



Semnan University



Research Article

Simulation of Fracture in First Mode Through Debonding of Composite Skin from Elastomeric Foam Core in Sandwich Beams

Ali Reza Nazari ^{a,*}, Amir Hossein Karimi ^a

^a Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 30 August 2023

Revised: 12 November 2023

Accepted: 09 December 2023

Keywords:

Debonding,
Sandwich beam,
Composite skin,
Elastomeric foam,
Hyperelastic response.

ABSTRACT

Debonding of skin from core in sandwich beams has been concerned in many studies. In the present paper, the influence of first mode of fracture for debonding of composite skins from elastomeric foam core in sandwich beams was investigated through sufficient experiments and FE simulations. According to the results of experiments on DCB specimens, made by PE-EVA foam and composite E-glass skins, the critical value for strain energy release rate related to the first mode of fracture was measured.

The experimental specimens were simulated by FE models, considering hyperelastic response for elastomeric foam of the core, calibrated by compression, tension and shear tests on the foam and the load-displacement curves were compared for experiments and FE models using the FE models distribution of various components of stress along the foam core for the sandwich beams, with different responses of foam. The FE results related to assumption of shear response for foam were the most accurate numerical results compared to other models with tensile and compressive responses of the foam. Although the maximum value of the shear stress in the most accurate model was equal to 25% of the maximum normal stress to the beam longitudinal direction, simulation of debonding in sandwich beam based on shear response of foam core could achieve the most accurate results.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.31639.2522>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding Author.

E-mail address: arnazari@tvu.ac.ir

How to cite this article:

Nazari, A., & Karimi, A. H. (2024). Simulation of fracture in first mode through debonding of composite skin from elastomeric foam core in sandwich beams. *Journal of Modeling in Engineering*, 22(77), 57-67. doi: 10.22075/jme.2023.31639.2522

مدل سازی مود اول شکست در جدایش رویه کامپوزیتی از هسته فوم الاستومری به کار رفته در تیرهای ساندویچی

علیرضا نظری^{۱*}، امیرحسین کریمی^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۰۸	جدایش رویه از هسته در تیرهای ساندویچی یکی از مودهای خرابی شایع بوده و تحقیقات زیادی برای بررسی تاثیر مودهای مختلف شکست در این نوع خرابی انجام شده است. در مقاله حاضر، جدایش رویه کامپوزیتی از هسته فوم الاستومری در تیرهای ساندویچی با انجام آزمایش و مدل سازی المان محدود بررسی شده است که در مورد این نوع هسته ها سابقه نداشته است. مطالعه آزمایشگاهی بر روی تیرهای DCB ساخته شده از یک نوع فوم الاستومری با جنس PE-EVA و رویه های کامپوزیتی با الیاف شیشه (E) انجام شده و مقدار بحرانی نرخ رهاسازی انرژی کرنشی در این نمونه ها اندازه گیری شده است. در ادامه، مدل سازی المان محدود از نمونه های آزمایشگاهی انجام شده و با توجه به پیچیده بودن پاسخ فوم هسته در تیرهای DCB، سه رفتار مختلف هیبرالاستیک شامل رفتارهای فشاری، کششی و برشی برای فوم هسته در مدل ها تعریف و نتایج بار-جابجایی ملاحظه شده برای مدل های مختلف با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. از مزایای مدلسازی المان محدود، بدست آوردن نمودارهایی برای توزیع مولفه های مختلف تنش در هسته تیرهای DCB می باشد. نتایج عددی، مدل های کالیبره شده با پاسخ برشی فوم را دارای دقت بیشتر نشان داده است و گرچه در مدل ها، اندازه مقدار ماکزیمم تنش برشی نسبت به تنش نرمال حدود ۲۵٪ بوده است، اما شبیه سازی رفتار فوم هسته بر اساس پاسخ برشی فوم توانسته دقیق ترین نتایج را برآورد کند که نشانگر رفتار غالب در تیرهای DCB با هسته الاستومری بوده است.
بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۱۸	
واژگان کلیدی: جدایش رویه از هسته، شکست مود اول، تیر ساندویچی، فوم الاستومری، رویه کامپوزیتی، رفتار هیبرالاستیک.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.31639.2522>

© 2024 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱-مقدمه^۱

جدایش بین لایه ها یکی از مودهای شایع خرابی در ورق های چند لایه و یا ساندویچی است که باعث از دست رفتن بخشی از ظرفیت باربری شده و با گسترش آن ممکن است موجب انهدام سازه شود، از این رو، محققین زیادی ابعاد مختلف این شکل خرابی را در مورد انواع سازه های چند لایه و ساندویچی مورد بررسی قرار داده اند. عموماً جدایش بین لایه های با فعال شدن یک یا ترکیبی از سه مود شکست اتفاق می افتد که مود اول تحت تاثیر نیروهای نرمال بر جبهه ترک

و دو مود دیگر تحت تاثیر نیروهای برشی در جبهه ترک واقع می شود [۱]. در مقاله حاضر بررسی مود اول شکست مود نظر می باشد. تست های استاندارد موجود برای بررسی جدایش بین لایه های تحت تاثیر مود اول شکست، غالباً نمونه ای را به نام تیر دو لبه شده گیردار^۲ پیشنهاد داده اند که دو لبه بالایی و پایینی این نمونه بصورت متقارن می باشد، حال آنکه در مسئله جدایش رویه از هسته در تیرهای ساندویچی، تیر دولبه دارای لبه های متقارن نیست. جهت مرور بخشی از تحقیقات انجام شده در مورد تاثیر مود

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: arnazari@tvu.ac.ir

۱. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه ای، تهران، ایران.

² Doubly cantilever beam (DCB)

استناد به این مقاله:

نظری، علیرضا، و کریمی، امیرحسین. (۱۴۰۳). مدل سازی مود اول شکست در جدایش رویه کامپوزیتی از هسته فوم الاستومری به کار رفته در تیرهای ساندویچی. مدل سازی در مهندسی، ۲۲(۷۷)، ۵۷-۶۷. doi: 10.22075/jme.2023.31639.2522

جدایش بین رویه و هسته، با تغییر مصالح مورد استفاده، ملاحظه این رفتار در مورد تیرهای دارای هسته از جنس فوم الاستومری و رویه کامپوزیتی در این مقاله مورد نظر می‌باشد. مزایای کاربرد فوم‌های الاستومری در مقابل فرم‌های ترد، شامل برگشت‌پذیری تغییر شکل فوم و تاثیر کم خرابی‌های مربوط به هسته، را می‌توان از عوامل کاربرد این فوم‌ها در سازه‌های ساندویچی برشمرد [۱۳]. حال آنکه این کاربرد نیازمند شناخت دقیق رفتار پیچیده این فوم‌ها در شرایط مختلف بارگذاری و در برابر انواع خرابی‌ها از جمله جدایش رویه از هسته می‌باشد.

