



ارائه قانون کشش-جدایش برای اتصال جوش فراصوتی مواد مرکب پلی پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه در مود II شکست

رضا احمدی، حسن بیگلری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۱۱
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۱/۰۷/۱۲

کلمات کلیدی:

کشش-جدایش
مد II شکست
جوشکاری فراصوتی
نرخ آزاد سازی انرژی
پل زنی

خلاصه: در سال‌های اخیر، به کارگیری اتصالات جوشی در سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف به شدت در حال توسعه می‌باشد. اتصالات جوشی دارای عیوب ذاتی ناشی از مراحل ساخت می‌باشند. ترک‌های اولیه از این عیوب شروع شده و در نهایت منجر به شکست قطعه می‌شوند. لذا استخراج پارامترهای مهم در محل اتصال، کمک شایانی به مهندسان در طراحی و پیش‌بینی زمان شروع و توسعه ترک بین لایه‌ای در لایه جوش می‌کند. در این مقاله، برای بررسی مود دوم شکست، به محاسبه‌ی تجربی و عددی نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی برشی بین لایه‌ای در اتصال جوش فراصوت مواد مرکب پرداخته شده است. در این پژوهش از استفاده از روش کاهش داده کالیبراسیون نرمی، تیر مبتنی بر نرمی و نظریه تیر کلاسیک، برای محاسبه نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی و از مدل کشش-جدایش دوزنقه‌ای برای مدل سازی اتصال در نرم افزار آباکوس استفاده شده است. سپس از ادغام نتایج تجربی و عددی برای استخراج پارامترهای قانون کشش-جدایش استفاده شده است. در پایان نمودارهای نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایشات تجربی و نمودارهای نیرو-جابجایی استخراج شده از مدل سازی عددی با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد مدل‌های استخراج شده با استفاده از روش تیر مبتنی بر نرمی و نظریه تیر کلاسیک پیش‌بینی خوبی نسبت به روش کالیبراسیون نرمی دارند. همچنین سهم چقرمگی شکست پل زنی در رشد ترک بیشتر از چقرمگی شکست اولیه می‌باشد.

۱- مقدمه

مواد مرکب پایه پلیمری مهم‌ترین دسته از مواد مرکب می‌باشند. طیف وسیعی از صنایع مانند تولید قطعات هواپیما تا تولید سینک ظرف شویی و غیره از مواد مرکب پایه پلیمری تولید می‌شوند و به همین دلیل بزرگ‌ترین زیر مجموعه مواد مرکب محسوب می‌گردند [۱]. پلی پروپیلن با فرمول شیمیایی $(-[\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)]_n-)$ یکی از مهم‌ترین پلیمرهای مهندسی است که نسبتاً ارزان قیمت، شکل‌پذیر، قابل بازیافت و دارای فرآیندپذیری آسان می‌باشد. مزایای زیاد پلی پروپیلن باعث شده تا به عنوان ماتریس مورد توجه قرار گیرد. اتصال مواد مرکب ترموپلاستیکی یکی از مراحل مهم در ساخت بدنه فضا پیماها، سیستم‌های حمل و نقل ریلی، صنایع کشتی‌سازی و خودروسازی می‌باشد. به طور کلی روش‌های اتصال مواد مرکب ترموپلاستیکی می‌تواند به روش مکانیکی، اتصال چسبی و جوشکاری تقسیم بندی شود. روش مکانیکی شامل پیچ و مهره، پرچ و ... و اتصالات چسبی شامل چسب و حلال می‌باشند. در روش مکانیکی،

مشکلاتی از قبیل تمرکز تنش در محل اتصال و خوردگی گالوانیکی وجود دارد و اتصالات چسبی نسبت به شرایط محیطی (رطوبت، شیمیایی، دما، روغن و ...) آسیب‌پذیر هستند [۲].

روش جوشکاری از پتانسیل بالایی برای اتصال، مونتاژ و تعمیر مواد مرکب ترموپلاستیکی برخوردار است و مزیت‌های زیادی نسبت به سایر روش‌های اتصال دارا می‌باشد. این روش می‌تواند تا حد زیادی مشکلات ناشی از روش‌های مکانیکی و چسبی را برطرف کند.

عملی‌ترین روش‌های جوشکاری موجود برای اتصال مواد مرکب ترموپلاستیکی عبارتند از جوشکاری ذوبی، جوشکاری مقاومتی [۳-۵]، جوشکاری القایی [۴ و ۱۰-۶] و جوشکاری فراصوتی [۱۵-۱۱]. جوشکاری فراصوتی یک روش سریع و اقتصادی است؛ به سادگی خودکار می‌شود و برای تولید انبوه مناسب است. یک ویژگی قابل توجه این روش این است که دما پایین‌تر از دمای ذوب مواد درگیر، باقی می‌ماند. در نتیجه از هرگونه خواص ناخواسته‌ای که به دلیل قرارگرفتن در دمای بالا در مواد به وجود می‌آید، جلوگیری می‌شود [۱۲ و ۱۶]. با توجه به موارد ذکر شده، در این

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hbiglari@tabrizu.ac.ir



تورق را مطرح و بیان کرد که معیار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی برای بررسی رشد تورق مناسب می‌باشد. داویدسون^۴ و سان^۵ [۳۱] با استفاده از روش کاهش داده کالیبراسیون نرمی^۶، برای تیرهای مواد مرکبی با شکاف انتهایی در دو حالت بارگذاری خمشی سه نقطه^۷ و چهارنقطه^۸ ساخته شده از جنس کربن/اپوکسی مقادیر چقرمگی شکست بین لایه‌ای را محاسبه نمودند. روش ترک معادل یکی از روش‌هایی است که برای محاسبه نرخ رهایی انرژی در تحلیل المان محدود در مسائل مکانیک شکست استفاده می‌شود. دی مورا^۹ و مورایس [۳۲] به بررسی تجربی مود دوم شکست در نمونه‌های خمشی سه نقطه‌ای انتها ترک‌دار و نمونه‌های تیر کنسول انتها ترک‌دار با استفاده از روش ترک معادل^{۱۰} پرداختند. مزایای این روش در این است که نیاز به رشد ترک در طول آزمون نمی‌باشد. در تحقیقی دیگر دی مورا و همکاران [۳۳] به صورت تجربی مود دو شکست در اتصالات مواد مرکبی را بررسی کردند. آن‌ها اندازه‌گیری انرژی شکست مود دو اتصالات چسبی را با استفاده از آزمون نمونه انتها ترک تحت بار عرضی با استفاده از روش ترک معادل پیشنهاد دادند. این روش بر پایه مفهوم ترک معادل بوده و نیازی به رصد ترک در هنگام انتشار که کار دشواری است، ندارد. آن‌ها نتایج خود را با روش کالیبراسیون نرمی و تئوری تیر ساده^{۱۱} مقایسه کردند. مقایسه نتایج نشان داد که روش پیشنهادی آنها نسبت به دو روش دیگر، نتایج دقیق‌تری را ارائه می‌دهد و انتخاب مناسبی برای مشخصه سازی شکست در اتصالات می‌باشد. در این تحقیق، با استفاده از مهندسی معکوس و نتایج به دست آمده از محاسبات عددی، مقادیر تنش و جابجایی بحرانی در مود II را برای چسب به دست آوردند. سپس با نتایج عملی از آزمایش کشش چسب، مقایسه شده و چقرمگی شکست معادل را محاسبه و نتایج به دست آمده از سه روش مذکور را با چقرمگی شکست معادل مقایسه کردند. با توجه مطالب بیان شده، پژوهش‌هایی که روی جوشکاری فراصوتی پلی‌پروپیلن و یا مواد مرکب پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه انجام گرفته صرفاً بر روی خواص مقاومتی اتصال و پارامترهای مؤثر بر آن متمرکز شده‌است. و تحقیقات اندکی روی مکانیک آسیب اتصالات جوش فراصوتی مواد مرکب و بویژه مواد مرکب پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه انجام گرفته‌است. در

پژوهش از جوشکاری فراصوتی برای اتصال مواد مرکب پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه استفاده کرده‌ایم.

پژوهش متعددی روی جوشکاری فراصوتی مواد مرکب انجام یافته‌است [۱۷-۲۲] ولی اغلب آنها روی پارامترهای مؤثر روی جوش و تکنیک‌های انجام بهتر فرآیند جوشکاری متمرکز شده‌اند. برخی تحقیقات هم روی جوشکاری فراصوتی مواد مرکب با فلزات انجام شده است [۲۳-۲۵]. از آنجا که در عمل ممکن است در لایه جوش ناپیوستگی‌ها و ترک‌هایی بوجود آید، در این پژوهش با استفاده از تئوری چسبناکی روی قانون کشش-جدایش شکست مود II لایه جوش بحث خواهیم کرد.

اهمیت بررسی مودهای تخریب احتمالی در مواد مواد مرکبی و اتصالات آنها به منظور بهبود طراحی و عملکرد این نوع از مواد بیشتر از سایر مواد است. تورق به دلیل کاهش خواص مواد مرکب از جمله سفتی و استحکام، یکی از مهمترین مودهای تخریب مواد مرکب می‌باشد که در بیشتر موارد به شکست‌های ناگهانی و فاجعه‌آمیز می‌انجامد. به بیان دیگر تورق، به ترکی اتلاق می‌شود که بین دو لایه از چندلایه مواد مرکبی که در مجاورت یکدیگر قرار دارند، شکل می‌گیرد [۲۶]. بررسی تئوری، عددی و آزمایشگاهی تورق در دو دهه اخیر، توجه بسیاری از محققین را به خود جلب نموده‌است. بارهای خمشی یکی از موارد ایجاد آسیب در نمونه‌های مواد مرکبی می‌باشد که منجر به مود II شکست در اینگونه مواد می‌شود که محققان زیادی در این زمینه مطالعه داشته‌اند [۲۷].

آرس^۱ و همکاران [۲۸] یک روش جدید برای تعیین قانون چسبناکی مود II برای مواد مرکب‌های تک جهته پیشنهاد کردند. این رویکرد بر اساس همبستگی بین نرخ آزادسازی انرژی توسعه‌یافته به عنوان تابعی از جابجایی لغزشی نوک ترک بود. روش آنها می‌تواند حداکثر تنش و چقرمگی را برای هر قانون چسبناکی ورودی پیش‌بینی کند. لو^۲ و همکاران [۲۹] به طور سیستماتیک اثر پارامترهای المان چسبنده را بر مدل سازی تورق بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که K_p (سفتی پنالتی) المان چسبنده نقش کلیدی در مدل سازی تورق ایفا می‌کند. سفتی کم شروع آسیب را به تأخیر می‌اندازد. مقادیر بالای K_p به درستی سفتی کلی سازه را تضمین می‌کند، اما هزینه‌های محاسباتی را افزایش می‌دهد. سفتی بیش از حد بالا نیز باعث مشکلات همگرایی می‌شود.

وایت کامب^۳ [۳۰] فرضیه ثابت ماندن چقرمگی شکست در هنگام رشد

- 4 Davidson
- 5 Sun
- 6 Compliance Calibration Method (CCM)
- 7 End Notch Flexure
- 8 Four-point End Notch Flexure
- 9 De Moura
- 10 Equivalent Crack Method
- 11 Direct Beam Theory (DBT)

- 1 Arrese
- 2 Lu
- 3 Whitcomb

جدول ۱. خواص مکانیکی مواد مرکب پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه [۳۴]

Table 1. Mechanical properties of glass-fiber reinforced polypropylene composite [34]

| E_l (MPa) | E_r (MPa) | E_r (MPa) | ν_{lr} | ν_{lr} | ν_{lr} | G_{lr} (MPa) | G_{lr} (MPa) | G_{rr} (MPa) |
|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|----------------|----------------|----------------|
| ۵۱۵۰ | ۲۱۰۰ | ۲۱۰۰ | ۰/۳۲ | ۰/۳۲ | ۰/۱۴ | ۴۰۰ | ۴۰۰ | ۱۳۸۰ |

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

ورق‌های مواد مرکب جهت انجام آزمایشات به روش هات وکیوم بگ^۶ توسط شرکت فنی مهندسی افق در ابعاد $۲۱۰ \pm 0.2 \times ۲۵۵ \times ۲۵۵$ میلی‌متر ساخته شدند. در مرحله بعد برای تولید بازوها به ابعاد $۲۰ \times ۲۰ \times ۱۴۰$ میلی‌متر به تعداد مورد نیاز، ورق‌های مواد مرکب با استفاده از دستگاه برش واتر جت ۵ محور شرکت فلو^۷، توسط مخلوط آب و ساینده و با فشار ۲۰۰۰ psi برشکاری شدند.

با توجه به اینکه در این پژوهش برای تولید نمونه ENF از جوشکاری فراسوتی برای ایجاد اتصال بین دو بازو استفاده کرده‌ایم، بنابراین برای اینکه بازوها در حین انجام فرآیند جوشکاری کاملاً ثابت بوده و تغییر موقعیت ندهند، فیکسچری از جنس فولاد 37St تهیه و ساخته شده‌است که شکل ۱ فیکسچر و نحوه قرار گرفتن بازوها درون فیکسچر را نشان می‌دهند.

پارامترهای مؤثر در جوشکاری فراسوتی پلاستیک‌ها شامل فشار نگهداری در سه سطح $۲/۵-۲-۱/۵$ بار، زمان اعمال جوش در سه سطح $۱/۲-۰/۸-۰/۴$ ثانیه و دامنه امواج فراسوتی در سه سطح $۳۳-۳۰-۲۷$ میکرومتر می‌باشند. محدوده تغییرات، بر اساس آزمایش‌هایی که قبل از آزمایش‌های اصلی، انجام شده بود و همچنین به کمک مقالات مطالعه شده [۱۸ و ۲۲ و ۳۵]، انتخاب شده‌اند. در آزمایش‌های اولیه برای انتخاب محدوده پارامترها، نفوذ کامل و عدم حرارت‌دهی خیلی زیاد^۸ معیار گزینش قرار گرفته است. جهت کاهش تعداد آزمایشات با حفظ کیفیت نتایج، پارامترهای فوق با استفاده از روش‌های طراحی آزمایشات^۹ و روش تاگوچی با آرایه متعامد^{۱۰} 9L، مطابق جدول ۲ مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. روش تاگوچی سیستمی از طرح‌های جدول‌بندی شده (آرایه‌ها) ایجاد کرده است که امکان تخمین حداکثر تعداد اثرات اصلی را به شیوه‌ای بی‌طرفانه (متعامد) با حداقل تعداد اجرا در آزمایش فراهم می‌کند.

این مقاله مدل آسیب پیشرونده برای پیش‌بینی فرآیند تخریب در نمونه‌های با شکاف انتهایی^۱ مواد مرکب جوشکاری شده به روش فراسوتی از نظر عددی و تجربی بررسی می‌شود. بعد از انجام آزمون خمش سه نقطه، با استفاده از سه روش کاهش داده کالیبراسیون نرمی^۲، تیر مبتنی بر نرمی^۳ و نظریه تیر کلاسیک^۴، و مقادیر انرژی جهت رشد و توسعه ترک محاسبه شد. سپس مدل کشش-جدایش دوزنقه‌ای که ناحیه فرآیندی تعبیه شده^۵ را بیان می‌کند، برای هر یک از این روش‌ها محاسبه شده و توسط نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل‌سازی می‌شود. در پایان نمودارهای نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمایشات تجربی و نمودارهای نیرو-جابجایی استخراج شده از مدل‌سازی عددی با یکدیگر مقایسه می‌شود.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- مواد نمونه‌ها

جنس نمونه‌ها مواد مرکب پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه می‌باشد و به دلیل کاربرد فراوان این مواد لزوم استفاده از روش‌های جوشکاری برای اتصال آنها، ضروری به نظر می‌آید. با توجه به اینکه در این پژوهش، مقدار الیاف جزء پارامترهای مورد بررسی نمی‌باشد، از مقدار رایج آن در مواد مرکب پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه موجود در بازار و مورد استفاده در صنایع، که تقریباً ۶۰ درصد وزنی می‌باشد، استفاده شده‌است. ضمناً الیاف شیشه بکار رفته در مواد مرکب پلی‌پروپیلن از نوع E و بصورت ممتد تک جهت می‌باشد.

