



## بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار خمشی تیرهای ساندویچی با رویه های فولادی و هسته الاستومری

علیرضا رهایی<sup>۱</sup>، علیرضا گلشن<sup>۱</sup>، محمود رضا گلشن<sup>۲\*</sup>

۱- دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.  
۲- دانشکده فنی و مهندسی شهید باهنر شیراز، دانشگاه فنی و حرفه‌ای فارس، شیراز، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۱۱  
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱  
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۵/۲۸  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۷/۱۳

### کلمات کلیدی:

تیر ساندویچی  
بار خمشی سه نقطه  
هسته الاستومری  
رویه فولادی  
پل سازی

**خلاصه:** صفحات ساندویچی روزبه‌روز در حال تکامل بوده و مدل‌های جدید ساخته شده نسبت به مدل‌های قبلی دارای مقاومت و باربری بیشتری هستند و به دلیل نسبت استحکام به وزن و جذب انرژی زیاد، کاربرد وسیعی در صنایع مختلف از جمله هوافضا، صنایع دریایی و پل‌سازی دارند. اما مشکلی که در بیشتر این نوع صفحات وجود دارد، خردشدن هسته در اثر اعمال بارگذاری و در نتیجه تخریب تیر است. در تحقیق حاضر، کارکرد تحمل بار و مقاومت نهایی در نوع جدیدی از تیرهای ساندویچی با رویه‌های فولادی و هسته فوم الاستومری مورد بررسی عددی و آزمایشگاهی قرار گرفته که استفاده از این نوع هسته در تیرهای ساندویچی در تحقیقات قبلی گزارش نشده است. فوم‌های الاستومری دارای مدول الاستیسیته کمتری هستند، اما در تغییر شکل‌های بزرگ رفتار برگشت‌پذیر دارند. از این‌رو در مورد سازه‌هایی از جمله پل که برای جذب انرژی بالا بکار می‌روند می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله، با ساخت پانل‌های ساندویچی، علاوه بر تعیین مشخصات مکانیکی مصالح، تأثیر اضافه کردن هسته الاستومری در مقدار تغییر شکل تیر ساندویچی و میزان جذب انرژی آن، مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین شبیه‌سازی سازه ساندویچی و صفحات فولادی تحت بار خمشی سه نقطه به کمک نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. بررسی‌های تجربی و مطالعات پارامتریک انجام شده نشان می‌دهند که بین نتایج عددی و تجربی، تطابق خوبی وجود دارد و می‌توان در تحقیقات آتی، در ابعاد بزرگ‌تر به عنوان عرشه پل مورد بررسی قرار گیرد.

### ۱- مقدمه

تیرهای ساندویچ متداول از دو ورق پوششی نازک و یک هسته ضخیم تشکیل شده است که ورق‌های پوشش از مصالح سخت و مقاوم با تراکم بالا از قبیل فولاد یا کامپوزیت‌ها ساخته شده‌اند که توسط مصالحی با تراکم پایین به نام هسته به هم متصل شده‌اند. تیرهای ساندویچی با طراحی‌های متنوع در صنایع مختلف استفاده می‌شود و بسته به کارکرد این اعضا در صنایع مختلف، هسته‌ها و رویه‌هایی با جنس‌های متنوع برای ساخت آن‌ها به کار می‌رود [۱].

با مطرح شدن فناوری‌های جدید ساخت، پانل‌های ساندویچی جایگاه گسترده‌تری به عنوان اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای در صنعت‌های مختلف پیدا کرده‌اند. تنوع گسترده تیرهای ساندویچی با داشتن متغیرهای مختلف طراحی و همچنین شیوه‌های طراحی نوین، امکان تولید اعضایی با قابلیت‌های ارزنده و کارایی بالا در کاربردهای مختلف صنعتی را فراهم کرده است. امروزه عملکرد منحصر به فرد تیرهای ساندویچی باعث شده است استفاده از

آن‌ها در صنایع مختلفی از جمله حمل‌ونقل دریایی، هوافضا و خودروسازی رایج شود [۲-۳]. طبق بررسی‌های صورت‌گرفته توسط ماترون<sup>۱</sup> [۴]، وزن عرشه پل‌های ساندویچ پانلی تقریباً یک‌پنجم عرشه‌های بتن مسلح است. اگر تصمیم گرفته شود کل فضای بین رویه‌های بالا و پایین توسط ماده‌ای پر شود، این ماده از جنسی با حجم زیاد و وزن کم انتخاب می‌شود که همچنین مقاومت و سختی مناسبی نیز داشته باشد. بهترین مواد برای این انتخاب فوم‌ها هستند. قیمت هسته‌های فوم ارزان است و نسبت صلبیت به وزن بالایی دارد و از معایب آن می‌توان به مقاومت و مدول کششی پایین اشاره کرد. این فوم‌ها شامل فوم پی‌وی‌سی<sup>۲</sup> (PVC)، فوم پلی‌اورتان و فوم پلی‌پروپیلن است [۵].

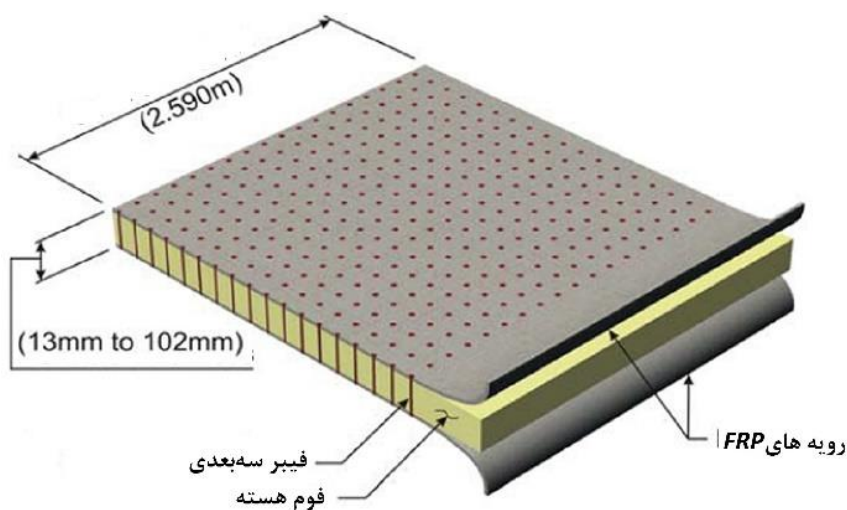
از آنجا که هسته مورد استفاده برای تیرهای ساندویچی تهیه شده در این مقاله از جنس فوم است، توجه بیشتری نسبت به تحقیقات انجام شده راجع به هسته‌های فوم صورت گرفته است. تاگاریلی<sup>۳</sup> و همکاران [۶] از

- 1 Murton
- 2 Poly Vinyl Chloride
- 3 Tagarielli

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: eng.proje@gmail.com

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





شکل ۱. شماتیک ساندویچ پانل FRP سه بعدی [۱۱]

Fig. 1. Schematic of a 3D FRP sandwich panel [11]

الیاف‌هایی سه‌بعدی در هسته که باعث اتصال پوشش بالایی به پایینی می‌شود، مقاومت ساندویچ پانل‌ها را تا حدی بالا ببرند و ارزیابی کنند. آن‌ها منحنی بار-تغییر مکان پانل‌هایی با ضخامت ۱/۵ و ۲/۵ اینچ را مطابق شکل ۲ تحت آزمایش خمش سه‌نقطه ترسیم کردند. با بررسی منحنی‌ها به این نتیجه رسیدند که رفتار پانل تا قبل از شروع اولین ترک در فوم هسته خطی است و پس از ایجاد اولین ترک رفتار آن غیرخطی می‌شود. در نهایت مشخص شد علت شکست همه نمونه‌ها پارگی ورق‌های پوشش بود.

هشام<sup>۷</sup> و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۱۵ مطابق شکل ۳ یک ساختار دوزنقه‌ای شکل<sup>۸</sup> متشکل از دولایه پوشش فوم شیشه‌ای تقویت شده پلیمری<sup>۹</sup> (GFRP) و یک هسته فوم پلی‌اورتان<sup>۱۰</sup> دوزنقه‌ای با چگالی کم را برای تیرهای ساندویچی بررسی و ارزیابی کردند. نمونه در ابعاد کوچک ساخته شده و تحت آزمایش خمشی استاتیکی قرار گرفته و ظرفیت باربری نهایی و رفتار نیرو-تغییر مکان پانل‌ها بررسی شده است. حالت شکست اولیه برای همه نمونه‌ها بیرون‌زدگی موضعی پوسته فشاری بالایی بوده و در آخر با خرد شدن هسته به علت ترد بودن، تیر ساندویچی تخریب می‌شود.

نوعی فوم PVC برای هسته در پانل‌های ساندویچی استفاده کردند. این نوع فوم مدول الاستیسیته و مقاومت بالایی دارد. ایشان مدول الاستیسیته اولیه مشاهده شده تحت کشش را برابر 10 GPa و مقاومت کششی را برابر 220 MPa و مقاومت فشاری را در حالتی که میکرو کماتش در فوم اتفاق افتاده باشد برابر 150 MPa ذکر می‌کنند. مقاومت برشی اعلام شده برای این فوم برابر 1 MPa است. تریانتفیلو و گیسون<sup>۱</sup> [۷] از نوعی فوم پلی‌اورتان با مدول برابر 1/6 GPa و مقاومت 127 MPa برای ترسیم مکانیزم‌های خرابی پانل‌های ساندویچی استفاده کرده‌اند. کوریگلیانو<sup>۲</sup> و همکاران [۸] از نوعی فوم ترکیبی استفاده کرده‌اند که خواص مکانیکی بالایی داشته و تا حد زیادی دارای رفتار خطی در منحنی تنش-کرنش کششی و فشاری هستند. فوم استفاده شده توسط مینز و الیاس<sup>۳</sup> [۹] مربوط به دو نوع فوم از جنس PVC است. همچنین فلورس و لی<sup>۴</sup> [۱۰] از فوم رهاصل استفاده کرده‌اند که خصوصیات مکانیکی نسبتاً بالایی نسبت به فوم‌های مورد استفاده در صنعت داشته است.

تارک حسن و رایس<sup>۵</sup> [۱۱] با تقویت ساندویچ پانل‌های دارای پوشش پلیمری تقویت شده<sup>۶</sup> (FRP) مشابه شکل ۱ سعی کردند با قراردادن

- 1 Triantfillou and Gibson
- 2 Corigliano
- 3 Mines and Alias
- 4 Flores and Li
- 5 Tarek Hassan and Reis
- 6 Fiber-reinforced polymer

- 7 Hesham
- 8 Trapezoidal-Shaped
- 9 Glass Fiber-reinforced polymer
- 10 Polyurethane Foam



شکل ۲. آزمایش خمشی سه‌نقطه بر ساندویچ پانل FRP [۱۱].

