

Effect of V-Notched Rail Shear Test Parameters on In-Plane Shear Properties of Glass/Epoxy Composites

Fathollah Taheri-Behrooz* and Hosein Salehi Moghaddam

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology,
P.O. Box 16846-13114, Tehran, Iran

Received: 9 March 2016, accepted: 4 September 2016

ABSTRACT

Since characterization of in-plane shear properties of composite materials is necessary for designing composite structures, there are many methods for shear testing of composite materials. V-notched rail (VNR) shear test method is the latest method published as ASTM D7078 in 2005. Strain and stress states of VNR specimens were investigated numerically by adopting a commercial finite element software. The effect of measurement errors on the results was also analyzed. Although, the experimental programs were implemented based on standard considerations, the possibility of some errors was unavoidable. The sources of errors originated from misalignment of the specimen with respect to the loading axis, application of end loading instead of face loading and fiber misalignment. According to the obtained results, slipping of the specimen within the fixture grip plates had the most important effect on the results in comparison to two other error sources. In addition, fiber misalignment was another important source of erroneous results which needed to be considered during testing. Misalignment of the specimen with respect to loading axis showed the least effect on the shear properties of the specimens compared to others. Some other errors also affected the stress state of the specimen. However, our investigations showed that their effect on the shear properties was negligible. Finally, glass/epoxy specimens were evaluated experimentally by V-notched rail shear test method. Shear modulus of the V-notched specimens was almost equal with the modulus of three rail specimens. However, the shear strength measured by the V-notched rail shear test method was approximately 36% higher than that measured by the three rail test method.

Keywords:

polymer composite,
in-plane shear properties,
shear testing of composites,
V-notched rail shear,
finite element analysis

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: taheri@iust.ac.ir

Please cite this article using:

Taheri-Behrooz F. and Salehi Moghaddam H., Effect of V-Notched Rail Shear Test Parameters on In-Plane Shear Properties of Glass/Epoxy Composites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **29**, 533-543, 2017.

اثر پارامترهای آزمون برش ریلی با شکاف V بر خواص برشی داخل صفحه‌ای کامپوزیت‌های شیشه-اپوکسی

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،
سال بیست و نهم، شماره ۶،
صفحه ۵۴۳-۵۳۳، ۱۳۹۵
ISSN: 1016-3255
Online ISSN: 2008-0883

فتح‌اله طاهری بهروز*، حسین صالحی مقدم

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶

دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۹، پذیرش: ۱۳۹۵/۶/۱۴

چکیده

از آنجا که شناسایی خواص برشی داخل صفحه‌ای، برای طراحی ساختارهای کامپوزیتی ضروری است، روش‌های متعددی برای انجام آزمون برش روی مواد کامپوزیتی ارائه شده است. برش ریلی نمونه دارای شکاف V شکل، جدیدترین آزمونی است که برای برش مواد کامپوزیتی، ارائه و در سال ۲۰۰۵ به‌عنوان استاندارد معرفی شده است. در این پژوهش، با مدل‌سازی عددی این آزمون در نرم‌افزار اجزای محدود، ضمن بررسی وضعیت نمونه تحت آزمون استاندارد، اثر چند مورد از خطاهای معمول حین آزمون، مانند ناهم‌محوری، تغییر در شرایط مرزی نمونه در اثر لغزش صفحه‌های نگه‌دارنده و نیز انحراف در زاویه لیاف بررسی شد. براساس نتایج به‌دست آمده، لغزش صفحه‌های نگه‌دارنده نسبت به نمونه و در نتیجه بارگذاری لبه‌ای نمونه، در مقایسه با سایر خطاهای بررسی شده، بیشترین اثرگذاری را روی نتایج دارد. افزون بر این، خطا در راستای قرارگیری لیاف نیز از مسائل مهمی است که باید حین تولید نمونه‌ها مورد توجه قرار گیرد. انحراف خط سنجش نمونه از محور بارگذاری، کمترین مقدار اثرگذاری را نسبت به سایر خطاهای بررسی شده، روی نتایج دارد. هرچند این خطاها می‌توانند روی نتایج اثرگذار باشند، اما بررسی‌ها نشان داد، اثرگذاری آن‌ها قابل توجه نیست. در نهایت، خواص برشی داخل صفحه‌ای نمونه‌هایی از جنس شیشه-اپوکسی به‌کمک آزمون استخراج شد. مدول برشی نمونه دارای شکاف V شکل تقریباً با مدول برشی به‌دست آمده از آزمون سه‌ریلی یکسان است، ولی استحکام برشی حدوداً ۳۶٪ افزایش نسبت به روش سه‌ریلی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

کامپوزیت پلیمری،
خواص برشی داخل صفحه‌ای،
آزمون برش کامپوزیت‌ها،
برش ریلی با شکاف V،
تحلیل اجزای محدود

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

taheri@iust.ac.ir

مقدمه

با گرایش روزافزون صنایع مختلف به استفاده از مواد کامپوزیتی، تعیین دقیق خواص مکانیکی آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. تعیین دقیق این خواص، در طراحی و پیش‌بینی رفتار سازه‌های کامپوزیتی، نقش بسزایی دارد. از جمله آن‌ها، خواص برشی داخل صفحه‌ای بوده که عبارت از مدول برشی و استحکام برشی داخل صفحه‌ای است. برای تعیین خواص برشی داخل صفحه‌ای، روش‌های مختلفی وجود دارد. روش‌های میکرومکانیک، برای تحلیل‌های کیفی می‌توانند مناسب باشند، اما برای تحلیل‌های کمی و یافتن مقادیر دقیق‌تری از خواص برشی، لازم است آزمون برش روی کامپوزیت انجام شود [۱]. در آزمون برش ایده‌آل، ناحیه‌ای از برش خالص و یکنواخت در مقطع سنجش نمونه ایجاد می‌شود. همچنین، باید رابطه‌ای منحصر به فرد میان بار اعمالی و بزرگی تنش برشی در مقطع سنجش وجود داشته باشد و تنش برشی در مقطع سنجش نیز باید از بزرگ‌ترین تنش‌ها نسبت به سایر نواحی نمونه باشد. برای آزمون برش، نسبت به آنچه که درباره کشش و فشار وجود دارد، روش‌های بیشتری ارائه شده است [۲]. از آنجا که دستیابی به حالت کاملاً ایده‌آل آزمون برش بسیار دشوار است، تلاش‌های متعددی برای ارائه روش مناسبی برای آزمون برش مواد کامپوزیت انجام شده است [۳].

روش آزمون برش ریلی نمونه با شکاف V شکل (VNR)، که ترکیبی از روش‌های برش دوریلی و Iosipescu است، در سال ۲۰۰۵ توسط ASTM به‌عنوان استاندارد معرفی شد [۴]. در این روش، نمونه دارای شکاف V شکل، با بهره‌گیری از بارگذاری وجهی، زیر برش قرار می‌گیرد و در خط واصل ریشه شکاف‌ها، وضعیت برش خالص اتفاق می‌افتد. توزیع تنش برشی در مقطع سنجش نیز نسبتاً یکنواخت است [۵].