خواص مکانیکی مواد مرکب مورد استفاده در این پژوهش مطابق جدول ۱ می‌باشد که توسط کاتالوگ شرکت سازنده مواد مرکب [۳۴] گزارش شده است و صحت آن بوسیله آزمون کشش توسط محققین این مقاله تأیید شده است.

6 Hot vacuum bag

7 Flow

8 Over Heating

9 Design Of Experiments (DOE)

10 Orthogonal Array

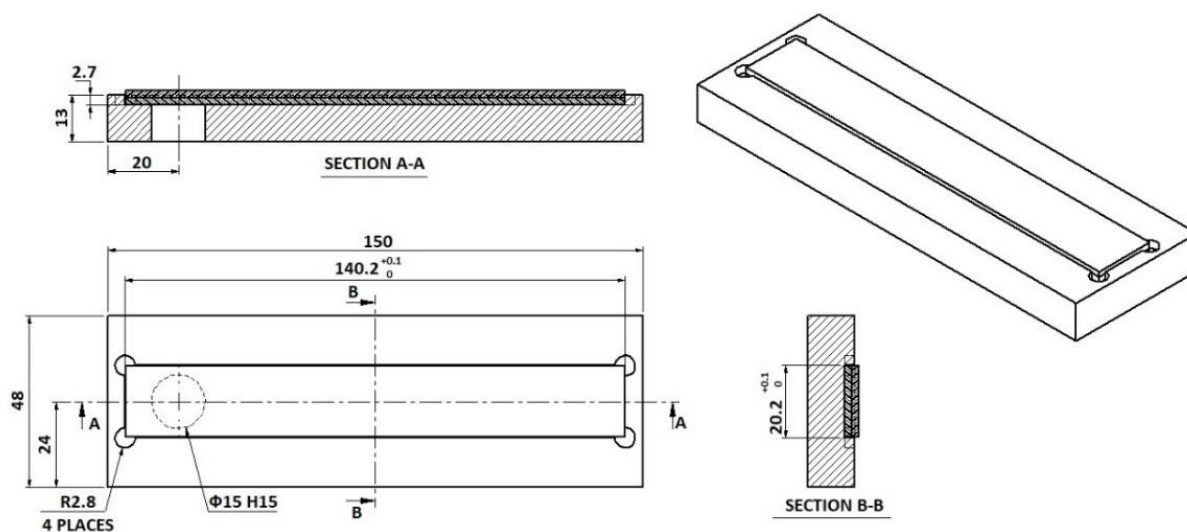
1 End Notch Flexure

2 Compliance Calibration Method (CCM)

3 Compliance-Based Beam Method (CBBM)

4 Classical Beam Theory (CBT)

5 Embedded Process Zone (EPZ)



شکل ۱. نقشه فیکسچر و نحوه قرار گرفتن نمونه‌ی آزمون ENF درون فیکسچر.

Fig. 1. Fixture sketch and the ENF test sample inside the fixture.

جدول ۲. پارامترهای مؤثر در جوشکاری فراصوتی و سطوح تغییرات آن بر اساس طراحی آزمایشات (DOE).

Table 2. Effective parameters in ultrasonic welding and the levels of its changes based on the Design Of Experiments (DOE).

| شماره آزمایش | نمونه ENF | زمان جوشکاری (s) | دامنه امواج فراصوتی (μm) | فشار نگهداری (bar) |
|--------------|-----------|------------------|--------------------------|--------------------|
| ۱ | ENF ۱ | ۰/۴ | ۲۷ | ۱/۵ |
| ۲ | ENF ۲ | ۰/۸ | ۳۰ | ۱/۵ |
| ۳ | ENF ۳ | ۱/۲ | ۳۳ | ۱/۵ |
| ۴ | ENF ۴ | ۰/۸ | ۲۷ | ۲ |
| ۵ | ENF ۵ | ۱/۲ | ۳۰ | ۲ |
| ۶ | ENF ۶ | ۰/۴ | ۳۳ | ۲ |
| ۷ | ENF ۷ | ۱/۲ | ۲۷ | ۲/۵ |
| ۸ | ENF ۸ | ۰/۴ | ۳۰ | ۲/۵ |
| ۹ | ENF ۹ | ۰/۸ | ۳۳ | ۲/۵ |

جوشکاری پلاستک‌ها به نام مکس وایت^۱ ساخت کشور تایوان با توان ۲۶۰۰ وات و فرکانس امواج فراصوتی برابر با ۱۵ کیلوهرتز می‌باشد. فشار پنوماتیک تا حداکثر ۵ بار، حداکثر زمان جوشکاری ۱/۵ ثانیه و حداقل زمان جوشکاری ۰/۱ ثانیه بر روی این دستگاه قابل تنظیم است. برای ایجاد ترک اولیه، هنگام جوشکاری از ورق نجسب با ضخامت ۲۰ میکرومتر استفاده شده است.

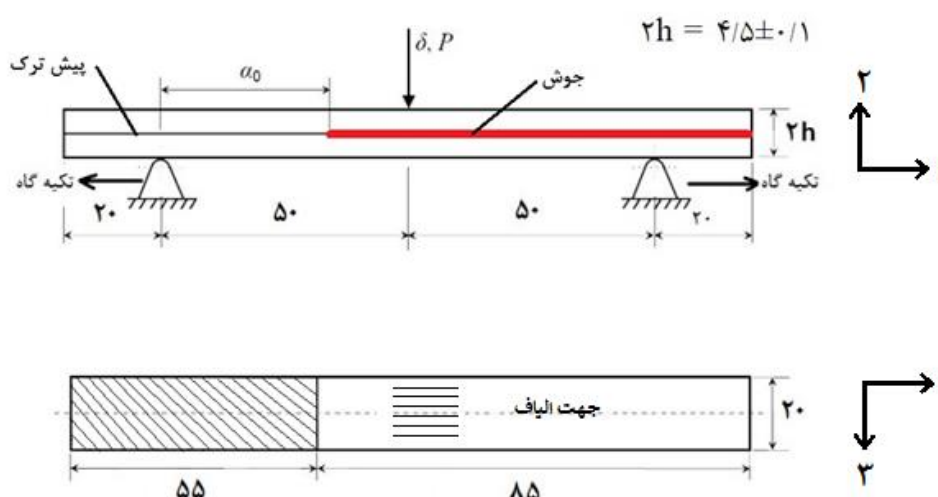
تاگوچی استفاده از آرایه‌های متعامد را در مرحله اجرای آزمایش، برای بررسی و پیش‌بینی عوامل نويز که ممکن است بر کیفیت یک محصول در مرحله تولید محصول تأثیر بگذارد، پیشنهاد کرده است [۳۶ و ۳۷]. برای تنظیم دقیق سطوح دامنه امواج فراصوتی از ساعت اندازه‌گیری با دقت یک میکرون استفاده شده است و همچنین جهت اطمینان از صحت داده‌های تجربی، آزمایشات ۳ بار تکرار شده‌اند (شکل ۲).

جوشکاری تمامی نمونه‌ها در شرکت آماج آرا [۳۸] انجام گرفته و دستگاه مورد استفاده در این پژوهش یک پرس جوشکاری فراصوتی مخصوص



شکل ۲. جوشکاری فراصوتی بازوها روی همدیگر جهت ساخت نمونه ENF

Fig. 2. Ultrasonic welding of the arms to make an ENF sample.



شکل ۳. ابعاد و اجزای نمونه‌های ENF طبق استاندارد [۴۰] D7905M/ASTM D7905.

Fig. 3. Dimensions and components of ENF specimens according to the ASTM D7905/D7905M standard.

منتشر شده‌است. آزمون‌های خمش سه نقطه‌ای و چهار نقطه‌ای با شکاف انتهایی و آزمون تیر سرگردار با شکاف انتهایی^۲ مشهورترین آزمون‌هایی هستند که در مراجع پیشنهاد شده‌اند. آزمون ENF [۴۱]، به دلیل فیکسچر ساده آن و مطابقت با آزمون خمش سه نقطه‌ای بیشترین کاربرد را دارد و به عنوان یک آزمون استاندارد مورد تأیید گروه استاندارد صنعتی ژاپن^۳ می‌باشد. طبق استاندارد [۴۰]، نمونه‌های ENF مطابق شکل ۳ ساخته شده‌اند.

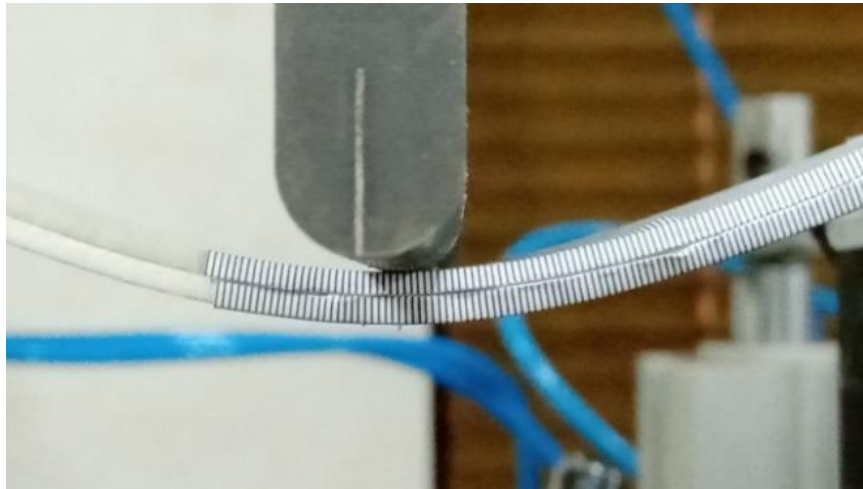
2 End Loaded Split (ELS)

3 Japan Industrial Standards Group (JIS)

۲-۳- آزمون خمش سه نقطه (ENF)

پرکاربردترین روش مشترک به کار برده شده برای تعیین مقاومت شکست بین لایه‌ای کامپوزیت‌ها، تعیین نرخ آزاد شدن انرژی کرنشی می‌باشد. اگر مقاومت در برابر رشد ترک مستقل از طول ترک (α) باشد، مقدار نرخ آزاد سازی انرژی کرنشی^۱ ثابت می‌باشد که برابر با میزان چقرمگی شکست، G_{II} یا G_{I} به ترتیب در مود I یا II می‌باشد [۳۹]. برای اندازه‌گیری G_{II} استاندارد [۴۰] ASTM D7905/D7905M در سال ۲۰۱۴

1 Strain Energy Release Rate (SERR)



شکل ۴. نمونه ENF تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای

Fig. 4. ENF sample under three point bending test

شده و بهترین روش کاهش داده با توجه به برازش منحنی نیرو-جابجایی تجربی با منحنی نیرو-جابجایی عددی مشخص می‌شود. روابط مورد استفاده در روش‌های کاهش داده برای محاسبه مقدار G_{II} در بخش پیوست ارائه شده است.

۲-۵- استخراج قوانین کشش-جدایش

بعد از محاسبه G_{II} ، سو و همکاران [۴۲]، به منظور توصیف تأثیر منحنی R (چقرمگی شکست با رشد تورق افزایش می‌یابد) با محاسبه انتگرال J حول نوک ترک و در طول صفحات ترک و با در نظر گرفتن وجود ناحیه پل‌زنی، روابط (۱) تا (۳) را برای نرخ آزادسازی انرژی در مود II بدست آورده‌اند:

$$G_{SS,II} = G_{0,II} + G_{b,II} \quad (1)$$

$$G_{b,II} = \int_0^{\delta_{II}^*} \sigma(\delta_{II}^*) d\delta_{II}^* \quad (2)$$

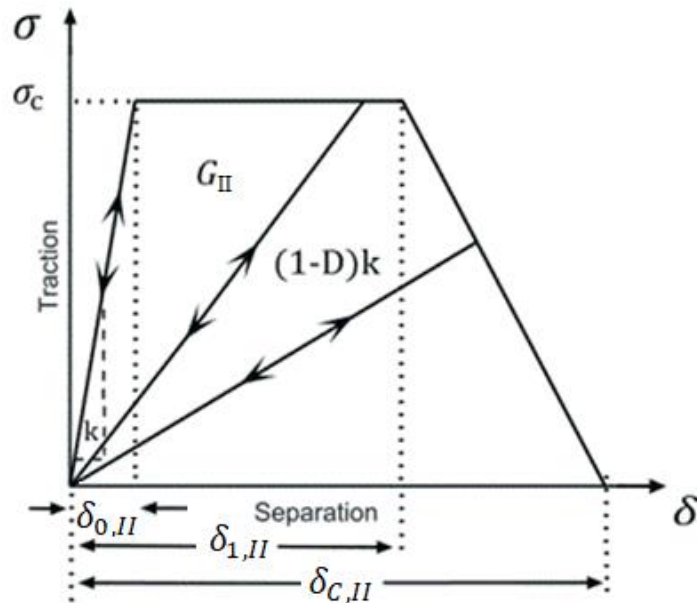
$$\sigma_{II}(\delta_{II}^*) = \frac{\partial G_{II}}{\partial \delta_{II}^*} \quad (3)$$

آزمایشات بوسیله دستگاه آزمون کشش AI-700M شرکت قو تک^۱ تایوان با دقت جابجایی ۰/۰۰۰۰۴ میلی‌متر، مستقر در آزمایشگاه پارک علم و فناوری آذربایجان شرقی و با استفاده از نیروسنج ۲۰ کیلو نیوتون صورت گرفته‌است. شکل ۴ نمونه ENF را حین آزمون خمش سه نقطه‌ای نشان می‌دهد. بار اعمالی به نمونه‌ها به صورت جابجایی کنترل شده با نرخ ثابت ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه به تکیه‌گاه وسط و رو به پایین وارد می‌شود. تمامی آزمایش‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد با طول ترک اولیه ۵۵ میلی‌متر انجام شده‌است. برای رصد رشد ترک از دوربین کانن مدل EOS ۲۵۰D استفاده شده‌است که دارای قابلیت عکس‌برداری ۵ فریم در ثانیه و نیز دارای فاصله کانونی ۱۸ الی ۵۵ میلی‌متر می‌باشد. با پردازش تصاویر ثبت شده و ترکیب نتایج آن با داده‌های استخراج شده از دستگاه کشش، داده‌های $P-\delta-\alpha$ بدست می‌آید.

۲-۴- روش‌های کاهش داده- محاسبه نرخ آزادسازی انرژی

روش کاهش داده بیانگر روشی است که برای محاسبه نرخ آزادسازی انرژی بکار گرفته می‌شود. در این پژوهش برای محاسبه نرخ آزادسازی انرژی در مود II، سه روش کاهش داده CCM، CBT و CBBM بکار گرفته شده‌است.

مقدار G_{II} بدست آمده از سه روش کاهش داده مذکور با یکدیگر مقایسه



شکل ۵. قانون کشش - جدایش دوزنقه‌ای

Fig. 5. Trapezoidal traction-separation law.

ناپایداری‌های عددی در حل غیرخطی، انتقال یابد [۴۳ و ۴۴]. اولین بخش قانون کشش-جدایش در شکل ۵ طبق رابطه (۴) بیان می‌شود [۴۳]:

$$\sigma(\delta) = K\delta \quad \text{for} \quad 0 \leq \delta \leq \delta_{0,II} \quad (4)$$

بنابراین $\delta_{0,II}$ از رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$\delta_{0,II} = \frac{\sigma_c}{K} \quad (5)$$

مطابق شکل ۵ تنش بحرانی تا نقطه $\delta_{1,II}$ ثابت می‌ماند. از آنجایی که سطح زیر منحنی نشان داده شده در شکل ۵ بین $\delta = 0$ و $\delta = \delta_{1,II}$ بیانگر مقدار $G_{b,II}$ می‌باشد، از رابطه (۶) بدست می‌آید:

$$\delta_{1,II} = \frac{G_{0,II}}{\sigma_c} + \frac{\delta_{0,II}}{2} \quad (6)$$

که δ_{II} مقدار لغزش نسبی موضعی در صفحه ترک در مود II می‌باشد. $G_{b,II}$ چقرمگی شکست اولیه (در شروع ترک) می‌باشد که شامل ترک خوردگی اتصال بوده و ثابت فرض می‌شوند. چقرمگی شکست پل زنی $G_{b,II}$ با استفاده از انتگرال‌گیری تنش پل زنی σ_{II} نسبت به δ_{II}^* محاسبه می‌شود. پس از انتگرال‌گیری (طبق رابطه (۲)) مقدار $G_{b,II}$ بر حسب جابجایی دهانه نوک ترک δ_{II}^* محاسبه می‌شود. در واقع $G_{b,II}$ شامل سهم پل زنی الیاف از چقرمگی شکست حالت پایدار ($G_{SS,II}$) می‌باشد.