Fig. 2. Three-point bending test on FRP sandwich panel [11]



شکل ۳. تیر ساندویچی ذوزنقه‌ای شکل [۱۲]

Fig. 3. Trapezoidal sandwich beam [12]

این مواد مدنظر قرار می‌گیرند. برای مدل کردن مصالح هایپیرالاستیک، در ابتدا باید رفتار مواد ذکر شده را با توجه به نتایج آزمایش‌های استاندارد تعریف شده به صورت آزمایش یک‌محوره<sup>۴</sup>، دومحوره<sup>۵</sup>، برش خالص<sup>۶</sup> و حجمی<sup>۷</sup> برای شناسایی خصوصیات مکانیکی این مواد به دست آورد و سپس نمودارهای تنش-کرنش به دست آمده را به عنوان ورودی اولیه به برنامه آباکوس وارد کرده و با در نظر گرفتن تابع مناسب، مصالح هایپیرالاستیک را مدل‌سازی کرد. مارکمن و ورون [۱۶] بیست مدل هایپیرالاستیک را که برای شبیه‌سازی مواد شبه لاستیک توسط محققین مختلف استفاده شده است، معرفی و در سه تیپ تجربی، فیزیکی و پدیده‌ای تقسیم کرده‌اند.

### ۲-۱-۱- مدل رفتاری هایپیرالاستیک

مواد هایپیرالاستیک با عنوان «مواد الاستیک سبز»<sup>۸</sup> نیز شناخته می‌شوند. این مواد، مدل‌های محافظه‌کارانه‌ای هستند که از تابع چگالی انرژی کرنشی<sup>۹</sup> (SEF) به دست می‌آیند. یک مدل هایپیرالاستیک است؛ اگر و تنها اگر امکان تعریف تانسور تنش کوشی آن به عنوان تابعی از گرادیان تغییر شکل وجود داشته باشد. رابطه این مدل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma = \frac{1}{J} \frac{\partial W}{\partial F} F^T \quad (1)$$

که در آن:

$$J = \det F \quad (2)$$

در رابطه بالا، انرژی پتانسیل "W" به عنوان تابعی از گرادیان تغییر شکل (F) در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از یک رویکرد دیگر می‌توان انرژی پتانسیل را به صورت تابعی از تانسور تغییر شکل کوشی-گرین (C=F<sup>T</sup>F) بیان کرد. در این حالت، رابطه معرف مدل هایپیرالاستیک به صورت زیر است:

$$\sigma = \frac{2}{J} F \frac{\partial W}{\partial C} F^T \quad (3)$$

کاماتا و شینگ<sup>۱</sup> [۱۳] خستگی عرشه پل‌های ساندویچی با پوشش FRP و هسته لانه‌زنبوری را به صورت تجربی و عددی بررسی کرده‌اند. هدف آن‌ها تعیین عملکرد این نوع تیرها در برابر بارهای سیکلی بوده است. لایه‌لایه شدن پوشش و جداسازی بین پوشش و هسته زنبوری را مود اصلی شکست در این نوع تیر تشخیص دادند.

سازه‌های ساندویچی به دلیل نسبت استحکام به وزن و جذب انرژی زیاد، کاربرد وسیعی در صنایع مختلف از جمله هوافضا، صنایع دریایی و پل‌سازی دارد و استفاده از روش المان محدود ابزار ارزشمندی را برای شبیه‌سازی این تیرها فراهم کرده است [۱۴-۱۵]. همان‌طور که ملاحظه شد در بیشتر موارد، عامل اصلی در خرابی تیرها شکست و گسیختگی به علت ترد بودن هسته است که به همین علت در مقاله حاضر مودهای شکست مربوط به هسته به علت خصوصیات الاستومری حذف می‌شود و به جای آن عملکرد هایپیرالاستیک<sup>۲</sup> که بتواند رفتار غیرخطی فوم را مدل کند در مدل‌های المان محدود به کار گرفته می‌شود. با توجه به نبود وجود سابقه تحقیق مشابهی در مورد تیرهای ساندویچی با رویه‌های فولادی و هسته فوم الاستومری، نتایج این پژوهش می‌تواند خروجی‌های مفیدی را برای استفاده از این نوع تیرهای ساندویچی فراهم کند.

### ۲- مشخصات مکانیکی مصالح

در این قسمت مشخصات مکانیکی نمونه‌های الاستومری و فولادی، به منظور مدل‌سازی مصالح در برنامه آباکوس<sup>۳</sup> بررسی شد که روند انجام آن در ادامه بیان می‌شود.

#### ۲-۱- مشخصات مکانیکی لایه الاستومری

برای مدل‌سازی رفتار مواد الاستومری تاکنون تحقیقات زیادی صورت گرفته است. رفتار ملاحظه شده از فوم الاستومری به شدت تحت تأثیر خصوصیات مکانیکی هایپیرالاستیک این فوم‌ها قرار دارد. در این تحقیق برای مدل‌سازی رفتار این فوم از مدل‌های پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. شبیه‌سازی رفتار هایپیرالاستیک در مواد توسط تابع انرژی انجام می‌شود. فوم‌های الاستومری و مواد شبه‌لاستیک رفتار مشابهی دارند؛ با این تفاوت که فوم‌های الاستومری دارای خصوصیات تراکم‌پذیری زیادی بوده و ترم‌های مربوط به تغییر شکل‌های حجمی نیز در محاسبه انرژی کرنشی

4 Uniaxial Tensile test  
5 Biaxial test  
6 Planner test  
7 Volumetric test  
8 Green Elastic Materials  
9 Strain energy function

1 Camata and Shing  
2 Hyperelastic  
3 Abaqus

### ۲-۱-۲- توابع انرژی کرنشی

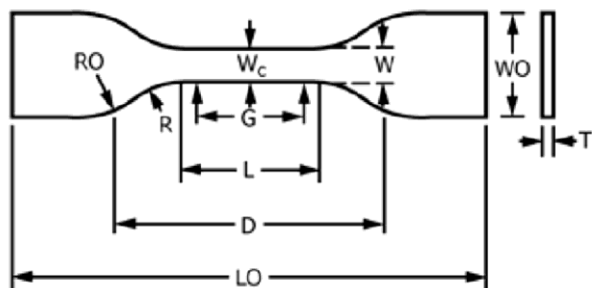
$$W = \sum_{i,j=0}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i + \sum_{i=0}^N \frac{1}{D_i} (J_{el} - 1)^{2i} \quad (6)$$

که در رابطه فوق ضرایب ثابت مصالح که رفتار برشی را کنترل کرده و با استفاده از تست‌های تک محوره، دو محوره و صفحه‌ای تعیین می‌شوند.  $D_i$  ضریب ثابت مصالح که فشرده شونده‌گی حجمی را کنترل کرده و برای لاستیک‌هایی که غیرقابل فشرده شدن هستند، برابر صفر است. این ضریب با استفاده از تست حجمی تعیین می‌شود.  $J_{el}$  نسبت حجمی الاستیک می‌باشد و  $N$  مرتبه تابع چند جمله‌ای است که در حداکثر آن برابر ۶ می‌باشد.

### ۲-۱-۴- آزمایش کشش یک محوره

آزمایش کشش فوم‌ها مطابق با استاندارد ASTM-D638 [۱۷] انجام شده است. ضخامت نمونه، ۲ میلی‌متر و سرعت بارگذاری آزمایش، ۵ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شده بود. برای تعیین رفتار قابل اعتماد فوم پیشنهادی، هر آزمایش برای چهار نمونه تکرار شد. ابعاد نمونه‌ها دقیقاً با میکرومتر اندازه‌گیری شد. با توجه به رفتار معمولاً ناهمسانگردی فوم‌ها، لازم بود آزمایش کشش در دو جهت ضخامت و جهت عمود بر ضخامت انجام شود. شکل ۴ نمونه پیشنهاد شده در این استاندارد را نشان داده است. واحد اندازه‌های داده شده شکل ۴ در جدول ۱، بر حسب میلی‌متر است. شکل ۵ روند انجام آزمایش کشش و شکل ۶ نمودار تنش-ازدیاد طول دو نمونه فوم الاستومری با نماد FE را نشان می‌دهد.

برای تعیین بهترین مدل جهت شبیه‌سازی رفتار کششی فوم مورد مطالعه، مدل‌های مختلفی از جمله مدل Neo-Hookean،



شکل ۴. نمونه FE پیشنهادی برای آزمایش کشش فوم [۱۷].

Fig. 4. Proposed FE sample for foam tensile test [17].

مدل‌های مختلفی برای مواد هایپرالاستیک توسط محققان معرفی شده‌اند که در حقیقت تابع انرژی کرنشی ماده را تعیین می‌کنند. این تابع را مطابق رابطه (۴) با نماد "W" نشان می‌دهند و وابسته به سه متغیر  $I_1$ ،  $I_2$  و  $I_3$  است که در رابطه (۵) متغیر  $\lambda$  نسبت کشش نمونه الاستومری در سه جهت اصلی است و با توجه به نوع آزمایش قابل محاسبه است [۱۶].

$$W = f(I_1 + I_2 + I_3) \quad (4)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad (5)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2$$

با توجه به اینکه معمولاً این مدل‌ها در مورد چند نمونه الاستومر خاص مطرح شده‌اند دامنه کاربرد آن‌ها محدود است و لازم نیست برای همه مواد، نتایج دقیقی را نشان دهند. از این رو، برای شبیه‌سازی رفتار مواد هایپرالاستیک معمولاً مدل‌های مختلفی بررسی شده و از مدلی که نزدیک‌ترین نتایج را به نتایج آزمایشگاهی تولید می‌کند برای تعریف تابع انرژی کرنشی استفاده می‌شود. در نرم‌افزار آباکوس دو روش برای تعریف مدل‌های هایپرالاستیک معرفی شده است. در روش اول با توجه به نمودارهای تنش-کشش آزمایش‌های یک‌محوره، دو محوره، صفحه‌ای و حجمی، ثابت‌های مدل‌ها استخراج شده و تابع انرژی کرنشی بر اساس مدل مربوطه تعریف می‌شود. در روش دوم نرم‌افزار، ثابت‌های مربوط به هر مدل را به عنوان ورودی دریافت کرده و تابع انرژی را بر اساس این ثابت‌ها تعیین می‌کند. در ادامه توضیح مختصری راجع به تابع انرژی کرنشی پیشنهاد شده توسط مدل‌های مذکور ارائه شده و برای شبیه‌سازی رفتار فوم پیشنهادی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

### ۲-۱-۳- مدل چندجمله‌ای

این مدل که معمولاً برای مدل‌سازی رفتار مواد الاستومر کاربرد دارد از دو قسمت تشکیل می‌شود که قسمت اول وابسته به تغییر شکل‌های بدون تغییر حجم و قسمت دوم مربوط به تغییر شکل‌های دارای تغییر حجم می‌باشد. این رابطه بصورت زیر می‌باشد:

جدول ۱. ابعاد نمونه FE پیشنهادی برای آزمایش کشش فوم [۱۷].