آزمون VNR، برای ارزیابی خواص برشی کامپوزیت‌های چندلایه تک‌جهتی و چندجهتی کاربرد دارد. پس از ارزیابی هندسه‌های مختلف نمونه و نیز مقایسه نمونه‌های دارای تب و نمونه دارای شکاف، نمونه آزمون VNR با شکاف V شکل با زاویه 90° ، به‌عنوان نمونه استاندارد ارائه شد که کمترین تمرکز تنش در نزدیکی ریل‌ها و بیشترین مقدار یکنواختی توزیع تنش برشی در مقطع سنجش را دارد. مقطع سنجش این نمونه، نسبت به نمونه آزمون Iosipescu بزرگ‌تر شده است. همچنین به دلیل نحوه اعمال بار در این روش، ظرفیت باری که می‌توان اعمال کرد، بسیار بیشتر از سایر روش‌های موجود است. بنابراین، هنگامی که به مقطع سنجش بزرگ‌تری نسبت به Iosipescu نیاز باشد یا هنگام آزمون نمونه‌هایی با استحکام زیاد که بار بیشتری نسبت به ظرفیت بار سایر روش‌ها نیاز دارند، آزمون

VNR می‌تواند انتخاب مناسبی برای ارزیابی تجربی باشد [۶].

هنگامی که یافتن خواص برشی داخل صفحه‌ای تک‌لایه مدنظر باشد، می‌توان با استفاده از آزمون VNR و با انتخاب لایه‌چینی مناسب برای نمونه، این کار را انجام داد. از لحاظ نظری، آزمون نمونه‌هایی با لایه‌چینی $[0]_n$ ، $[90]_n$ و $[0/90]_{ns}$ می‌تواند خواص برشی تک‌لایه کامپوزیتی را به‌دست دهد. اما بررسی‌های تجربی و عددی، نشان می‌دهد، با توجه به سازوکارهای شکست و وضعیت توزیع تنش برشی در نمونه، بهترین گزینه، لایه‌چینی $[0/90]_{ns}$ است. تحلیل‌ها نشان داده است، بیشترین مقدار یکنواختی توزیع تنش برشی و دقیق‌ترین نتیجه به‌دست آمده برای خواص برشی داخل صفحه‌ای، از آزمون نمونه‌ای با لایه‌چینی $[0/90]_{ns}$ به‌دست می‌آید [۷-۵]. افزون بر ارزیابی خواص برشی کامپوزیت‌ها با استفاده از آزمون VNR، کاربرد این آزمون برای تعیین خواص برشی نمونه‌هایی از جنس پلی‌پروپیلن نیز بررسی شده است [۱۱]. هرچند با استفاده از این آزمون می‌توان نمونه‌هایی با استحکام زیاد را که با سایر روش‌های موجود قابل ارزیابی نیستند، بررسی کرد، اما اگر استحکام نمونه مورد آزمون بسیار زیاد باشد، ممکن است، انجام آزمون با استفاده از این روش نیز با مشکلاتی روبه‌رو شود. در این حالت ممکن است، بار لازم برای شکست نمونه از ظرفیت بار بست استاندارد بیشتر باشد. بست استاندارد، برای آزمون نمونه‌هایی مناسب است که در بار کمتر از ۵۳ kN دچار شکست می‌شوند [۱۲]. برای بست استاندارد، اصلاحاتی پیشنهاد شده است تا بتوان به‌کمک آن، نمونه‌های با استحکام بسیار زیاد را نیز ارزیابی کرد [۱۴-۱۲].

اگر بررسی پاسخ دینامیکی نمونه نیز مدنظر باشد، می‌توان از این آزمون بهره برد. برای انجام آزمون تحت نرخ کرنش‌های زیاد و تحلیل خواص برشی داخل صفحه‌ای در این شرایط، اصلاحی برای بست پیشنهاد شده است. در این حالت، وب‌هایی به بست اضافه می‌شود و سفتی خمشی آن تا ۶۷٪ افزایش می‌یابد [۱۶، ۱۵].

در بخش اول این پژوهش، خواص برشی داخل صفحه‌ای نمونه‌هایی از جنس شیشه-اپوکسی با روش تجربی و با استفاده از آزمون VNR بررسی شد. سپس نتایج به‌دست آمده، با نتایج حاصل از آزمون برش سه‌ریلی مقایسه شده است. بدیهی است، برای دستیابی به دقیق‌ترین نتایج، باید آزمون را کاملاً مطابق با شرایط بیان شده در استاندارد انجام داد. اما در عمل، از آنجا که ایجاد شرایط کاملاً ایده‌آل قابل تضمین نیست، وقوع برخی خطاها هنگام انجام آزمون محتمل است. هر یک از این خطاها می‌تواند نتایج به‌دست آمده از آزمون را غیردقیق سازد و نیز موجب پراکندگی در داده‌های به‌دست آمده شود. اما مقدار اثر هریک از این خطاها بر نتایج، متفاوت است.

استحکام برشی نهایی از معادله (۲) به دست می‌آید که در آن S^u استحکام نهایی (MPa)، P^u کمترین مقدار از میان مقادیر بار نهایی و بار در 0.05 کرنش برشی مهندسی (N) و A سطح مقطع (mm^2) محاسبه شده از معادله (۱) است [۴]:

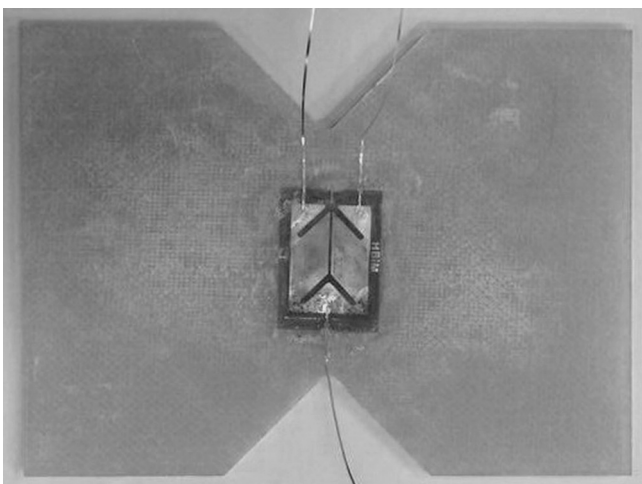
$$S^u = \frac{P^u}{A} \quad (2)$$

برای محاسبه مدول برشی باید پیش از قراردادن نمونه داخل بست، روی آن دو کرنش‌سنج با زاویه $\pm 45^\circ$ نسبت به محور بارگذاری و دقیقاً در وسط نمونه نصب شوند. کرنش برشی مهندسی (γ_i) از معادله (۳) محاسبه شد. کرنش برشی نهایی نیز به شکل حداقل مقدار از میان مقادیر کرنش برشی در بار نهایی و کرنش 5% تعریف می‌شود:

$$\gamma_i = |\epsilon_{+45}| + |\epsilon_{-45}| \quad (3)$$

برای محاسبه مدول برشی از معادله (۴) استفاده می‌شود. از آنجا که منحنی تنش برشی-کرنش برشی، معمولاً غیرخطی است، باید بازه استفاده شده برای تعیین مدول برشی مشخص شود. طبق استاندارد، این معادله باید در بازه‌ای که شامل $1500 \mu\epsilon$ تا $2000 \pm 4000 \mu\epsilon$ از کرنش برشی مهندسی است، به کار برده شود. ابتدای این بازه باید نقطه‌ای در محدوده کرنش برشی $1500 \mu\epsilon$ تا $2500 \mu\epsilon$ باشد. اگر داده‌ها، دقیقاً در بازه‌های تعیین شده موجود نباشند، لازم است بازه‌ای از کرنش که در آن مدول برشی محاسبه شده است، ذکر شود [۴]:

$$G^{\text{chord}} = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} \quad (4)$$



شکل ۱- نصب کرنش‌سنج روی نمونه.