۲-۶- مدل پل زنی و چسبناکی

پس از بدست آوردن تنش پل زنی در شروع رشد ترک و جابجایی لغزشی بحرانی، در این قسمت مدل کشش-جدایش دوزنقه‌ای که بتواند رفتار واقعی رشد ترک در اتصال را شبیه‌سازی کند، ارائه خواهد شد.

شکل ۱۳ الی شکل ۲۱ (پیوست) قوانین پل زنی را بدون در نظر گرفتن چقرمگی شکست اولیه $G_{b,II}$ نشان داده‌اند. بنابراین به منظور غلبه بر تکینگی^۱ تنش در نقطه $\delta = 0$ یک سفتی خطی اولیه K معرفی می‌شود و مقدار آن بسیار بزرگ انتخاب می‌شود ($MPa/mm10^5$) تا به تنش این امکان را دهد که در راستای صفحه میانی به صورت ثابت و بدون ایجاد

1 Singularity

روی شکل ۶ نشان داده شده و بین سطح غلطک و نمونه، تماس تعریف شده است. از اصطکاک بین غلطک و سطح نمونه صرفنظر شده است و تماس بدون اصطکاک فرض شده است.

با توجه به همگن بودن خواص مواد اتصال (جوش) و همچنین نوع بارگذاری و شرایط مرزی وارد بر آن، می‌توان آزمون ENF را به صورت صفحه‌ای^۳ مدل‌سازی نمود. به هنگام استفاده از فرمولاسیون کشش-جدایش برای المان چسبناک^۴، برای المان اتصال بایستی یک ضخامت خیلی کوچک‌تر از سایر ابعاد نمونه در نظر گرفته شود. در مدل‌هایی که سایر ابعاد مسئله بزرگتر از ۰/۱ میلی‌متر باشد، معمولاً ضخامت المان اتصال را بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۰۱ در نظر می‌گیرند. در این پژوهش برای اینکه هم نسبت طول به عرض^۵ حفظ شود و هم زمان حل کاهش یابد ضخامت المان اتصال یا چسبناک ۰/۰۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. المان مورد استفاده برای لایه جوش COH۲D۴ می‌باشد که المان چسبناک دو بعدی با ۴ گره می‌باشد. از آنجایی که عمق بازوهای مواد مرکب ۲۰ میلی‌متر می‌باشد که کمتر از ۰/۱ طول و ضخامت آن نمی‌باشد، بنابراین المان مورد استفاده برای بازوها CPE۴R می‌باشد که المان ۴ گره دو خطی، کرنش صفحه‌ای، چهارضلعی می‌باشد (شکل ۶).

مدل پیش بینی آسیب بر اساس مدل مرتبه ۲ تنش‌ها در نظر گرفته می‌شود یعنی آسیب هنگامی شروع می‌شود که شرایط رابطه (۱۰) ارضا شود [۴۶]؛ که در آن σ_n ، σ_s و σ_t بترتیب تنش در مودهای I، II و III می‌باشد. تخریب در المان با کاهش ضرایب الاستیک در آن صورت می‌پذیرد.

$$\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_{C,I}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{C,II}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{C,III}}\right)^2 = 1 \quad (10)$$

سه نوع تکامل آسیب در نرم‌افزار آباکوس موجود است: خطی، نمایی یا جدولی. برای تعریف تکامل آسیب در انواع خطی و نمایی، تنها لازم است که جدایش در آسیب کامل متناظر با δ_f یا انرژی شکست متناظر با G_c مشخص شود. اما برای تعریف آن در نوع جدولی، لازم است ماهیت متغیر تکامل آسیب، D ، بین شروع آسیب و شکست نهایی (شرایط نرم شدن) مشخص شود. از آنجایی که قانون کشش-جدایش دوزنقه‌ای مستقیماً در آباکوس ادغام نمی‌شود، برای هر نمونه ENF، ابتدا قانون کشش-جدایش

پس از تکمیل فرآیند رشد ترک در $\delta_{I,II}$ ، تنش‌های برشی σ با توجه به رفتار نرم شدگی بدست آمده از قوانین پل‌زنی تجربی، حذف می‌شوند. $\delta_{C,II}$ از مجموع مقادیر $\delta_{I,II}$ و مقدار $\delta_{C,II}^*$ بدست می‌آید (رابطه (۷)):

$$\delta_{C,II} = \delta_{I,II} + \delta_{C,II}^* \quad (7)$$

در مقادیر بالاتر از $\delta_{C,II}$ ، الیاف پل‌زنی قابلیت تحمل بار خود را از دست می‌دهند و تسلیم می‌شوند. بنابراین تنش‌ها بطور کلی حذف می‌شوند. از آنجایی قانون کشش - جدایش در نرم‌افزار آباکوس^۱ از طریق متغیر آسیب^۲ مطابق رابطه (۸) تعریف می‌شود [۴۵]:

$$\sigma = (1 - D) K \delta \quad (8)$$

بنابراین متغیر آسیب برای نمودار کشش - جدایش تعریف شده طبق رابطه (۹) بیان می‌شود [۴۵]:

$$D = \begin{cases} 0 & \text{for } 0 < \delta < \delta_{0,II} \\ 1 - \frac{\delta_{0,II}}{\delta} & \text{for } \delta_{0,II} < \delta < \delta_{1,II} \\ 1 - \frac{\delta_{0,II}}{\delta} \frac{\delta_{C,II} - \delta}{\delta_{C,II} - \delta_{1,II}} & \text{for } \delta_{1,II} < \delta < \delta_{C,II} \\ 1 & \text{for } \delta > \delta_{C,II} \end{cases} \quad (9)$$

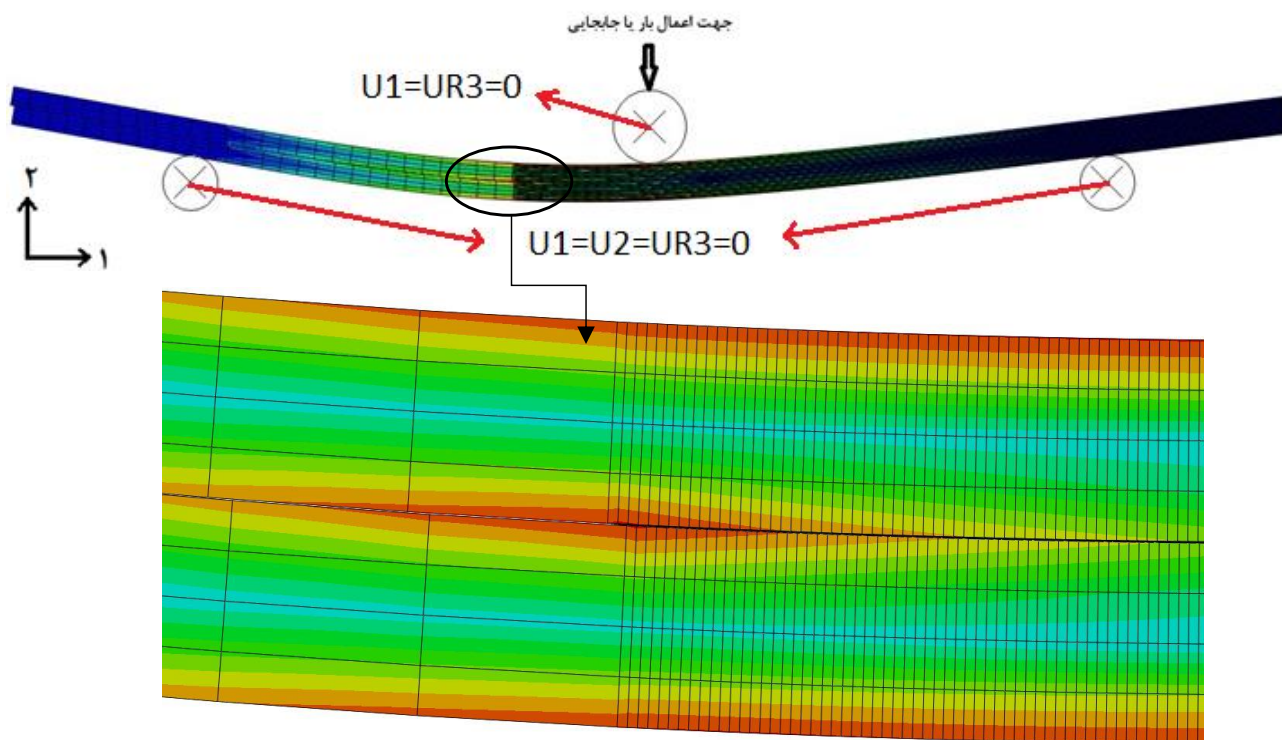
با تعریف تعدادی نقاط بین $\delta_{0,II}$ تا $\delta_{C,II}$ و محاسبه متغیر آسیب متناظر آنها طبق رابطه (۹)، می‌توان قانون کشش - جدایش تعریف شده را وارد نرم‌افزار آباکوس کرد. بدیهی است هر چه تعداد نقاط بیشتر باشد، نتیجه مطلوب‌تر خواهد بود.

۲-۷- مدل‌سازی المان محدود

مطابق آزمون تجربی، نمونه‌های ENF روی دو غلتک قرار می‌گیرد. بار اعمالی از طریق غلتک وسطی و رو به پایین به نمونه اعمال می‌شود. این شرایط در مدل‌سازی المان محدود، دقیقاً پیاده‌سازی می‌گردد. غلطک‌ها بصورت دایره‌های صلب مدل‌سازی شدند. شرایط مرزی حاکم بر غلطک‌ها

3 2D planar
4 Cohesive
5 Aspect Ratio

1 ABAQUS
2 Damage Variable (D)



شکل ۶. مدل المان محدود آزمون خمشی سه نقطه (ENF)

Fig. 6. Three-point bending test (ENF) finite element model.

با توجه به شکل ۷، اتصال نمونه 9ENF بیشترین استحکام را دارد. دامنه امواج بالا (۳۳ میکرومتر) باعث ارتعاش بیشتر بین مولکول‌های پلی‌پروپیلن شده و بنابراین حرارت اصطکاکی بالاتری بین مولکول‌ها ایجاد می‌شود. و متعاقباً ساختار بلوری با سرعت بیشتری ذوب شده و چسبندگی و یکپارچگی جوش را پس از سرد شدن و تبلور مجدد تسهیل می‌کند. علاوه بر این، فشار نگهداری بیشتر (۲/۵ بار) باعث گسترش یکنواخت مواد مذاب به کل سطح تماس می‌شود. با ترکیب فشار بیشتر با زمان جوشکاری بیشتر (۰/۸ ثانیه)، ذوب مواد به تدریج ارتقا می‌یابد و اتصال بهتری ایجاد می‌شود. با توجه به اینکه آزمون‌های تجربی ۳ بار تکرار شده‌اند، در جدول ۳ آنالیز واریانس برای حداکثر نیروی متحمل توسط نمونه‌ها نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸ که از تحلیل پاسخ سطح حداکثر نیروی متحمل توسط نمونه‌های آزمون ENF بر اساس پارامترهای مؤثر بر جوشکاری فراصوتی توسط نرم‌افزار تحلیل آماری مینی‌تب^۲ بدست آمده است، با افزایش

برای هر سه روش کاهش داده استخراج شد و سپس یک برنامه متلب^۱ برای ارائه ورودی جدولی پاسخ کشش-جدایش دوزنقه‌ای توسعه یافت. مرحله نرم شدن مدل دوزنقه‌ای با استفاده از شکل جدولی برای نشان دادن فرآیند تخریب سفتی مطابق رابطه (۹) تعریف شد. سپس نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از تحلیل عددی با نمودار نیرو-جابجایی تجربی مقایسه شد.

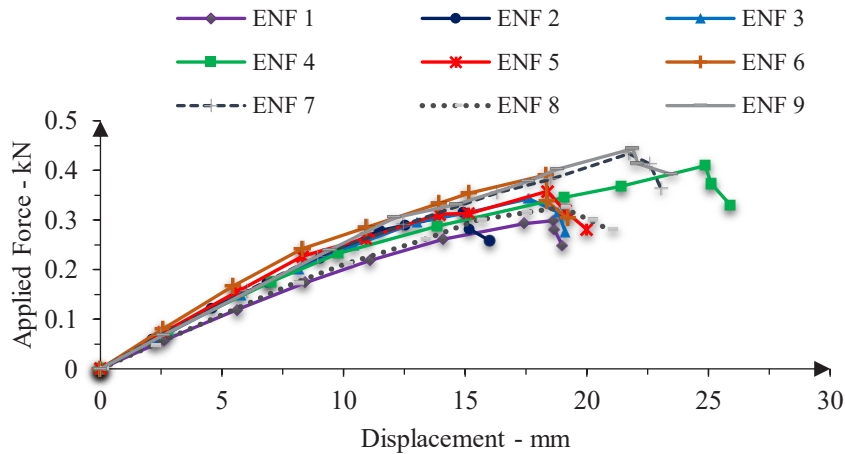
۳- نتایج و بحث

۳-۱- پردازش نتایج تجربی

پردازش نتایج تجربی بدست آمده از آزمون‌های ENF مطابق شکل ۷ با هدف محاسبه دو مقدار صورت می‌گیرد: انرژی شکست بحرانی و چقرمگی شکست اولیه. نمودارهای شکل ۷ همگی دارای یک بخش خطی اولیه می‌باشند که با افزایش جابجایی، رفتار غیرخطی شروع می‌شود که نشانگر رشد ترک می‌باشد.

2 Minitab

1 MATLAB



شکل ۷. نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌های ENF

Fig. 7. Force-displacement diagram for ENF samples.

