

خواص مکانیکی کامپوزیت بازالت / اپوکسی

محمود مهرداد شکریه^۱، مهدی معمار^۲
Mahmemar@gmail.com

چکیده

هدف از این مقاله بدست آوردن خواص مکانیکی کامپوزیت بازالت / اپوکسی می باشد. نمونه‌های آزمایشی، نمونه‌های تک جهته کامپوزیت بودند که پس از آماده سازی با استفاده از دستگاه یونیورسال تحت آزمایش خمش سه نقطه طبق شرایط مشخص شده در استاندارد ASTM D790-96 قرار گرفتند. مقادیر استحکام نهایی، مدول الاستیسیته و انرژی شکست نمونه‌های تحت خمش بدست آمد. سپس با توجه به مقاومت مصالح حاکم بر نمونه‌های تک جهته و با انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های کششی ضرایب تبدیل خواص خمشی به خواص کششی و فشاری بدست آمد و با استفاده از نتایج آزمایش‌ها نمونه‌های تحت خمش، خواص کششی و فشاری نمونه‌ها شامل استحکام‌ها و مدول‌ها استخراج گردید

کلیدواژه:

کامپوزیت بازالت / اپوکسی - آزمایش خمش سه نقطه‌ای - آزمایش کشش - خواص مکانیکی

۱- استاد دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، Shokrieh@iust.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

جدول (۱): مشخصات فنی رووینگ بازالت [۵]

قطر متوسط الیاف (μm)	چگالی خطی (tex)	استحکام کششی الیاف خشک (MN / tex)	حداکثر جذب رطوبت (%)	محتوای بالایی الیاف غیر سوزنی (%)	محتوای سایزینگ (%)
۱۳/۳۵	۲۱۲۰	۴۲۵	۰/۵	۵	۰/۴

۱- مقدمه

الیاف بازالت به عنوان یک نوع از الیاف جدید، نوید کاربردهای جدید در صنعت کامپوزیت را می‌دهند. با توجه به عدم وجود و یا لاقبل کمبود اطلاعات در مورد الیاف بازالت و کامپوزیت‌های ساخته شده از این الیاف، انجام آزمایش‌ها برای استخراج خواص مکانیکی، شیمیایی، الکتریکی و... این مواد احساس می‌شود. کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف بازالت مخصوصاً در جاهایی که دماهای بالا وجود دارد می‌توانند به عنوان جایگزینی مناسب برای کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف شیشه معرفی شوند [۱]. در این مقاله خواص مکانیکی کامپوزیت که در طراحی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد بررسی شده است. همچنین قبلاً خواص کششی کامپوزیت بازالت/ اپوکسی بوسیله Liu و دیگران آزمایش شده است [۲]. الیاف بازالت به دلیل استحکام بالاتر نسبت به الیاف شیشه و مقاومت بالاتر در محیط‌های قلیایی، همچنین به دلیل قیمت مناسب نسبت به الیاف کربن، که الیافی با استحکام بالا بوده و خنثی از نظر شیمیایی می‌باشند، در موارد زیادی قابل ترجیح هستند [۳].

۲- نمونه‌ها

۱-۲ الیاف تقویت کننده

برای ساخت قطعات آزمایشی از رووینگ بازالت به عنوان ماده تقویت کننده استفاده می‌شود. رووینگ شامل نخ‌های پیچیده شده به هم می‌باشد. رووینگ بازالت برای تولید پارچه‌های بافته شده، نمدهای بافته نشده، نوارهای عایق الکتریکی، تقویت کننده‌های پلاستیک و در سیستم‌های صدا خفه‌کن موتورهای احتراقی به کار می‌روند. در شکل (۱) رووینگ بازالت مورد استفاده در ساخت قطعات مشاهده می‌شود و در جدول (۱) مشخصات فنی آن آورده شده است.



شکل (۱): رووینگ های بازالت

۳- ماتریس

از رزین اپوکسی ML-506 به عنوان زمینه در ساخت قطعات کامپوزیتی استفاده شد. رزین اپوکسی ML-506 و هاردنر اپوکسی HA-11 بر پایه رزین اپوکسی بیسفنول F و هاردنر پلی‌آمین تولید می‌شود. در ساختار این رزین از نوعی آلیفاتیک اپوکسی استفاده گردیده که موجب افزایش خواص چقرمگی و انعطاف‌پذیری آن می‌شود. در جدول (۲) خصوصیات مکانیکی رزین اپوکسی ML-506 آورده شده است.