در بخش دوم این پژوهش، با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی آزمون VNR، افزون بر بررسی وضعیت نمونه تحت آزمون استاندارد، مقدار اثر مواردی از خطاهای معمول بر نتایج آزمون، بررسی شده است. اولین پارامتر، خطا در نصب نمونه داخل بست است، به گونه‌ای که خط واصل ریشه شکاف‌ها از محور بارگذاری، انحراف داشته باشد. پارامتر دوم، نامناسب بودن وضعیت گرفتن نمونه داخل بست، نسبت به بار اعمالی و در نتیجه لغزش صفحه‌های نگه‌دارنده نسبت به نمونه است. در این حالت، بارگذاری از حالت وجهی به حالت بارگذاری لبه‌ای تبدیل می‌شود. پارامتر سوم، انحراف در راستای قرارگیری الیاف حین تولید نمونه‌ها بوده که اثر آن بر نتایج حاصل، بررسی شده است. ارزیابی مقدار اثر این پارامترها نشان می‌دهد، وجود عدم اطمینان مربوط به هریک از آن‌ها، چقدر نتایج آزمون برش را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

تجربی

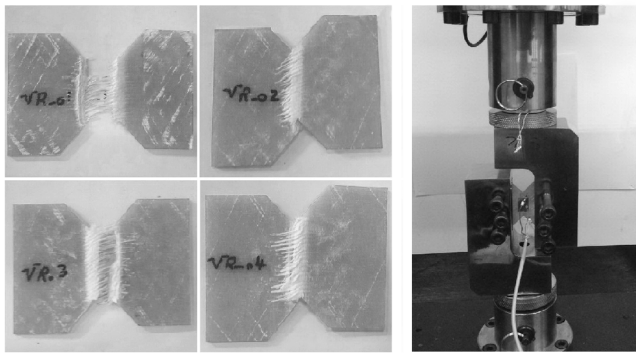
مواد

الیاف به کار برده شده در تولید کامپوزیت استفاده شده، الیاف شیشه نوع E ساخت شرکت Interglas آلمان با کد فنی ۹۲۱۴۵ بود. رزین اپوکسی LY-5052 Araldite متعلق به شرکت Huntsman آمریکا نیز به عنوان ماتریس در این کامپوزیت استفاده شده است.

دستگاه‌ها و روش‌ها

خواص برشی داخل صفحه‌ای نمونه‌هایی از جنس کامپوزیت شیشه-اپوکسی با آزمون VNR ارزیابی شده است. برای پخت رزین اپوکسی، چرخه گرمایی شامل قرارگیری در دمای 23°C به مدت ۲۴ h و سپس ۴ h در دمای 80°C باید اعمال شود. ابتدا صفحه کامپوزیتی با لایه‌چینی $[0/90]_6$ تولید شد. سپس، نمونه‌هایی با ابعاد $56 \times 76 \text{ mm}$ از آن جدا شد. در نهایت با انجام ماشین‌کاری روی نمونه‌ها، شکاف V شکل 90° با عمق $12/7 \text{ mm}$ و شعاع کمانی برابر $1/3 \text{ mm}$ برای ریشه شکاف ایجاد شد. برای انجام آزمون برش روی نمونه‌ها، ابتدا باید ابعاد دقیق مقطع سنجش، اندازه‌گیری شود. بدین منظور، برای هر یک از نمونه‌ها، عرض مقطع سنجش (d) و ضخامت نمونه در ناحیه میان دو شکاف (h) اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده، مساحت مقطعی از نمونه که تحت نیروی برشی قرار می‌گیرد (A)، طبق معادله (۱) به دست می‌آید:

$$A = d \times h \quad (1)$$



شکل ۳- (الف) نحوه انجام آزمون برش و (ب) نمونه‌های آزمون شده پس از شکست.

شکل ۳- (الف) نحوه انجام آزمون برش و (ب) نمونه‌های آزمون شده پس از شکست.

کرنش سنج‌های نصب شده، منحنی تنش برشی-کرنش برشی مربوط به این نمونه به دست می‌آید. این نمودار، با عنوان منحنی تجربی در شکل ۶ قابل مشاهده است. برای تعیین مدول برشی، از محدوده کرنش برشی $1430 \mu\epsilon$ تا $5030 \mu\epsilon$ استفاده شد. سپس با استفاده از معادله (۴)، مدول برشی $4/189 \text{ GPa}$ به دست آمده است.

در جدول ۲، می‌توان نتایج به دست آمده از آزمون برش VNR را با نتایج حاصل از آزمون برش سه‌ریلی که روی همین کامپوزیت انجام شده است [۱۷]، مقایسه کرد. با وجود اینکه مدول برشی به دست آمده از هر دو روش، تقریباً یکسان است، ولی آزمون VNR، استحکام بیشتری را از آزمون برش سه‌ریلی پیش‌بینی می‌کند. مدول‌های برشی به دست آمده از این دو روش، فقط حدود ۴٪ اختلاف دارند، اما استحکام به دست آمده از آزمون VNR حدود ۳۶٪ نسبت به آزمون برش سه‌ریلی افزایش یافته است.

مدل‌سازی عددی

هدف از مدل‌سازی عددی، بررسی توزیع تنش در نمونه تحت آزمون و نیز بررسی و مقایسه مقدار اثر چند مورد از خطاهای معمول حین آزمون است. خطا در نصب نمونه داخل بست، کافی نبودن نیروی فشاری برای نگه‌داشتن آن و لغزش صفحه‌های نگه‌دارنده نسبت به نمونه و نیز انحراف در راستای الیاف حین تولید آن، خطاهایی هستند که اثر آن‌ها ارزیابی شده است. این ارزیابی نشان می‌دهد، عدم اطمینان در

جدول ۱- نتایج تجربی ارزیابی استحکام برشی نهایی (MPa) نمونه‌ها.

نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵
۶۲/۳۳	۶۸/۲۲	۶۵/۳۹	۷۱/۰۰	۵۸/۴۶

(میانگین استحکام برشی $65/08$ ، انحراف معیار $4/9$ و ضریب تغییرات $7/54$).