جدول ۳. آنالیز واریانس داده‌های تجربی

Table 3. Variance analysis of experimental data

| نمونه‌ها | میانگین حداکثر نیروها (kN) | انحراف معیار حداکثر نیروها | ضریب واریانس حداکثر نیروها |
|----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| ENF ۱ | ۰/۲۹۳ | ۰/۰۰۵ | ۱/۷۹۵ |
| ENF ۲ | ۰/۳۰۴ | ۰/۰۰۱ | ۳/۳۰۲ |
| ENF ۳ | ۰/۳۳۹ | ۰/۰۰۴ | ۱/۳۱۴ |
| ENF ۴ | ۰/۳۸۹ | ۰/۰۱۸ | ۴/۶۵۲ |
| ENF ۵ | ۰/۳۳۹ | ۰/۰۱۷ | ۴/۹۷۸ |
| ENF ۶ | ۰/۳۶۶ | ۰/۰۲۴ | ۶/۵۷۵ |
| ENF ۷ | ۰/۴۰۶ | ۰/۰۲۴ | ۵/۹۲۹ |
| ENF ۸ | ۰/۳۱۴ | ۰/۰۰۱ | ۳/۲۳ |
| ENF ۹ | ۰/۴۰۱ | ۰/۰۴۳ | ۱۰/۸۰۹ |

شیشه بازوی بالایی با الیاف شیشه بازوی پایینی بدون حضور پلی‌پروپیلن مذاب با یکدیگر در تماس خواهند بود و اتصال تضعیف خواهد شد. همچنین این افزایش فشار در صورتی که برای مدت زمان بیشتری ادامه یابد، وضعیت اتصال بدتر هم خواهد شد. مرید اسمیتا^۱ و دیناس [۴۷] با بررسی‌هایی که

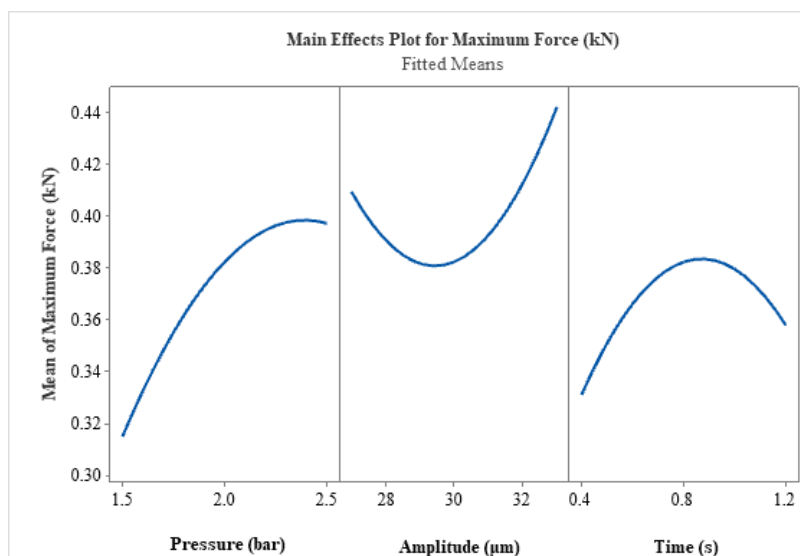
فشار نگهداری، حداکثر نیروی مورد تحمل توسط نمونه‌های آزمون ENF افزایش می‌یابد ولی با توجه به رفتار نمودار، افزایش بیشتر از ۲/۵ بار به کاهش حداکثر نیروی متحمل منجر خواهد شد. همچنین با افزایش زمان جوشکاری تا حد متوسط آن، حداکثر نیروی متحمل افزایش می‌یابد و بعد از آن کاهش می‌یابد. اگر مقدار فشار نگهداری از یک حدی عبور کند، الیاف

1 Mridusmita Roy

جدول ۴. تحلیل واریانس حداکثر نیروی متحملی نمونه‌ها بر حسب ترم‌های مؤثر در جوشکاری فراصوتی

Table 4. Variance analysis of the maximum force endured by the ENF samples according to the effective terms in ultrasonic welding

| ترم‌ها | درجه آزادی | جمع مربعات | میانگین مربعات | مقدار | مقدار |
|-----------------------|------------|------------|----------------|---------|---------|
| | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
| مدل | ۸ | ۰/۰۴۶۳۰۶ | ۰/۰۰۵۷۸۸ | ۱۹/۹۶ | ۰/۰۰۰ |
| P (bar) | ۱ | ۰/۰۰۱۵۵۵ | ۰/۰۰۱۵۵۵ | ۵/۳۶ | ۰/۰۳۳ |
| A (μm) | ۱ | ۰/۰۰۶۶۶۹ | ۰/۰۰۶۶۶۹ | ۲۲/۹۹ | ۰/۰۰۰ |
| T (s) | ۱ | ۰/۰۰۱۸۴۸ | ۰/۰۰۱۸۴۸ | ۶/۳۷ | ۰/۰۲۲ |
| P^2 | ۱ | ۰/۰۰۱۸۷۴ | ۰/۰۰۱۸۷۴ | ۶/۴۶ | ۰/۰۲۱ |
| A^2 | ۱ | ۰/۰۰۸۶۷۵ | ۰/۰۰۸۶۷۵ | ۲۹/۹۱ | ۰/۰۰۰ |
| T^2 | ۱ | ۰/۰۰۴۸۰۹ | ۰/۰۰۴۸۰۹ | ۱۶/۵۸ | ۰/۰۰۱ |
| $P*A$ | ۱ | ۰/۰۰۰۲۰۷ | ۰/۰۰۰۲۰۷ | ۰/۷۱ | ۰/۴۱۰ |
| $P*T$ | ۱ | ۰/۰۰۰۵۸۹ | ۰/۰۰۰۵۸۹ | ۲/۰۳ | ۰/۱۷۲ |
| خطا | ۱۷ | ۰/۰۰۴۹۳۱ | ۰/۰۰۰۲۹۰ | | |
| مجموع | ۲۵ | ۰/۰۵۱۲۳۷ | | | |



شکل ۸. تأثیر مستقل پارامترهای مؤثر بر جوشکاری بر روی حداکثر نیروی متحمل توسط نمونه‌های آزمون ENF

Fig. 8. The independent influence of the effective parameters on welding on the maximum force endured by the ENF samples.

حاصل از آنالیز واریانس در جدول ۴ آمده است. آنالیز واریانس میزان تأثیر پارامترهای معادله رگرسیون را مشخص می‌نماید و در تحلیل و مدل‌سازی آزمایش‌ها نقش به‌سزایی دارد.

روی جوشکاری فراصوتی مواد مرکب سبز انجام داده‌اند نتیجه گرفته‌اند که با افزایش فشار و زمان جوشکاری بار کششی ابتدا افزایش می‌یابد و سپس کاهش می‌یابد که نتایج تجربی بدست آمده در این پژوهش را تأیید می‌کند. با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل نیروی حداکثر برای نمونه‌ها، نتایج

جدول ۵. بهینه سازی انجام شده

Table 5. Optimization

| پاسخ | Fit | SE Fit | %۹۵ CI | %۹۵ PI |
|------------------|--------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| حداکثر نیرو (kN) | ۰/۴۵۳۷ | ۰/۰۱۲۰ | (۰/۴۰۳۷ و ۰/۴۵۴۲) | (۰/۳۸۵۱ و ۰/۴۷۲۹) |
| متغیر | فشار نگهداری (bar) | دامنه امواج فراصوتی (μm) | زمان جوشکاری (s) | |
| مقدار | ۲/۴۴۹۴۹ | ۳۳ | ۰/۹۴۹۴۹۵ | |

نمودار $G_{II} - \delta_{II}^*$ با استفاده از سه روش کاهش داده توضیح داده شده در بخش قبل شامل CCM، CBT و CBBM، برای نمونه‌های مختلف ENF در شکل ۹ الی شکل ۱۱ محاسبه شده است. از آنجایی که هدف اصلی این کار استخراج قانونی است که ناحیه پل زنی را مشخص کند و بتوان از آن به عنوان یک خاصیت اتصال استفاده کرد، برای هر نمونه ENF یک تابع تحلیلی (تابع برازش) که بتواند روند تغییرات را تخمین بزند، مطابق فرمت رابطه (۱۲) برازش می‌شود. این روال به منظور دیفرانسیل‌گیری از داده‌های $G_{II} - \delta_{II}^*$ (استفاده از رابطه (۳)) و در نتیجه ایجاد یک شکل تحلیلی از قوانین پل زنی، مورد نیاز است.

$$G_{II}(\delta_{II}^*) = A\delta_{II}^{*2} + B\delta_{II}^* + C \quad (12)$$

بعد از بدست آوردن پارامترهای رابطه (۱۲)، می‌توان مقدار $G_{b,II}$ و $G_{o,II}$ را استخراج کرد و با بکار بستن رابطه (۳) می‌توان $I_{EXP,II}$ (انتگرال سطح) را محاسبه نمود.

جدول ۶ مشخصه‌های انرژی برای نمونه‌های مختلف ENF که توسط سه روش CCM، CBT و CBBM، محاسبه شده‌است را نشان می‌دهد. در جدول ۶ مقادیر انتگرال سطح^۱ بدست آمده از هر قانون پل زنی با مقادیر میانگین $G_{b,II}$ برای هر سه روش کاهش داده مقایسه شده‌است. انتگرال‌های سطح در یک هماهنگی بسیار خوبی با مقادیر متناظر $G_{b,II}$ برای هر سه روش CCM، CBT و CBBM، می‌باشند که صحت توابع برازش استفاده شده برای بیان داده‌های تجربی را تأیید می‌کند. همچنین داده‌های جدول ۶ نشان می‌دهد که سهم چقرمگی شکست پل زنی در نمونه‌های ENF بیشتر از چقرمگی شکست اولیه می‌باشد.

با توجه به قابلیت اطمینان ۹۵ درصد در آزمایش‌های مهندسی، مقدار P-value کمتر از ۰/۰۵ به منظور تعیین اثر مؤلفه‌های مدل در نظر گرفته می‌شود. با عنایت به جدول ۴، از آنجا که P-value پارامترهای فشار نگهداری دامنه امواج فراصوتی و فشار نگهداری زمان جوشکاری (بترتیب ۰/۴۱ و ۰/۱۷۲) از ۰/۰۵ بزرگ‌تر می‌باشند، تاثیری در مدل ندارند و می‌توان آنها را از مدل حذف نمود. بنابراین معادله رگرسیون خطی مرتبه دوم حاکم بر حداکثر نیروی متحملی نمونه‌ها به صورت رابطه (۱۱) بدست می‌آید:

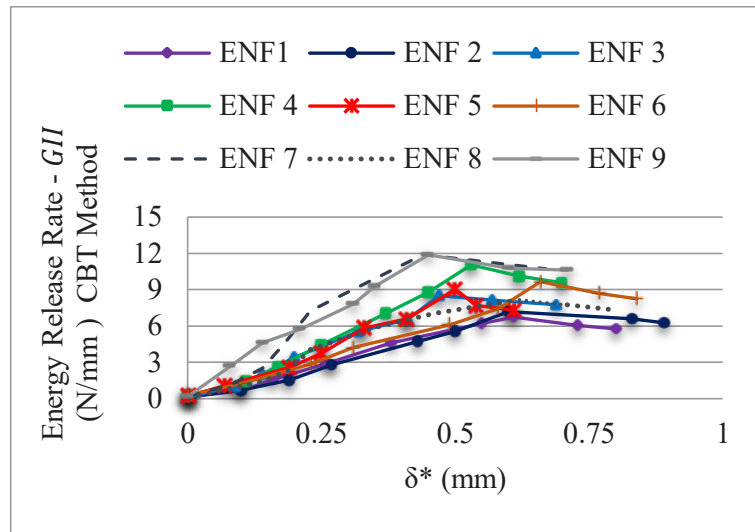
$$F_{max} = 3.891 + 0.452P - 0.2822A + 0.253T - 0.0717P^2 + 0.004929A^2 - 0.2064T^2 \quad (11)$$

P:فشار نگهداری A:دامنه امواج فراصوتی T: زمان اعمال جوشکاری

با در نظر گرفتن مقدار $R-sq = 90.38\%$ می‌توان گفت که مدل سازی صورت گرفته از دقت مناسبی برخوردار است.

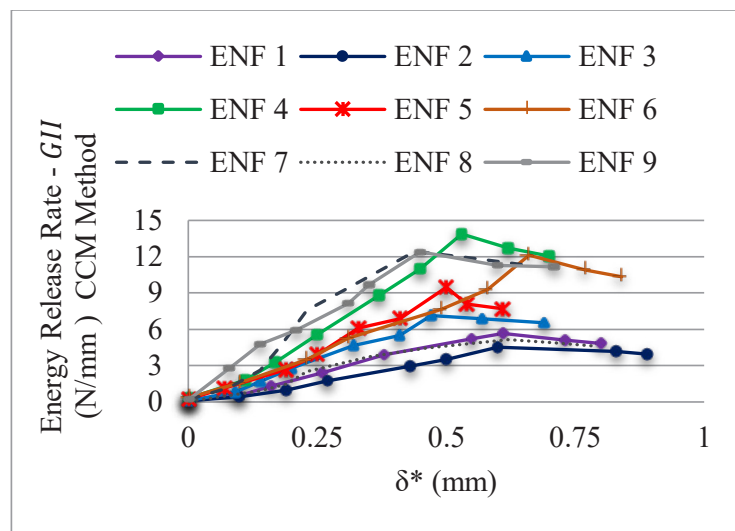
همچنین با در نظر گرفتن حد بیشینه مقدار حداکثر نیروی متحملی نمونه‌ها در مدل منطبق شده بر آزمایش‌ها و لحاظ نمودن حد مطلوبیت، بهینه‌سازی صورت گرفته بر روی مدل آزمایش‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. با توجه به شکل ۷ بیشترین نیروی قابل تحمل برای نمونه‌های ENF مربوط به نمونه ۹ENF می‌باشد که مقدار آن $443/575$ نیوتن می‌باشد. نمونه ۹ENF حاصل جوشکاری فشار نگهداری ۲/۵ بار، دامنه امواج التراسونیک ۳۳ میکرومتر و زمان جوشکاری ۰/۸ ثانیه می‌باشد. با توجه به نتایج بهینه‌سازی (جدول ۵) برای نمونه‌های ENF، مشاهده می‌شود که با کاهش فشار نگهداری نمونه ۹ENF از ۲/۵ بار به ۲/۴۵ بار و افزایش زمان جوشکاری از ۰/۸ ثانیه به ۰/۹۵ ثانیه می‌توان به به بالاترین حد تحمل یعنی $453/7$ نیوتن رسید.

1 $I_{II,EXP}$



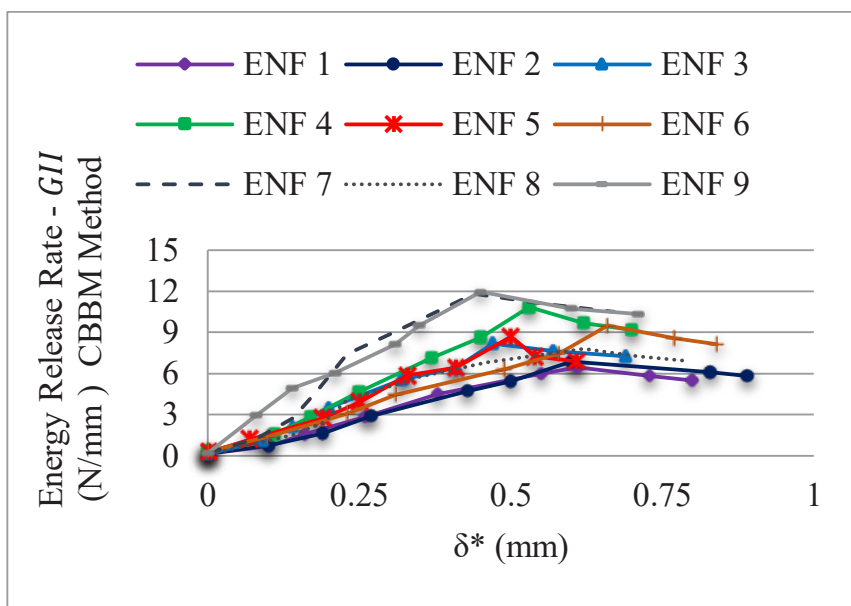
شکل ۹: نمودار $GII-\delta^*II$ محاسبه شده با روش CBT

Fig. 9. $GII-\delta^*II$ diagram calculated by the CBT method.



شکل ۱۰: نمودار $GII-\delta^*II$ محاسبه شده با روش CCM

Fig. 10. $GII-\delta^*II$ diagram calculated by the CCM method.



شکل ۱۱. نمودار $G_{II}-\delta_{II}^*$ محاسبه شده با روش CBBM

Fig. 11. $G_{II}-\delta_{II}^*$ diagram calculated by the CBBM method.

با توجه به تحلیل پاسخ سطح تنش پل زنی بر اساس پارامترهای مؤثر بر جوشکاری فراصوتی که از نرم افزار مینی تب استخراج شده و در شکل ۱۲ نشان داده شده است، افزایش فشار نگهداری و زمان اعمال جوشکاری باعث افزایش تنش پل زنی می شود با این تفاوت که نرخ افزایش تنش پل زنی با افزایش زمان اعمال جوشکاری کند می شود. همچنین با افزایش دامنه امواج فراصوتی تا حد متوسط آن، تنش پل زنی کاهش می یابد و بعد از آن افزایش دامنه امواج فراصوتی باعث افزایش تنش پل زنی می شود.

پس از استخراج تنش پل زنی در شروع رشد ترک و جابجایی لغزشی بحرانی مطابق جدول ۷، پارامترهای قانون کشش-جدایش دوزنقه ای بر اساس آنچه که در بخش ۲-۶ توضیح داده شده است، برای سه روش کاهش داده CCM، CBT و CBBM محاسبه شده و در جدول ۸ نشان داده شده است.

با پیاده سازی قوانین کشش-جدایش دوزنقه ای در مدل المان محدود نمونه ENF (شکل ۶) و تحلیل آن در نرم افزار المان محدود آباکوس، مقادیر حداکثر نیرو و جابجایی جهت رشد ترک در نمونه های ENF، از تحلیل عددی برای سه روش کاهش داده استخراج می شود. مقایسه مقادیر نیروی حداکثر و جابجایی جهت رشد ترک بدست آمده از تحلیل عددی و آزمایشات تجربی در جدول ۹ نشان داده شده است.