جدول (۲): خصوصیات مکانیکی رزین اپوکسی ML-506 [۵]

پارامتر	مقدار	واحد	استاندارد
مقاومت فشاری	۹۷۴	K / cm^2	ASTM D695M
مدول فشاری	۹۳۷۱	K / cm^2	ASTM D695M
مقاومت خمشی	۹۶۰	K / cm^2	ASTM D790M
مدول خمشی	۳۶۴۵۴	K / cm^2	ASTM D790M
استحکام کششی	۷۶۱	K / cm^2	ASTM D638M
مدول کششی	۲۷۸۹۰	K / cm^2	ASTM D638M
سختی	۸۲	Shore D	ASTM D2240
مقاومت ضربه‌ای	۷/۸۵	K / m^2	ASTM D256
مقاومت چسبندگی (درمقابل نیروی برشی)	۵۴۸	K / cm^2	ASTM D1002

۴- روش ساخت نمونه‌ها

۱-۴ نمونه‌های تحت خمش

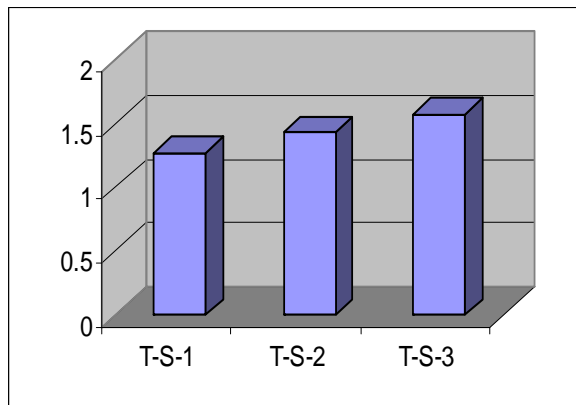
نمونه‌ها به روش پیچش الیاف^۱، شامل پیچاندن رووینگ‌ها به دور مندرل و آغشته‌سازی رووینگ‌ها توسط رزین، تا دستیابی به ضخامت مورد نظر، ساخته شدند. سپس قطعات براساس استاندارد ASTM D790-96 به ابعاد مناسب برش خوردند [۶]، جهت الیاف در نمونه‌ها صفر درجه و نسبت حجمی آنها ۵۰ درصد انتخاب شد. براساس استاندارد ASTM D790-96 پهنای نمونه‌ها باید ۲۵ میلی‌متر بوده و طول نمونه‌ها به دلیل جلوگیری از سرخوردن نمونه‌ها حین آزمایش در هر طرف تکیه‌گاه باید حداقل ۱۰٪ از

کششی شامل سه نمونه با کدهای T-S-1 تا T-S-3 بودند. در شکل (۴) نمونه آزمایشی کششی T-S-1 مشاهده می‌شود.



شکل (۴): نمونه‌های کششی ساخته شده

در شکل (۵) ضخامت نمونه‌های کششی مقایسه شده‌اند. مقدار میانگین برای ضخامت نمونه‌ها = $1/42$ میلی‌متر و مقدار انحراف استاندارد ضخامت نمونه‌ها = $0/150$ میلی‌متر