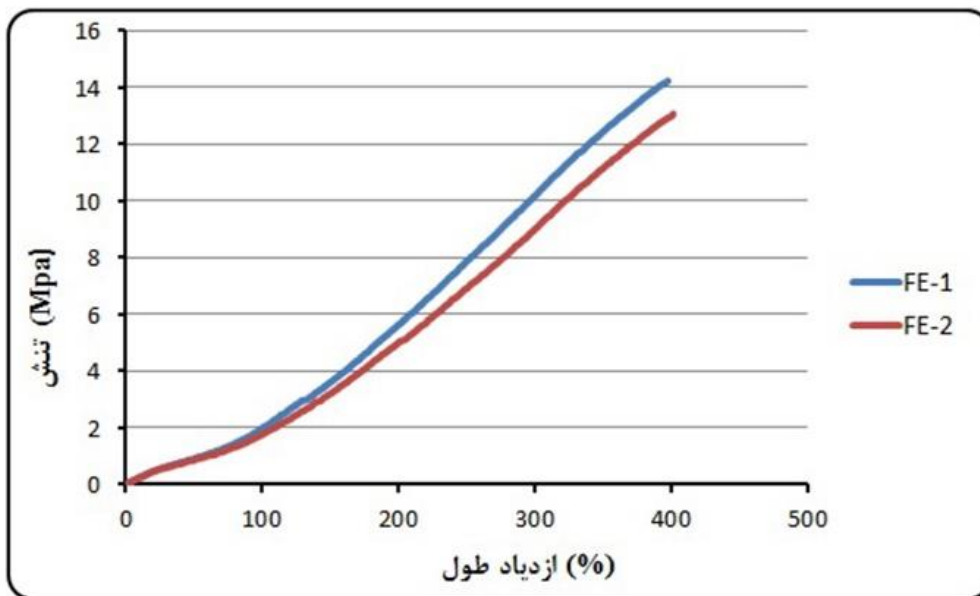
Table 1. Dimensions of the proposed FE sample for foam tensile testing [17]

ابعاد (mm)	پارامتر (مطابق شکل ۴)
Type V	
۳/۱۸	<i>W</i>
۴/۰	<i>T</i>
۹/۶۳	<i>L</i>
۹/۵۳	<i>WO</i>
۶۳/۵	<i>LO</i>
۷/۶۲	<i>G</i>
۲۵/۴	<i>D</i>
۱۲/۷	<i>R</i>



شکل ۵. دستگاه آزمایش کشش صفحه الاستومری

Fig. 5. Elastomeric plate tensile testing device.



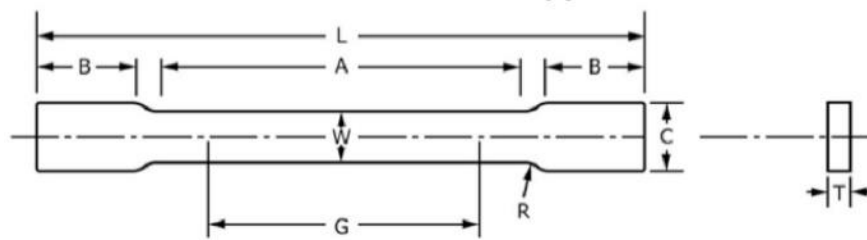
شکل ۶. نمودار تنش-ازدیاد طول حاصل از انجام آزمایش کشش فوم الاستومری

Fig. 6. Stress-elongation diagram of elastomeric foam tensile test.

جدول ۲. ضرایب ثابت مدل Mooney-Rivlin [۱۱].

Table 2. Fixed coefficients of the Mooney-Rivlin model [11].

$C_{10}(Mpa)$	$C_{01}(Mpa)$	$D_1$
۰/۳۳۳۹	$-۳/۳۷ \times 10^{-۴}$	$۱/۵۸۲۸ \times 10^{-۳}$



شکل ۷. نمونه SP پیشنهادی برای آزمایش کشش فولاد [۱۸]

Fig. 7. Proposed SP sample for tensile testing of steel [18]

جدول ۳. ابعاد نمونه SP پیشنهادی برای آزمایش کشش فوم [۱۸].

Table 3. Dimensions of the proposed SP sample for foam tensile testing [18].

ابعاد (mm) پارامتر (مطابق شکل ۷)	Type V
$G$	۵۰
$W$	۴۰
$T$	-
$R$	۱۳
$L$	۲۰۰
$A$	۶۰
$B$	۵۰
$C$	۵۰

زائده‌های دو انتها و عرض نمونه‌ها مطابق شکل ۷ و جدول ۳ پیشنهاد شده است.

برای رسیدن به رفتار قابل اعتماد، هر آزمایش را دو بار تکرار کردیم. بردن نمونه‌ها از صفحات فولادی با دقت زیادی صورت گرفت تا در لبه‌های

و Mooney-Rivlin بررسی شدند که مناسب‌ترین نتایج با توجه به بیشترین همگرایی با مشاهدات آزمایشگاهی توسط تابع مرتبه اول Mooney-Rivlin به دست آمد. تابع انرژی کرنشی ماده توسط این تابع مطابق رابطه (۷) می‌باشد. ضرایب ثابت مربوط به مدل چندجمله‌ای درجه اول Mooney-Rivlin در جدول ۲ ارائه شده است.

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J_{el} - 1)^2 \quad (7)$$

۲-۲- مشخصات مکانیکی فولاد

برای تیرهای ساندویچی که از دو بخش رویه و هسته تشکیل شده‌اند عملکرد رویه‌ها در تعیین مقاومت بسیار مؤثر است. از این رو هدف این بخش تعیین خواص مکانیکی رویه‌های فولادی تحت بارگذاری محوری است.

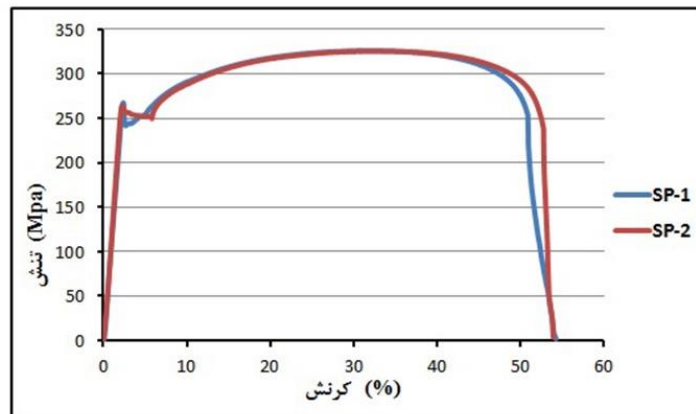
از آزمایش‌های کششی به علت ساده بودن بارگذاری و شرایط مرزی، اطلاعات دقیق‌تری از خواص مکانیکی فولادها یافت می‌شود. به همین منظور از استاندارد ASTM-A۳۷۰ [۱۸] برای تعیین مقاومت کششی و همچنین مدول الاستیسیته فولاد استفاده شده است. در این استاندارد طول قسمت‌های مختلف از جمله طول کلی، طول مورد اندازه‌گیری، طول

1 Gauge length



شکل ۸. دستگاه آزمایش کشش فولاد.

Fig. 8. Steel tensile testing machine.



شکل ۹. نمودار تنش - کرنش فولاد تحت آزمایش کشش.

Fig. 9. Stress-strain diagram of steel under tensile test.

### ۳- مطالعات آزمایشگاهی و عددی صفحات فولادی تحت بارگذاری خمشی

جدول ۴. مشخصات مکانیکی فولاد

Table 4. Mechanical properties of steel

مصالح	$E(Mpa)$	$\mu$	$\rho(Kg/m^3)$
فولاد	$21 \times 10^5$	۰/۳	۷۸۵۰

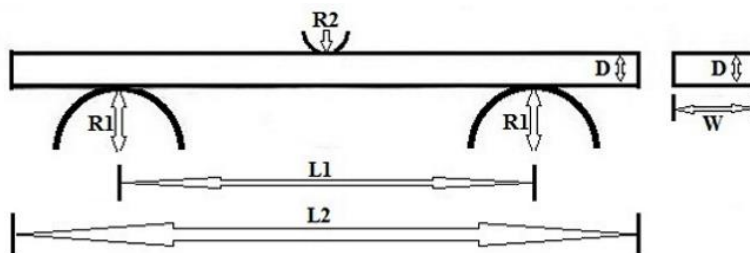
فولاد ترک ایجاد نشود. به این منظور نمونه‌های فولادی با استفاده از دستگاه CNC از صفحه فولاد مادر بریده شده‌اند. سرعت بارگذاری در این آزمایش حدود ۲ میلی‌متر بر دقیقه بود. شکل ۸ روند انجام آزمایش کشش و شکل ۹ نمودار تنش - ازدیاد طول نمونه‌های فولادی را با نماد SP نشان می‌دهد. نمودار شکل ۹ مقاومت کششی را برابر ۲۵۰ MPa نشان می‌دهد. مشخصات الاستیک فولاد در جدول ۴ نشان داده شده است. در جدول ذکر شده،  $\rho$  جرم مخصوص فولاد،  $\mu$  ضریب پواسون و  $E$  مدول ارتجاعی فولاد است.



جدول ۵. ابعاد هندسی صفحات فولادی برای آزمایش خمش

Table 5. Geometric dimensions of steel plates for bending tests

پارامتر	$L_1$ (mm)	$L_2$ (mm)	$W$ (mm)	$D$ (mm)	$R_1$ (mm)	$R_2$ (mm)
SB-1	۹۶	۲۱۰	۲۵	۵	۱۰	۱۰
SB-2	۲۰۰	۳۱۰	۱۰۰	۴	۳۰	۳۰



شکل ۱۰. ابعاد پارامتری جدول ۵ برای نمونه‌های فولادی

Fig. 10. Parametric dimensions of Table 5 for steel samples

است که پارامترهای مربوط به این جدول در شکل ۱۰ معرفی شده‌اند. در این صفحات ضخامت برابر ۵ و ۴ میلی‌متر و دهانه به ترتیب برابر ۹۶ و ۲۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

انجام این آزمایش با استفاده از دستگاه Zwick با سرعت اعمال بار ۵ میلی‌متر بر دقیقه و ظرفیت ۱۰۰ تن صورت گرفت. نمودار بار-جابجایی این نمونه‌ها بر اساس کنترل تغییر مکان<sup>۲</sup> تحت بار اعمالی ترسیم شد. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، به ترتیب مراحل انجام آزمایش نمونه SB-1 قبل و بعد از بارگذاری و در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، مراحل انجام آزمایش مربوط به نمونه SB-2 نشان داده شده است.

در ادامه با توجه به شرایط آزمایشگاهی و با استفاده از خصوصیات مکانیکی به دست آمده از قسمت قبل، نمونه‌های فولادی مدل‌سازی شده و آزمایش خمش سه‌نقطه در برنامه آباکوس انجام شد و در انتها نتایج آزمایشگاهی و عددی با هم مقایسه شدند.