با استفاده از نمودار $G_{II}-\delta_{II}^*$ و رابطه (۳)، قانون پل زنی $\sigma_{II}-\delta_{II}^*$ برای تمامی نمونه ها را می توان به دست آورد. دیفرانسیل گیری از تابع چند جمله ای مرتبه دوم نسبت به δ_{II}^* منجر به ایجاد قوانین پل زنی خطی می شود. شکل ۱۳ الی شکل ۲۱ (پیوست) قوانین پل زنی حاصله از روش های کاهش داده CCM، CBT و CBBM، برای نمونه های مختلف ENF را با هم مقایسه می کند.

در شروع شکست کشش برشی به بیشترین میزان می رسد و سپس کاهش می یابد تا به صفر می رسد که به تابع ویژه $G_{II}-\delta_{II}^*$ برای هر نمونه بستگی دارد. در نهایت بعد از یک مقدار مشخص δ_{II}^* که میزان لغزش بحرانی ($\delta_{C,II}^*$) نامیده می شود تنش برشی صفر می شود. جدول ۷ تنش پل زنی در شروع رشد ترک و جابجایی لغزشی بحرانی بدست آمده از قوانین پل زنی مود II را برای نمونه های ENF نشان می دهد.

با توجه به شکل ۱۳ الی شکل ۲۱ (پیوست)، نرخ آزادسازی انرژی محاسبه شده توسط روش های کاهش داده CBT و CBBM هماهنگی خوبی با هم دارند و اختلاف روش CCM با دو روش دیگر در نمونه های ۲، ۴، ۸ و ENF بسیار مشهود است. این اختلاف به ماهیت نمودار $C-\alpha$ و شیب خط برازش آن (m) که در رابطه (۱۵) (پیوست) مورد استفاده قرار می گیرد، مربوط می شود.

جدول ۶. مشخصه‌های انرژی محاسبه شده برای نمونه‌های آزمون ENF در مود II

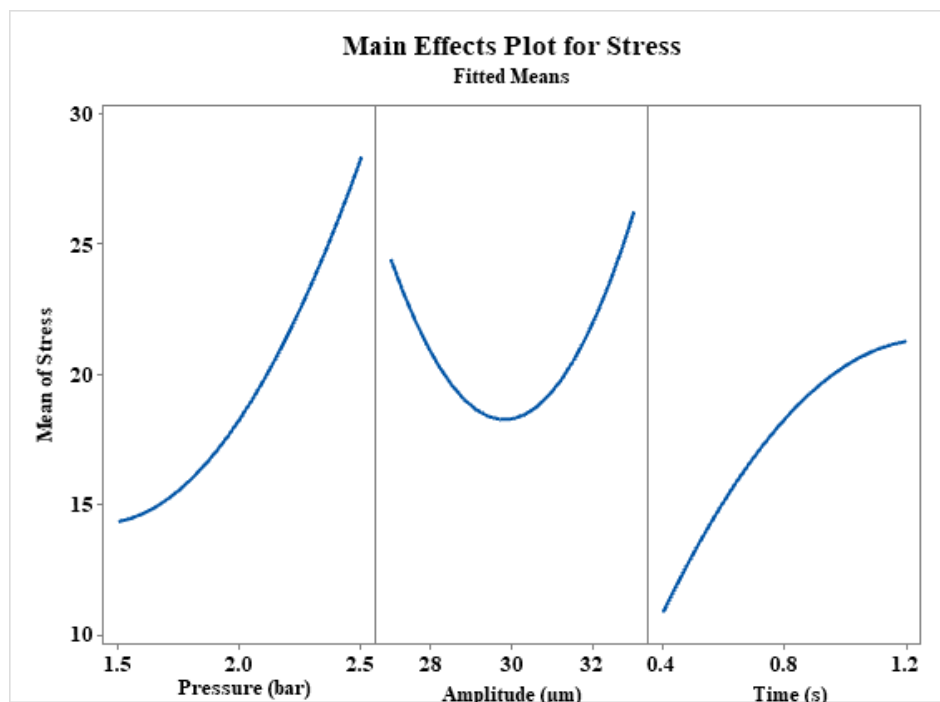
Table 6. Calculated energy characteristics for ENF samples in Mode II.

| $G_{b,II}$ (N/mm) | $G_{0,II}$ (N/mm) | $I_{EXP,II}$ (N/mm) | روش | نمونه |
|-------------------|-------------------|---------------------|------|-------|
| ۴/۸۱۳ | ۰/۱۱۹ | ۴/۸۳۱ | CCM | ENF ۱ |
| ۵/۷۲۷ | ۰/۱۴۳ | ۵/۷۲ | CBT | |
| ۵/۴۶۲ | ۰/۱۵۲ | ۵/۴۶۴ | CBBM | |
| ۳/۹۸۹ | ۰/۱ | ۳/۹۸۹ | CCM | ENF ۲ |
| ۶/۳۰۸ | ۰/۱۶۱ | ۶/۳۱۹ | CBT | |
| ۵/۸۱۴ | ۰/۱۸۱ | ۵/۷۹۵ | CBBM | |
| ۶/۴۱۹ | ۰/۱۲ | ۶/۴۳۹ | CCM | ENF ۳ |
| ۷/۶۱۷ | ۰/۱۴۵ | ۷/۶۱۲ | CBT | |
| ۷/۰۵۱ | ۰/۱۶۲ | ۷/۰۶۲ | CBBM | |
| ۱۳/۱۸۷ | ۰/۳۲۳ | ۱۳/۲۱ | CCM | ENF ۴ |
| ۱۰/۴۰۳ | ۰/۲۶ | ۱۰/۴۱۳ | CBT | |
| ۹/۳۶۸ | ۰/۲۹۱ | ۹/۳۵۹ | CBBM | |
| ۸/۵۰۷ | ۰/۲۴۹ | ۸/۵۰۶ | CCM | ENF ۵ |
| ۸/۰۳۳ | ۰/۲۴ | ۸/۰۲۴ | CBT | |
| ۷/۰۱۴ | ۰/۲۷ | ۷/۰۳۴ | CBBM | |
| ۹/۶۰۹ | ۰/۳۶۲ | ۹/۶۲۱ | CCM | ENF ۶ |
| ۷/۶۳۱ | ۰/۲۹۲ | ۷/۶۲۳ | CBT | |
| ۷/۲۰۷ | ۰/۳۲۹ | ۷/۲۳۶ | CBBM | |
| ۱۱/۱۱۸ | ۰/۲۱۲ | ۱۱/۱۳ | CCM | ENF ۷ |
| ۱۰/۶۱۴ | ۰/۲۰۵ | ۱۰/۶۱۹ | CBT | |
| ۱۰/۳۵ | ۰/۲۳ | ۱۰/۳۸ | CBBM | |
| ۴/۷۷ | ۰/۰۶۳ | ۴/۷۸۳ | CCM | ENF ۸ |
| ۷/۵۴۹ | ۰/۱۰۱ | ۷/۵۵ | CBT | |
| ۷/۱۱۷ | ۰/۱۰۷ | ۷/۱۲۴ | CBBM | |
| ۱۱/۴۳۷ | ۰/۲۱ | ۱۱/۴۴۷ | CCM | ENF ۹ |
| ۱۰/۹۳۵ | ۰/۲۰۳ | ۱۰/۹۳۸ | CBT | |
| ۱۰/۸۴۴ | ۰/۲۲۶ | ۱۰/۸۷ | CBBM | |

جدول ۷. پارامترهای تجربی بدست آمده از قوانین پلرزی مود II برای نمونه‌های ENF

Table 7. Experimental parameters obtained from bridging Mode II laws for ENF samples.

| روش | ENF ۱ | | | | ENF ۲ | | | | ENF ۳ | | | |
|------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | $\sigma_{c,II}$ (MPa) | $\delta_{0,II}$ (mm) | $\delta_{1,II}$ (mm) | $\delta_{c,II}$ (mm) | $\sigma_{c,II}$ (MPa) | $\delta_{0,II}$ (mm) | $\delta_{1,II}$ (mm) | $\delta_{c,II}$ (mm) | $\sigma_{c,II}$ (MPa) | $\delta_{0,II}$ (mm) | $\delta_{1,II}$ (mm) | $\delta_{c,II}$ (mm) |
| CCM | ۱۳/۲۱ | ۰/۰۰۰۱۳۲ | ۰/۰۰۹۰۵ | ۰/۷۴۱ | ۸/۸۳۶۲ | ۰/۰۰۰۰۸۸۴ | ۰/۰۱۱۴ | ۰/۹۱۴ | ۱۸/۷۳۲ | ۰/۰۰۰۱۸۷ | ۰/۰۰۶۵ | ۰/۶۹۴ |
| CBT | ۱۵/۶۵۱ | ۰/۰۰۰۱۵۷ | ۰/۰۰۹۲۳ | ۰/۷۴۰ | ۱۴/۱۷۸ | ۰/۰۰۰۱۴۲ | ۰/۰۱۱۴ | ۰/۹۰۳ | ۲۲/۳۰۵ | ۰/۰۰۰۲۲۳ | ۰/۰۰۶۶۱ | ۰/۶۸۹ |
| CBBM | ۱۵/۴۵ | ۰/۰۰۰۱۵۵ | ۰/۰۰۹۹۴ | ۰/۷۱۷ | ۱۴/۳۷ | ۰/۰۰۰۱۴۴ | ۰/۰۱۲۶ | ۰/۸۱۹ | ۲۲/۹۳۵ | ۰/۰۰۰۲۲۹ | ۰/۰۰۷۱۶ | ۰/۶۲۳ |
| روش | ENF ۴ | | | | ENF ۵ | | | | ENF ۶ | | | |
| | $\sigma_{c,II}$ (MPa) | $\delta_{0,II}$ (mm) | $\delta_{1,II}$ (mm) | $\delta_{c,II}$ (mm) | $\sigma_{c,II}$ (MPa) | $\delta_{0,II}$ (mm) | $\delta_{1,II}$ (mm) | $\delta_{c,II}$ (mm) | $\sigma_{c,II}$ (MPa) | $\delta_{0,II}$ (mm) | $\delta_{1,II}$ (mm) | $\delta_{c,II}$ (mm) |
| CCM | ۲۹/۱۵ | ۰/۰۰۰۲۹۲ | ۰/۰۱۱۲ | ۰/۹۱۸ | ۲۰/۸۰۸ | ۰/۰۰۰۲۰۸ | ۰/۰۱۲۱ | ۰/۸۳۰ | ۲۱/۷۱ | ۰/۰۰۰۲۱۷ | ۰/۰۱۶۸ | ۰/۹۰۳ |
| CBT | ۲۳/۳۱۷ | ۰/۰۰۰۲۳۳ | ۰/۰۱۱۳ | ۰/۹۰۴ | ۱۹/۹۶۸ | ۰/۰۰۰۲ | ۰/۰۱۲۱ | ۰/۸۱۶ | ۱۷/۳۴۷ | ۰/۰۰۰۱۷۳ | ۰/۰۱۶۹ | ۰/۸۹۶ |
| CBBM | ۲۴/۴۳۵ | ۰/۰۰۰۲۴۴ | ۰/۰۱۲ | ۰/۷۷۸ | ۲۱/۲۸۲ | ۰/۰۰۰۲۱۳ | ۰/۰۱۲۸ | ۰/۶۷۴ | ۱۸/۸۴۷ | ۰/۰۰۰۱۸۸ | ۰/۰۱۷۶ | ۰/۷۸۵ |
| روش | ENF ۷ | | | | ENF ۸ | | | | ENF ۹ | | | |
| | $\sigma_{c,II}$ (MPa) | $\delta_{0,II}$ (mm) | $\delta_{1,II}$ (mm) | $\delta_{c,II}$ (mm) | $\sigma_{c,II}$ (MPa) | $\delta_{0,II}$ (mm) | $\delta_{1,II}$ (mm) | $\delta_{c,II}$ (mm) | $\sigma_{c,II}$ (MPa) | $\delta_{0,II}$ (mm) | $\delta_{1,II}$ (mm) | $\delta_{c,II}$ (mm) |
| CCM | ۳۷/۰۶۱ | ۰/۰۰۰۳۷۱ | ۰/۰۰۵۹ | ۰/۶۰۷ | ۱۲/۶۵۵ | ۰/۰۰۰۱۲۷ | ۰/۰۰۵۰۳ | ۰/۷۶۱ | ۳۷/۳۲۹ | ۰/۰۰۰۳۲۳ | ۰/۰۰۵۸ | ۰/۶۱۹ |
| CBT | ۳۵/۵۳ | ۰/۰۰۰۳۵۵ | ۰/۰۰۵۹۴ | ۰/۶۰۴ | ۲۰/۱۱۵ | ۰/۰۰۰۲۰۱ | ۰/۰۰۵۱۳ | ۰/۷۵۶ | ۳۵/۸۵۹ | ۰/۰۰۰۳۵۹ | ۰/۰۰۵۸۳ | ۰/۶۱۶ |
| CBBM | ۳۶/۷۸۳ | ۰/۰۰۰۳۶۸ | ۰/۰۰۶۴۳ | ۰/۵۷۱ | ۲۰/۱۰۴ | ۰/۰۰۰۲۰۱ | ۰/۰۰۵۴۵ | ۰/۷۱۴ | ۳۷/۸۰۶ | ۰/۰۰۰۳۷۸ | ۰/۰۰۶۱۷ | ۰/۵۸۱ |



شکل ۱۲. تأثیر مستقل پارامترهای مؤثر بر جوشکاری بر روی تنش پلرزی بدست آمده از روش CBBM در آزمون ENF

Fig. 12. The independent influence of the effective parameters on welding on the bridging stress obtained by the CBBM method in the ENF samples

جدول ۸. پارامترهای قانون کشش- جدایش محاسبه شده با استفاده از ۳ روش کاهش داده برای نمونه‌های ENF

Table 8. Traction-separation law parameters calculated using the three data reduction methods for ENF samples.

| روش | ENF ۱ | | | | | ENF ۲ | | | | | ENF ۳ | | | | |
|------|------------------|------------------------|------------------|---------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|---------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|---------------|------------------------|
| | تجربی | | عددی | | | تجربی | | عددی | | | تجربی | | عددی | | |
| | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو٪ | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو٪ | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو٪ | δ_{EXP} (mm) |
| CCM | | | ۲۶۴/۷۹۳ | -۱۱/۳۲ | ۱۹/۸۱۸ | | | ۲۳۶/۴۷۳۷ | -۲۴/۹۵۲ | ۱۷/۷۶۶ | | | ۲۹۸/۶۵۲۵ | -۱۲/۸۸۲ | ۱۷/۴۹۶ |
| CBT | ۲۹۸/۵۹۵ | ۱۸/۶۱ | ۲۹۶/۸۰۳ | -۰/۶ | ۱۸/۱ | ۳۱۵/۰۹۵ | ۱۴/۹۲ | ۳۰۴/۳۵ | -۲/۴۱ | ۱۳/۸۹۹ | ۳۴۲/۸۱۵ | ۱۷/۶ | ۳۳۴/۰۰۳ | -۲/۵۷ | ۱۷/۳۶۵ |
| CBBM | | | ۲۹۲/۵۳ | -۲/۰۳۱ | ۱۷/۹۴۶ | | | ۳۱۳/۰۵۲ | -۰/۶۴۸ | ۱۴/۴۸۸ | | | ۳۴۳/۰۴۵ | -۰/۰۶۷ | ۱۷/۷۵۶ |
| | ENF ۴ | | | | | ENF ۵ | | | | | ENF ۶ | | | | |
| | تجربی | | عددی | | | تجربی | | عددی | | | تجربی | | عددی | | |
| | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو٪ | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو٪ | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو٪ | δ_{EXP} (mm) |
| CCM | | | ۴۵۹/۱۵۸ | ۱۲/۱۶۳ | ۲۳/۸۴ | | | ۳۵۱/۴۸۴۴ | -۱/۷۸۸ | ۱۷/۸۳۴ | | | ۴۳۲/۳۸۱ | ۱۰/۶۳۱ | ۱۷/۰۳۷ |
| CBT | ۴۰۹/۳۶۵ | ۲۴/۸۶ | ۳۸۲/۳۹۹ | -۶/۵۸۷ | ۲۳/۴۸۱ | ۳۵۷/۸۸۵ | ۱۸/۳۸ | ۳۳۵/۱۳ | -۶/۳۵۹ | ۱۷/۴۸ | ۳۹۰/۸۳ | ۱۸/۳۳ | ۳۴۶/۸۱۸ | -۱۱/۲۶۱ | ۱۶/۷ |
| CBBM | | | ۴۰۱/۰۲۶ | -۲/۰۳۷ | ۲۴/۴۳۷ | | | ۳۵۲/۹۰۲ | -۱/۳۹۲ | ۱۷/۷۰۸ | | | ۳۷۹/۰۲۹ | -۳/۰۱۹ | ۱۷/۳۳۵ |
| | ENF ۷ | | | | | ENF ۸ | | | | | ENF ۹ | | | | |
| | تجربی | | عددی | | | تجربی | | عددی | | | تجربی | | عددی | | |
| | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو٪ | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو٪ | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو٪ | δ_{EXP} (mm) |
| CCM | | | ۴۲۹/۱۳۱ | -۱/۰۴۸ | ۲۱/۷۸۶ | | | ۲۳۸/۳۸۲ | -۲۶/۷۳۷ | ۱۷/۷۱۹ | | | ۴۲۷/۸۳۴ | -۳/۵۴۹ | ۲۱/۰۰۶ |
| CBT | ۴۳۲/۶۷۵ | ۲۱/۷۳ | ۴۱۰/۰۹۶ | -۵/۴۳۷ | ۲۱/۵۳ | ۳۲۵/۳۸ | ۱۸/۹۷ | ۳۱۹/۰۷ | -۱/۹۴ | ۱۸/۳۷۵ | ۴۴۳/۵۷۵ | ۲۱/۸۸ | ۴۰۹/۷۵ | -۷/۶۲۶ | ۲۱/۱۳۴ |
| CBBM | | | ۴۲۴/۵۲۳ | -۲/۱۱ | ۲۱/۷۲۸ | | | ۳۱۸/۴۷۶ | -۲/۱۲۲ | ۱۸/۷۲۷ | | | ۴۳۲/۶۰۶ | -۲/۴۷۳ | ۲۱/۱۸۳ |