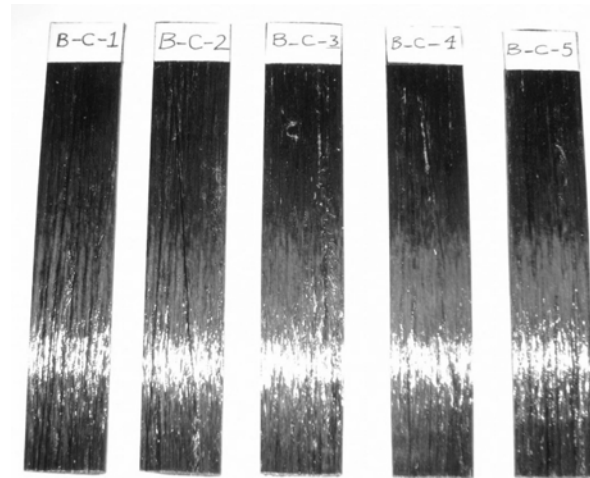
شکل (۵): مقایسه ضخامت نمونه‌های کششی

۶- ابزار آزمایش

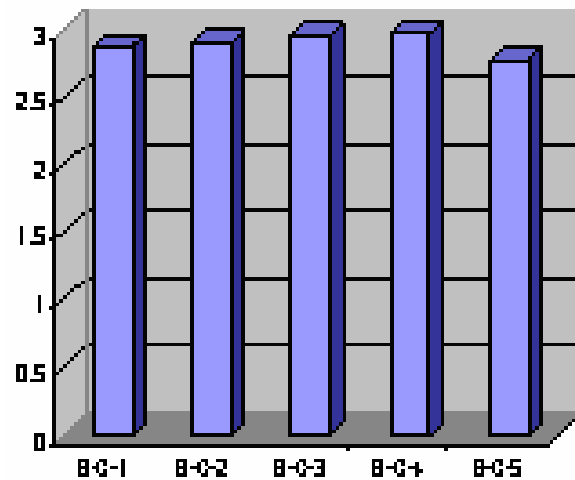
۶-۱- آزمایش خمش

برای انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای طبق استاندارد ASTM D790-96 یک دستگاه آزمایش دقیق باید مورد استفاده قرار گیرد، که توانایی بارگذاری با سرعت ثابت در محدوده تعریف شده را داشته و خطای سیستم اندازه‌گیری نیرو در آن بیش از ۱٪ حداکثر بارگذاری قابل اندازه‌گیری آن نباشد. سفتی قطعات ماشین آزمایش باید به گونه‌ای باشد که در حین آزمایش بیش از ۱٪ کل جابجایی نمونه آزمایشی نباشد. برای انجام آزمایش از یک دستگاه Zwick Amster HA-500 استفاده شد. در شکل (۶) این دستگاه مشاهده می‌شود.

فاصله بین دو تکیه‌گاه بلندتر باشد، به همین دلیل طول نمونه‌ها ۱۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل (۲) نمونه‌های بازالت/ اپوکسی ساخته شده و آماده برای انجام آزمایش مشاهده می‌شوند. تعداد ۵ عدد قطعه تحت خمش با کدهای B-C-1 تا B-C-5 مشخص شدند. در شکل (۳) ضخامت نمونه‌های خمشی مقایسه شده‌اند.



شکل (۲): نمونه‌های خمشی ساخته شده



شکل (۳): مقایسه ضخامت نمونه‌ها

مقدار میانگین برای ضخامت نمونه‌ها = $2/89$ میلی‌متر
مقدار انحراف استاندارد ضخامت نمونه‌ها = $0/080$ میلی‌متر

۵- نمونه‌های تحت کشش

نمونه‌های تحت کشش نیز با استفاده از روش وایندینگ و بر اساس استاندارد ASTM D3039 ساخته شدند [۷]. جهت الیاف در نمونه‌ها صفر درجه و نسبت حجمی الیاف ۵۰ درصد انتخاب شد. نمونه‌های

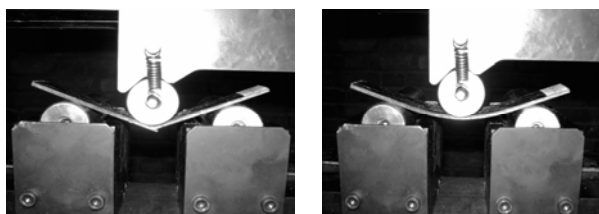
۸- شرایط آزمایش

۸-۱- آزمایش خمش

آزمایش خمش سه نقطه‌ای در دما و رطوبت محیط طبق استاندارد ASTM D790-96 و با استفاده از روش آزمایش شماره ۱ این استاندارد انجام شد [۶]. بر اساس این استاندارد ۵ عدد قطعه کامپوزیت بازالت/ اپوکسی در جهت الیاف مورد آزمایش خمش سه نقطه قرار گرفتند. در جدول (۳) مقادیر پیشنهاد شده در استاندارد برای نسبت طول نمونه به ضخامت نمونه برابر با ۳۲ به ۱ ($L/d=32$) آورده شده است [۶]. دماغه بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها باید به گونه‌ای تنظیم شوند که محورهای غلطک‌های استوانه‌ای با هم موازی بوده و دماغه بارگذاری در وسط فاصله بین دو تکیه‌گاه باشد. در شکل (۸) نمونه آزمایشی در حین بارگذاری و پس از شکست قابل مشاهده است [۶].