۳-۲- شبیه‌سازی المان محدود صفحات فولادی

برای شبیه‌سازی مدل اجزای محدود صفحات فولادی، مشخصات مکانیکی مطابق جدول ۴ و شکل ۹ در حالت الاستیک و پلاستیک

با توجه به اینکه در تیرها و پانل‌های ساندویچی رفتار خمشی حاکم است [۱۱-۱۳]، در این بخش به بررسی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی رویه‌های فولادی زیر بار خمشی با هدف کاهش خطاهای احتمالی در مدل‌سازی نمونه‌های ساندویچی و همچنین بررسی تأثیر استفاده از صفحات الاستومری در میزان باربری خمشی می‌پردازیم. در هر قسمت از برنامه‌های آزمایشگاهی در ابتدا روش آزمایش توضیح داده شده و سپس به مدل‌سازی و مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی می‌پردازیم.

۳-۱- آزمایش خمش سه‌نقطه روی صفحات فولادی

استاندارد ASTM-D7۹۰ [۱۹] نسبت ۱ به ۴۰ را برای اندازه ضخامت به دهانه توصیه کرده است. زیوبن<sup>۱</sup> و همکاران [۲۰] نسبت ۱ به ۱۶ را برای ملاحظه مقاومت خمشی پیشنهاد کردند. در این استاندارد دماغه بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها باید استوانه‌ای باشد که شعاع آن‌ها حدود ۵ میلی‌متر و همچنین ابعاد نمونه‌ها در استاندارد به صورت  $۱۲۷ \times ۱۲۷ \times ۳/۲$  با واحد میلی‌متر پیشنهاد شده است؛ اما به دلیل فراهم نبودن این ابعاد، از امکانات موجود استفاده شد. ابعاد نمونه‌های آزمایش شده در جدول ۵ نشان داده شده

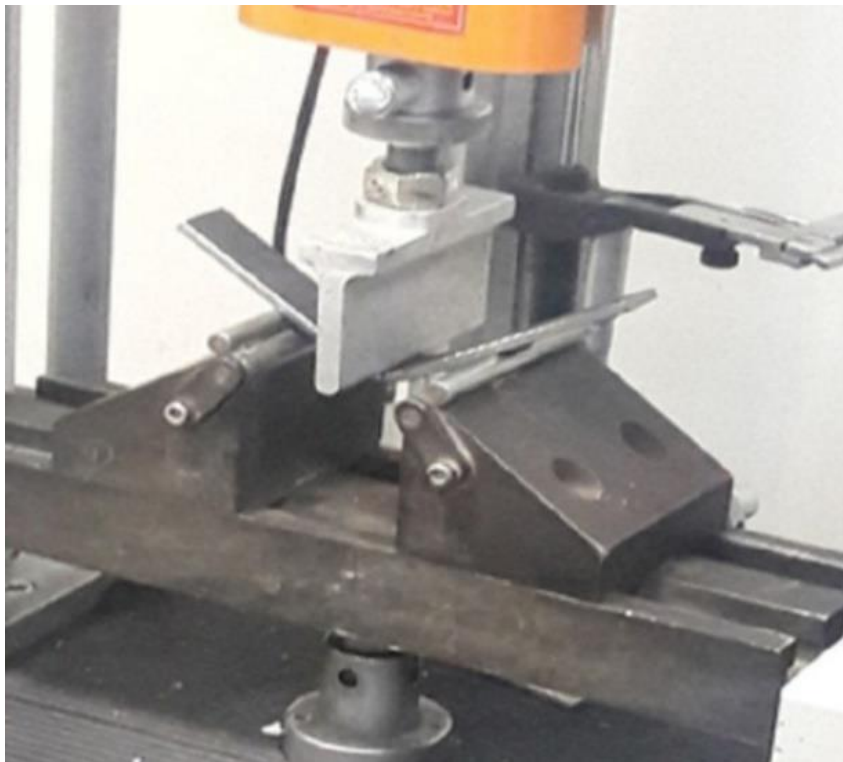
2 Displacement Control

1 Zweben



شکل ۱۱. نمونه SB-1 - تحت آزمایش خمش - قبل از بارگذاری

Fig. 11. Example SB-1 - under bending test - before loading



شکل ۱۲. نمونه SB-1 - تحت آزمایش خمش - بعد از بارگذاری

Fig. 12. SB-1 sample - under bending test - after loading



شکل ۱۳. نمونه SB-۲ - تحت آزمایش خمش - قبل از بارگذاری

Fig. 13. Sample SB-2 - under bending test - before loading



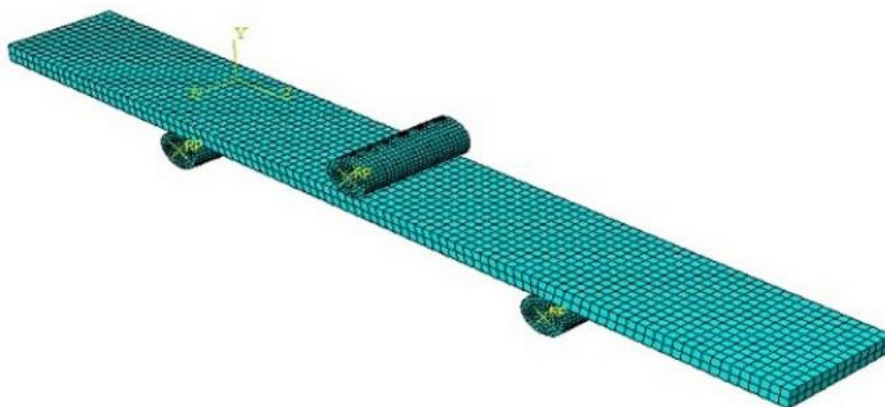
شکل ۱۴. نمونه SB-۲ - تحت آزمایش خمش - بعد از بارگذاری

Fig. 14. SB-2 sample - under bending test - after loading

مختلف بررسی و با توجه به بیشترین همگرایی با نتایج آزمایشگاهی تعیین شده است. نوع تحلیل در این مدل سازی براساس کنترل تغییرمکان است. در شکل های ۱۵ و ۱۶ نمونه مدل شده SB-۱ و در شکل های ۱۷ و ۱۸ نمونه مدل شده SB-۲ در برنامه، قبل و بعد از بارگذاری نشان داده شده است. کانتور نشان داده شده در شکل ۱۸ که با علامت U نشان داده شده است، میزان تغییر شکل نمونه SB-۲ بر حسب میلی متر را بیان می کند.

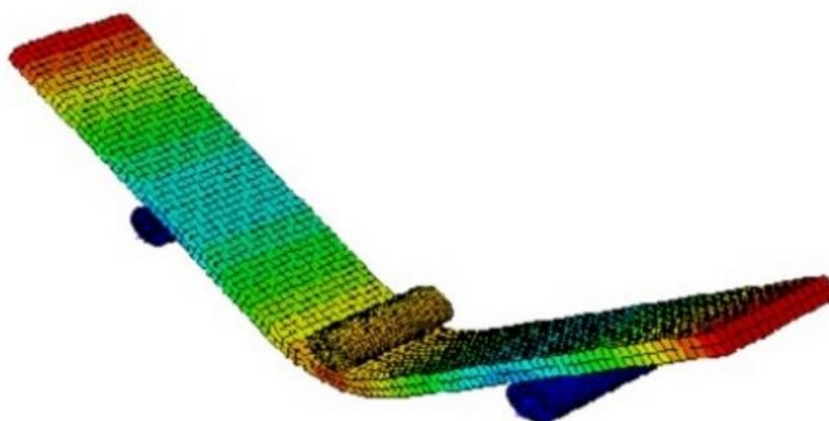
برای دست یافتن به نزدیک ترین جواب با نتایج آزمایشگاهی، پارامترهای مختلفی از جمله نوع مش، اندازه مش و نوع المان بررسی شد و نزدیک ترین نتیجه به عنوان مدل نهایی در نظر گرفته شد. معیار مورد مقایسه بین

مدل سازی شده است. تحلیل به صورت استاتیکی و تغییر شکل های بزرگ در تحلیل با گزینه Nlgeom در نظر گرفته شده است. شکل المان به صورت Quad و روش مش بندی به صورت Structured انتخاب شده است. نماد المان صفحات فولادی CAX4R می باشد. تکیه گاه ها به صورت صلب مدل سازی شده و بین تکیه گاه و تیر رابطه تماسی در هر دو جهت افقی و قائم برقرار شد که در جهت افقی، تماس با یک ضریب اصطکاک برابر ۰/۵۵ در نظر گرفته شده است. دو تکیه گاه تحتانی، درجات آزادی در هر سه جهت اصلی مقید شده و در غلتک فوقانی درجات آزادی در جهت طولی و عرضی تیر مقید شده. ابعاد مش در هر سه جهت و نوع مش، در حالت های



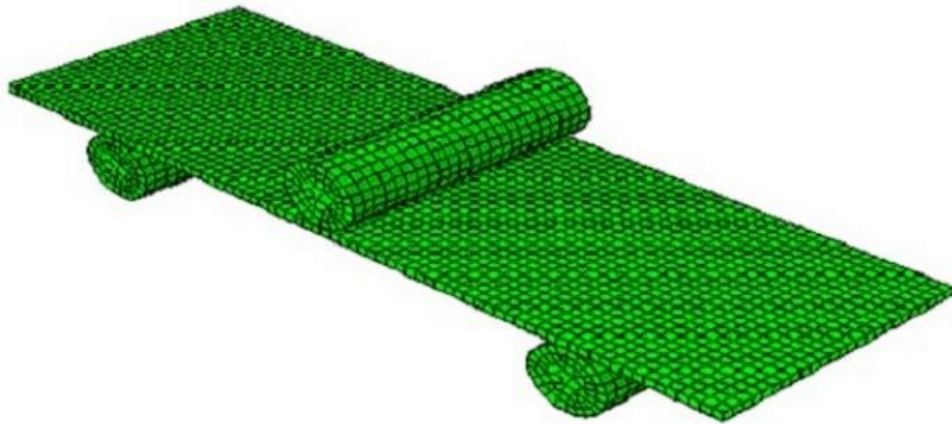
شکل ۱۵. مدل عددی نمونه SB-۱ - قبل از بارگذاری