فوم‌های الاستومری از شبکه سلولی باز تشکیل شده‌اند که تحت فشار، دیواره‌های سلولی آن‌ها دچار کمانش شده و منجر به نرم‌شدگی قابل توجه می‌شود، حال آنکه با همراستا شدن دیواره‌های سلولی در برابر کشش، سختی ماده نسبت به عملکرد فشاری آن افزایش می‌یابد [۱۴]. از آنجا که زنجیره‌های سلولی بر روی هم دچار لغزش می‌شوند پاسخ فوم‌های الاستومری در برابر تنش برشی ضعیف‌تر ملاحظه می‌شود [۱۳]، لذا طراحی کاربردی این فوم‌ها نیازمند ارائه تحلیل دقیق نسبت به پاسخ فوم در شرایط مختلف بارگذاری می‌باشد تا رفتار حاکم بر فوم تحت بارگذاری‌های مختلف مشخص شود. عارفی و همکاران [۱۵، ۱۶] عملکرد کمانش و ارتعاش را در تیرهای ساندویچی دارای هسته‌های نرم و صفحات کامپوزیتی حاوی اجزای نانو ملاحظه کرده و تاثیر پارامترهای مختلف از جمله نسبت طول به ضخامت، نسبت ضخامت هسته به رویه و شرایط مرزی را در پاسخ این سازه‌ها توسط روش‌های تحلیلی برآورد کردند. اگرچه در حال حاضر مطالعاتی در مورد رفتار حاکم بر هسته‌های از جنس فوم الاستومری [۱۳] در تیرهای ساندویچی با لایه‌چینی‌های مختلف برای رویه‌های کامپوزیتی [۱۷] انجام شده، در مقاله حاضر، مطالعه رفتار این تیرها در جریان جدایش بین رویه و هسته هدف‌گذاری شد. اگرچه در مورد تیرهای ساندویچی با هسته فوم ترد، با توجه به قابل توجه بودن تنش برشی بین رویه و هسته، شکست مود دوم دارای تاثیر بزرگی بر جدایش رویه از هسته است؛ اما با توجه به مقدار کم صلبیت برشی در فوم‌های الاستومری، به نظر می‌رسد تاثیر مود دوم شکست بین لایه‌ای در این تیرها کمتر بوده و شکست مود اول دارای تاثیر بزرگتری در جدایش بین رویه و هسته باشد که موضوع مقاله حاضر است.

اول شکست در جدایش بین لایه‌ای، می‌توان به تحقیقات کیم و مایر [۲]، اندرسون و کونینگ [۳] و نقی‌پور و همکاران [۴] اشاره کرد که تاثیر تغییر جهت‌گیری الیاف و لایه‌چینی را بر روی مقاومت در برابر جدایش بین لایه‌ای ملاحظه کردند. اندرسون و کونینگ [۲] شروع و رشد ترک بین لایه‌ای را در چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف تک‌جهته بررسی کرده و دریافتند که وابسته به شکل بارگذاری و نوع لایه‌چینی، چقرمگی شکست برای چندلایه‌های کامپوزیتی افزایش یا کاهش می‌یابد. رهان [۵] با تغییر جهت الیاف در چندلایه‌های کربن-اپوکسی، تغییر در نرخ رهایی آزادسازی انرژی را که از آن بعنوان چقرمگی یاد می‌شود، اندازه‌گیری نموده است. شکریه و همکاران [۶] وابستگی رفتار نمونه‌های DCB را به زوایه الیاف در چندلایه‌های کامپوزیتی بررسی کردند. پیرا و همکاران [۷] چقرمگی شکست بین لایه‌ای مطابق مود دوم را برای چندلایه‌های دارای الیاف زاویه‌دار بررسی کردند. تریکی و همکاران [۸] جدایش بین لایه‌ای را برای ورق‌های ضخیم کامپوزیتی از جنس شیشه/پلی‌استر ملاحظه کرده و تاثیر تغییر زوایه الیاف را در مقدار چقرمگی شکست ملاحظه کردند. شکریه و زین‌الدینی [۹] چقرمگی شکست را تحت ترکیب مودهای اول و دوم در چندلایه‌های کامپوزیتی مطالعه کردند.

در مورد سازه‌های ساندویچی، موضوع جدایش بین رویه و هسته برای جنس‌های مختلف رویه و هسته مورد مطالعه قرار گرفته است. ماتانی و همکاران [۱۰] تست DCB را بر روی نمونه تیرهای ساندویچی با رویه‌های CFRP و هسته فوم از جنس رهاصل PMI ملاحظه کردند که در مدل ایشان برای شبیه‌سازی نمونه تیرهای آزمایشگاهی از مدل CZM استفاده شد. ویانا و کارلسون [۱۱] با ملاحظه ضخامت‌های مختلف برای هسته و رویه در تیرهای ساندویچی، تاثیر تغییر ضخامت هسته و رویه را در تیرهای ساندویچی در مقدار ضریب چقرمگی اندازه‌گیری شده برای جدایش اتصال بین رویه و هسته در تیرهای ساندویچی با رویه از جنس شیشه/اپوکسی اندازه‌گیری کردند. بردلی و کوهن [۱۲] عملکرد این نمونه را تحت بارگذاری‌های مختلف بر روی لبه تیرها ملاحظه کردند. اگرچه در تورق برای نمونه DCB ترکیبی از مودهای اول و دوم موثر می‌باشد، مطالعات نشان داده که تاثیر مود دوم به مراتب کمتر از تاثیر مود دوم شکست در وقوع جدایش بین لایه‌ای در تیرهای DCB می‌باشد [۹]. با توجه به تغییر رفتار

ضخامت هر لایه حدود 0.75 mm بود که برای هر ورقه چهار لایه، ضخامتی برابر 3 mm اندازه‌گیری شد. دانسیته چندلایه‌ها حدود 1800 kg/m^3 بوده و بر روی سطح خارجی آن‌ها لایه‌ای ژلاتینی به رنگ آبی با ضخامت حدود 0.1 mm جهت محافظت در برابر اثرات خارجی استفاده شد. فوم الاستومری برای استفاده در هسته تیرهای ساندویچی ترکیبی از پلی‌اتیلن و اتیلن-وینیل استات (PE-EVA) با نسبت ۲۸٪ برای جزء دوم بوده و با ضخامت 10 mm و دانسیته حدود 224 kg/m^3 در دمای اتاق جهت کاربرد در هسته تیرهای ساندویچی مورد استفاده قرار گرفت که مشخصات مکانیکی آن در جدول ۲ قابل مشاهده است. برای اتصال هسته و رویه‌های کامپوزیتی از چسب اپوکسی با مشخصات جدول ۳ استفاده شد. پس از اتصال رویه‌ها به هسته، تیرهای ساندویچی به مدت ۴۸ ساعت در گرمخانه تحت دمای 60°C قرار گرفتند که بدین منظور از وزنه‌های مناسبی جهت خارج شدن حباب‌های هوا از حد فاصل بین رویه و هسته استفاده شد. ابعاد تیر ساندوچی شامل 200 ، 25 و 16 میلی‌متر به ترتیب در مورد طول و عرض و ضخامت تیر بود. تعداد نمونه‌های مورد بررسی سه عدد بود تا از قابل اعتماد بودن نتایج اطمینان حاصل شود. استاندارد ASTM5528 [۱۹]، دو چیدمان را برای بررسی جدایش رویه از هسته در تیرهای ساندویچی پیشنهاد کرده است که نمونه دارای لولای پینوئی مطابق شکل (۱) در این مطالعه انتخاب شد. برای ایجاد جبهه جدایش بین رویه و هسته، در فاصله a طبق شکل (۱) مربوط به ناحیه ناپیوستگی رویه از هسته، قطعه‌ای کاغذ بین رویه و هسته در طولی برابر 20 mm جاگذاری شد. دستگاه مورد استفاده برای بارگذاری، HIWA و سرعت بارگذاری برابر mm/min ۳ برای فک بالایی دستگاه تعریف گردید در شرایطی که فک پایینی دستگاه ثابت بود.