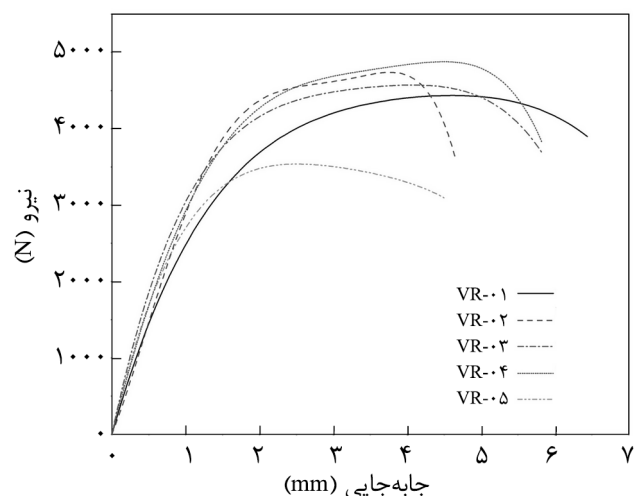
در ارزیابی تجربی، پنج نمونه مطابق با رویه ذکر شده در استاندارد ASTM D7078 آزمایش شدند. شکل ۱، نمونه آماده شده برای انجام آزمون را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث

شکل ۲، منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی به دست آمده از ارزیابی تجربی پنج نمونه آزمون را نشان می‌دهد. محور عمودی در شکل ۲ نمایانگر نیروی کششی است که به وسیله دستگاه آزمون به بست متصل می‌شود. این نیرو با نصب نیروسنج روی فک متحرک دستگاه آزمون، اندازه‌گیری می‌شود. محور افقی نیز بیانگر جاب‌جایی فک متحرک دستگاه آزمون است.

شکل ۳، نحوه انجام آزمون برش روی نمونه دارای کرنش سنج و نیز نمونه‌هایی را که در آزمون استحکام قرار گرفته‌اند، پس از انجام آزمون و شکست نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، تمام نمونه‌ها در مقطع سنجش و روی خط سنجش دچار شکست شده‌اند. این مسئله نشان می‌دهد، از نظر محل ایجاد آسیب و شکست، نتایج آزمون بر آنچه که مورد انتظار بوده، منطبق است. آسیب در نمونه‌ها ابتدا با تخریب ماتریس آغاز شده و سپس با شکست الیاف گسترش می‌یابد. در جدول ۱ نتایج آزمون پنج نمونه آمده است.

کرنش‌های خوانده شده از کرنش‌سنج‌هایی که در راستای 45° و -45° نصب شده‌اند، برحسب تنش برشی اعمالی در شکل ۴ مشخص شده‌اند. با تقسیم اعداد واقع بر محور افقی بر سطح مقطع سنجش و محاسبه کرنش برشی مهندسی از روی نتایج خوانده شده از



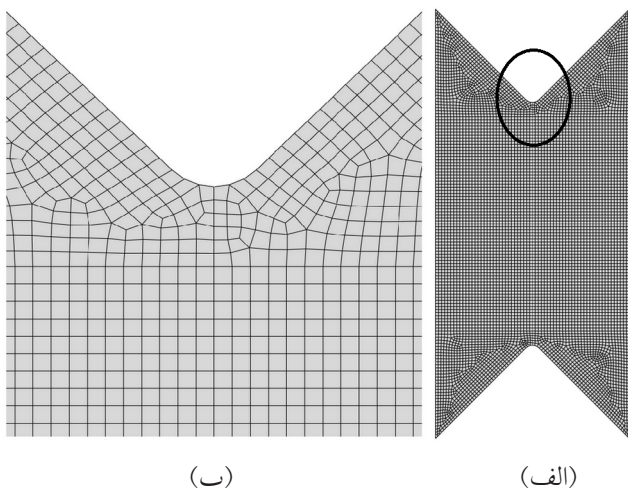
شکل ۲- منحنی‌های نیرو-جاب‌جایی به دست آمده از آزمون.

عددی را نشان می‌دهد.

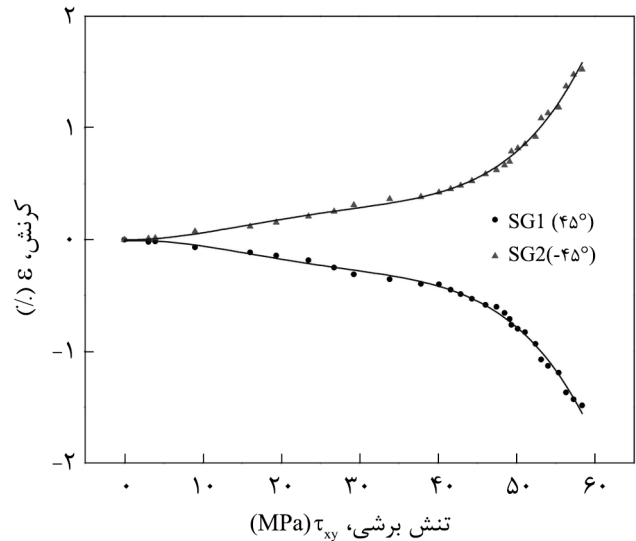
$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}} + \alpha \tau_{xy}^3 \quad (5)$$

نمونه، بست و صفحه‌های نگه‌دارنده، اجزای اصلی تشکیل‌دهنده مدل عددی هستند. بست و صفحه‌های نگه‌دارنده از جنس فولاد و نمونه نیز کامپوزیت شیشه-اپوکسی است. خواص مکانیکی موادی که در مدل‌سازی استفاده شده‌اند، در **جدول ۳** آمده است. نوع مقطعی که برای نمونه کامپوزیتی در نظر گرفته شده، مقطع جامد است. ضخامت نمونه، براساس ضخامت نمونه‌های آزمون شده، $2/30$ mm و لایه‌چینی نیز $[0/90]_s$ انتخاب شده است. برای مدل‌سازی بست از 8878 جزء، برای هر یک از صفحه‌های نگه‌دارنده از 360 جزء و برای مدل‌سازی نمونه کامپوزیت شیشه-اپوکسی از تعداد 13335 جزء استفاده شد. تمام اجزا شش‌وجهی خطی پیوسته ۸ گرهی از نوع انتگرال‌گیری کاهش یافته (C3D8R) هستند.

رابطه میان بست با صفحه‌های نگه‌دارنده و نیز نمونه با صفحه‌های نگه‌دارنده، با تعریف اجزای تماس اصطکاکی مشخص شده است. با توجه به مطالعات انجام شده در زمینه بررسی اصطکاک میان نمونه و صفحه‌های نگه‌دارنده [۱۲]، ضریب اصطکاک میان این دو سطح $0/28$ تعریف شده است. بار اعمالی، به شکل نیروی متمرکز به گرهی در سطح بالایی بست که دقیقاً در راستای خط واصل شکاف‌ها و در وسط ضخامت نمونه قرار دارد، وارد شده و بزرگی آن، براساس نتایج تجربی $2/4758$ N در نظر گرفته شده است. گره مقابل آن در سطح پایین بست (محل ثابت‌شدن بست داخل دستگاه آزمون) در



شکل ۵- مش‌بندی: (الف) ناحیه سنجش نمونه و (ب) ریشه شکاف (ناحیه مشخص شده در شکل الف).