جدول (۳): مقادیر پیشنهاد شده در استاندارد برای نسبت $L/d=32$

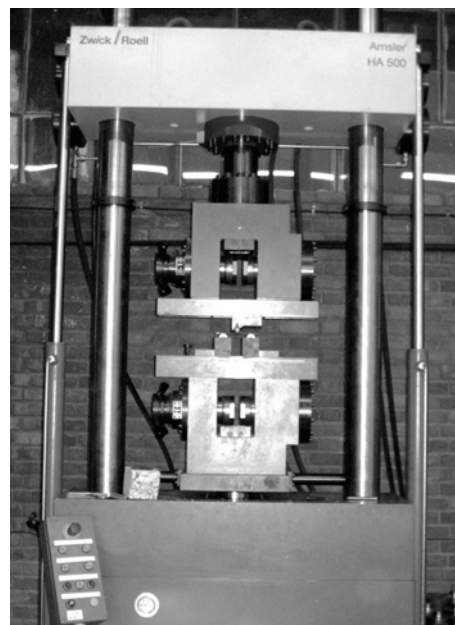
۳,۲	ضخامت نامی نمونه (mm)
۲۵	پهنای نمونه (mm)
۱۳۰	طول نمونه (mm)
۱۰۰	فاصله دو تکیه‌گاه (mm)
۵,۳	سرعت حرکت دماغه بارگذاری (mm/min)



شکل (۸): نمونه آزمایشی در حین بارگذاری و پس از شکست

۹- آزمایش کشش

آزمایش کشش با رعایت دما و شرایط مشخص شده در استاندارد ASTM D3039 و بر اساس ابعاد مشخص شده در جدول (۴) انجام شد. در این آزمایش همانطور که در شکل (۹) مشاهده می‌شود بر روی قطعات اکستنسومتر نصب گردید و سپس تحت کشش قرار داده شدند، ضمناً به دلیل اینکه مقدار E_T برای ما مهم بود کشیدگی قطعات تا نقطه گسیختگی ادامه نیافت.



شکل (۶): ابزار آزمایش خمش

۷- آزمایش کشش

برای انجام آزمایش کشش نمونه‌های کامپوزیتی طبق استاندارد ASTM D3039 باید یک دستگاه آزمایش یونیورسال مورد استفاده قرار گیرد، به طوری که دقت دستگاه باید برای خواندن جابجایی به اندازه ۰,۱٪ ضخامت و پهنای نمونه باشد. برای انجام این آزمایش از یک دستگاه آزمایش INSTRON 4208 استفاده شد. در شکل (۷) نمونه آزمایشی در فک دستگاه مشاهده می‌شود.



شکل (۷): ابزار آزمایش کشش

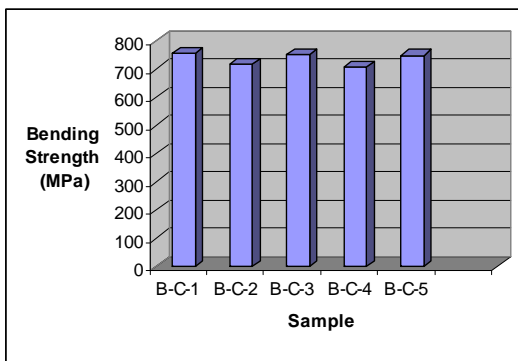
جدول(۵): استحکام‌های خمشی نمونه‌ها

کد نمونه	B-C-1	B-C-2	B-C-3	B-C-4	B-C-5
استحکام خمشی (MPa)	۷۴۸,۷	۷۰۸,۴	۷۵۰,۴	۷۱۷,۶	۷۵۶,۷
میانگین استحکام خمشی (MPa)	۷۳۶,۳۶				
انحراف استاندارد (MPa)	۲۱,۷۸				

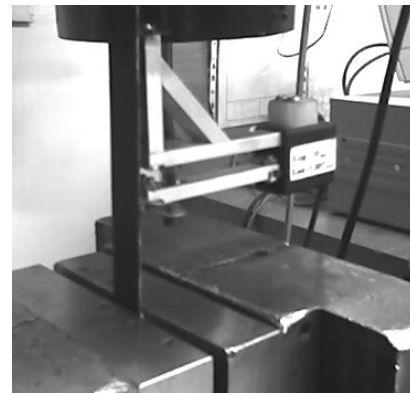
جدول(۴): مقادیر پیشنهاد شده در استاندارد برای نمونه‌های کششی [۸]

زاویه تب (درجه)	۹ تا ۷
ضخامت تب (mm)	۱,۵
طول تب (mm)	۵۶
ضخامت (mm)	۱
طول (mm)	۲۵۰
پهنای (mm)	۱۵
جهت الیاف	صفر درجه

در نمودار (۱۰) استحکام خمشی نمونه‌ها مقایسه شده است.