جدول ۲- خصوصیات مکانیکی فوم الاستومری مورد استفاده
بعنوان هسته تیرهای ساندویچی.

فوم PE-EVA	خصوصیات مکانیکی
۱۹	مدول الاستیسیته اولیه تحت کشش (MPa)
۱۳	مدول الاستیسیته اولیه تحت فشار (MPa)
۰/۲۷۸	نسبت پواسون تحت کشش
۰/۱	نسبت پواسون تحت فشار

هدف تحقیق حاضر، ملاحظه رفتار جدایش رویه از هسته در تیرهای ساندویچی با هسته از جنس فوم الاستومری است که تاکنون کمتر مورد توجه واقع شده، حال آنکه کاربرد این نوع فوم‌ها با توجه به خصوصیت برگشت‌پذیری تغییر شکل‌ها و عدم آسیب در برابر بارهای ضربه‌ای مورد علاقه است. مسئله مهم در مورد این نوع سازه‌های ساندویچی، تفاوت زیاد رفتار هیپرالاستیک فوم‌های الاستومری تحت شرایط مختلف تنش از جمله تحت تنش‌های فشاری، کششی و برشی، و لزوم شناخت رفتار حاکم بر فوم هسته تحت تنش‌های پیچیده در جریان جدایش رویه از هسته می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق، رفتار جدایش بین رویه از هسته در تیرهای DCB دارای هسته از جنس فوم الاستومری بصورت آزمایشگاهی بررسی شده و تاثیر کاربرد توابع انرژی مختلف کالیبره شده با رفتارهای مختلف فوم بر روی نتایج، توسط مدل‌های المان محدود ساخته شده از نمونه‌های آزمایشگاهی ارزیابی شده است. ارائه توزیع تنش بر روی فوم هسته و نتایج پیشروی جدایش بین رویه و هسته در برابر بار وارده بر لبه تیرها از دستاوردهای تحقیق حاضر بوده است.

۲- مطالعه آزمایشگاهی

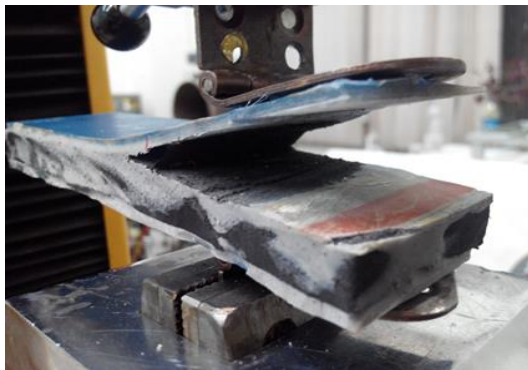
چند لایه‌های کامپوزیتی مورد استفاده برای رویه، توسط الیاف تک‌جهته از جنس شیشه-E با دانسیته 400 gr/m^2 و مقاومت کششی 600 MPa و رزین وینیل استر بعنوان ماده زمینه با استفاده از روش تزریق به قالب تحت فشار ساخته شدند. مشخصات مکانیکی چند لایه‌های مذکور که توسط آزمایشات استاندارد در جریان یک تحقیق وسیع‌تر [۱۸] بدست آمده در جدول ۱ قابل ملاحظه است.

جدول ۱- خصوصیات مکانیکی ورقه‌های کامپوزیتی مورد

استفاده برای رویه تیرهای ساندویچی [۱۸].

خصوصیات مکانیکی	لایه‌های تک‌جهته GFRP
E_1 (MPa)	۱۲۱۰۰
E_2 (MPa)	۱۴۲۰
E_3 (MPa)	۱۴۲۰
ν_{12}	۰/۲
ν_{13}	۰/۲
ν_{23}	۰/۳۵
G_{12} (MPa)	۱۰۷۰
G_{13} (MPa)	۱۰۷۰
G_{23} (MPa)	۷۷۰

و هسته تحت تاثیر بارهای ضربه‌ای بوده و مزیت محسوب می‌شود.

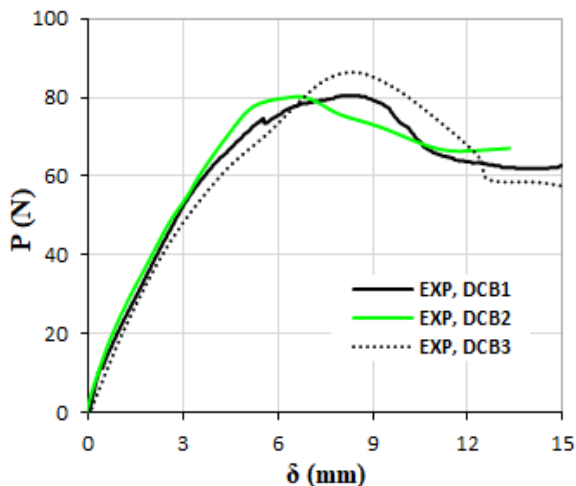


(الف)



(ب)

شکل ۲- نمونه تیر ساندویچی DCB تحت آزمایش برای بررسی جدایش رویه از هسته، (الف) نمایی از کل تیر در حال پیشروی ناحیه جداشدگی رویه از هسته، (ب) نمایی از جبهه جدایش بین رویه و هسته.



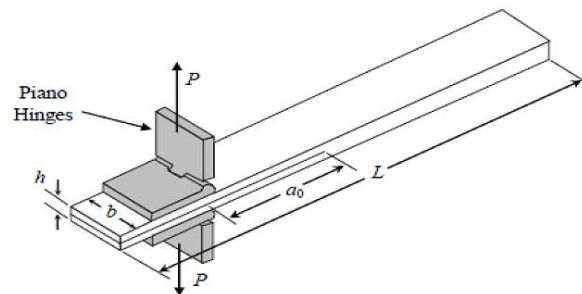
شکل ۳- نمودار بار-جابجایی مربوط به تست نمونه‌های DCB.