- سهم چقرمگی شکست پل زنی در رشد ترک نمونه‌های ENF بیشتر از چقرمگی شکست اولیه می‌باشد.
- روش‌های CBBM و CBT نتایج آزمایشات تجربی را بهتر از روش CCM بترتیب با حداکثر خطای ۳٪ و ۷/۶٪ پیش‌بینی کردند.
- روش CBBM کمترین خطا را در پیش‌بینی حداکثر نیروی نمونه ۳ENF و حداکثر جابجایی نمونه ۷ENF دارا می‌باشد (به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۰۱ درصد) و می‌تواند حداکثر نیرو و جابجایی را برای رشد ترک ۳ENF به ترتیب با خطاهای ۰/۰۷ درصد و ۰/۸۹ درصد پیش‌بینی کند.
- هر سه روش قادر به پیش‌بینی نمونه‌های ۷ENF و ۵ENF بودند. با این حال، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش زمان جوشکاری و فشار نگهداری، نتایج عددی با نتایج تجربی سازگارتر می‌شوند.
- بر اساس نتایج CBBM، با افزایش دامنه امواج فراصوتی تا سطح متوسط آن، $\delta_{C,II}^*$ افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش فشار نگهداری و زمان جوشکاری تا سطح متوسط، $\delta_{C,II}^*$ ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. پس از سطح متوسط پارامترهای مذکور، $\delta_{C,II}^*$ به شدت کاهش می‌یابد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود روش CBBM و تا حدودی روش CBT نسبت به روش CCM نتایج بدست آمده از آزمایشات تجربی را بهتر پیش‌بینی می‌کنند. خطای روش CBBM برای پیش‌بینی حداکثر نیرو، حداکثر ۳ درصد می‌باشد و خطای این روش برای پیش‌بینی حداکثر جابجایی، حداکثر ۵/۵ درصد می‌باشد. این روش توانسته است حداکثر نیرو و جابجایی جهت رشد ترک نمونه ۳ENF را با کمترین خطا پیش‌بینی کند.

۴- نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف استخراج قانونی برای تعیین نواحی پل زنی و چسبناکی که می‌تواند به‌عنوان مشخصه اتصال استفاده شود، انجام گرفته است. اعتبار قوانین کشش-جدایش به دست آمده از نرم‌افزار تحلیل گر آباکوس، با مقایسه حداکثر نیروهای عددی و تجربی (نیروی که واگرایی غیرخطی در آن رخ می‌دهد) تعیین شده است. نتایج اصلی به شرح زیر می‌باشد:

- در بین مدل‌های مختلف ناحیه چسبناکی، مدل دوزنقه‌ای رفتار اتصال جوش فراصوتی را در مود II بهتر از مدل‌های دیگر پیش‌بینی می‌کند.

جدول ۹. حداکثر نیرو و جابجایی مورد نیاز جهت رشد ترک، بدست آمده از آزمایشات تجربی و استخراج شده از تحلیل عددی برای سه روش کاهش داده

Table 9. Maximum force required for crack growth obtained from experimental investigations and extracted from numerical analysis for the three data reduction methods

| روش | ENF ۱ | | | | | ENF ۲ | | | | | ENF ۳ | | | | |
|------|------------------|------------------------|------------------|----------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|----------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|----------------|------------------------|
| | تجربی | | عددی | | | تجربی | | عددی | | | تجربی | | عددی | | |
| | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو % | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو % | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو % | δ_{EXP} (mm) |
| CCM | | | ۲۶۴/۷۹۳ | -۱۱/۳۲ | ۱۹/۸۱۸ | | | ۲۳۶/۴۷۳۷ | -۲۴/۹۵۲ | ۱۷/۷۶۶ | | | ۲۹۸/۶۵۲۵ | -۱۲/۸۸۲ | ۱۷/۴۹۶ |
| CBT | ۲۹۸/۵۹۵ | ۱۸/۶۱ | ۲۹۶/۸۰۳ | -۰/۶ | ۱۸/۱ | ۳۱۵/۰۹۵ | ۱۴/۹۳ | ۳۰۴/۳۵ | -۳/۴۱ | ۱۳/۸۹۹ | ۳۴۲/۸۱۵ | ۱۷/۶ | ۳۳۱/۰۰۳ | -۲/۵۷ | ۱۷/۳۶۵ |
| CBBM | | | ۲۹۲/۵۳ | -۲/۰۳۱ | ۱۷/۹۴۶ | | | ۳۱۳/۰۵۲ | -۰/۶۴۸ | ۱۴/۴۸۸ | | | ۳۴۳/۰۴۵ | -۰/۰۶۷ | ۱۷/۷۵۶ |
| روش | ENF ۴ | | | | | ENF ۵ | | | | | ENF ۶ | | | | |
| | تجربی | | عددی | | | تجربی | | عددی | | | تجربی | | عددی | | |
| | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو % | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو % | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو % | δ_{EXP} (mm) |
| CCM | | | ۴۵۹/۱۵۸ | ۱۲/۱۶۳ | ۲۳/۸۴ | | | ۳۵۱/۴۸۴۴ | -۱/۷۸۸ | ۱۷/۸۳۴ | | | ۴۳۲/۳۸۱ | ۱۰/۱۶۳۱ | ۱۷/۰۲۷ |
| CBT | ۴۰۹/۳۶۵ | ۲۴/۸۶ | ۳۸۲/۳۹۹ | -۶/۵۸۷ | ۲۳/۴۸۱ | ۳۵۷/۸۸۵ | ۱۸/۳۸ | ۳۳۵/۱۳ | -۶/۳۵۹ | ۱۷/۴۸ | ۳۹۰/۸۳ | ۱۸/۳۳ | ۳۴۶/۸۱۸ | -۱۱/۲۶۱ | ۱۶/۷ |
| CBBM | | | ۴۰۱/۰۲۶ | -۲/۰۳۷ | ۲۴/۴۳۷ | | | ۳۵۲/۹۰۲ | -۱/۳۹۲ | ۱۷/۷۰۸ | | | ۳۷۹/۰۲۹ | -۳/۰۱۹ | ۱۷/۳۳۵ |
| روش | ENF ۷ | | | | | ENF ۸ | | | | | ENF ۹ | | | | |
| | تجربی | | عددی | | | تجربی | | عددی | | | تجربی | | عددی | | |
| | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو % | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو % | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | δ_{EXP} (mm) | F_{MAX} (N) | خطای نیرو % | δ_{EXP} (mm) |
| CCM | | | ۴۲۹/۱۳۱ | -۱/۰۴۸ | ۲۱/۷۸۶ | | | ۲۳۸/۳۸۲ | -۲۶/۷۳۷ | ۱۷/۷۱۹ | | | ۴۲۷/۸۳۴ | -۳/۵۴۹ | ۲۱/۰۰۶ |
| CBT | ۴۳۳/۶۷۵ | ۲۱/۷۳ | ۴۱۰/۰۹۶ | -۵/۴۳۷ | ۲۱/۵۳ | ۳۲۵/۳۸ | ۱۸/۹۷ | ۳۱۹/۰۷ | -۱/۹۴ | ۱۸/۳۷۵ | ۴۴۳/۵۷۵ | ۲۱/۸۸ | ۴۰۹/۷۵ | -۷/۶۲۶ | ۲۱/۱۳۴ |
| CBBM | | | ۴۲۴/۵۲۳ | -۲/۱۱ | ۲۱/۷۲۸ | | | ۳۱۸/۴۷۶ | -۲/۱۲۲ | ۱۸/۷۲۷ | | | ۴۳۲/۶۰۶ | -۲/۴۷۳ | ۲۱/۱۸۳ |

در این رابطه C کامپلیانس نمونه می‌باشد (جابجایی خمشی بر واحد نیرو، $C = \delta/P$). مقدار کامپلیانس C ، برحسب ثابت C و توان سوم طول ترک (α) ، طبق رابطه زیر بیان می‌شود.

$$C = C_0 + m\alpha^3 \quad (14)$$

که مقدار ثابت C برابر با کامپلیانس اولیه ترک هنگام شروع رشد ترک می‌باشد (α). ضریب m می‌تواند از شیب منحنی تجربی کامپلیانس بر حسب توان سوم طول ترک تعیین شود. با دیفرانسیل گرفتن از رابطه (۱۴) نسبت به طول ترک و جایگزین کردن آن در رابطه (۱۴)، مقادیر G_{II} بازای هر طول ترک α_i به وسیله رابطه (۱۵) بدست می‌آید.

$$G_{II} = \frac{3m\alpha^2 P^2}{2b} \quad (15)$$

• با افزایش فشار نگهداری و زمان جوشکاری، $\sigma_{C,II}$ افزایش می‌یابد ولی با افزایش دامنه امواج فراصوتی، $\sigma_{C,II}$ ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

۵- پیوست‌ها

۵-۱ روش‌های کاهش داده- محاسبه نرخ آزادسازی انرژی

۵-۱-۱ روش کالیبراسیون نرمی^۱

روش CCM، یک روش کاهش داده برای تعیین G_{II} است که توسط انجمن کامپوزیت آمریکا معرفی شده است [۴۸]. این روش از رابطه اروین-کیس برای محاسبه G_{II} استفاده می‌کند [۴۹].

$$G_{II} = \frac{P^2 \cdot dC}{2b \cdot d\alpha} \quad (13)$$

1 Compliance Calibration Method (CCM)

۵-۱-۲- نظریه تیر کلاسیک^۱

$$G_{II} = \frac{9\alpha_e^2 P^2}{16b^2 h^3 E_f} \quad (19)$$

روش CBT برای محاسبه G_{II} توسط وانگ و ویلیامز پیشنهاد شده است [۵۰]. این روش بر اساس مدلی بر پایه تیر الاستیک می‌باشد (رابطه (۱۶)).

که α_e معادل طول ترک می‌باشد و بیانگر اصلاح طول ترک واقعی به منظور محاسبه اثر ناحیه پل‌زنی است و از رابطه (۲۰) بدست می‌آید [۵۱]:

$$G_{II} = \frac{9(\alpha + 0.42\Delta_1)^2 P^2}{16b^2 h^3 E_1} \quad (16)$$

$$\alpha_e = \left[\frac{C_c}{C_{0c}} \alpha_0^3 + \left(\frac{C_c}{C_{0c}} - 1 \right) \frac{2L^3}{3} \right]^{1/3} \quad (20)$$

که E مدول در راستای طولی نمونه‌ها و A اصلاح طول ترک می‌باشد، که برای تغییر شکل برشی گسترش یافته در هنگام بارگذاری قطعه محاسبه می‌شود و توسط دی مورا و دی موریا س به صورت رابطه (۱۷) ارائه شده است [۳۲].

مدول خمشی نمونه E_f ، تأثیر مهمی بر روی شیب و رفتار منحنی $P-\delta$ دارد که از رابطه کمپلیانس اولیه C با α محاسبه می‌شود [۵۱] (رابطه (۲۱)).

$$\Delta_1 = h \sqrt{\frac{E_1}{11G_{13}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \right]} \quad (17)$$

$$E_f = \frac{3\alpha_0^3 + 2L^3}{8b^3 C_{0c}} \quad (21)$$

که Γ از رابطه زیر بدست می‌آید:

که

$$\Gamma = 1.18 \frac{\sqrt{E_1 E_3}}{G_{13}} \quad (18)$$

$$C_{0c} = C_0 - \frac{3L}{10bhG_{13}} \quad (22)$$

که E و G به ترتیب مدول عرضی و برشی می‌باشند.

کمپلیانس اصلاح شده C_c از رابطه (۲۳) بدست می‌آید [۵۱]:

۵-۱-۳- روش تیر مبتنی بر نرمی^۲

$$C_c = C - \frac{3L}{10bhG_{13}} \quad (23)$$

روش‌های کاهش داده CBT و CCM به اندازه‌گیری دقیق طول ترک نیاز دارند بنابراین، دی مورا و همکاران [۵۱]، یک تئوری تیر جدید با پایه محاسباتی و بکارگیری مفهومی معادل ترک پیشنهاد کرده‌اند.

که C کمپلیانس نمونه ENF در طول آزمون می‌باشد و محاسبه آن بر اساس تئوری تیر می‌باشد [۵۱] (رابطه (۲۴)):

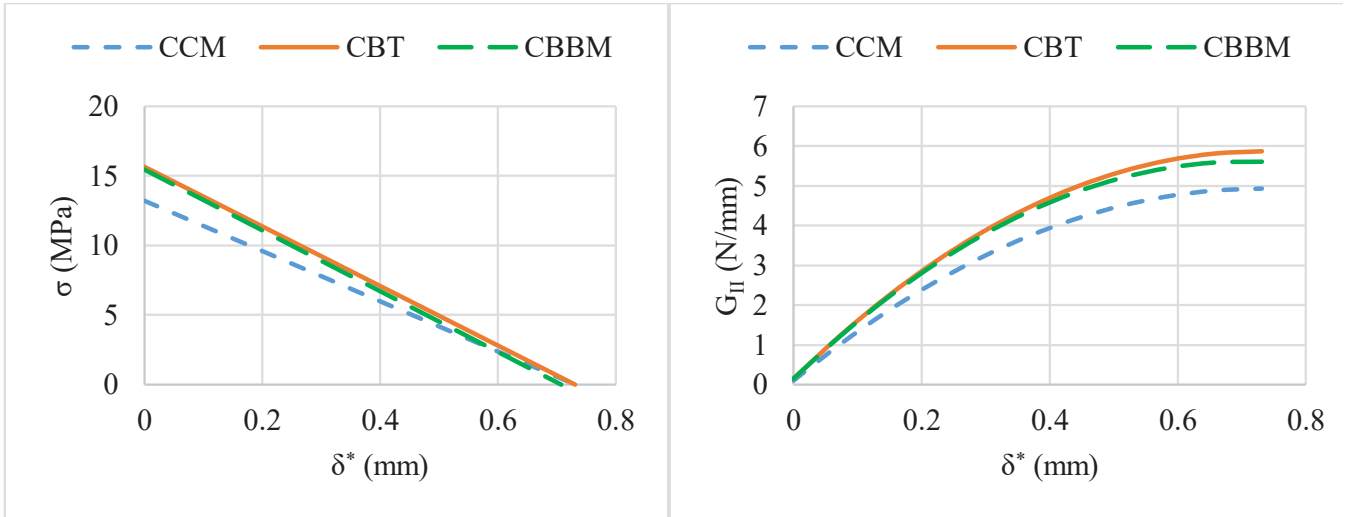
روش CBBM تنها بستگی به کمپلیانس نمونه طی آزمون داشته و در این روش محاسباتی، برخی اثرات که بر روی رفتار نمونه و در نتیجه منحنی $P-\delta$ تأثیر می‌گذارند، در نظر گرفته نشده‌است. مهم‌ترین مزیت این روش توانایی‌اش در بدست آوردن منحنی R از منحنی $P-\delta$ دارد، که در نتیجه دشواری‌های رصد ترک را برطرف می‌کند. محاسبه G_{II} با اصلاح رابطه اروین-کیس به صورت رابطه (۱۹) بدست می‌آید [۵۱].

