰

پروفیل‌های توخالی	SE-۳	۱۹۰	-	۳	۴۰	-
تکی پرشده از فوم	SFF-۳	۱۹۰	-	۳	۴۰	-
دوتایی پرشده از فوم	DSFF-۳	۱۹۰	۰.۵	۳	۴۰	۲۰
لوله‌های توخالی	CE-۳	۱۹۰	-	۳	۴۰	-
تکی پرشده از فوم	CFF-۳	۱۹۰	-	۳	۴۰	-
دوتایی پرشده از فوم	DCFF-۳	۱۹۰	۰.۵	۳	۴۰	۲۰

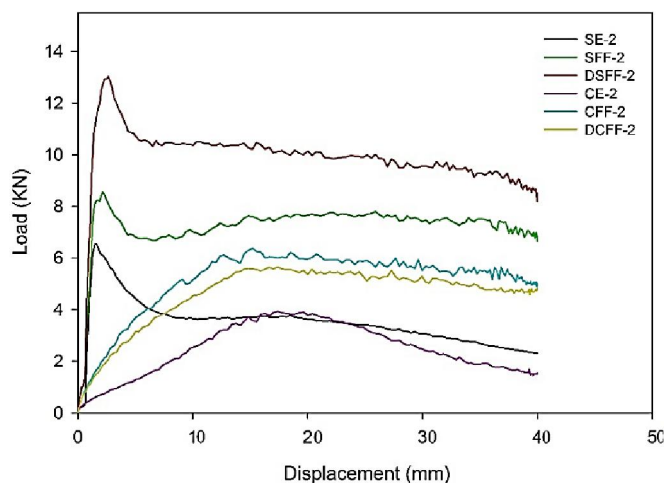
مقایسه نتایج ارائه شده در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ نشان می‌دهد افزایش ضخامت تیر سبب افزایش مقاومت به خمش در تمامی نمونه‌ها شده است. همچنین مطابق نتایج می‌توان نتیجه گرفت قرارگیری فوم آلومینیوم به عنوان تقویت‌کننده درون پروفیل تاثیر بسزایی در افزایش مقاومت به خمش داشته است. وجود فوم همچنین باعث جلوگیری از افت مقاومت به خمش پس از اولین آسیب در نمونه شده است. حتی در حالت‌هایی (شکل ۵ حالت‌های SSF-1 و DSFF-1) مقاومت به خمش پس از اولین آسیب افزایش یافته است. نمونه‌های دارای تیر داخلی (تیرهای دوتایی پر شده از فوم یا تیر مرکب پر شده از فوم توخالی) در مقایسه با تیرهای توخالی و تیرهای تکی پر شده از فوم مقاومت خمشی بالاتری از خود نشان دادند، علاوه بر آن استفاده از تیر داخلی در نمونه‌های دوتایی پرشده از فوم سبب کاهش وزن، نسبت به تیرهای تکی پر شده از فوم می‌گردد، از اینرو می‌توان از تیرهای دوتایی پر شده از فوم به عنوان ساختارهای بهینه شده جایگزین تیرهای تکی پر شده از فوم، استفاده نمود که علاوه بر کاهش وزن، افزایش مقاومت به خمش را نیز به همراه دارد. شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی را برای نمونه‌های مختلف با ضخامت یک میلی‌متر نشان می‌دهد. لوله‌های توخالی با ضخامت یک میلی‌متر مقاومت به خمش کمتری نسبت به پروفیل توخالی و نمونه‌ها پر شده از فوم از خود نشان دادند. همچنین پروفیل دوتایی پر شده از فوم بیشترین مقاومت به خمش را از خود نشان داد و حتی پس از اولین آسیب روندی صعود داشت. از طرفی مقاومت به خمش لوله‌های توخالی پس از اولین آسیب، روندی نزولی داشتند که این شرایط برای پروفیل‌های توخالی نیز صادق است، با این تفاوت که کاهش مقاومت خمشی پس از اولین آسیب، روندی ثابتی دارند. نتایج بدست آمده افزایش مقاومت به خمش در تیرهای پر شده از فوم را نشان می‌دهد، به طوریکه در لوله‌های تکی و دوتایی پر شده از فوم مقاومت خمشی و کاهش آن پس از اولین آسیب، روند نسبتاً یکسانی دارند، این مسئله برای پروفیل‌های تکی و دوتایی پر شده از فوم نیز صادق است.



شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌هایی با ضخامت ۱ میلی‌متر

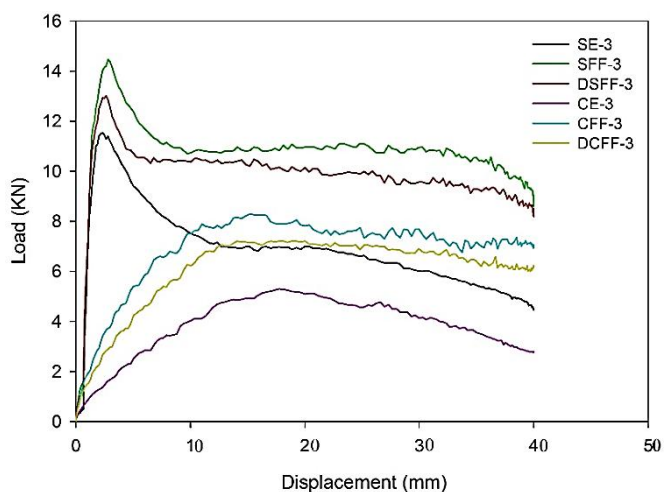
مطابق نتایج نشان داده شده در شکل ۶ افزایش ضخامت ۱/۵ میلی‌متری تیرهای مدلسازی شده، افزایش مقاومت به خمش و مقاومت به خمش در لوله‌های تکی و دوتایی پر شده از فوم، روند نسبتاً یکسانی دارند؛ اما پروفیل دوتایی پر شده از فوم مقاومت به

خمشی نزدیک به ۱۳ کیلو نیوتن دارند که این عدد برای پروفیل تکی پرشده از فوم، ۸ کیلو نیوتن می‌باشد. این نشان‌دهنده این مسئله می‌باشد که با اضافه کردن پروفیل داخلی به نمونه‌ی پرشده از فوم علاوه بر کاهش وزن نمونه، افزایش مقاومت به خمش را نیز به همراه دارد.



شکل ۶ نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌هایی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر

بالاترین مقاومت خمشی در نمونه‌هایی با ضخامت ۲ میلی‌متر برای پروفیل تکی پرشده از فوم می‌باشد؛ که مقدار آن در بالاترین نقطه برابر ۱۴/۵ کیلو نیوتن است، مقاومت خمشی برای پروفیل دوتایی پرشده از فوم برابر با ۱۳ کیلو نیوتن می‌باشد. در لوله تکی پرشده از فوم، این مقدار برابر است با ۸ کیلو نیوتن و برای لوله دوتایی پرشده از فوم برابر با ۷ کیلو نیوتن. با افزایش ضخامت تیر خارجی در تیرهای دوتایی پرشده از فوم به ۲ میلی‌متر مقاومت خمشی آن‌ها نسبت به تیرهای تکی پرشده از فوم، روندی کاهشی داشته است (شکل ۷). مقاومت خمشی تیرهای دوتایی پرشده از فوم با ضخامت ۲ میلی‌متر کمتر از تیرهای تکی پرشده از فوم می‌باشد.



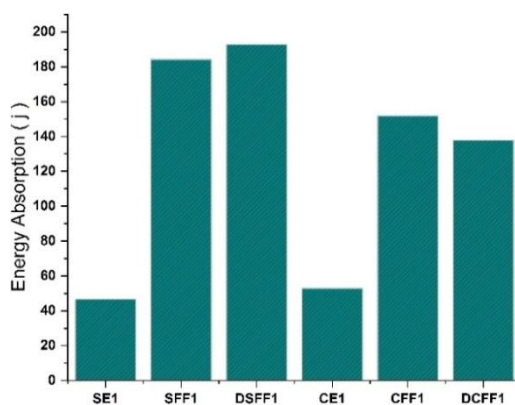
شکل ۷ نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌هایی با ضخامت ۲ میلی‌متر

۳-۳- انرژی جذب شده

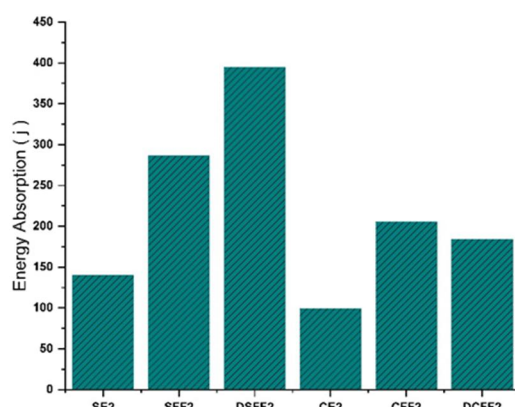
کل انرژی جذب شده (E_t)، ناحیه زیر منحنی نیرو-جابجایی تا نقطه شکست است، رابطه (۱) بیانگر انرژی کل جذب شده است که در آن F نشان دهنده میزان بار سنبه، δ جابجایی سنبه و δ_{max} حداکثر جابجایی است [۱۴].