۳- روش مدل‌سازی المان محدود

بدلیل قابلیت بالا در شبیه‌سازی رفتارهای غیرخطی در فوم الاستومری و جدایش رویه از هسته، نرم‌افزار آباکوس [۲۰] جهت بررسی موضوع مورد مطالعه انتخاب شد. با توجه به قابلیت انعطاف بالا در ارتباط رویه کامپوزیتی و هسته فوم

جدول ۳- خصوصیات مکانیکی چسب اپوکسی برای اتصال فوم به ورق‌های کامپوزیتی.

چسب اپوکسی	خصوصیات مکانیکی
۱۱۰۰	مدول الاستیسیته (MPa)
۳۵	مقاومت کششی (MPa)
۰/۲	نسبت پوآسون



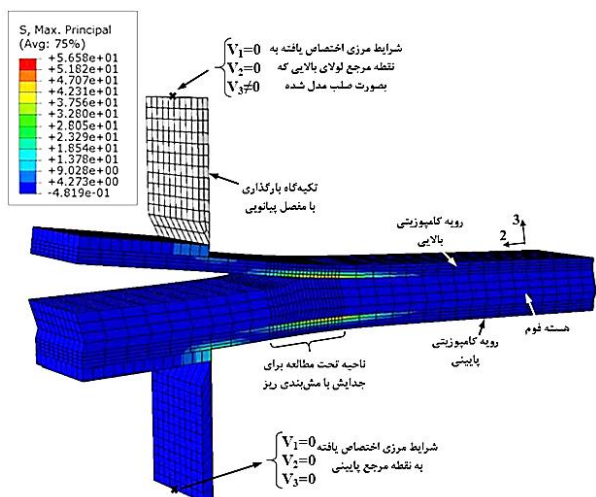
شکل ۱- شکل شماتیک چیدمان تست تیر گیردار دولبه برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست مربوط به مود اول [۱۹].

نمونه تحت آزمایش در شکل (۲) ملاحظه می‌شود. با حرکت قائم فک بالای دستگاه و قرار گرفتن جبهه جدایش بین رویه و هسته تحت تنش، جابجایی فک بالایی و همچنین بار وارده به آن از طرف دستگاه ثبت می‌شود. شکل (۳) نمودار بار (P) - جابجایی (delta) را برای سه نمونه نشان می‌دهد.

مطابق تعریف استاندارد [۱۹]، نرخ بحرانی رهاسازی انرژی کرنشی در مود اول شکست برای جدایش بین رویه و هسته مطابق با رابطه زیر بدست می‌آید.

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2ab} \quad (1)$$

که در آن پارامترهای P، delta، a و b به ترتیب بار مربوط به شروع ناحیه غیرخطی شدن منحنی بار-تغییر مکان، فاصله دو لبه از هم جدا شده در انتهای تیر مربوط به بار P، طول ناحیه دارای جدایش بین رویه و هسته و عرض تیر می‌باشد که با قرار دادن مقادیر پارامترهای معرفی شده در بالا مربوط به میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده در تست‌ها به ترتیب برابر ۳۰/۱۳ N، ۱/۵۲ mm، ۲۲ mm، ۲۵ mm مقدار G_{IC} برابر ۰/۱۲۵ N/mm بدست می‌آید. در شکل (۲) دو نما از پیشروی ترک بین رویه و هسته در تیر ساندویچی ملاحظه می‌شود. منحنی بار-تغییر مکان بدست‌آمده از تست تیرهای DCB، با نرم‌شدگی قابل توجه نسبت به نمونه‌های مشابه با کاربرد فوم ترد برای هسته هستند. این نرم‌شدگی باعث کاهش امکان جدایش بین رویه



شکل ۴- مدل المان محدود تیر DCB و معرفی اجزا و شرایط مرزی در مدل.

۳-۱- رفتار هیبرالاستیک فوم الاستومری

شبهه سازی رفتار تنش= کرنش هیبرالاستیک در مواد غیر قابل فشار معمولاً با تعریف توابع انرژی انجام می‌شود که این توابع وابسته به نامتغیرهای اول و دوم کشیدگی انحرافی معرفی می‌شوند. در این توابع برای جبران تغییر حجم در مواد قابل فشار مانند فوم الاستومری، یک عبارت مربوط به نسبت تغییر حجم نیز تعریف می‌شود.

یکی از توابع مناسب برای شبهه‌سازی رفتار هیبرالاستیک، تابع چندجمله‌ای مرتبه دوم می‌باشد که کارایی خود را برای شبهه‌سازی رفتار فوم الاستومری نشان داده است [۲۱]. این تابع بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$U = \sum_{i,j}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J - 1)^{2i} \quad (2)$$

که در آن، U تابع انرژی، N مرتبه تابع چندجمله‌ای و C_{ij} و D_i پارامترهایی هستند که از برازش این تابع با داده‌های آزمایشگاهی بدست می‌آیند. \bar{I}_1 و \bar{I}_2 به ترتیب نامتغیرهای اول و دوم کرنش انحرافی هستند که بصورت زیر معرفی می‌شوند:

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (3)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{-2} + \bar{\lambda}_2^{-2} + \bar{\lambda}_3^{-2} \quad (4)$$

که در روابط بالا پارامترهای λ مربوط به مقدار اتساع انحرافی ماده بوده و بصورت زیر معرفی می‌شوند:

$$\bar{\lambda}_i = J^{-1/3} \lambda_i \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

الاستومری و اهمیت ملاحظه تنش در جهات مختلف، نمونه بصورت سه بعدی مدل‌سازی شده که رفتار اجزای مربوط به بارگذاری و تکیه‌گاه بصورت صلب تعریف شد که در محل اتصال دو قطعه از لولا، درجات آزادی چرخشی بصورت آزاد در نظر گرفته شد. نوع المان آجری مورد استفاده برای مدل‌سازی C3D8R با سه درجه آزادی تغییر مکان و سه درجه آزادی چرخشی به ازای هر گره بود. ارتباط لولا با رویه‌ها که توسط چسب فراهم شده بود توسط قید Tie تعریف گردید. اتصال رویه و هسته در تیر ساندویچی توسط قید Tie و در ناحیه مستعد برای پیشروی ترک بصورت Contact تعریف گردید که در آن گره‌های متقابل از رویه و هسته بصورت مزدوج تعریف شد. اگرچه آسیب‌های مرتبط با رویه در سازه‌های ساندویچی به دو شکل درون لایه‌ای ناشی از تنش در لایه‌ها و نوع دیگر شکست از نوع جدایش بین لایه‌ای محتمل است، با توجه به مقادیر کم تنش ایجاد شده در رویه‌ها در نمونه DCB، شکست نوع اول در نمونه‌های فوق صرف نظر شده و خرابی صرفاً از نوع جدایش بین رویه و هسته مدل‌سازی گردید.