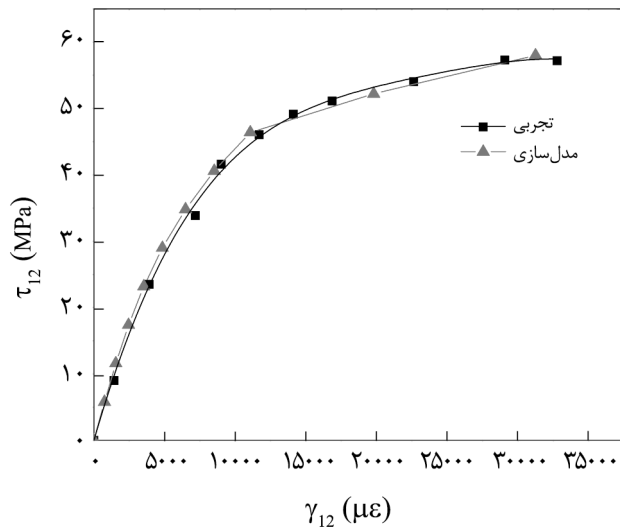
شکل ۴- داده‌های خوانده شده از کرنش سنج‌های نصب شده روی نمونه‌ها.

تضمین استاندارد بودن هر یک از این پارامترها، تا چه مقدار می‌تواند به عدم اطمینان در نتایج حاصل منجر شود. بدین منظور، از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus نسخه ۱۴-۶ استفاده شد.

ابتدا مدل‌سازی آزمون در شرایط استاندارد انجام و توزیع تنش و کرنش در نمونه بررسی شد (شکل ۵). بدین منظور، با نوشتن سابروتین UMAT در نرم‌افزار Abaqus، مدل‌سازی غیرخطی از نمونه کامپوزیتی انجام و نشان داده شد، مدل رایانه‌ای با داشتن رفتار غیرخطی مادی با دقت خوبی رفتار غیرخطی سازه‌ای را نشان می‌دهد. با توجه به یکسان بودن رفتار برشی تحت برش مثبت و منفی لازم است، ارتباط غیرخطی تنش برشی و کرنش برشی با استفاده از یک تابع فرد تعریف شود. به همین دلیل، در مدل‌سازی غیرخطی فرض شده است که ماده از معادله تسای-هان پیروی می‌کند. معادله (۵)، این معادله را معرفی می‌کند که در آن G_{xy} ، مدول برشی اولیه است. از آنجا که با استفاده از معادله تسای-هان، برازش یک منحنی به نتایج تجربی ممکن نبود، رابطه تنش برشی و کرنش برشی دو ضابطه‌ای فرض شد. بدین ترتیب، برای تنش‌های برشی کمتر از 43 MPa، ضریب α در معادله تسای-هان $10^{-26} \times 6/9$ و برای تنش‌های بیشتر از 43 MPa، $10^{-25} \times 2/5$ در نظر گرفته شد. شکل ۶ تطابق منحنی‌های تجربی و

جدول ۲- مقایسه نتایج آزمون‌های VNR و برش سه‌ریلی.

روش آزمون	استحکام برشی (MPa)	مدول برشی (GPa)
VNR	۶۵/۰۸	۴/۱۸۹
برش سه‌ریلی	۴۷/۷۵	۴/۴۰۰



شکل ۶- مقایسه نمودارهای تنش برشی- کرنش برشی تجربی و مدل‌سازی.

به زوایای هدف انحراف دارند. این انحراف ممکن است، به ایجاد جفت‌شدگی برشی در نمونه منجر شود و اعمال بار برشی، تنش‌های عمودی نیز در نمونه ایجاد کند. در حالی که محاسبات و تحلیل نتایج با این فرض انجام می‌شود که نمونه فاقد جفت‌شدگی برشی است. در این بخش از مدل‌سازی، اثر انحراف زاویه الیاف به اندازه $\pm 2^\circ$ بررسی شده است.

برای مقایسه مقدار اثر هر یک از این خطاها، تغییرات کرنش و شاخص شکست روی خط سنجش (خط واصل ریشه شکاف‌ها) طی تحلیل خطی بررسی شده است. کرنش‌های به‌دست آمده از هر یک از مدل‌سازی‌ها نسبت به کرنش برشی میانگین، نرمال شده است. برای تحلیل نتایج مربوط به شاخص شکست، اختلاف مقادیر به‌دست آمده با مقادیر مربوط به مدل‌های استاندارد، بررسی شده است. برای مقایسه مقدار اثر هر یک از خطاها بر نتایج، نقاطی از نمونه که دارای بیشترین شاخص شکست در هر یک از حالت‌های بارگذاری هستند، به‌عنوان نقاط بحرانی برای مقایسه شاخص شکست در نظر گرفته می‌شوند. برای تبدیل تغییرات شاخص شکست به تغییرات در استحکام حاصل، باری به‌عنوان بار نهایی در هر مورد در نظر گرفته

همه جهت‌های مفید است.

از مواردی که حین انجام آزمون باید مورد توجه قرار داد، نصب صحیح نمونه داخل بست است. نمونه باید به نحوی درون بست قرار گیرد که خط واصل ریشه شکاف‌ها دقیقاً منطبق بر محور بارگذاری باشد. اگر دقت لازم هنگام نصب نمونه به‌کار برده نشود، ممکن است، نمونه نسبت به محور بارگذاری منحرف شود. این مورد، اولین پارامتری است که اثر آن بر نتایج بررسی شده است. در این حالت، فرض شده است که خط واصل ریشه شکاف‌ها، به اندازه 2 mm نسبت به محور بارگذاری انحراف دارد.