Fig. 15. Numerical model of the SB-1 sample - before loading



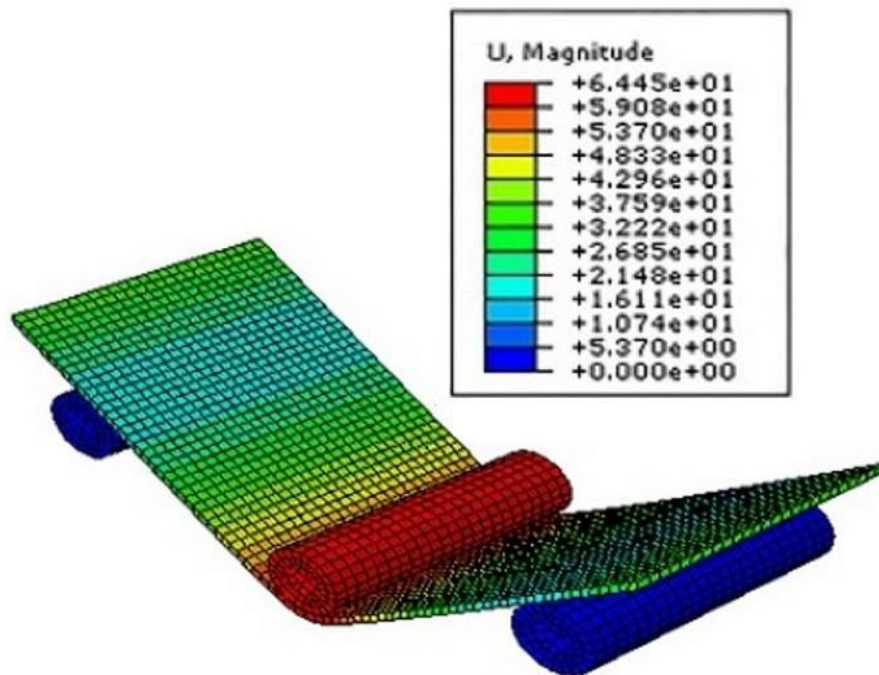
شکل ۱۶. مدل عددی نمونه SB-۱ - بعد از بارگذاری

Fig. 16. Numerical model of the SB-1 sample - after loading



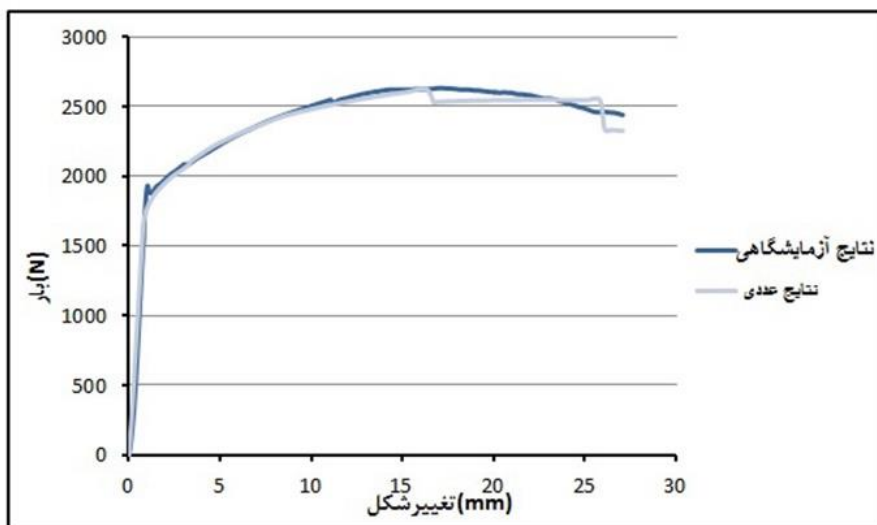
شکل ۱۷. مدل عددی نمونه SB-۲ - قبل از بارگذاری

Fig. 17. Numerical model of the SB-2 sample - before loading



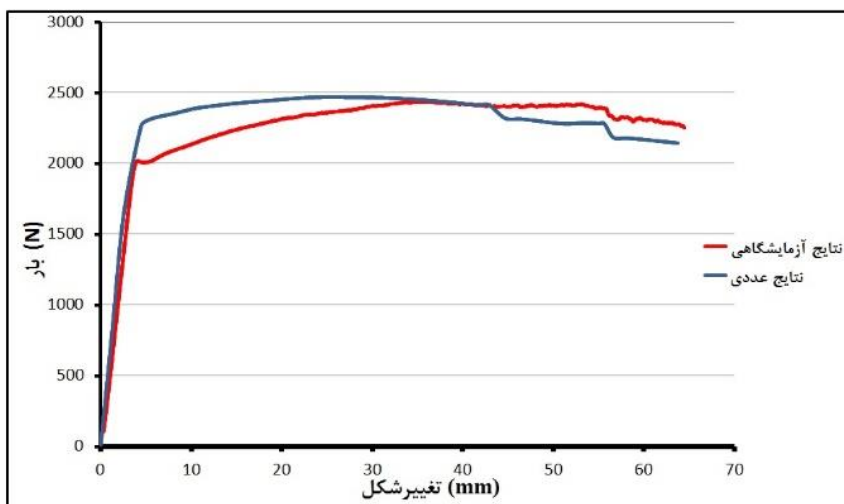
شکل ۱۸. مدل عددی نمونه SB-۲ - بعد از بارگذاری

Fig. 18. Numerical model of the SB-2 sample - after loading



شکل ۱۹. نمودار بار - تغییر مکان نمونه SB-۱ تحت آزمایش خمش

Fig. 19. Load diagram - displacement of the SB-1 specimen under bending test



شکل ۲۰. نمودار بار - تغییر مکان نمونه SB-۲ تحت آزمایش خمش

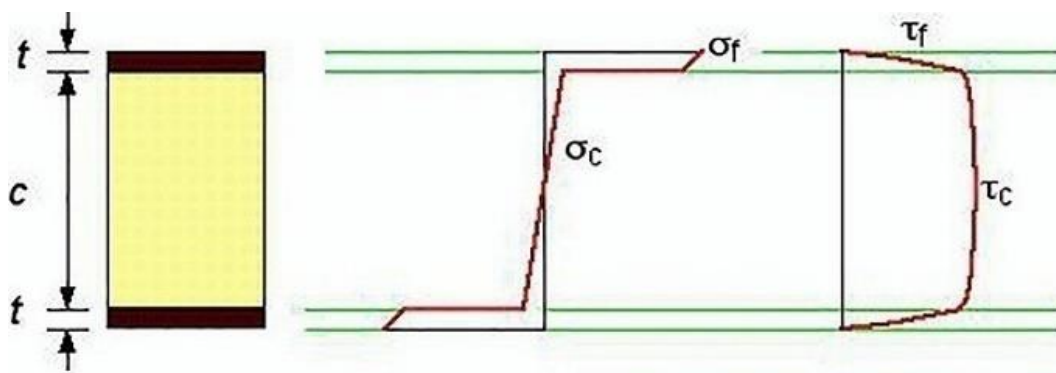
Fig. 20. Load diagram - displacement of the SB-2 specimen under bending test

عددی و آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است نتایج با دقت بالا و قابل قبولی همگرا شده‌اند.

#### ۴- بررسی رفتار خمشی تیرهای ساندویچی

در این قسمت تیرهای ساندویچی براساس شرایط و محدودیت‌های آزمایشگاهی و اجرایی ساخته شده، مورد آزمایش خمش قرار گرفته و سپس

نمونه‌های آزمایشگاهی و مدل‌های عددی نمودار بار- تغییر مکان بود. در مدل‌سازی نمونه SB-۱ با توجه به نسبت عرض به ضخامت ۵، نوع المان را Solid و در مدل‌سازی نمونه SB-۲ با توجه به نسبت عرض به ضخامت ۲۵، نوع المان Shell در نظر گرفته شده است که اهمیت ابعاد هندسی در تحلیل عددی را نشان می‌دهد. شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نمودار بار-تغییر مکان نمونه‌ها تحت بارگذاری خمش سه نقطه و مقایسه بین نتایج



شکل ۲۱. شکل شماتیک توزیع تنش بر روی ضخامت تیر ساندویچی؛ الف) توزیع تنش نرمال، ب) توزیع تنش برشی [۲۱].

Fig. 21. Schematic figure of stress distribution on the thickness of sandwich beam a) normal stress distribution; B) Shear stress distribution [21].

و همکاران [۲۲] برابر ۱۵ میلی‌متر و ضخامت رویه‌ها برابر ۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده بود. در تحقیق یاد شده، رویه‌ها از جنس ورق GFRP بودند. دهانه نمونه‌ها برای آزمایش‌های خمشی برابر ۶ سانتی‌متر در نظر گرفته شده بود که با توجه به ضخامت نمونه‌ها، نسبت دهانه به ضخامت برابر ۴ است. تیرهای ساندویچی مطالعه شده توسط مینس و الیاس<sup>۲</sup> [۲۳] دارای ضخامت رویه و هسته به ترتیب برابر ۱ و ۱۰ میلی‌متر بودند که با داشتن دهانه‌ای برابر ۲۰۰ میلی‌متر، نسبت دهانه به عمق در این تیرهای ساندویچی تقریباً برابر ۱۷ بود.

تیرهای ساندویچی مورد مطالعه در این پژوهش دارای مقاطع پنج‌لایه‌ای است که از دو لایه فولادی به ضخامت  $T_1$  و سه لایه الاستومری به ضخامت‌های  $T_2$ ،  $C_T$  و  $C_B$  مطابق جدول ۶ و شکل ۲۲ تشکیل شده است که این ابعاد مطابق شرایط اجرایی و با در نظر گرفتن مطالعات پیشین تعیین شده است. طول تیرهای ساندویچی برای داشتن اتکای مناسب با تکیه‌گاه‌ها حدود ۵۰ میلی‌متر بلندتر از دهانه در نظر گرفته شده است. آزمایش انجام شده بر اساس امکانات، محدودیت‌ها، تجهیزات موجود و با توجه به دستورالعمل ASTM-C۳۹۳ [۲۴] انجام گرفته است. رویه‌های مورد استفاده در تیرهای ساندویچی همان صفحات فولادی بودند که تحت بارگذاری خمشی در بخش قبل مورد مطالعه قرار گرفتند. برای ساخت

با توجه به شرایط هندسی تیرهای ساخته شده، اقدام به مدل‌سازی تیرهای ساندویچی در برنامه اباکوس گردید. هدف از این مدل‌سازی، صحت‌سنجی روند مدل‌سازی ساختار مذکور در برنامه عددی می‌باشد تا بتوان مطابق نتایج بدست آمده از هر دو نمونه آزمایشگاهی و عددی، بهترین مدل‌سازی را انجام داد و بتوانیم در پژوهش‌های آتی با توجه به این فرضیات بدست آمده، از این ساختار در کاربری‌های مختلف از جمله عرشه پل استفاده کنیم.