جهت مدل‌سازی جدایش بین رویه و هسته معمولاً از دو روش CZM و VCCT استفاده می‌شود که مزیت روش اول امکان مدل‌سازی رفتار غیرخطی مربوط به رهاسازی انرژی کرنشی در زمان جدایش و مزیت روش دوم سرعت بیشتر و سادگی اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی می‌باشد که با توجه به مزیت روش دوم، این روش برای مدل‌سازی جدایش بین رویه و هسته انتخاب شد.

مطالعه همگرایی مش‌بندی در دو مرحله یکی در مورد تعداد المان‌ها در سطح تیر و دیگری تعداد المان‌ها در ضخامت تیر صورت گرفت (بمنظور اختصار از ارائه در مقاله صرف نظر شد) که بر اساس این مطالعه، با مش‌بندی بصورت یک المان به ازای هر لایه در رویه‌های کامپوزیتی و چهار المان در ضخامت هسته نتایج با همگرایی کافی بدست آمد. تعداد کل المان‌ها در مورد رویه‌های کامپوزیتی ۵۰۰ عدد و در مورد هسته فوم ۵۰۰ عدد بود. شکل (۴) مدل المان محدود تیر DCB تهیه شده برای بررسی جدایش رویه از هسته را نشان می‌دهد. در این شکل اجزای مدل المان محدود و شرایط مرزی معرفی شده است. در ادامه توضیحات مفصل‌تری در مورد مدل‌سازی رفتار هیبرالاستیک فوم الاستومری در هسته تیر ساندویچی و روش VCCT برای بررسی پیشروی جدایش رویه از هسته ارائه شده است.

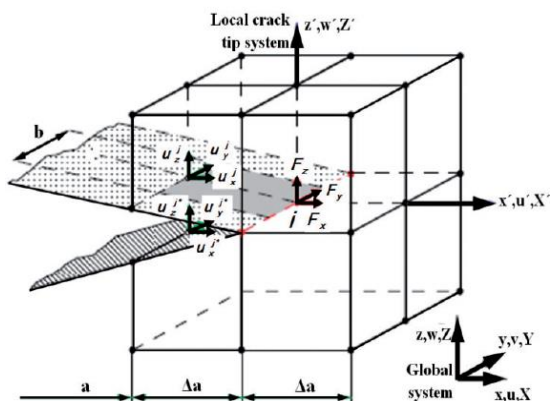
۲-۳- شبیه‌سازی جدایش رویه از هسته توسط روش

VCCT

روش VCCT برای شبیه‌سازی جدایش بین لایه‌های اولین بار توسط روش ریبری و کانین [۲۲] و کروگر [۲۳] مطرح شده و با توجه به مزایای یاد شده، تاکنون در تحقیقات زیادی کارایی خود را نشان داده است [۲۴، ۲۵]. اساس این روش بررسی امکان رشد ترک بر اساس مقایسه مقدار کار انجام شده جهت باز شدن گره‌های بسته به یکدیگر در المان‌های متصل بهم نسبت به نرخ بحرانی آزادسازی انرژی کرنشی می باشد که در صورت بزرگتر بودن مقدار کار محاسبه شده، ترک رشد کرده و در غیر این صورت متوقف خواهد بود. شکل ۶- بخشی از یک سازه با المان‌های آجری هشت گرهی را نشان می‌دهد که در آن نیروهای گرهی F_x و F_z از نوع برشی و F_y نیروی نرمال بر روی جبهه ترک می باشند. اندازه رشد ترک در هر مرحله برابر طول المان‌ها می‌باشد که با Δa نشان داده شده است. جدایش بین لایه‌ها عموماً در سه مود شامل یکی تحت تاثیر نیروهای نرمال با عنوان شکست مود اول و دو مود دیگر تحت اثر نیروهای برشی اتفاق می‌افتد که در نمونه DCB مورد اول جدایش تاثیر به مراتب بیشتری داشته و با رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$G_I = \frac{1}{2\Delta a} F_z^i (u_z^j - u_z^{j*}) \quad (7)$$

که در این رابطه $\Delta A = b \cdot \Delta a$ مساحت جبهه ترک مورد بررسی، a طول ترک و b عرض المان می‌باشد.



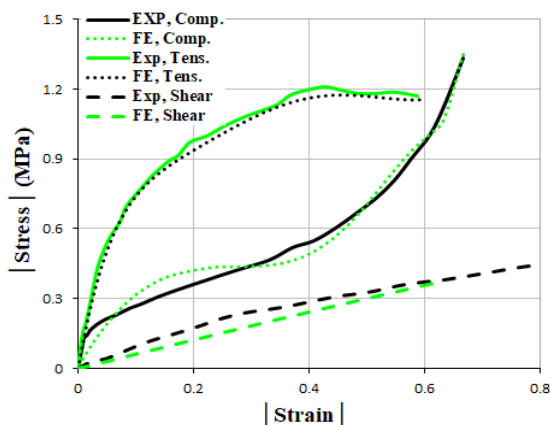
شکل ۶- معرفی پارامترهای موثر در روش VCCT برای یک المان هشت گرهی [۲۲، ۲۳].

پارامتری که در مدل المان محدود نرخ رهاسازی انرژی کرنشی را نسبت به نرخ بحرانی (G_I/G_{IC}) نشان می‌دهد، G_{SDMG} می‌باشد که مقدار صفر آن به معنی فعال نشدن نیروهای موثر در جدایش در گره مذکور و مقدار یک،

که در این رابطه J دترمینان تغییر شکل می‌باشد. برای تعیین ضرایب مربوط به ماده در تابع انرژی لازم است از یک روش برازش ضرایب توسط داده‌ها بهره برد که در نرم‌افزار آباکوس، این روند بر مبنای روش حداقل مجموع مربعات خطا انجام می‌شود. بر اساس این روش، مقادیر تنش محاسبه شده توسط نرم‌افزار با استفاده از تابع انرژی، T_i^U و مقادیر تنش اندازه‌گیری شده توسط تست آزمایشگاهی، T_i^U در رابطه زیر قرار گرفته و با مینیمم کردن تابع مربوط به مجموع مربعات خطاها، E ، مقادیر ضرایب ثابت بدست می‌آید.

$$E = \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_i^U}{T_i^{exp}}\right)^2 \quad (6)$$

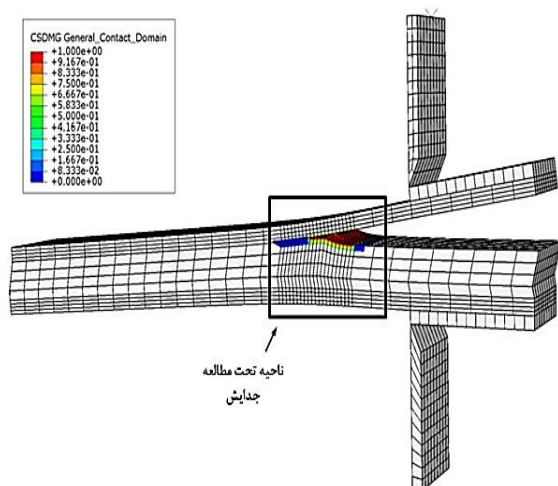
شکل (۵) نمودار تنش-کرنش بدست آمده برای فوم الاستومری مورد استفاده در هسته توسط آزمایشات مختلف و مدل المان محدود را نشان می‌دهد [۱۳] که ضرایب بدست آمده برای هر یک از رفتارها در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۵- نمودار تنش-کرنش فوم الاستومری تحت شرایط مختلف بارگذاری بدست‌آمده از آزمایش و مدل‌سازی المان محدود [۱۳].