$$E_t = \int_0^{\delta_{max}} F d\delta \quad (1)$$

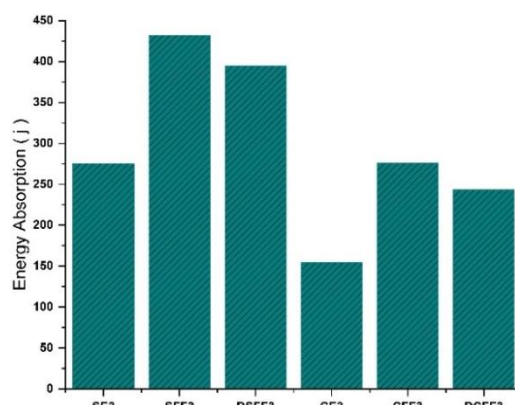
شکل‌های (۸ و ۹ و ۱۰) انرژی کل جذب شده در تیرهای مدل‌سازی شده پس از آزمایش خمش سه‌نقطه را نشان می‌دهد. انرژی جذب شده نمونه‌های مختلف از طریق خمش از ۵۰ ژول تا ۴۰۰ ژول متغیر است. مشاهده می‌شود تیرهای توخالی SE و CE کمترین انرژی جذبی را نسبت به نمونه‌های پر شده از فوم دارند. بیشترین جذب انرژی در تیرهای دوتایی پر شده (DSFF) و (DCFF) که به ترتیب ۴۰۰ و ۲۵۰ ژول می‌باشد. تیرهای دوتایی پر شده از فوم با وجود پایین بودن وزن آن‌ها نسبت به تیرهای تکی پر شده از فوم توانایی جذب انرژی بالایی نسبت به تیرهای تکی پر شده از فوم دارند. انرژی جذبی در پروفیل دوتایی پر شده از فوم با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر افزایش دو برابری نسبت به ضخامت یک میلی‌متر داشته‌اند که از ۲۰۰ به ۴۰۰ ژول افزایش داشته است. پروفیل‌های تکی و دوتایی پر شده از فوم، نسبت به لوله‌ها انرژی بیشتری جذب کرده‌اند. همچنین با افزایش ضخامت تیرها روند جذب انرژی در تمامی نمونه‌ها افزایش می‌باشد. افزایش جذب انرژی در نمونه‌های پر شده از فوم به علت افزایش مقاومت خمشی می‌باشد و نشان می‌دهد که پر کردن تیرها از فوم روش مؤثری برای بهبود ظرفیت جذب انرژی در آن‌ها تحت خمش باشد.



شکل ۸ انرژی جذب شده در تیرهایی با ضخامت ۱ میلی‌متر



شکل ۹ انرژی جذب شده در تیرهایی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر



شکل ۱۰ انرژی جذب شده در تیرهایی با ضخامت ۲ میلی‌متر

۴- نتیجه‌گیری

مقاومت خمشی لوله‌ها و پروفیل‌های خالی و پرشده از فوم با انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای ارزیابی شدند. هجده نمونه مختلف در نظر گرفته شد، از جمله پروفیل و لوله‌های توخالی و پرشده از فوم آلومینیوم. پروفیل و لوله‌های پر شده از فوم از نظر تغییرشکل بعد از اعمال بار، مقاومت خمشی و راندمان جذب انرژی بررسی و مقایسه شدند. نتایج بدست آمده به شرح زیر است:

- ۱- قرار دادن فوم‌ها در پروفیل‌ها و لوله‌ها باعث ایجاد مقاومت بالا در برابر خمش شد.
 - ۲- راندمان جذب انرژی در تمامی نمونه‌ها ارزیابی شدند، مشخص شد در تیرهای پر شده از فوم مقاومت خمشی در حین بارگذاری بعد از اولین آسیب حفظ می‌شود و حتی روندی افزایشی دارد.
 - ۳- نمودارهای جذب انرژی نشان دادند که روند جذب انرژی در لوله‌های تو خالی و پرشده از فوم نسبت به پروفیل‌ها (مقاطع مربعی) پایین‌تر است؛ که بیان‌کننده اتلاف انرژی در لوله‌ها می‌باشد.
 - ۴- تیرهای دوتایی پرشده از فوم با وجود وزن کمتر نسبت به تیرهای تکی پرشده از فوم، مقاومت خمشی بالاتری از خود نشان دادند، همچنین جذب انرژی در آن‌ها روندی افزایشی نسبت به تیرهای تکی پرشده از فوم داشته است.
 - ۵- افزایش ضخامت رابطه مستقیمی با افزایش مقاومت به خمش و افزایش جذب انرژی دارد.
- پروفیل و لوله‌های دوتایی پر شده از فوم عملکرد خمشی و جذب انرژی بهتری در مقایسه با پروفیل و لوله‌های توخالی و نیز پروفیل و لوله‌های تکی پرشده از فوم ارائه دادند؛ بنابراین، تیرهای دوتایی پرشده از فوم به دلیل وزن کمتر نسبت به تیرهای تکی پرشده از فوم، مقاومت خمشی بالا و حفظ مقاومت خمشی حتی بعد از اولین آسیب و ظرفیت جذب انرژی بالا، می‌توانند به عنوان ساختاری مقاوم در مهندسی بکار روند.