#### ۴-۱- آزمایش خمشی سه‌نقطه روی تیر ساندویچی

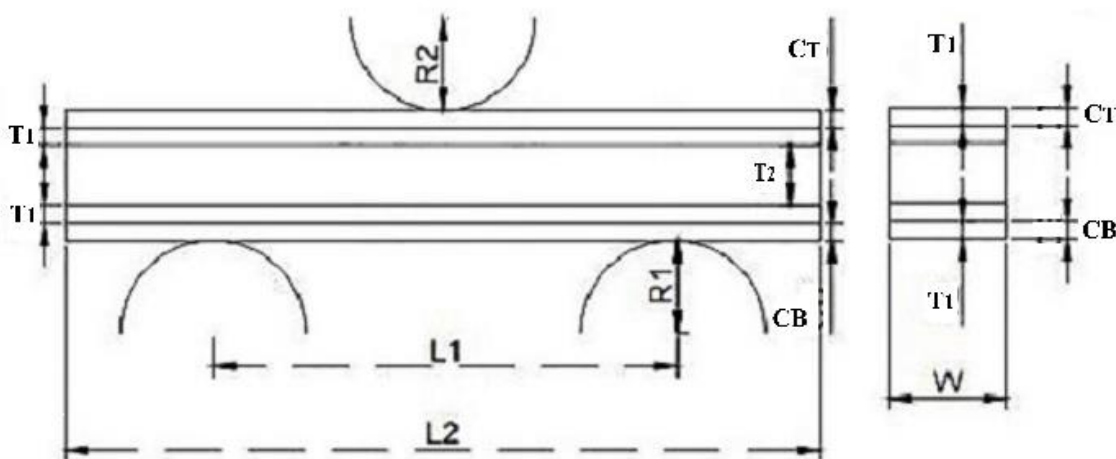
شکل شماتیک توزیع تنش در یک تیر ساندویچی با هسته ترد در شکل ۲۱ نشان داده شده است [۲۱]. با داشتن چنین توزیع تنش بر روی هسته در فوم‌های ترد انتظار می‌رود رفتار هسته غالباً تابع خواص مکانیکی برشی ماده باشد. حال آنکه در صفحات الاستومری با وجود کمبود سختی برشی، عملکرد صفحه الاستومری به عنوان هسته باید به صورت دقیق‌تری بررسی شود. از این رو، به منظور شناخت دقیق‌تر مکانیزم تحمل بار در این ماده تحت بارهای عمود بر صفحه، آزمایش سه‌نقطه خمشی بر روی تیرهای ساندویچی انجام گرفت.

برای انتخاب ابعاد نمونه‌ها، تحقیقات قبلی بررسی شده است. به عنوان مثال، ضخامت کل تیر ساندویچی در تحقیقات انجام شده توسط کوریگلیانو<sup>۱</sup>

جدول ۶. ابعاد تیرهای ساندویچی نشان داده شده در شکل ۲۲.

Table 6. Dimensions of sandwich beams shown in Figure 22.

پارامتر	$L_1$ (mm)	$L_2$ (mm)	$T_1$ (mm)	$T_2$ (mm)	$C_T$ (mm)	$C_B$ (mm)	$R_1$ (mm)	$R_2$ (mm)	$W$ (mm)
SPSB – 1	۲۰۰	۳۰۰	۴	۱۷	۵	۱۰	۵۰	۵۰	۱۰۰
SPSB – 2	۲۰۰	۳۰۰	۴	۱۷	۱۰	۵	۵۰	۵۰	۱۰۰



شکل ۲۲: ابعاد پارامتری نمونه‌های ساندویچی و تکیه‌گاه‌های نشان داده شده در جدول ۶

Fig. 22. Parametric dimensions of sandwich samples and supports shown in Table 6.

به ذکر است که پس از باربرداری نمونه‌هایی که خم شده بودند، به دلیل خواص الاستوپلاستیک لایه‌های الاستومری، به صورت یکپارچه تا حدی به حالت اولیه برگشتند. شکل‌های ۲۴ تا ۲۶، به ترتیب تیر ساندویچی زیر دستگاه بارگذاری سه‌نقطه خمشی در سه لحظه بارگذاری، بلافاصله پس از اتمام بارگذاری و لحظاتی پس از بارگذاری را نشان می‌دهد.

#### ۴-۲- شبیه‌سازی المان محدود تیرهای ساندویچی

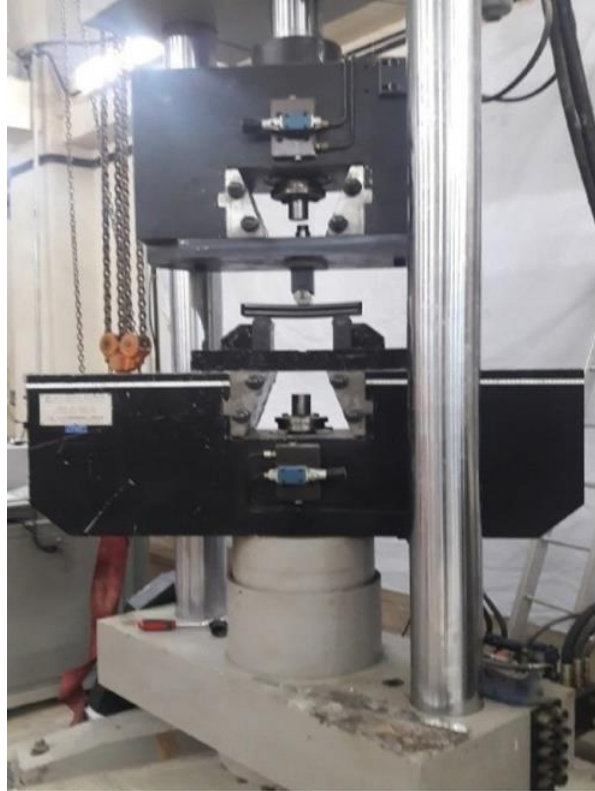
برای شبیه‌سازی مدل اجزای محدود تیرهای ساندویچی، صفحات فولادی و هسته الاستومری مطابق ملاحظات قبلی مدل‌سازی شدند. در

نمونه‌ها، پس از بریدن اجزای تیر ساندویچی، رویه‌ها توسط چسب اپوکسی<sup>۱</sup> و با اتصال گرم به فوم هسته که حالت خمیری داشتند، متصل شدند. پس از اتصال رویه‌های بالایی و پایینی به فوم هسته، مجموعه تحت فشار نسبی قرار داده شد تا حباب‌های هوا از فضای اتصال خارج شود و به ایجاد یک جسم یکپارچه منجر شود.

برای انجام این آزمایش با توجه به سختی خمشی فوق‌العاده بالای نمونه، مطابق شکل ۲۳ از دستگاه دارتک با ظرفیت ۱۰۰ تن، بر اساس کنترل تغییرمکان و با سرعتی برابر ۰/۰۲ میلی‌متر بر ثانیه استفاده شد. لازم

1 Epoxy





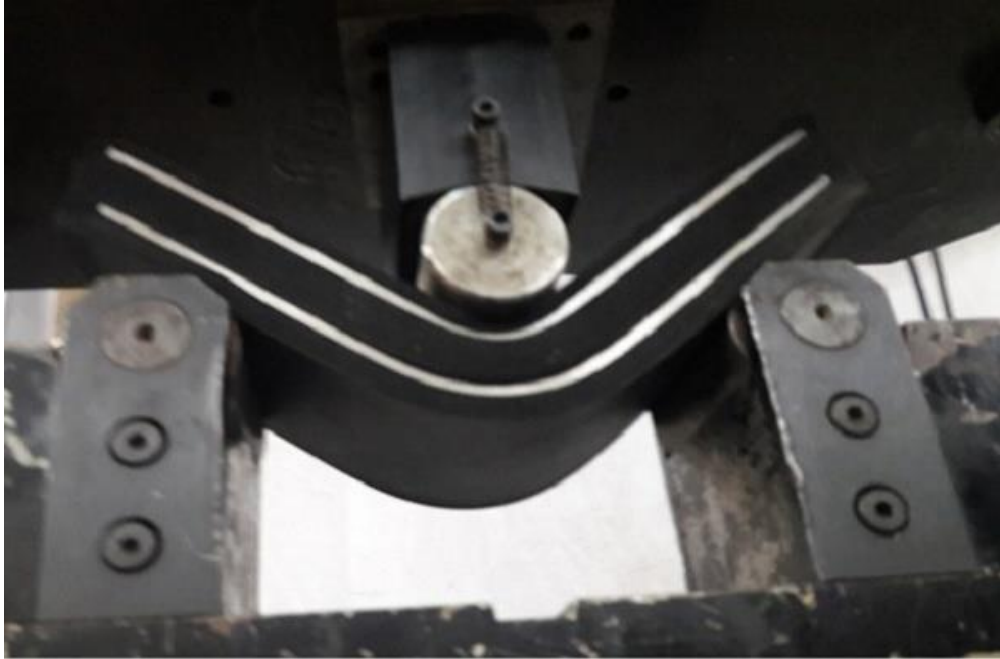
شکل ۲۳. دستگاه دار تک برای انجام آزمایش خمش

Fig. 23. Dartek machine for bending test



شکل ۲۴. نمونه ساندویچ در حین بارگذاری

Fig. 24. Sample sandwich during loading



شکل ۲۵. نمونه ساندویچی لحظه‌ای که به زاویه ۹۰ درجه می‌رسد.

Fig. 25. Example of a moment sandwich that reaches a 90 degree angle.



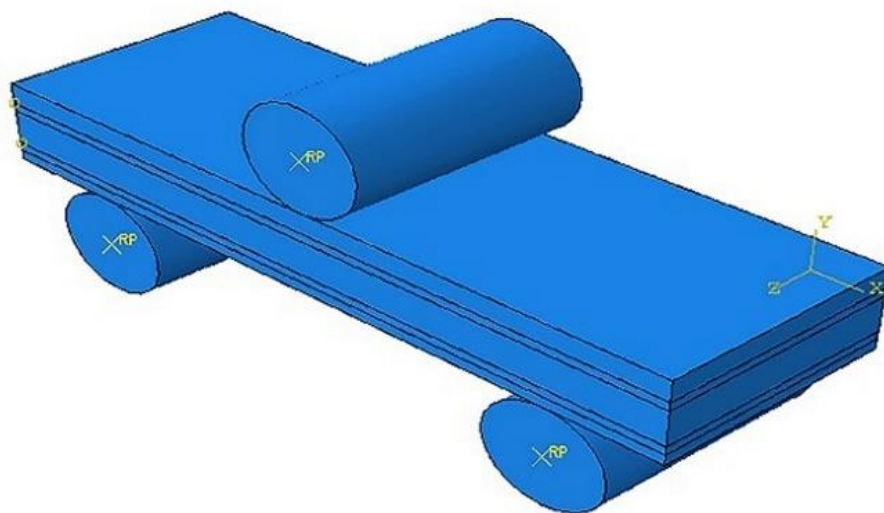
شکل ۲۶. نمونه ساندویچی پس از برداشتن بار.

Fig. 26. Sandwich sample after loading.