جدول ۴ ضرایب ماده معرفی شده در تابع انرژی بدست‌آمده از برازش نتایج عددی با نتایج آزمایشات بر روی فوم الاستومری مورد استفاده در هسته [۱۳].

ضرایب	رفتار فشاری	رفتار کششی	رفتار برشی و فشاری
C ₁₀	۲۴/۲۲۴۹	-۱۹/۳۵۷۲	۵/۳۸۵۷
C ₀₁	-۲۲/۷۱۵۳	۲۲/۱۲۸۵	-۵/۰۰۰۲
C ₂₀	۱۸۷/۳۵۱۹	۱۷/۷۴۵۸	۱۵/۸۷۲۱
C ₁₁	-۲۵۱/۹۵۷	-۵۷/۸۰۴۴	-۴۴/۱۰۴۶
C ₀₂	۹۰/۷۹۹۸	۵۵/۰۷۹	۲۸/۲۳۲۶
D ₁	۰/۷۲۲۶	۰/۱۸۸	۱/۳۵۲۱
D ₂	N.A.	N.A.	N.A.



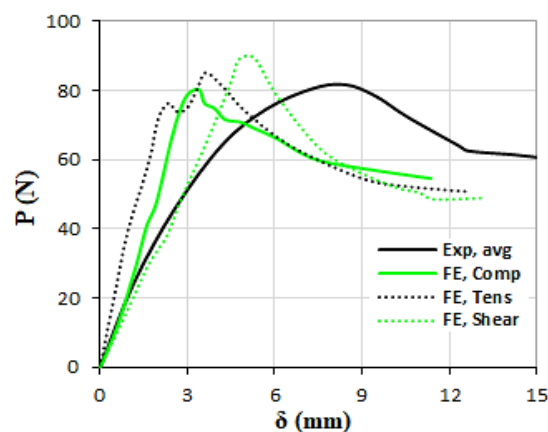
شکل ۸- نمایی از مدل المان محدود و ناحیه مورد مطالعه برای پیشرفت جدایش.

شکل (۸) نمایی از مدل المان محدود تیر DCB و ناحیه مورد مطالعه برای بررسی پیشروی جدایش را نشان می‌دهد. شکل (۹) ناحیه مورد بررسی برای پیشروی جدایش بین رویه و هسته را در مدل FE, Shear مربوط به چهار لحظه از نمودار بار-جابجایی نشان می‌دهد. ناحیه جدایش با پارامتر CSDMG در این شکل‌ها مشخص است. مدل‌های المان محدود در شبیه‌سازی نرم‌شدگی باربری در تیرهای ساندویچی قبل از رسیدن به بار ماکزیمم نقص داشته و بخش افت منحنی را با سرعت بیشتر و سختی کمتری نشان دادند، بعنوان مثال تغییر شکل فوم هسته در مدل FE, Shear نسبت به نمونه آزمایشگاهی بیشتر بود. نمودار شکل (۱۰) توزیع تنش بر روی فوم هسته را در طول تیر در طول اتصال به رویه بالایی نشان می‌دهد که ابتدای محور افقی در این نمودار مربوط به انتهای تیر ساندویچی است که متصل به لولاهای بارگذاری بوده است. توزیع تنش برای هر یک از مدل‌های FE, Comp, FE, Tens, و FE, Shear در نمودارهای جداگانه ارائه شده است. سه تنش نرمال بر راستای تیر (σ_{33})، تنش نرمال بر سطح مقطع تیر (σ_{22}) و تنش برشی (σ_{13}) در فوم هسته در این نمودارها نشان داده شده که جهش نمودارها مربوط به ناحیه مورد بررسی جدایش بین رویه و هسته است. مقادیر تنش در فوم هسته با افزایش سختی در مورد مدل FE, Tens بیشترین مقدار و در مورد مدل FE, Shear مقادیر کمتری است. نمودارها تنش نرمال بر سطح مقطع تیر را بصورت فشاری نشان می‌دهند، حال آنکه در مورد مدل FE, Tens این تنش در محل جبهه جدایش از نوع کششی است. در

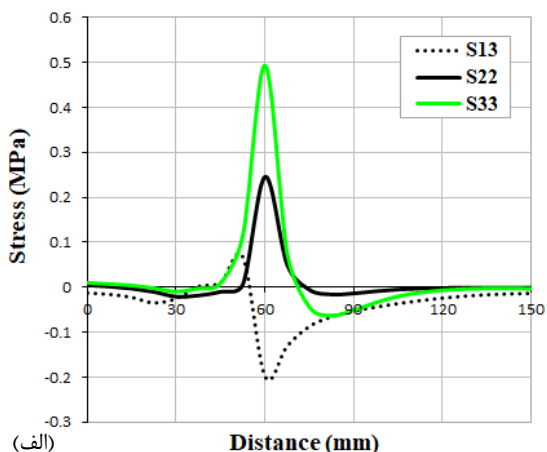
جدایش بین رویه و هسته را نشان می‌دهد.