$$C = \frac{3\alpha^3 + 2L^3}{8bh^3 E_1} + \frac{3L}{10bhG_{13}} \quad (24)$$

1 Classical Beam Theory (CBM)
2 Compliance-Based Beam Method (CBBM)

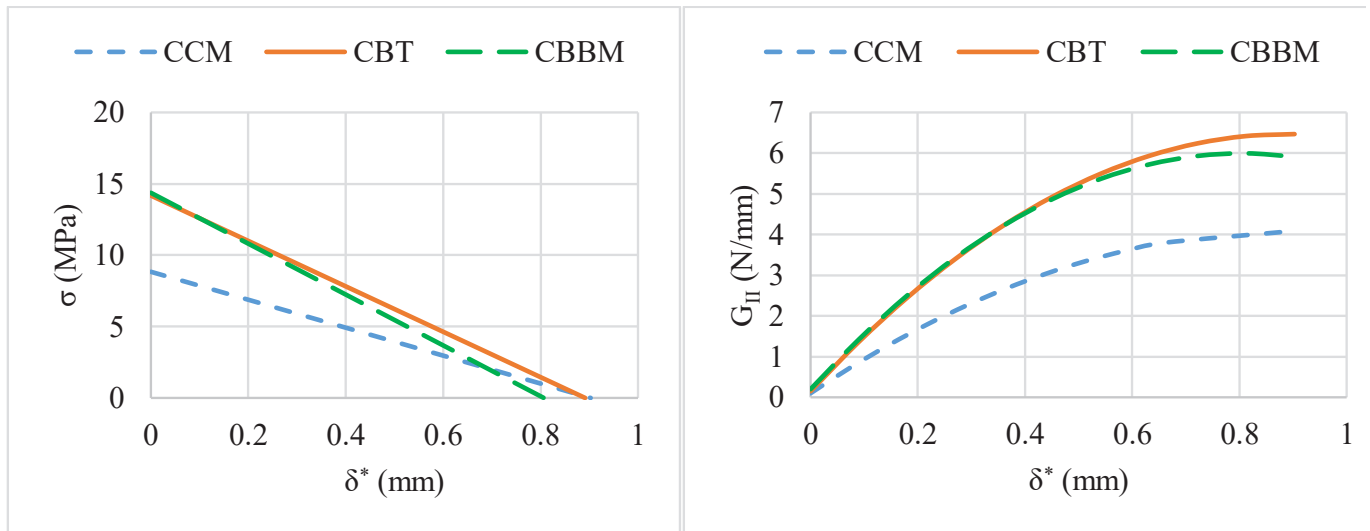
قوانین پل زنی تجربی استخراج شده برای نمونه‌های ENF را در شکل ۱۳ الی شکل ۲۱ نشان داده شده است

۵-۱-۴- برآزش داده‌های $G_{II} - \delta_{II}^*$ و استخراج قوانین پل زنی تجربی برآزش داده‌های $G_{II} - \delta_{II}^*$ برای سه روش کاهش داده به همراه



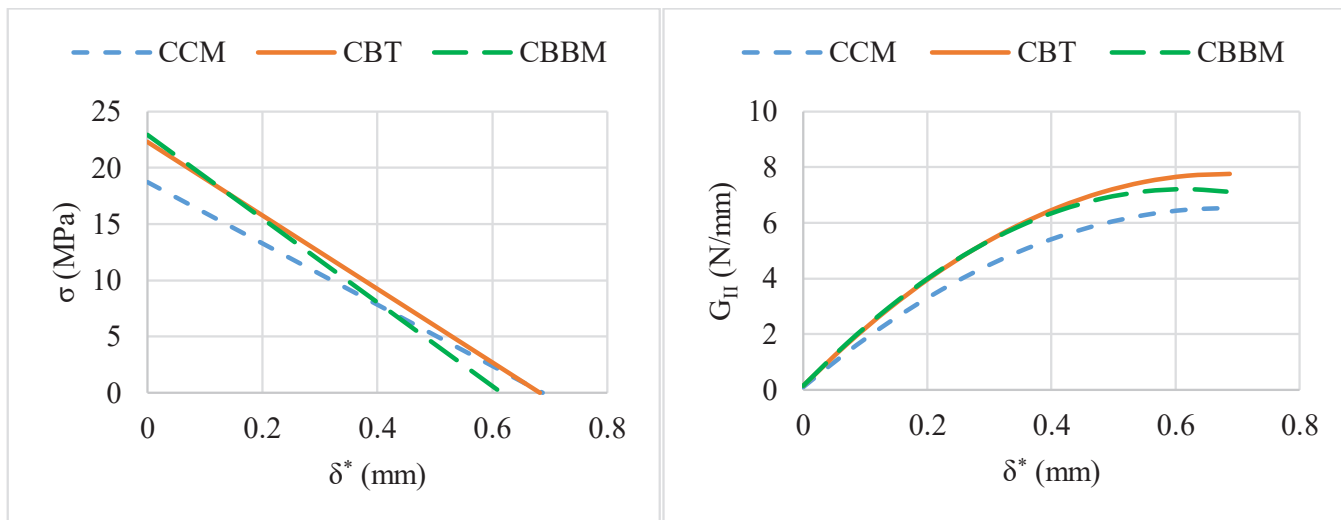
شکل ۱۳. نمودار برآزش $G_{II} - \delta_{II}^*$ و قانون پل زنی تجربی محاسبه شده برای نمونه ۱ ENF با استفاده از سه روش کاهش داده

Fig. 13. Fit diagram of $G_{II} - \delta_{II}^*$ and experimental bridging laws calculated for ENF 1 sample using three data reduction methods.



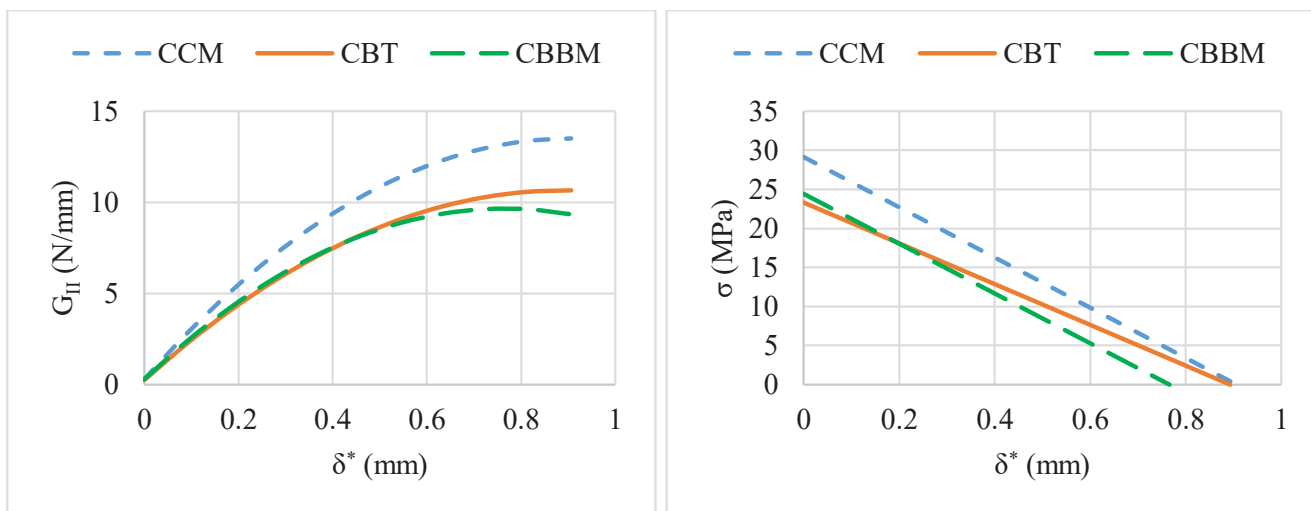
شکل ۱۴. نمودار برآزش $G_{II} - \delta_{II}^*$ و قانون پل زنی تجربی محاسبه شده برای نمونه ۲ ENF با استفاده از سه روش کاهش داده

Fig. 14. Fit diagram of $G_{II} - \delta_{II}^*$ and experimental bridging laws calculated for ENF 2 sample using three data reduction methods.



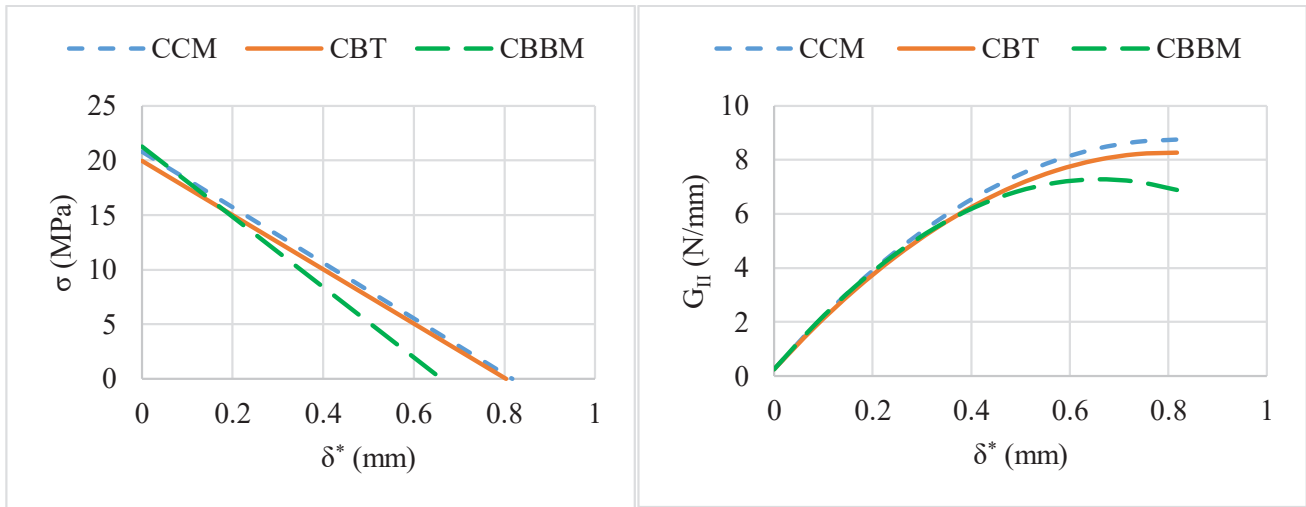
شکل ۱۵. نمودار برازش $G_{II}-\delta^*$ و قانون پلزنی تجربی محاسبه شده برای نمونه ۳ ENF با استفاده از سه روش کاهش داده

Fig. 15. Fit diagram of $G_{II}-\delta^*$ and experimental bridging laws calculated for ENF 3 sample using three data reduction methods.



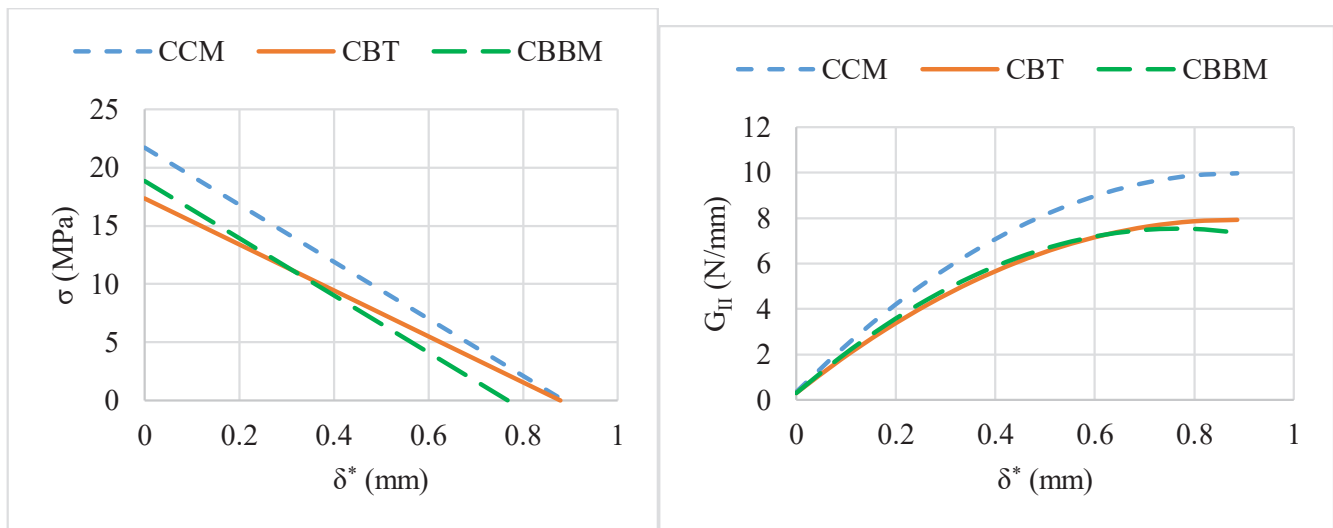
شکل ۱۶. نمودار برازش $G_{II}-\delta^*$ و قانون پلزنی تجربی محاسبه شده برای نمونه ۴ ENF با استفاده از سه روش کاهش داده

Fig. 16. Fit diagram of $G_{II}-\delta^*$ and experimental bridging laws calculated for ENF 4 sample using three data reduction methods.



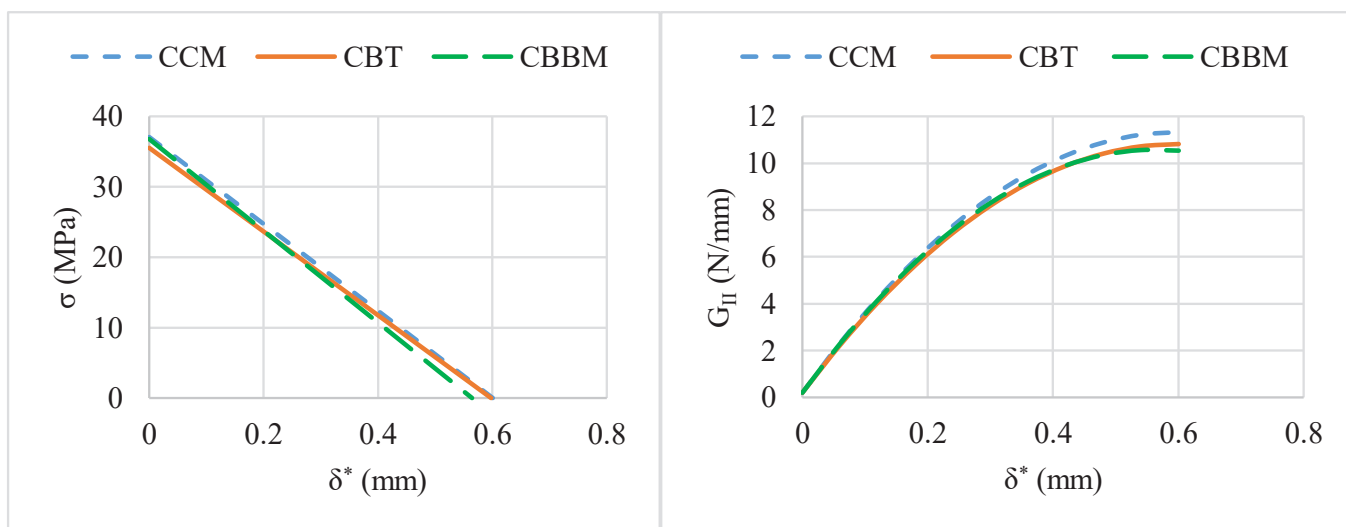
شکل ۱۷. نمودار برازش $G_{II}-\delta^*_{II}$ و قانون پل زنی تجربی محاسبه شده برای نمونه ۵ ENF با استفاده از سه روش کاهش داده

Fig. 17. Fit diagram of $G_{II}-\delta^*_{II}$ and experimental bridging laws calculated for ENF 5 sample using three data reduction methods.