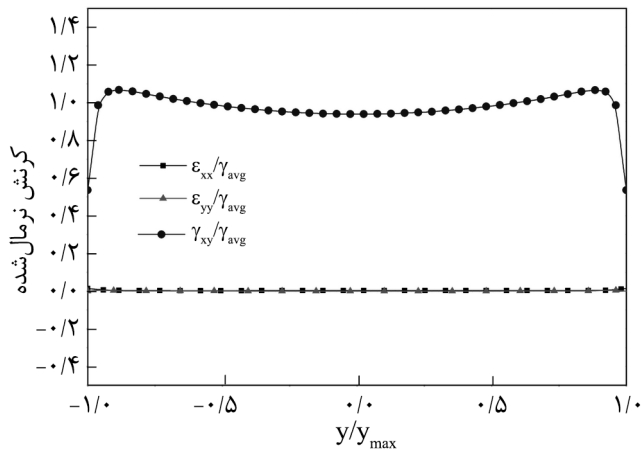
دومین پارامتر مورد بررسی، لغزش صفحه‌های نگه‌دارنده نسبت به نمونه است. در آزمون VNR، بار به‌کمک اصطکاک از بست به نمونه منتقل شده و بارگذاری از سطح نمونه انجام می‌شود. با افزایش گشتاور اعمالی به پیچ‌های دو طرف بست، نیروی عمودی که به‌وسیله آن‌ها بر نمونه وارد می‌شود، افزایش می‌یابد. در نتیجه، بیشترین نیروی اصطکاک ایستا (نیروی که نمونه را در آستانه لغزش قرار می‌دهد) زیاد می‌شود. بنابراین، اگر ضریب اصطکاک میان سطح صفحه‌های نگه‌دارنده و نمونه کم باشد یا گشتاور اعمالی به پیچ‌ها کافی نباشد، بیشترین نیروی اصطکاک ایستا با افت مواجه می‌شود. در این صورت، هنگامی که نیروی اعمالی به‌وسیله دستگاه آزمون به حد تحمل اصطکاک سطوح برسد، نمونه در آستانه لغزش قرار می‌گیرد و با اندک افزایش نیروی دستگاه، سطح صفحه‌های نگه‌دارنده روی نمونه می‌لغزد. پس از شروع لغزش، جابه‌جایی بست نسبت به نمونه باعث برقراری تماس میان لبه نمونه با سطح کف حفره داخل بست می‌شود. پس از برقراری کامل این تماس، مسیر انتقال نیرو به جای سطح جانبی نمونه، از سطح کف حفره داخل بست به لبه نمونه است و صفحه‌های نگه‌دارنده فقط نقش راهنما را برای نمونه دارند.

آخرین مورد از خطاهای احتمالی بررسی شده، انحراف در راستای زاویه الیاف حین تولید نمونه‌هاست. از مواردی که در استاندارد [۴] مورد تأکید قرار گرفته است، کنترل و دقت بر زاویه الیاف حین تولید و آماده‌سازی نمونه‌هاست. اگر حین تولید نمونه‌ها دقت کافی به‌کار برده نشود، ممکن است نمونه‌هایی به‌دست آیند که الیاف آن‌ها نسبت

جدول ۳- خواص مکانیکی به‌کار گرفته شده در مدل‌سازی [۱۷].

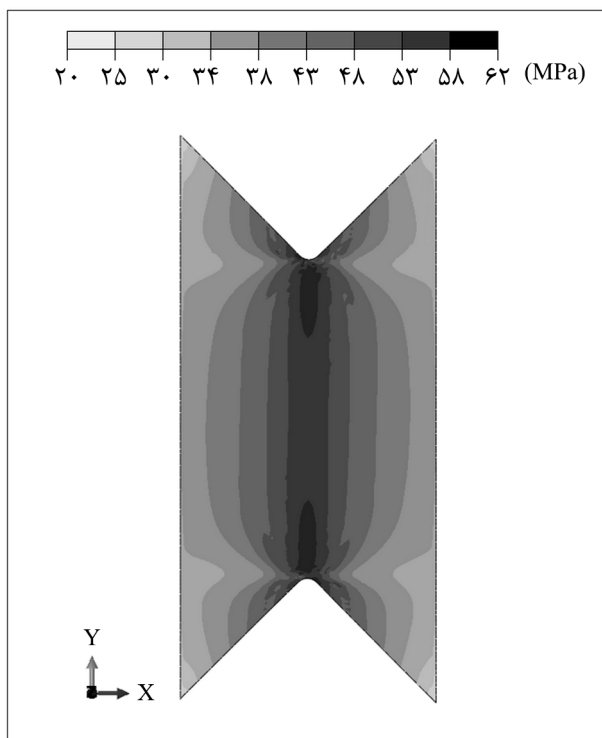
S_{12}^* (MPa)	S_{22C} (MPa)	S_{22T} (MPa)	S_{11C} (MPa)	S_{11T} (MPa)	ν_{23}	ν_{13} و ν_{12}	G_{23} (GPa)	G_{13} و G_{12} (GPa)	E_3 (GPa)	E_2 (GPa)	E_1 (GPa)	ماده
۶۵/۰۸	۹۶/۵	۳۹/۰	۳۵۳/۹	۵۰۱/۳	۰/۱۵	۰/۲۳۷	۲/۹	۳/۸	۳/۵	۸/۴	۳۱/۶۲	شیشه-اپوکسی
-	-	-	-	-	۰/۳	-	-	-	۲۰۰	-	-	فولاد

* استحکام برشی، براساس نتایج تجربی پژوهش حاضر انتخاب شده است.



شکل ۷- کرنش‌های نرمال شده در راستای خط سنجش در مدل‌سازی آزمون استاندارد.

اعمالی به نیروی نهایی می‌رسد، تنش برشی در نقاطی از نمونه، از مقدار میانگین بیشتر است. بنابراین، وقتی نیرو به مقدار نیروی نهایی می‌رسد، نقاطی از نمونه، تنش برشی بیشتری از مقدار گزارش شده به‌عنوان استحکام را تجربه می‌کنند. در نتیجه استحکام واقعی ماده، مقداری بیشتر از استحکام گزارش شده و این اختلاف تقریباً حدود ۶٪ است.



شکل ۸- توزیع تنش τ_{xy} در لایه اول نمونه به ازای بار نهایی.

می‌شود که شاخص شکست در بحرانی‌ترین نقطه را به مقدار متناظر خود در حالت آزمون استاندارد برساند. محور افقی در همه نمودارها، بیانگر مکان نرمال شده نقاط واقع بر خط سنجش (خط واصل ریشه شکاف‌ها) است. با کمی فاصله گرفتن از ریشه شکاف‌ها، نتایج برای فاصله -0.8 تا 0.8 بررسی شده است.

نتایج مدل‌سازی

آزمون در شرایط استاندارد

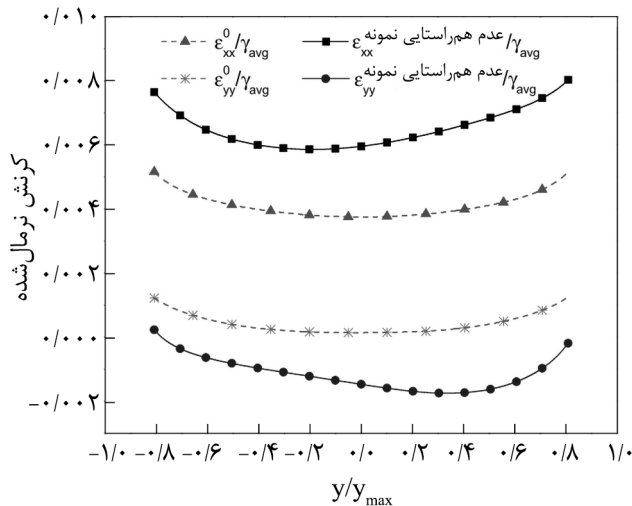
برای مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج تجربی، مقایسه‌ای بین نمودار تنش برشی-کرنش برشی به‌دست آمده در هر یک از این حالت‌ها انجام شد. از آنجا که نمودار حاصل از ارزیابی تجربی، نمودار تنش برشی متوسط برحسب کرنش برشی مرکز نمونه است، نموداری که از مدل‌سازی استخراج شده نیز نمودار تنش برشی متوسط برحسب کرنش برشی اجزای مرکزی نمونه است. شکل ۶ تطابق خوب نتایج مدل‌سازی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد.