References

- [1] Abramowicz W. Thin-walled structures as impact energy absorbers. *Thin-walled structures*: 2003 Feb; 41(2-3): 91-107. doi: 10.1016/S0263-8231(02)00082-4
- [2] Immarigeon J P, Holt R T, Koul A K, Zhao L, Wallace W, Beddoes J C. Lightweight materials for aircraft applications. *Materials characterization*: 1995 July;35(1): 41-67. doi: 10.1016/1044-5803(95)00066-6
- [3] Soltani S, Deilami Azodi H, Elahi S H. The influence of the amount of CaCO₃ foaming agent on the physical structure and mechanical properties of LM13 aluminum foam. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*: 2022 Sep;9(5): 33-39. doi: 10.22034/ijme.2022.160057 [In Persian]
- [4] Bilston D, Ruan D, Candido A, Durandet Y. Parametric study of the cross-section shape of aluminum tubes in dynamic three-point bending. *Thin-Walled Structures*: 2019 Mar;136:315-322. doi: 10.1016/j.tws.2018.12.032
- [5] Sampath V, Rao C L, Reddy S. Energy absorption of foam filled aluminum tubes under dynamic bending. *Procedia Manufacturing*: 2019 Jan; 7:225-233. doi: 10.1016/j.promfg.2016.12.054
- [6] Zarei H, Kröger M. Bending behavior of empty and foam-filled beams: Structural optimization. *International Journal of Impact Engineering*: 2008 June;35(6):521-529. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2007.05.003
- [7] Li Z, Zheng Z, Yu J, Guo L. Crashworthiness of foam-filled thin-walled circular tubes under dynamic bending. *Materials & Design*: 2013 Dec; 52:1058-1064. doi: 10.1016/j.matdes.2013.06.067
- [8] Crupi V, Montanini R. Aluminum foam sandwiches collapse modes under static and dynamic three-point bending. *International Journal of Impact Engineering*: 2007 Mar;34(3):509-521. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2005.10.001
- [9] Santosa S, Banhart J, Wierzbicki T. Bending Crush Resistance of Partially Foam-Filled Sections. *Advanced Engineering Materials*: 2000 Apr;2(4):223-227. doi: 10.1002/(SICI)1527-2648(200004)2:4<223::AID-ADEM223>3.0.CO;2-J
- [10] Shojaeifard M H, Zarei H R, Talebitooti R. Bending behavior of empty and foam-filled aluminum tubes with different cross-sections. *Acta Mechanica Solida Sinica*: 2012 Dec;25(6):616-626. doi: 10.1016/S0894-9166(12)60057-3
- [11] An Y, Yang Ch H, Hodgson P. A study on bending behaviors of aluminum foam-filled tubes. *Applied Mechanics and Materials*: 2014 Aug;620:413-416. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.620.413
- [12] Li Z, Lu F. Bending resistance and energy-absorbing effectiveness of empty and foam-filled thin-walled tubes. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*: 2015 Apr;34(9):761-768. doi: 10.1177/0731684415580329
- [13] Yu J, Wang E, Li J, Zheng Z. Static and low-velocity impact behavior of sandwich beams with closed-cell aluminum-foam core in three-point bending. *International Journal of Impact Engineering*: 2008 Aug;35(8):885-894. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2008.01.006

- [14] Guo L W, Yu J L, Li Z B. Experimental studies on the quasi-static bending behavior of double square tubes filled with aluminum foam. *Acta mechanica*: 2010 Mar; 213(3):349-358. doi: [10.1007/s00707-010-0281-1](https://doi.org/10.1007/s00707-010-0281-1)
- [15] Duan L, Xue K, Du Z, Ma H, Li, W, Su Y. Application of Johnson-Cook Model in Failure Simulation for Steel-Aluminum Hybrid Spr Joint Under Dynamic Loading. Available at SSRN 4232841: 2022 Sep; doi: [10.2139/ssrn.4232841](https://doi.org/10.2139/ssrn.4232841)
- [16] Avalle M, Lehmhus D, Peroni L, Pleteit H, Schmiechen Ph, Belingardi G, Busse M. AlSi7 metallic foams— aspects of material modelling for crash analysis, *International Journal of Crashworthiness*: 2009 Jul;14(3):269-285, doi: [10.1080/13588260802445836](https://doi.org/10.1080/13588260802445836)