بر اساس تحقیقات متعدد در مدل‌سازی تیرهای ساندویچی از مدل‌سازی چسب اتصال‌دهنده رویه به هسته صرف‌نظر می‌شود. ضخامت کم چسب باعث می‌شود با صرف‌نظر از وجود آن، تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در نتایج اجزای محدود ملاحظه نشود. البته توجه شود که در هیچ‌یک از تیرهای ساندویچی آزمایش شده، جداشدگی رویه از هسته در زمان آزمایش مشاهده نشد. لذا ارتباط بین هسته و رویه به صورت یک ارتباط مقید و ناگسستگی در طول زمان بارگذاری در نظر گرفته شد. این ارتباط توسط قید Tie در نرم‌افزار آباکوس تعریف شده است. تماس بین تیر ساندویچی و تکیه‌گاه‌ها همانند ارتباطی که در قسمت‌های قبل بین صفحات فولادی و تکیه‌گاه‌ها تعریف شد، منظور گردید. در شکل‌های ۲۷ و ۲۸، مدل عددی ساخته شده از این تیر ساندویچی با المان‌های آجری قبل و پس از اعمال بارگذاری نشان داده شده است. نوع تحلیل در این مدل‌سازی براساس کنترل تغییرمکان است. کانتور نشان داده شده در شکل ۲۸ که با علامت U نشان داده شده است، میزان تغییر شکل نمونه SPSB بر حسب میلی‌متر را بیان می‌کند.

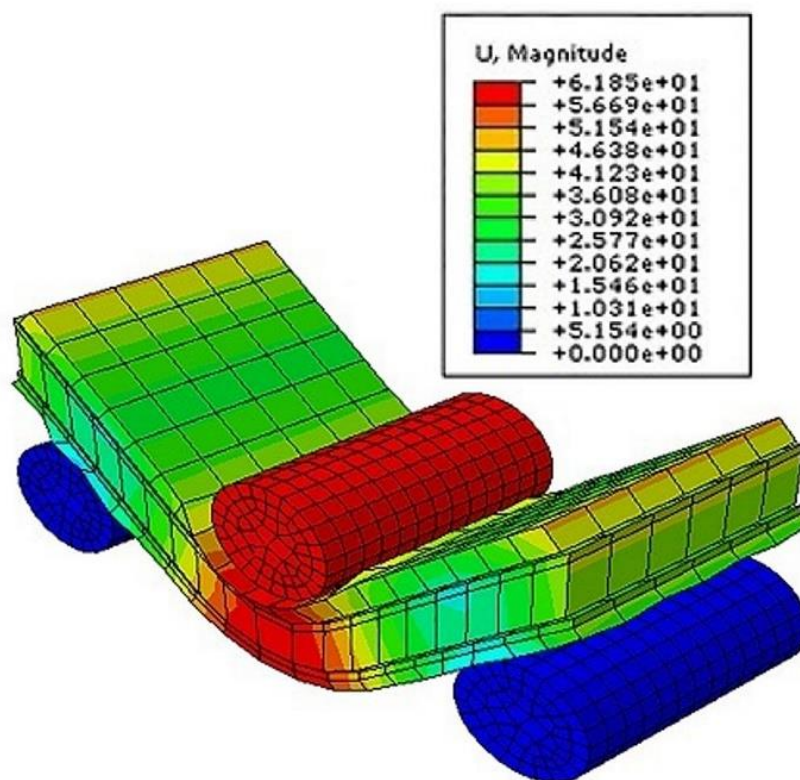
در شکل‌های ۲۹ و ۳۰، نمودارهای بار-تغییر مکان به دست آمده از مدل‌های المان محدود در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است. در مورد هر نمونه، مشاهدات فیزیکی با نتایج مشاهده شده در مدل‌های المان

مدل‌سازی صفحات الاستومری و صفحات فولادی، نوع مقاطع به ترتیب بصورت Solid و Shell در نظر گرفته شده است. صفحات الاستومری به صورت Hyperelastic و با استفاده از روش چند جمله‌ای مرتبه اول و مطابق ضرایب جدول ۲ مدل‌سازی شده است. مشخصات مکانیکی صفحات فولادی نیز مطابق جدول ۴ و شکل ۹ در حالت الاستیک و پلاستیک مدل‌سازی شده است. تحلیل به صورت استاتیکی و تغییرشکل‌های بزرگ در تحلیل با گزینه Nlgeom در نظر گرفته شده است. شکل المان به صورت Quad و روش مش‌بندی به صورت Structured انتخاب شده است. با توجه تراکم‌ناپذیری صفحات الاستومری، نوع المان Hybridformula-tion در نظر گرفته شده است. نماد المان صفحات الاستومری CAX4RH و صفحات فولادی CAX4R می‌باشد. ابعاد مش در هر سه جهت و نوع مش، در حالت‌های مختلف بررسی و با توجه به بیشترین همگرایی با نتایج آزمایشگاهی تعیین شده است. تکیه‌گاه‌ها به صورت صلب مدل‌سازی شده و بین تکیه‌گاه و تیر رابطه تماسی در هر دو جهت افقی و قائم برقرار شد که در جهت افقی، تماس با یک ضریب اصطکاک برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است. دو تکیه‌گاه تحتانی، درجات آزادی در هر سه جهت اصلی مقید شده و در غلتک فوقانی درجات آزادی در جهت طولی و عرضی تیر مقید شده است.



شکل ۲۷. مدل عددی نمونه ساندویچی SPSB قبل از بارگذاری

Fig. 27. Numerical model of the SPSB sandwich sample before loading



شکل ۲۸. مدل عددی نمونه ساندویچی SPSB بعد از بارگذاری

Fig. 28. Numerical model of the SPSB sandwich sample after loading.

مناسب انجام نمی‌شود و این یک عیب محسوب می‌شود؛ اما روند خرابی چندمرحله‌ای و بازیابی قابل توجه مقاومت پس از شکست رویه‌ها در این نوع تیرها، مزیتی است که در انواع تیرهای دیگر با هسته‌های مختلف کمتر گزارش شده است. خرابی تیرهای ساندویچی مشاهده شده توسط لیم<sup>۱</sup> و همکاران [۲۵]، سوکولینسکی<sup>۲</sup> و همکاران [۲۶] و کارپینو<sup>۳</sup> و همکاران [۲۷] که نشان‌دهنده نداشتن توانایی هسته فوم در بازگردانی توان تحمل بار در تیر ساندویچی است، مزیت استفاده از فوم الاستومری در تیرهای ساندویچی را مشخص می‌سازد.

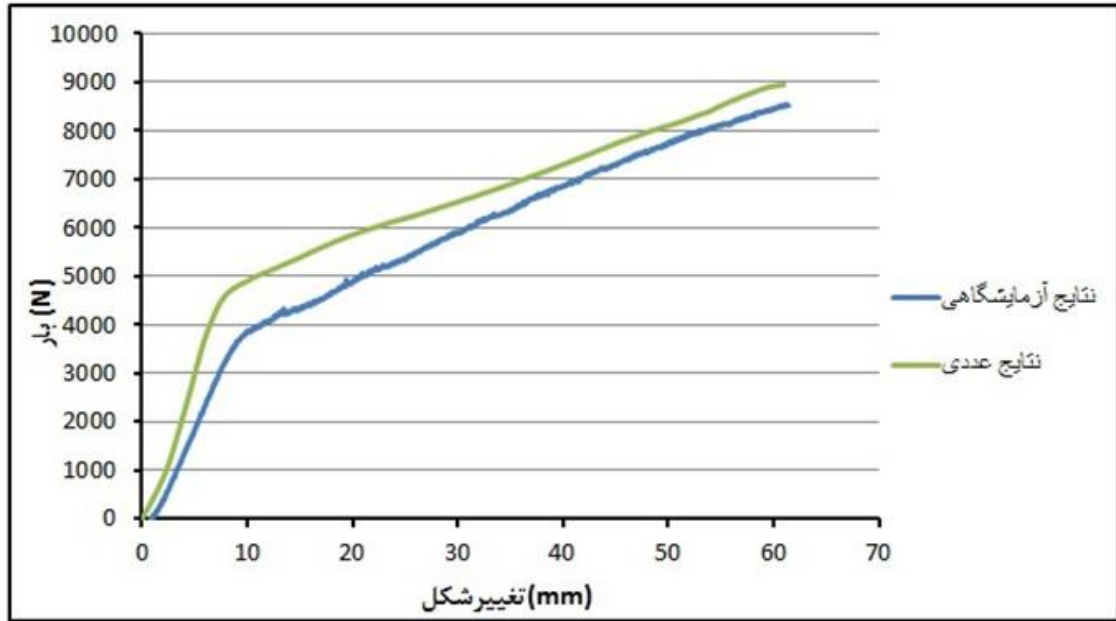
##### ۵- نتیجه‌گیری

گرچه مطالعات وسیعی در مورد رفتار تحمل بار و انواع مختلف خرابی در تیرهای ساندویچی با رویه‌ها و هسته‌های مختلف انجام شده است؛ اما

محدود مقایسه شده است. در مقطع ساندویچی صفحات الاستومری در برابر فشار و صفحات فولادی در برابر کشش عملکرد بهتری از خود نشان داده‌اند. در نمونه‌ای که لایه پوشش زیرین کمتر است، فولاد مقاومت بیشتری نشان داده است و در نتیجه ظرفیت باربری نمونه بیشتر شده است.

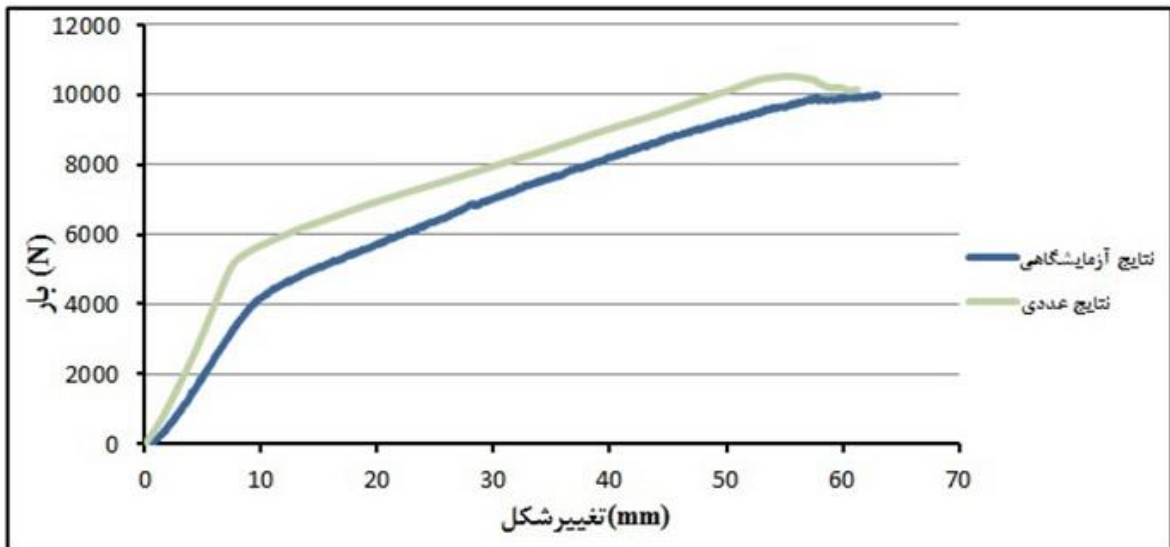
مطابق با رفتار کلاسیک تیر، انتقال بار در تیرها توسط تنش نرمال بر روی مقطع انجام می‌شود که این تنش‌ها به صورت غیریکنواخت بر اساس مقدار مدول الاستیسیته در تیرها کششی یا فشاری هستند؛ اما در تیر ساندویچی که امکان خیز زیاد تیر برای رسیدن به شکست نهایی وجود دارد، تنش فشاری خارج از صفحه در نواحی زیر دماغه بارگذاری اهمیت زیادی می‌یابد. المان‌های هسته در چنین حالتی تحت تنش چندمحوره قرار دارند که نوع این تنش‌ها در طول تیر به صورت فشاری یا کششی متفاوت است و از این جهت دقیق‌ترین شبیه‌سازی از رفتار هسته، رفتار هایپرالاستیک است. بنابراین در تیرهای ساندویچی با هسته‌هایی از جنس فوم الاستومری، گرچه به نظر می‌رسد انتقال تنش بین رویه بالایی و پایینی به صورت