۴- بحث بر روی نتایج

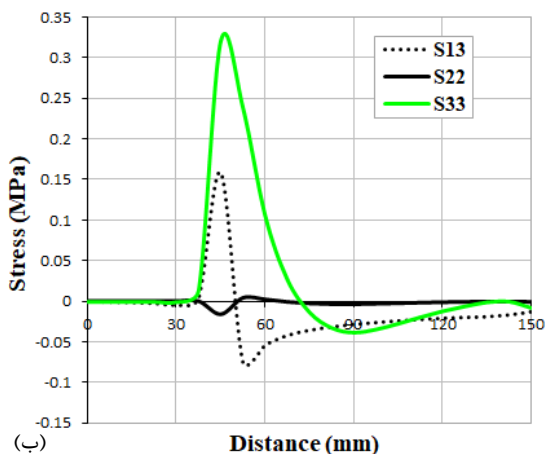
از آنجا که هدف مطالعه حاضر، تعیین رفتار حاکم بر هسته تیر ساندویچی از جنس فوم الاستومری بود، سه مدل المان محدود با فرض رفتار فشاری، کششی و برشی برای فوم هسته تهیه شده که به ترتیب با نام‌های FE, Comp, FE, Tens, و FE, Shear معرفی شدند. شکل (۷) نمودار بار-جابجایی بدست آمده توسط این مدل‌ها را در مقایسه با نمودار بار-جابجایی آزمایشگاهی مربوط به متوسط نتایج آزمایشگاهی (Exp, avg) نشان می‌دهد. اگرچه در مدل‌های فوق مقدار یکسانی برای نرخ بحرانی رهاسازی انرژی کرنشی تعریف شده است اما نمودارها نتایج متفاوتی را با فرض رفتارهای متفاوت برای فوم هسته نشان داده‌اند. طبق شکل (۷) نزدیک‌ترین نمودار بدست‌آمده توسط مدل‌های المان محدود نسبت به نتایج آزمایشگاهی مربوط به مدل FE, Shear می‌باشد که توانسته بخش ابتدایی منحنی $P-\delta$ را به دقت شبیه‌سازی کند که این بمعنی، حاکم بودن رفتار برشی فوم هسته بر عملکرد تیر DCB در ناحیه ابتدایی باربری می‌باشد حال آنکه در ادامه، نمونه آزمایشگاهی رفتار نرم‌شدگی قابل توجهی را نشان داده تا به مقدار ماکزیمم برسد. دورترین نتایج نسبت به نتایج آزمایشگاهی در بخش الاستیک منحنی مربوط به مدل FE, Tens می‌باشد. بار ماکزیمم بدست‌آمده توسط مدل‌های المان محدود نسبت به بار ماکزیمم تست آزمایشگاهی بیشتر بوده که یک عامل آن صرف‌نظر از مودهای دیگر شکست در مدل المان محدود می‌باشد. بار ماکزیمم بدست‌آمده توسط فوم هسته تعریف کرده، دارای مقدار بیشتری است.



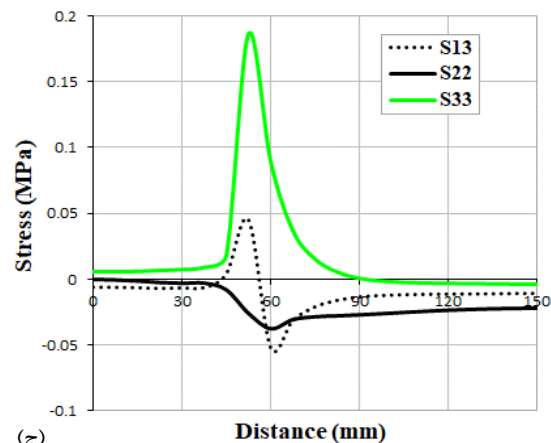
شکل ۷- نمودار بار-جابجایی مربوط به تست نمونه‌های DCB در مقایسه با نمودار بدست آمده توسط مدل المان محدود.



(الف)



(ب)



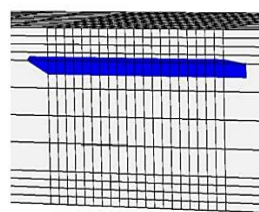
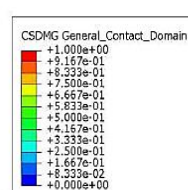
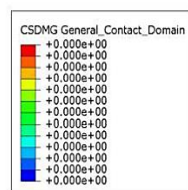
(ج)

شکل ۱۰- توزیع مولفه‌های تنش در مدل‌های المان محدود با ملاحظه رفتار مختلف برای فوم هسته، (الف) FE, Tens. (ب) FE, Comp. (ج) FE, Shear.

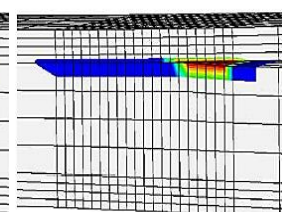
۵- نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر بررسی مکانیزم جدایش رویه از هسته در تیر ساندویچی دارای رویه کامپوزیتی و هسته فوم الاستومری تحت اثر مود اول شکست بود. برنامه آزمایشگاهی شامل ساخت تیرهای ساندویچی DCB با رویه کامپوزیتی از الیاف شیشه و هسته از جنس فوم الاستومری بود که اتصال

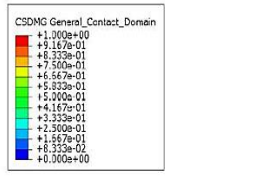
دو مدل FE, Tens و FE, Comp که دارای دقت کمتری در پیش‌بینی نتایج بودند مقدار تنش برشی (σ_{13}) در طول ناحیه پیوسته بین رویه و هسته بیشتر از سایر مولفه‌های تنش بدست آمده است، حال آنکه در مدل FE Shear مقدار تنش برشی نسبت به مقدار تنش نرمال بر سطح مقطع دارای مقادیر کمتر بوده که منطقی‌تر به نظر می‌رسد. بر اساس این یافته‌ها، رفتاری از فوم الاستومری که در پیش‌بینی عملکرد تیر ساندویچی در برابر جدایش رویه از هسته موثرتر است رفتار برشی بوده و نتایج بدست‌آمده بر اساس آن، دارای قابلیت اعتماد بیشتری است.



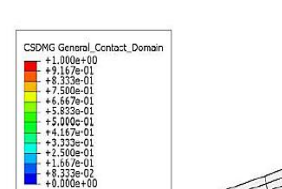
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹- پیشروی جبهه جدایش رویه از هسته در مدل المان محدود FE, Shear و پارامتر CSDMG مربوط به چهار مقدار جابجایی در رویه بالایی تیر، (الف) $\delta=0$ mm، (ب) $\delta=3$ mm، (ج) $\delta=4.5$ mm، (د) $\delta=9$ mm.

مطابق با نمودار، تنش نرمال بر سطح مقطع از نوع فشاری بوده و تنش نرمال بر راستای تیر (σ_{33}) در محل جدایش بین رویه و هسته دارای جهش بزرگی است. مقدار تنش برشی در ناحیه پیوستگی بین رویه و هسته دارای مقدار بیشتری است.

جابجایی را به دقت شبیه‌سازی کند اما در شبیه‌سازی نرم‌شدگی قابل توجه در تیرهای ساندویچی قبل از بار ماکزیمم قاصر بود. نتایج مدل‌ها حاکی از آن بود که سختی تیرهای ساندویچی در جریان جدایش رویه از هسته تحت مود اول شکست، حتی نسبت به پاسخ برشی فوم، ضعیف‌تر بوده و عبارتی دارای تغییر شکل قابل توجه در برابر بار وارده بوده و نرمی قابل توجه آن موجب جذب انرژی زیادی قبل از جدایش رویه از هسته می‌شود. از این رو، احتمال کمی در مورد جدایش رویه از هسته های الاستومری را تحت مود اول نشان می‌دهد. مدل های المان محدود نشان داد با وجود تنش های نرمال در مقطع تیرهای ساندویچی DCB، رفتار حاکم بر فوم هسته نزدیک تر به رفتار برشی فوم بوده که ممکن است جهت طراحی هسته‌های از نوع فوم الاستومری برای تیرهای ساندویچی مورد نظر قرار گیرد.