شکل ۷ توزیع مؤلفه‌های کرنش را روی خط سنجش نشان می‌دهد که نسبت به کرنش برشی میانگین نرمال شده است. همان‌طور که مشخص است، توزیع کرنش برشی روی خط سنجش نسبتاً یکنواخت بوده و همچنین مؤلفه‌های عمودی کرنش تقریباً صفر هستند. از آنجا که در آزمون برش ایده‌آل، وجود برش خالص و توزیع کرنش برشی یکنواخت در مقطع سنجش، مورد انتظار است، وضعیت کرنش به‌دست آمده از مدل‌سازی، نزدیک‌بودن این آزمون را به حالت ایده‌آل تأیید می‌کند.

بررسی توزیع تنش برشی روی خط سنجش نشان می‌دهد، در نقطه وسط نمونه که محل نصب کرنش‌سنج است، تنش برشی، مقداری کمتر از تنش برشی میانگین است. در حالی که برای یافتن مدول برشی فرض می‌شود، تنش معادل با تنش برشی میانگین به محل نصب کرنش‌سنج وارد می‌شود. براساس نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی، اختلاف تنش برشی در نقطه وسط نمونه با تنش برشی میانگین، حدود ۷٪ است. بنابراین، مدول برشی واقعی ماده، حدود ۷٪ کمتر از مدول برشی به‌دست آمده خواهد بود.

شکل ۸ وضعیت توزیع تنش را در لایه اول نمونه (لایه صفر درجه) نشان می‌دهد. این شکل، هنگامی که باری معادل با بار نهایی آزمون به نمونه‌ای با لایه‌چینی و ابعاد نمونه وارد شود، نشان‌دهنده وضعیت تنش برشی در نمونه است. مطابق انتظار، یکنواختی توزیع تنش برشی در مقطع سنجش کاملاً مشهود است.

طبق استاندارد، استحکامی که در آزمون VNR گزارش می‌شود، برابر با تنش برشی میانگین به ازای بار نهایی است. هنگامی که نیروی



شکل ۹- کرنش‌های عمودی نرمال شده در راستای خط سنجش، در مدل‌سازی عدم هم‌راستایی نمونه.

کرنش از حالت کششی به حالت فشاری تبدیل می‌شوند. هر دو مؤلفه کرنش عمودی از نظر عددی، نسبت به حالت استاندارد افزایش می‌یابند و افزایش کرنش ϵ_{yy} بیشتر از کرنش ϵ_{xx} است. بنابراین، افزایش کرنش‌های عمودی ناشی از حالت بارگذاری لبه‌ای، به معنی فاصله گرفتن آزمون از حالت ایده‌آل آزمون برش است.

اثر تغییرات به وجود آمده در هر یک از مؤلفه‌های تنش، بر رفتار نهایی ماده از نظر شروع آسیب و شکست، با مطالعه تغییرات شاخص شکست قابل بررسی است. مطابق جدول ۴، بارگذاری لبه‌ای باعث می‌شود، شاخص شکست روی خط سنجش، حدود ۰/۰۸ نسبت به حالت استاندارد کاهش یابد. کاهش شاخص شکست به این معناست که شکست در نمونه، تحت بار بیشتری نسبت به حالت استاندارد ایجاد می‌شود. در واقع می‌توان گفت، اگر حین آزمون، این نوع بارگذاری به نمونه اعمال شود، استحکام به دست آمده، حدود ۴/۶٪ از استحکام واقعی قطعه بیشتر است.

انحراف الیاف حین تولید نمونه‌ها

شکل ۱۱، نتایج حاصل از مدل‌سازی انحراف الیاف را نشان می‌دهد.

خطا در نصب نمونه داخل بست

شکل ۹ نتایج به دست آمده از مدل‌سازی خطا در نصب نمونه را ارائه می‌دهد. در این شکل، توزیع کرنش‌های عمودی روی خط سنجش که نسبت به کرنش برشی میانگین، نرمال شده، نشان داده شده است. طبق این شکل، اگر نمونه به اندازه ۲ mm از مکان اصلی منحرف شود، کرنش ϵ_{xx} در نمونه افزایش می‌یابد، اما، حالت کششی آن بدون تغییر باقی می‌ماند. در حالی که ϵ_{yy} از حالت کششی به حالت فشاری تبدیل می‌شود. انحراف نمونه از محور بارگذاری، اثری بر توزیع تنش برشی در خط سنجش ندارد. بنابراین ناهم‌راستایی خط سنجش و محور بارگذاری، تنها موجب تغییر وضعیت مؤلفه‌های عمودی کرنش می‌شود.

از لحاظ نظری، هنگامی که خط سنجش کاملاً بر محور بارگذاری منطبق باشد، دقیقاً روی خط سنجش محل وقوع برش خالص بوده و روی آن، ممان خمشی صفر است. انحراف خط سنجش از محور بارگذاری سبب می‌شود، خط سنجش در محلی واقع شود که ممان خمشی غیر صفر است. بنابراین وضعیت مؤلفه‌های عمودی، تغییر می‌یابد. در نمونه‌هایی که دارای جفت‌شدگی برشی هستند، تغییر در وضعیت مؤلفه‌های عمودی نیز می‌تواند باعث تغییر در وضعیت مؤلفه برشی شود. اما در لایه چینی $[0/90]_{ns}$ وضعیت برشی، تابع بار برشی اعمالی است و با انحراف خط سنجش از محور بارگذاری، بدون تغییر باقی می‌ماند.

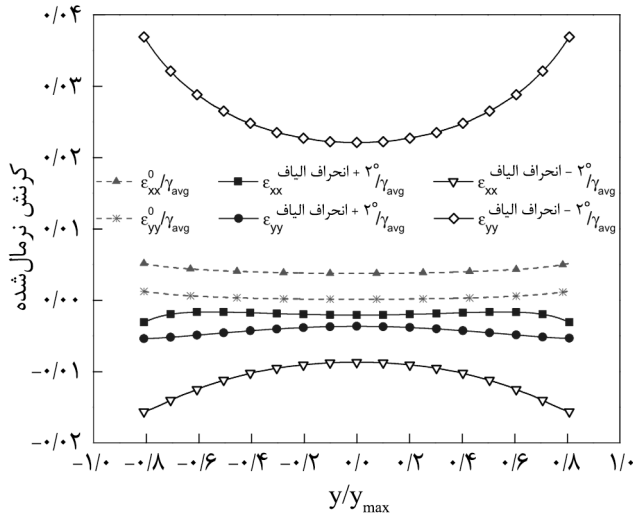
بر اساس معیار شکست تسای-وو (جدول ۴)، افزایش حدود ۰/۰۰۶ شاخص شکست در نقطه بحرانی، نشان‌دهنده این است که خطا در نصب نمونه با شرایطی که بیان شد، می‌تواند استحکامی کمتر از استحکام واقعی نمونه به دست دهد. این اختلاف در استحکام، حدود ۰/۹٪ است.