1 Epoxy  
2 Sokolinsky  
3 Caprino



شکل ۲۹. نمودار بار- تغییر مکان نمونه SPSB-۱ تحت بار خمشی

Fig. 29. Load diagram - SPSB-1 specimen displacement under flexural load.



شکل ۳۰. نمودار بار - تغییر مکان نمونه SPSB-۲ تحت بار خمشی.

Fig. 30. Load diagram - SPSB-2 specimen displacement under flexural load.

فوم‌های خردشونده که با از دست رفتن مقاومت رویه‌ها، به کلی توان باربری خود را از دست می‌دهند. از این‌رو، با تقویت برشی هسته می‌توان این نوع ساختار را به عنوان عرشه پل‌ها که به جذب انرژی زیاد نیاز دارند، بررسی و ارزیابی کرد.

### منابع

- [1] Carlsson, L.A. and Kardomateas, G.A., 2015, Structural and Failure Mechanics of Sandwich Composites, Department of Mechanical Engineering, USA.
- [2] Manalo A, Aravinthan T, et al. State-of-the-art review on FRP sandwich systems for lightweight civil infrastructure. *J Compos Constr* 2016; 21: 04016068.
- [3] Tuwair H, Drury J and Volz J. Testing and evaluation of full scale fiber-reinforced polymer bridge deck panels incorporating a polyurethane foam core. *Eng Struct* 2019; 184: 205–216.
- [4] Murton, M. C. (1999). "Commercialization of FRP bridge decks: Lessons and challenges for Ohio's project 100." *Proc. Int. SAMPE Symp. Exhibition*, 46(I), 943–951.
- [5] Chroscielewski J, Miskiewicz M, Pyrzowski Ł, et al. A novel sandwich footbridge – practical application of laminated composites in bridge design and in situ measurements of static response. *Compos Part B-Eng* 2017; 126: 153–161.
- [6] Tagarielli V.L., Fleck N.A., Deshpande V.S., 2004, "Cold lapse of clamped and simply supported composite sandwich beams in three-point bending", *Journal of composites: Part B*, Vol. 35, PP. 523-534
- [7] Triantfillou T.C., Gibson L.J., 1987, "Failure mode maps for foam core sandwich beams", *Materials Science and Engineering*, Vol. 95, PP. 37-53.
- [8] Corigliano A., Rizzi E., Pap E., 2000, "Experimental characterization and numerical simulation of a syntactic-foam/glass-fibre composite sandwich", *Composites Science and Technology*, Vol. 60, PP. 2169-2180
- [9] Mines R.A.W., Alias A., 2002, "Numerical simulation of the progressive collapse of polymer composite sandwich beams under static loading", *Composites: Part A*, Vol. 33, PP.11-26
- [10] Flores-Johnson E.A., Li Q.M., 2011, "Experimental

در مورد تیرهای ساندویچی با هسته‌های فوم الاستومری تاکنون مطالعه‌ای نشده است. نتایج ارائه شده در این تحقیق نشان دادند رفتار هسته در این تیرها متفاوت از رفتاری است که برای تیرهای ساندویچی با هسته‌های ترد فرض شده است. البته شاید به نظر برسد که استفاده از این نوع فوم‌ها به اندازه کافی ظرفیت تحمل بار تیر را بالا نمی‌برد و برای افزایش ظرفیت باربری استفاده از فوم‌های ترد رایج مناسب‌تر است؛ اما نگاهی به نتایج این پژوهش نشان می‌دهد استفاده از فوم‌های الاستومری مزایای خاصی از جمله حذف مودهای شکست مربوط به هسته دارد که در فوم‌های ترد وجود ندارد. آزمایش‌های انجام شده روی فوم الاستومری نشان‌دهنده روابط تنش- کرنش بسیار غیرخطی و کاملاً متفاوت زیر بارهای مختلف از جمله کشش، فشار و برش بود. از این‌رو، مدل‌سازی رفتار فوم بر مبنای تئوری هاپرلاستیک انجام شد و برای بازتولید منحنی تنش-کرنش از توابع انرژی پیشنهاد شده در مراجع مختلف استفاده شد که از بین این توابع، همگراترین نتایج با نتایج آزمایشگاهی، توسط تابع مرتبه اول Mooney-Rivlin به دست آمد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از هسته صفحات الاستومری در تیرهای ساندویچی توانسته خصوصیات مکانیکی از جمله حداکثر ظرفیت باربری و انرژی جذب شده در نمونه‌ها را نسبت به این پارامترها در صفحات فولادی تنها بهبود بخشد؛ اما این افزایش برای نمونه‌هایی با رویه‌های مختلف، متفاوت است. استفاده از صفحات الاستومری گرچه در وظیفه انتقال تنش بین رویه بالایی و پایینی دارای ضعف بود؛ اما مزایایی مانند بازیابی توان تحمل بار پس از شکست رویه‌ها در مورد این تیرهای ساندویچی خاصیت ارزشمندی بود.

از معایب این فوم‌ها برای استفاده در هسته، سختی کم و تغییرشکل زیاد تیر به علت خصوصیت الاستومری بود که می‌توان با بیشتر کردن مدول الاستیسیته در فوم‌های الاستومری آن را مرتفع کرد.

به علت سختی کم فوم الاستومری و در نتیجه کاهش نیروهای لایه‌ای بین رویه و هسته، آسیب از نوع جدایش رویه از هسته در این تیرها مشاهده نشد. در مشاهدات آزمایشگاهی و مدل‌های المان محدود ملاحظه شده در این پژوهش نسبت افزایش جذب انرژی در مقایسه با نسبت افزایش ظرفیت تحمل بار در این تیرها قابل‌ملاحظه‌تر بود.

تیرهای ساندویچی با هسته الاستومری در تغییرشکل‌های بزرگ، رفتار برگشت‌پذیر دارند؛ از این‌رو، بکارگیری آن‌ها در مورد تیرهایی که به جذب انرژی زیاد نیاز دارند، از جمله عرشه پل‌ها، بسیار مناسب هستند. این نوع فوم‌ها در صورت آسیب رویه‌ها دارای مقداری مقاومت هستند؛ برعکس

- lating materials, ASTM: D790-07, 2007
- [20] Zweben C. 1994. "Is there a size effect in composite materials and structures" *Composites Vol.25*, PP. 228-262.
- [21] Triantfillou t.c., Gibson L.J., 1987, "Failure mode maps for foam core sandwich beams", *Materials Science and Engineering*, Vol. 95, PP.37-53
- [22] Corigliano A., Rizzi E., Pap E., 2000, "Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam/glass-fibre composite sandwich", *Composites Science and Technology*, Vol. 60, PP. 2169-2180
- [23] Mines R.A.W., Alias A., 2002, "Numerical simulation of the progressive collapse of polymer composite sandwich beams under static loading", *Composites: Part A*, Vol. 33, PP. 11-26
- [24] ASTM. (2011b). "ASTM standard test method for flexural properties of Sandwich constructions ." C393/C393M-11e1, West Conshohocken, PA.
- [25] Lim T.S., Lee C.S. and Lee D.G., 2004, "Failure Modes of Foam Core Sandwich beams under static and Impact loads", *Journal of Composite Materials*, Vol 38, PP. 1639-1662.
- [26] Sokolinsky V.S., Shen H., Vaikhanski L., Nutt R.S., 2003, "Experimental and analytical study of nonlinear bending response of sandwich beams", *Composite Structures*, Vol. 60, PP. 224
- [27] Caprino G., Durante M., Leone C., Lopresto V., 2015, "The effect of shear on the local indentation and failure of sandwich beams with polymeric foam core loads in flexure", *Composites: Part B*, Vol.71, PP.45-51.
- study of sandwich panels with carbon fibre-reinforced polymer face sheets and polymeric foam core", *Composites: Part B Vol. 42*, PP. 1212-1219.
- [11] Hassan, T., Reis, M., 2003, *INNOVATIVE 3-D FRP SANDWICH PANELS FOR BRIDGE DECKS*, North Carolina State University, USA.
- [12] Tuwair, H. and Volz, J., 2015, *Testing and Evaluation of Polyurethane-Based GFRP Sandwich Bridge Deck Panels with Polyurethane Foam Core*, Univ of Science and Technology, Missouri.
- [13] Camata G., Shing P. B., 2010, "Static and fatigue load performance of a gfrp honeycomb bridge deck", *Composites: partB*, 41, PP. 299-307
- [14] Siwowski TW, Kaleta D and Rajchel M. Structural behaviour of an all-composite road bridge. *Compos Struct* 2018; 192: 555–567.
- [15] Ascione L, Gutierrez E, Dimova S, et al. Prospect for new guidance in the design of FRP: support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016
- [16] Markmann G., Verron E., 2006, "Comparison of hyperelastic models for rubber like materials", *Rubber Chem Technol*, Vol. 79, PP.835-858
- [17] American Society for Testing and Materials – ASTM. ASTM Standard D638. Standard test method for tensile Properties of plastics. West Conshohocken: ASTM: 2010. Available from: [www.astm.org/Download-D638.pdf](http://www.astm.org/Download-D638.pdf). Access in: 08/17.20114.
- [18] American Society for Testing and Materials .ASTM Standard A370. Standard test method for tensile Properties of Steel. ASTM: 2000.
- [19] ASTM standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insu-

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A.R. Rahai, A.R. Golshan, M.R. Golshan, *Experimental and Numerical Study of Bending Behavior of Sandwich Beams with Steel Surfaces and Elastomeric Core*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(11) (2022) 4743-4766.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18510.6884