رویه به هسته توسط چسب اپوکسی انجام شده بود. مقدار بحرانی نرخ رهاسازی انرژی کرنشی با ترسیم نمودارهای بار-جابجایی برای تیرهای DCB بدست آمد. با توجه به تاثیر مهم رفتار فوم الاستومری هسته بر عملکرد تیر DCB، نمونه‌های آزمایشگاهی توسط مدل المان محدود با فرض رفتار هیپراالاستیک توسط توابع انرژی کالیبره شده با رفتارهای مختلف فوم شامل فشاری، کششی و برشی و همچنین روش VCCT برای بررسی پیشروی جدایش رویه از هسته شبیه‌سازی شدند. نتایج عددی، شبیه‌سازی رفتار جدایش رویه از هسته را در مدل‌های ساخته شده با فرض رفتار برشی برای فوم دارای دقت بیشتری نشان دادند که نشانگر اهمیت پاسخ برشی فوم الاستومری در برابر جدایش رویه از هسته در تیرهای ساندویچی DCB بوده و ممکن است جهت کاربرد این نوع فوم ها بعنوان هسته در سازه‌های ساندویچی مد نظر قرار گیرد. روش VCCT توانست بار ماکزیمم و بخش اولیه نمودار بار-

مراجع

- [1] T.L Anderson. "Fracture mechanics Fundamentals and Application." 2nd edition, Boca Raton NY, CRC press, 1995.
- [2] B.W. Kim, and A.H. Mayer. "Influence of fiber direction and mixed-mode ratio on delamination fracture toughness of carbon/epoxy laminates." *Composites Science and Technology* 63, No. 5 (2003): 695–713.
- [3] J. Andersons, and M. Konig. "Dependence of fracture toughness of composite laminates on interface ply orientations and delamination growth direction." *Composites Science and Technology* 64, No. 13-14 (2004): 2139–2152.
- [4] P. Naghipour, M. Bartsch, L. Chernova, J. Hausmann, and H. Voggenreiter. "Effect of fiber angle orientation and stacking sequence on mixed mode fracture toughness of carbon fiber reinforced plastics: numerical and experimental investigations." *Materials Science and Engineering* 527, No. 3 (2010): 509–517.
- [5] M.M Rehan, J. Rousseau, X.J. Gong, L. Guillaumat, and J.S.M. Ali. "Effects of fiber orientation of adjacent plies on the mode I crack propagation in a carbon-epoxy laminates." *Procedia Engineering* 10 (2011): 3179-3184.
- [6] M.M. Shokrieh, , M. Salamat-talab and M. Heidari-Rarani. "Dependency of bridging traction of DCB composite specimen on interface fiber angle." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 90, (2017): 22–32.
- [7] A. Pereira, and A. Balacó de Morais. "Mode II Interlaminar fracture of glass/epoxy multidirectional laminates." *Composites Part A: Application Science and Manufacturing* 35, No. 2 (2004): 265–272.
- [8] E. Triki, B. Zouari and F. Dammak. "Dependence of the interlaminar fracture toughness of E-Glass/Polyester woven fabric composites laminates on ply orientation." *Engineering Fracture Mechanics* 159, (2016): 63–78.
- [9] M.M. Shokrieh, and A. Zeinedini. "Modeling of delamination fracture toughness of I and II mixed mode of a laminated composite asymmetric double cantilever beam." *Journal of Modeling in Engineering* 13, no. 41 (2015): 1-11. (in Persian)
- [10] D.A. Ramantani, M.F.S.F. De Moura, R.D.S.G. Campilho, and A.T. Marques. "Fracture characterization of sandwich structures interfaces under mode I loading." *Composites Science and Technology* 70, no. 9 (2010): 1386-1394.
- [11] G.M. Viana, and L.A. Carlsson. "Influences of foam density and core thickness on debond toughness of sandwich specimens with PVC foam core." *Journal of Sandwich Structures and Materials* 5, no. 2 (2003): 103-117.

- [12] W.L. Bradley, and R.N. Cohen. "Matrix deformation and fracture in graphite-reinforced epoxies, delamination and debonding of materials." *American Society for Testing and Materials, ASTM STP*, 1985.
- [13] A.R. Nazari, M.Z. Kabir and H. Hosseini-Toudeshky. "Investigation of elastomeric foam response applied as core for composite sandwich beams through progressive failure of the beams." *Journal of Sandwich Structures & Materials* 21, no. 2 (2019): 604-638.
- [14] L.J. Gibson, and M.F. Ashby. "Cellular solids: structure and properties." 2nd ed. Cambridge, Cambridge University Press, 1997.
- [15] M. Arefi, and A.M. Zenkour. "Influence of micro-length-scale parameters and inhomogeneities on the bending, free vibration and wave propagation analyses of a FG Timoshenko's sandwich piezoelectric microbeam." *Journal of Sandwich Structures & Materials* 21, no. 4 (2019): 1243-1270.
- [16] M. Arefi, and F. Najafitabar. "Buckling and free vibration analyses of a sandwich beam made of a soft core with FG-GNPs reinforced composite face-sheets using Ritz Method." *Thin-Walled Structures* 158 (2021): 107200.
- [17] A.R. Nazari, F. Taheri. "On the pacifying influence of an elastomeric foam core on the failure mechanism of sandwich composites with various skin layups." *International Journal of Crashworthiness* 28, no. 3 (2023): 402-417.
- [18] A.R. Nazari, M.Z. Kabir and H. Hosseini-Toudeshky. "Investigation of stiffness degradation progress in Glass/Vinylester laminated beams under large deformations." *Scientia Iranica A* 25, no. 5, (2018): 2389-2403.
- [19] Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites, ASTM: Designation: D 5528 – 94a, 1994.
- [20] ABAQUS/Analysis User's Manual, Version 6.10, ABAQUS Inc., 2010.
- [21] J. Bonet, and R.D. Wood. "Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis." 2nd ed. Cambridge University Press, 2008.
- [22] E.F. Rybicki, and M.F. Kanninen. "A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral." *Engineering Fracture Mechanics* 9 (1977): 931-938.
- [23] R. Krueger. "Virtual crack closure technique: History, approach, and applications." *Appl. Mech. Rev.* 57, no. 2 (2004): 109-143.
- [24] H. Hosseini-Toudeshky, M. Saber and B. Mohammadi. "Finite element crack propagation of adhesively bonded repaired panels in general mixed-mode conditions." *Finite Elements in Analysis and Design* 45, (2009): 94-103.
- [25] H. Hosseini-Toudeshky, S. Hosseini and B. Mohammadi. "Progressive delamination growth analysis using discontinuous layered element." *Composite Structures* 92 (2010): 883-890.