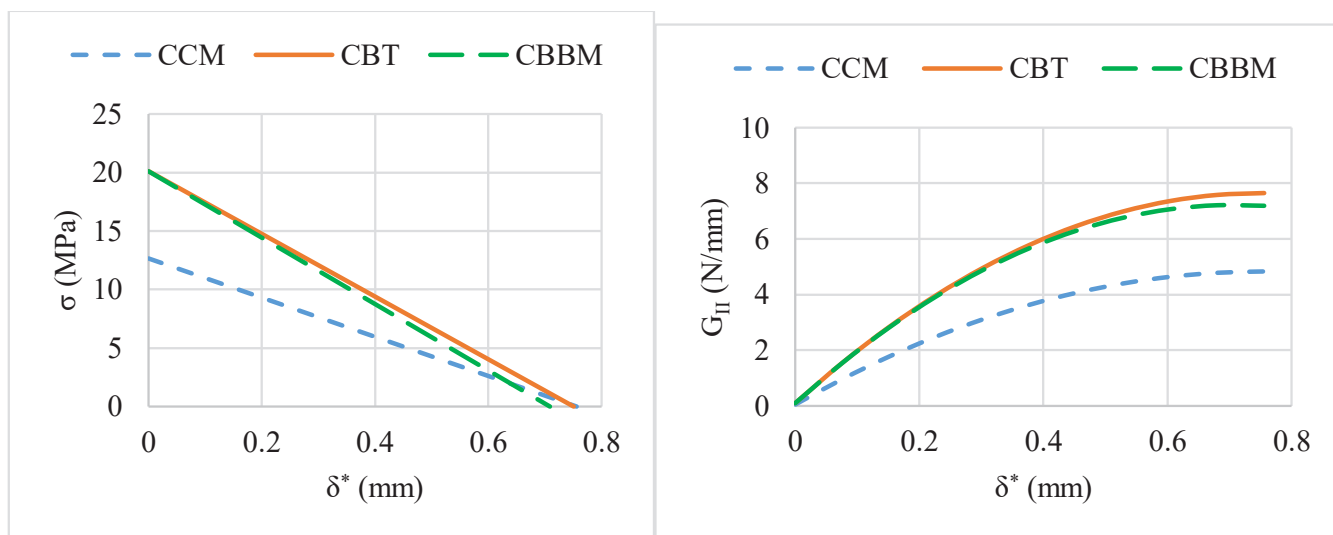
شکل ۱۸. نمودار برازش $G_{II}-\delta^*_{II}$ و قانون پل زنی تجربی محاسبه شده برای نمونه ۶ ENF با استفاده از سه روش کاهش داده

Fig. 18. Fit diagram of $G_{II}-\delta^*_{II}$ and experimental bridging laws calculated for ENF 6 sample using three data reduction methods.



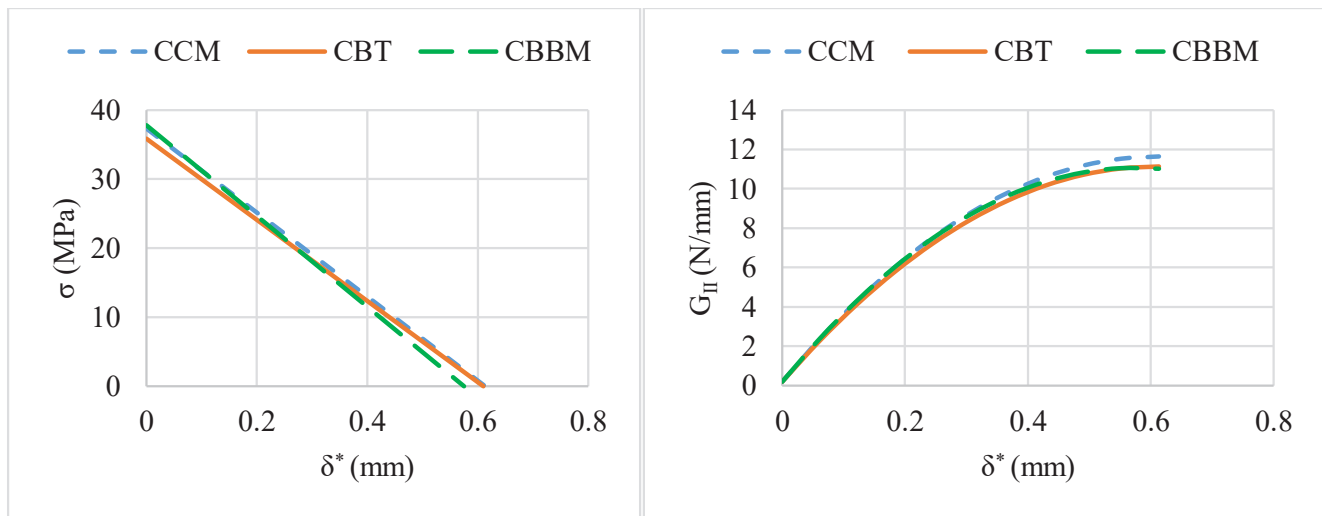
شکل ۱۹. نمودار برازش $G_{II}-\delta^*_{II}$ و قانون پلزنی تجربی محاسبه شده برای نمونه ۷ ENF با استفاده از سه روش کاهش داده

Fig. 19- Fit diagram of $G_{II}-\delta^*_{II}$ and experimental bridging laws calculated for ENF 7 sample using three data reduction methods.



شکل ۲۰. نمودار برازش $G_{II}-\delta^*_{II}$ و قانون پلزنی تجربی محاسبه شده برای نمونه ۸ ENF با استفاده از سه روش کاهش داده

Fig. 20. Fit diagram of $G_{II}-\delta^*_{II}$ and experimental bridging laws calculated for ENF 8 sample using three data reduction methods.



شکل ۲۱. نمودار برازش $G_{II}-\delta^*II$ و قانون پل زنی تجربی محاسبه شده برای نمونه ۹ ENF با استفاده از سه روش کاهش داده

Fig. 21. Fit diagram of $G_{II}-\delta^*II$ and experimental bridging laws calculated for ENF 9 sample using three data reduction methods.

منابع

- for joining of thermoplastics, *Journal of Manufacturing Processes*, 20 (2015) 234-244.
- [7] S. Pappadà, A. Salomi, J. Montanaro, A. Passaro, A. Caruso, A. Maffezzoli, Fabrication of a thermoplastic matrix composite stiffened panel by induction welding, *Aerospace Science and Technology*, 43 (2015) 314-320.
- [8] M. Troughton, Chapter 11—Induction Welding, *Handbook of Plastics Joining*, 2nd ed.; William Andrew Publishing: Boston, MA, USA, (2009) 113-120.
- [9] T. Ahmed, D. Stavrov, H. Bersee, A. Beukers, Induction welding of thermoplastic composites—an overview, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(10) (2006) 1638-1651.
- [10] S. Mahdi, H.-J. Kim, B. Gama, S. Yarlagadda, J. Gillespie Jr, A comparison of oven-cured and induction-cured adhesively bonded composite joints, *Journal of composite materials*, 37(6) (2003) 519-542.
- [11] W. Tao, X. Su, H. Wang, Z. Zhang, H. Li, J. Chen, Influence mechanism of welding time and energy director to the thermoplastic composite joints by ultrasonic
- [1] R.E.e. Shalin, *Polymer matrix composites*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [2] J. Comyn, *Adhesion Science*, Royal Society of Chemistry, 2007.
- [3] D. Brassard, M. Dubé, J.R. Tavares, Resistance welding of thermoplastic composites with a nanocomposite heating element, *Composites Part B: Engineering*, 165 (2019) 779-784.
- [4] I.F. Villegas, L. Moser, A. Yousefpour, P. Mitschang, H.E. Bersee, Process and performance evaluation of ultrasonic, induction and resistance welding of advanced thermoplastic composites, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 26(8) (2013) 1007-1024.
- [5] D. Stavrov, H. Bersee, Resistance welding of thermoplastic composites-an overview, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(1) (2005) 39-54.
- [6] B. Vijendra, A. Sharma, Induction heated tool assisted friction-stir welding (i-FSW): A novel hybrid process

- in ultrasonic welding of thermoplastic composites with flat energy directors and its application to the definition of optimum processing parameters, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 65 (2014) 27-37.
- [22] R. Nikoi, M. Sheikhi, N.B.M. Arab, Experimental Analysis of Effects of Ultrasonic Welding on Weld Strength of Polypropylene Composite Samples, *International Journal of Engineering-Transactions C: Aspects*, 28(3) (2014) 447.
- [23] F. Balle, G. Wagner, D. Eifler, Ultrasonic Metal Welding of Aluminium Sheets to Carbon Fibre Reinforced Thermoplastic Composites, *Advanced Engineering Materials*, 11(1-2) (2009) 35-39.
- [24] F. Balle, G. Wagner, D. Eifler, Ultrasonic Spot Welding of Aluminum Sheet/Carbon Fiber Reinforced Polymer–Joints, *Material Science and Engineering Technology*, 38(11) (2007) 934-938.
- [25] S. Krüger, G. Wagner, D. Eifler, Ultrasonic Welding of Metal/Composite Joints, *Advanced Engineering Materials*, 6(3) (2004) 157-159.
- [26] S. Hashemi, A. Kinloch, J. Williams, The effects of geometry, rate and temperature on the mode I, mode II and mixed-mode I/II interlaminar fracture of carbon-fibre/poly (ether-ether ketone) composites, *Journal of Composite Materials*, 24(9) (1990) 918-956.
- [27] T. Lyashenko-Miller, G. Marom, Delamination fracture toughness of UHMWPE fibers/polyurethane laminates interleaved with carbon nanotube-reinforced polyurethane films, *Polymers for Advanced Technologies*, 28(5) (2017) 606-612.
- [28] A. Arrese, N. Insausti, F. Mujika, M. Perez-Galmés, J. Renart, A novel experimental procedure to determine the cohesive law in ENF tests, *Composites Science and Technology*, 170 (2019) 42-50.
- [29] X. Lu, M. Ridha, B. Chen, V. Tan, T. Tay, On cohesive element parameters and delamination modelling, *Engineering Fracture Mechanics*, 206 (2019) 278-296.
- [30] J.D. Whitcomb, Analysis of instability-related growth of welding, *Journal of manufacturing processes*, 37 (2019) 196-202.
- [12] A. Benatar, Ultrasonic welding of plastics and polymeric composites, in: *Power Ultrasonics*, Elsevier, (2015) 295-312.
- [13] K. Goto, K. Imai, M. Arai, T. Ishikawa, Shear and tensile joint strengths of carbon fiber-reinforced thermoplastics using ultrasonic welding, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 116 (2019) 126-137.
- [14] P. Ochôa, I.F. Villegas, R.M. Groves, R. Benedictus, Diagnostic of manufacturing defects in ultrasonically welded thermoplastic composite joints using ultrasonic guided waves, *NDT & E International*, 107 (2019) 102126.
- [15] S.F. Raza, Ultrasonic welding of thermoplastics, University of Sheffield, (2015).
- [16] S. Mostafavi, D.F. Hesser, B. Markert, Effect of process parameters on the interface temperature in ultrasonic aluminum wire bonding, *Journal of Manufacturing Processes*, 36 (2018) 104-114.
- [17] Y.-H. Gao, Q. Zhi, L. Lu, Z.-X. Liu, P.-C. Wang, Ultrasonic Welding of Carbon Fiber Reinforced Nylon 66 Composite Without Energy Director, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 140(5) (2018) 051009.
- [18] T. Chinnadurai, S. Arungalai Vendan, C. Rusu, E. Scutelnicu, Experimental Investigations on the Polypropylene Behavior during Ultrasonic Welding, *Materials and Manufacturing Processes*, 33(7) (2018) 718-726.
- [19] I.F. Villegas, G. Palardy, Ultrasonic Welding of Thermoplastic Composite Coupons for Mechanical Characterization of Welded Joints through Single Lap Shear Testing, *Journal of visualized experiments: JoVE*, 108 (2016) e53592.
- [20] N. Sirbu, O. Oancă, Optimizing ultrasonic joining technologies of composite polymer materials, (2016) 25:9-13.
- [21] I.F. Villegas, Strength development versus process data

- Phenomena Due to Damage, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 40(1) (1992) 1-16.
- [43] K.N. Anyfantis, N.G. Tsouvalis, A 3D Ductile Constitutive Mixed-Mode Model of Cohesive Elements for the Finite Element Analysis of Adhesive Joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27(10) (2013) 1146-1178.
- [44] K.N. Anyfantis, N.G. Tsouvalis, A Novel Traction–Separation Law for the Prediction of the Mixed Mode Response of Ductile Adhesive Joints, *International Journal of Solids and Structures*, 49(1) (2012) 213-226.
- [45] M. De Moura, J. Gonçalves, J. Chousal, R. Campilho, Cohesive and Continuum Mixed-Mode Damage Models Applied to the Simulation of the Mechanical Behaviour of Bonded Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28(8) (2008) 419-426.
- [46] K. Dadej, B. Surowska, Analysis of cohesive zone model parameters on response of glass-epoxy composite in mode II interlaminar fracture toughness test, *composites theory and practice*, 16(3) (2016) 180-188.
- [47] M.R. Choudhury, K. Debnath, Analysis of tensile failure load of single-lap green composite specimen welded by high-frequency ultrasonic vibration, *Materials Today: Proceedings*, 28 (2020) 739-744.
- [48] A.J. Russell, K.N. Street, Moisture and Temperature Effects on the Mixed-Mode Delamination Fracture of Unidirectional Graphite/Epoxy, in: *Delamination and Debonding of Materials*, ASTM International, 1985.
- [49] G.R. Irwin, J. Kies, Critical Energy Rate Analysis of Fracture Strength, *Spie Milestone Series MS*, 137 (1997) 136-141.
- [50] Y. Wang, J. Williams, Corrections for Mode II Fracture Toughness Specimens of Composites Materials, *Composites Science and Technology*, 43(3) (1992) 251-256.
- [51] M. De Moura, J. Oliveira, J. Morais, J. Xavier, Mixed-Mode I/II Wood Fracture Characterization Using the Mixed-Mode Bending Test, *Engineering Fracture Mechanics*, 77(1) (2010) 144-152.
- a through-width delamination, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 1984.
- [31] B.D. Davidson, X. Sun, Effects of friction, geometry, and fixture compliance on the perceived toughness from three-and four-point bend end-notched flexure tests, *Journal of reinforced plastics and composites*, 24(15) (2005) 1611-1628.
- [32] M. De Moura, A. De Morais, Equivalent Crack Based Analyses of ENF and ELS Tests, *Engineering Fracture Mechanics*, 75(9) (2008) 2584-2596.
- [33] M. De Moura, R. Campilho, J. Gonçalves, Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints, *International Journal of Solids and Structures*, 46(6) (2009) 1589-1595.
- [34] <http://ofogheng.ir/>.
- [35] Q. Zhi, Y. Gao, L. Lu, Z. Liu, P. Wang, Online Inspection of Weld Quality in Ultrasonic Welding of Carbon Fiber/Polyamide 66 without Energy Directors, *Weld. J*, 97(3) (2018) 65s-74s.
- [36] A. Freddi, M. Salmon, Introduction to the Taguchi method, in: *Design principles and methodologies*, Springer, (2019) 159-180.
- [37] H. Atil, Y. Unver, A different approach of experimental design: Taguchi method, *Pakistan journal of biological sciences*, 3(9) (2000) 1538-1540.
- [38] <https://amajsonic.com>.
- [39] D. Broek, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Springer Science & Business Media, 1986.
- [40] Standard ASTM D7905/D7905M–14, Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, in, 2014.
- [41] W. Barrois, Use of Standardized Sequences of Flight-by-Flight Load Spectra in Fatigue Testing of Structural Aircraft Components, *Engineering Fracture Mechanics*, 9(2) (1977) 317-330.
- [42] Z. Suo, G. Bao, B. Fan, Delamination R-Curve

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

R. Ahmadi, H. Biglari, *Presenting the Traction-Separation Law for Ultrasonic Welding of Glass-Fiber Reinforced Polypropylene Composite*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 54(10) (2023) 2429-2456.

DOI: [10.22060/mej.2022.20581.7261](https://doi.org/10.22060/mej.2022.20581.7261)