شکل (۱۰): مقایسه استحکام خمشی نمونه‌ها



شکل(۹): نصب اکستنسومتر بر نمونه آزمایشی کششی

۱۰- نتایج آزمایش خمشی نمونه‌ها

۱۰-۱- استحکام خمشی نمونه‌ها

بر اساس روش آزمایش شماره ۱ در استاندارد ASTM D790-96 برای تیرهای آزمایش شده در فاصله‌های تکیه‌گاهی بلند، یعنی وقتی که نسبت فاصله تکیه‌گاهی به ضخامت نمونه بیش از ۱۶ به ۱ باشد و مقدار جابجایی تیر بیش از ۱۰٪ فاصله تکیه‌گاهی باشد، مقدار حداکثر تنش برای یک تیر ساده می‌تواند با رابطه ۱ تخمین زده شود [۶].

$$S_B = (3PL/2bd^2) \cdot [1 + 6(D/L)^2 - 4(d/L)(D/L)] \quad (۱)$$

وقتی که از نسبت‌های بالای فاصله تکیه‌گاهی به ضخامت استفاده می‌شود، نیروهای پایانی عمده‌ای بر روی تکیه‌گاه‌ها اعمال می‌شود که بر روی ممان تیر با تکیه‌گاه ساده اثر می‌گذارد. در حقیقت مقدار $[1 + 6(D/L)^2 - 4(d/L)(D/L)]$ یک ضریب تصحیح تقریبی برای رابطه (۱) می‌باشد که نیروهای پایانی را در تیرهای با تکیه‌گاه ساده، وقتی که جابجایی‌های بزرگ وجود دارد، تصحیح می‌کند [۶]. مقدار P حداکثر برای محاسبه S با استفاده از برازش داده‌ها بر روی یک منحنی با استفاده از نرم افزار MATLAB بدست آمد [۹]. استحکام‌های خمشی نمونه‌های در جدول (۵) آورده شده‌اند.

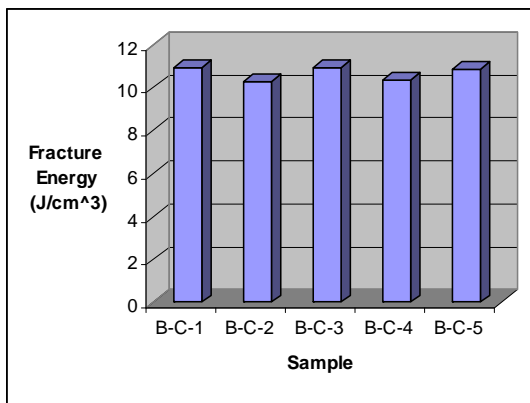
۱۱- مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌ها

مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌ها با بدست آوردن بیشترین مقدار شیب نمودار نیرو-جابجایی و با استفاده از رابطه (۲) بدست می‌آید [۶]. مقدار m با برازش داده‌های دستگاه آزمایش بر روی یک نمودار با استفاده از نرم افزار MATLAB بدست آمد [۹]. برای بدست آوردن مدول خمشی نمونه‌ها، تک‌تک نمونه‌ها تحت شرایط مشخص شده در استاندارد مورد آزمایش خمشی قرار گرفتند. نتایج آزمایش در جدول (۶) آورده شده است [۶].

$$E_B = L^3m/4bd^3 \quad (۲)$$

جدول(۶): مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌ها

کد نمونه	B-C-1	B-C-2	B-C-3	B-C-4	B-C-5
مدول الاستیسیته خمشی (GPa)	۲۳/۵۴	۲۳/۳۸	۲۳/۴۶	۲۳/۶	۲۳/۹
میانگین مدول الاستیسیته خمشی (GPa)	۲۳/۵۷۶				
انحراف استاندارد (GPa)	۰/۲				



شکل (۱۲): مقایسه انرژی شکست نمونه‌ها

۱۳- کرنش حداکثر نمونه‌ها در خمش

کرنش حداکثر نمونه‌ها در خمش مقدار کرنشی است که در وسط فاصله تکیه‌گاهی بر نمونه‌ها اعمال می‌شود و با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. در این بخش مقادیر کرنش حداکثر برای نمونه‌های آزمایشی محاسبه شده‌اند، که نتایج در جدول (۸) آورده شده‌اند [۶].

$$r = 6Dd / L^2 \quad (3)$$

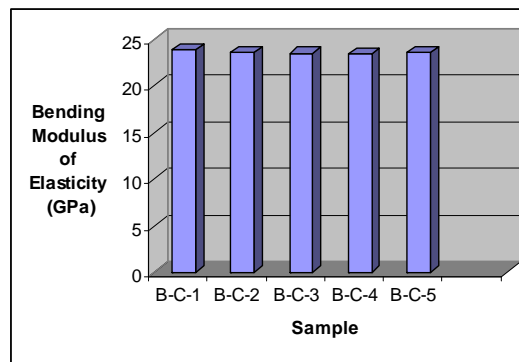
جدول (۸): کرنش حداکثر قطعات کنترلی تحت خمش

کد نمونه	B-C-1	B-C-2	B-C-3	B-C-4	B-C-5
کرنش حداکثر	۰/۰۳۱	۰/۰۲۹۶	۰/۰۲۹۷	۰/۰۳۰۶	۰/۰۳۱۱

۱۴- بحث بر روی تبدیل خواص خمشی به خواص کششی و فشاری کامپوزیت

یکی از فرضیات اصلی تئوری تیر کلاسیک (Classical Beam Theory) اینست که مدولهای کششی و فشاری یکسان باشند. در کامپوزیت‌های تقویت شده، مدولهای کششی و فشاری متفاوت هستند. بر اساس رابطه‌ای که مربوط به مدولهای کششی، فشاری و خمشی است یک روش تجربی برای تعیین هر سه مدول بوسیله آزمایشات خمش توسط Mujika و همکارانش پیشنهاد شده است [۸]. مدول خمشی در جهت اصلی در کامپوزیت‌های تک‌جهته معمولاً بر اساس تئوری تیر کلاسیک محاسبه می‌شود. در کامپوزیت‌های تک‌جهته تقویت شده با الیاف، مدول کششی در جهت طولی بیش از مدول فشاری بوده، در حالی که مدول خمشی دارای مقداری بین مدولهای کششی و فشاری است [۱۱].

در شکل (۱۱) مقادیر مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌ها مقایسه شده‌اند.



شکل (۱۱): مقایسه مدول الاستیسیته خمشی نمونه‌ها

۱۲- انرژی شکست نمونه‌ها

پارامتر انرژی شکست نمونه‌های کامپوزیتی به عنوان یکی از پارامترهای مکانیکی مهم می‌باشد. انرژی شکست قطعات در خمش را می‌توان به دو روش بدست آورد، در روش اول با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی تا نقطه حداکثر نیرو مقدار انرژی شکست بر حسب ژول و در روش دوم با محاسبه سطح زیر منحنی تنش-کرنش تا نقطه حداکثر تنش مقدار انرژی بر حسب ژول بر سانتیمتر مکعب بدست می‌آید. این پارامتر همان انرژی ویژه شکست (Break Specific Energy) می‌باشد. درحقیقت انرژی ویژه شکست مقدار چقرمگی مواد و بالانس انرژی در طول جابجایی و بارگذاری ماده تا فروپاشی یا شکست آن را نشان می‌دهد [۱۰]. در این قسمت با توجه به نمودارهای نیرو-جابجایی خروجی دستگاه و تبدیل آنها به نمودارهای تنش-کرنش مقدار انرژی شکست متناظر با ناحیه تغییر شکل کششی نمونه‌ها محاسبه شد. نتایج در جدول (۷) آورده شده‌اند. در شکل (۱۲) مقادیر انرژی شکست نمونه‌ها مقایسه شده است.

جدول (۷): انرژی شکست نمونه‌ها [۱۰]

کد نمونه	B-C-1	B-C-2	B-C-3	B-C-4	B-C-5
انرژی شکست (J/cm³)	۱۰/۸۸	۱۰/۳۷	۱۰/۹۴	۱۰/۳	۱۰/۹۷
میانگین انرژی شکست (J/cm³)	۱۰/۶۹				
انحراف استاندارد (J/cm³)	۰/۳۲				

خواص کششی و فشاری با استفاده از رابطه‌های گفته شده در بالا بدست آمد، در جدول (۹) این اعداد مشخص شده‌اند.

برای محاسبه λ ابتدا مقدار β را از رابطه $E_B = \beta E_T$ بدست آورده و سپس از رابطه $\beta = \frac{4}{(1 + \sqrt{\lambda})^2}$ مقدار λ محاسبه می‌گردد، لذا نیاز به مقادیر h_1 و h_2 نداریم.

جدول(۹): پارامترهای ارتباط خواص خمشی به خواص کششی و فشاری

پارامتر	β	$\sqrt{\lambda} = h_2 / h_1$	λ
مقدار	۰/۹۷۳	۱/۰۲۷	۱/۰۵۶

۱۶- خواص کششی و فشاری کامپوزیت

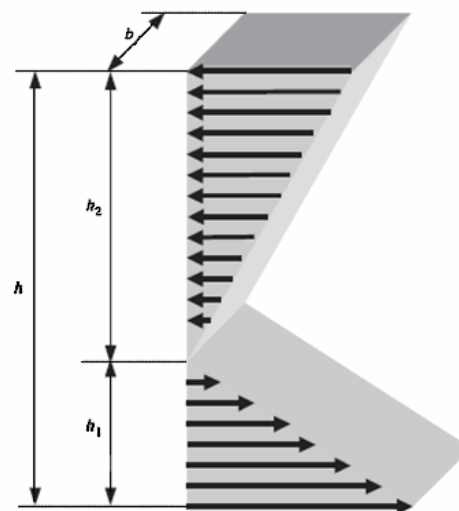
با توجه به بحث مطرح شده در قسمت قبل برای بدست آوردن خواص کششی و فشاری کامپوزیت با استفاده از آزمایشات خمش، نیاز به انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های کششی و استخراج مقادیر مدول کششی، λ و β می‌باشد. بدین ترتیب با استفاده از نتایج آزمایشات خمش و مقادیر λ و β استحکام کششی، مدول الاستیسیته کششی، استحکام فشاری و مدول الاستیسیته فشاری نمونه‌های تک جهتت بازالت/اپوکسی بدست آمد. مقادیر استحکام و مدول الاستیسیته نمونه‌ها در حالت‌های خمشی، کششی و فشاری در جدول (۱۰) با هم مقایسه شده‌اند.

جدول(۱۰): خواص کششی و فشاری نمونه‌ها

۷۳۶/۳۶	استحکام خمشی (MPa)
۲۳/۵۷۶	مدول الاستیسیته خمشی (GPa)
۷۴۶/۴۷	استحکام کششی (MPa)
۲۴/۲۳	مدول الاستیسیته کششی (GPa)
۷۲۶/۵۲	استحکام فشاری (MPa)
۲۲/۹۵	مدول الاستیسیته فشاری (GPa)

۱۷- نتیجه‌گیری

برای بدست آوردن خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها شامل خواص کششی، فشاری و خمشی لازم است که نمونه‌های مختلف کششی، فشاری و خمشی ساخته شده و بر اساس استانداردهای مربوط به هر کدام مورد آزمایش قرار گیرد. در این تحقیق بر روی نمونه‌های خمشی آزمایش خمش انجام شد و پس از انجام آزمایش کشش بر روی نمونه‌های کششی و استخراج ضرایب تبدیل، خواص خمشی کامپوزیت به خواص کششی و فشاری آن تبدیل شدند. با استفاده از روش استفاده شده در این تحقیق می‌توان با انجام تعداد محدودتری آزمایشات تجربی مقادیر خواص مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی تک



شکل(۱۳): ابعاد و توزیع تنش نرمال مقطع عرضی [7]

ضرایب β و λ برای ارتباط دادن خواص خمشی به کششی و فشاری تعریف می‌شود، به طوری که $\lambda = \frac{E_T}{E_C}$

و $\beta = \frac{4}{(1 + \sqrt{\lambda})^2}$ ، $\sqrt{\lambda} = \frac{h_2}{h_1}$ است، که $E_B = \beta E_T$ است، که E_T و E_C به ترتیب مدول‌های کششی و فشاری می‌باشند و با توجه به شکل ۸، h_1 و h_2 به ترتیب ارتفاع جهت‌های کششی و فشاری‌اند، به طوری که $h_1 + h_2 = h$. ضریب $\sqrt{\lambda}$ همچنین استحکام‌های کششی و فشاری کامپوزیت را طبق رابطه (۴) به استحکام‌های خمشی‌اش مربوط می‌سازد.

$$\sigma_{T \max} = \sigma_{\max} \frac{1 + \sqrt{\lambda}}{2}, \quad (4)$$

$$\sigma_{C \max} = \sigma_{\max} \frac{1 + \sqrt{\lambda}}{2\sqrt{\lambda}}$$

به طوری که σ_{\max} مقدار استحکام خمشی نمونه‌ها، $\sigma_{T \max}$ مقدار استحکام کششی نمونه‌ها و $\sigma_{C \max}$ مقدار استحکام فشاری نمونه‌ها می‌باشد.

۱۵- نتایج آزمایش کشش

آزمایش کشش با هدف بدست آوردن پارامترهای ارتباط خواص خمشی به خواص کششی و فشاری انجام شد. همانطور که قبلاً اشاره شد این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D3039 [۷] انجام گردید. مقدار متوسط مدول‌های الاستیسیته کششی برابر با ۲۴/۲۳ می‌باشد. مقدار β ، یعنی پارامترهای ارتباط خواص خمشی به

۱۹- مراجع

- [1] J. Sim, C. Park and D. Y. Moon "Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures" Composites: Part B 36, 504-512, 2005.
- [2] Q. Liu, M.T. Shaw, R.S. Parnas and A.M. McDonnell, "Investigation of Basalt Fiber Composite Aging Behavior for Applications in Transportation" Polymer composites ISSN 0272-8397 CODEN PCOMDI, Vol. 27, No5, pp. 475-483, 2006.
- [3] N. G. McCrum, C. P. Buckley, and C.B. Bucknall, principles of polymer engineering, Oxford University Press, New York, 1989.
- [4] <http://www.basfiber.com>
- [۵] کاتالوگ مشخصه سازی رزین‌ها، پژوهشگاه صنعت نفت، ویرایش ۱۳۸۴.
- [6] ASTM D 790-96, "Standard test methods for flexural properties of un-reinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials".
- [7] ASTM D 3039 "Standard Test Methods for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials".
- [8] F. Mujika, N. Carbajl, A. Arrese and I. Mondragon, "Determination of tensile and compressive moduli by flexural tests", Polymer Testing 25, 766-771, 2006.
- [9] Manual of Matlab Version 7.04
- [10] F. Segovia, M. D. Salvadore, O. Sahquillo and A. Vicente "Effects of Long-term Exposure on E-glass Composite Material Subjected to Stress Corrosion in Saline Medium" Journal of Composite Materials, Vol. 41, No. 17, 2007.
- [11] <http://www.hexcelcomposites.com>

جهته را با دقت مناسبی استخراج کرد. با توجه به نتایج بدست آمده کامپوزیت بازالت / اپوکسی دارای خواص مکانیکی مناسبی می‌باشد، که با توجه به برتریهای اقتصادی الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه (نوع S)، این کامپوزیت می‌تواند جایگزین بسیار خوبی برای کامپوزیت شیشه / اپوکسی در تقویت سازه‌های کامپوزیتی باشد.

۱۸- فهرست علائم

d	ضخامت نمونه آزمایشی (mm)
b	پهنای نمونه آزمایشی (mm)
D	مقدار حداکثر جابجایی در مرکز تیر (mm)
E_B	مدول الاستیسیته در خمش (GPa)
E_T	مدول الاستیسیته در کشش (GPa)
E_C	مدول الاستیسیته در فشار (GPa)
L	فاصله بین دو تکیه‌گاه (mm)
P	بار در نقطه‌ای از منحنی بار-جابجایی (N)
r	مقدار حداکثر کرنش در نمونه (mm/mm)
S_B	تنش در سطح خارجی در وسط فاصله تکیه‌گاهی (MPa)
σ_{max}	استحکام خمشی نمونه‌ها
σ_{Tmax}	استحکام کششی نمونه‌ها
σ_{Cmax}	استحکام فشاری نمونه‌ها
β و λ	پارامتر ارتباط خواص خمشی به خواص کششی و فشاری