لغزش صفحه‌های نگه‌دارنده نسبت به نمونه

اثر بارگذاری لبه‌ای بر نتایج، در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این شکل، وضعیت مؤلفه‌های عمودی کرنش را ارائه می‌دهد که نسبت به کرنش برشی میانگین نرمال شده‌اند. طبق این شکل، با تغییر نوع بارگذاری از حالت وجهی به حالت لبه‌ای، هر دو مؤلفه عمودی

جدول ۴- ارزیابی اثر خطاهای احتمالی.

خطای احتمالی		مقدار تغییر در شاخص شکست	درصد خطا در استحکام برشی
خطا در نصب نمونه (انحراف خط سنجش از محور بارگذاری)		۰/۰۰۵	۰/۹
لغزش نمونه نسبت به صفحه‌های نگه‌دارنده (بارگذاری لبه‌ای)		۰/۰۸	۴/۶
انحراف در راستای الیاف	+۲°	۰/۰۳۴	۱/۴
	-۲°	۰/۰۵۹	۳/۶

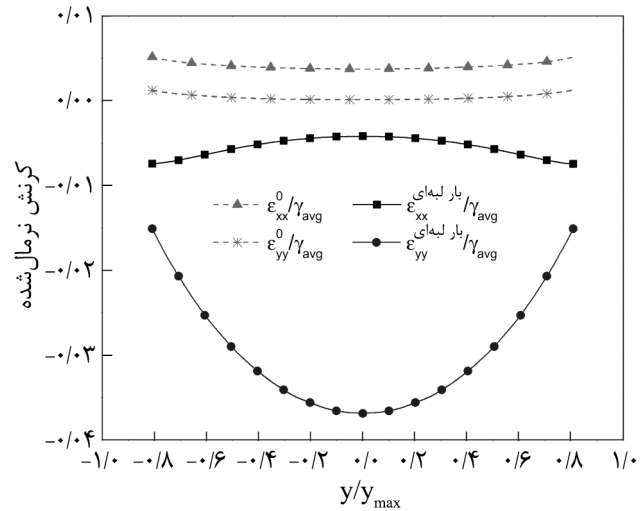


شکل ۱۱- کرنش‌های عمودی نرمال شده در راستای خط سنجش، در مدل‌سازی انحراف الیاف.

استحکام به دست آمده در حالت انحراف -2° الیاف، حدود $3/6\%$ بیشتر از استحکام واقعی و در حالت انحراف $+2^\circ$ الیاف، حدود $1/4\%$ کمتر از استحکام واقعی نمونه است.

نتیجه گیری

تحلیل عددی نمونه آزمون VNR نشان داد، هنگامی که این آزمون در شرایط استاندارد انجام شود، توزیع یکنواختی از تنش و کرنش برشی داخل صفحه‌ای، در مقطع سنجش نمونه ایجاد می‌شود. همچنین مشاهده شد، در این حالت، کرنش‌های عمودی موجود در مقطع سنجش، بسیار اندک هستند و بنابراین به حالت برش خالص، که ایده‌آل آزمون برش بوده، نزدیک است. با وجود این، فرض مزبور که تنش برشی وارد شده به نمونه، معادل تنش برشی میانگین است، در محاسبه استحکام حدود 6% و در محاسبه مدول برشی حدود 7% خطا ایجاد می‌کند. بدیهی است برای دستیابی به دقیق‌ترین نتایج، باید تمام مراحل انجام آزمون مطابق با شرایط استاندارد انجام شود. با وجود این در عمل، وقوع برخی خطاها محتمل است. عدم اطمینان در پارامترهای مختلف آزمون، می‌تواند بسته به اهمیت آن پارامتر، موجب کاهش اعتماد به نتایج به دست آمده شود. خطا در نصب نمونه داخل بست، لغزش صفحه‌های نگاه‌دارنده نسبت به نمونه و انحراف زاویه الیاف حین تولید نمونه‌ها، سه مورد از خطاهای احتمالی حین آزمون هستند که به تفصیل بررسی شده و اثر هر یک از آن‌ها بر وضعیت کرنش و شکست نمونه ارزیابی شد. بررسی اثر پارامترها



شکل ۱۰- کرنش‌های عمودی نرمال شده در راستای خط سنجش، در مدل‌سازی لغزش نمونه.

طبق این شکل، در هر دو حالت انحراف زاویه الیاف، مؤلفه‌های کرنش عمودی تغییر می‌کند، اما، تغییر وضعیت کرنش‌های عمودی در حالت انحراف $+2^\circ$ الیاف، نسبت به حالت انحراف -2° کمتر است. در حالت انحراف $+2^\circ$ هر دو مؤلفه کرنش عمودی از حالت کششی به فشاری تبدیل می‌شوند. در حالت انحراف -2° نیز، کرنش ϵ_{xx} به حالت فشاری تبدیل می‌شود. در حالی که کرنش ϵ_{yy} ضمن حفظ حالت کششی، بیشترین تغییرات را نسبت به حالت استاندارد، در مقایسه با سایر مؤلفه‌های کرنش دارد.

از لحاظ نظری، انحراف در زاویه قرارگیری الیاف موجب می‌شود، اعمال برش خالص به نمونه، در جهت‌های اصلی تک‌لایه‌ها به وضعیت تنش‌های عمودی دومی محوری به همراه تنش برشی با اندازه‌ای کمتر از تنش برشی اعمالی تبدیل شود. بنابراین با توجه به اینکه هدف از این آزمون، سنجش خواص برشی تک‌لایه کامپوزیت است، ایجاد مؤلفه‌های عمودی در تک‌لایه‌ها، باعث ایجاد خطا در آزمون می‌شود.

نتیجه بررسی اثر تغییرات هر یک از مؤلفه‌های تنش بر شکست نمونه طبق معیار تسای-وو در هر دو حالت انحراف، در جدول ۴ ارائه شده است. از آنجا که استحکام تک‌لایه کامپوزیت در جهت‌های مختلف، متفاوت است، بنابراین کششی یا فشاری بودن مؤلفه‌های عمودی ایجاد شده ناشی از انحراف الیاف، در تعیین وضعیت نمونه مؤثر است. در نتیجه پاسخ نمونه در حالت انحراف $+2^\circ$ با حالت انحراف -2° یکسان نیست. در حالت انحراف -2° الیاف، در محل بیشترین شاخص شکست، این مقدار حدود $0/059$ کاهش و در حالت انحراف $+2^\circ$ الیاف، تا حدود $0/034$ افزایش می‌یابد. بنابراین

به‌دست آمده از دو آزمون VNR و برش سه‌ریلی در ارزیابی تجربی خواص برشی داخل صفحه‌ای کامپوزیت تک‌جهتی شیشه-اپوکسی نشان داد، اگرچه مدول برشی به‌دست آمده از هر دو روش تقریباً یکسان است، اما استحکام برشی به‌دست آمده از آزمون VNR، حدود ۳۶٪ نسبت به مقدار مربوط به آزمون برش سه‌ریلی افزایش یافته است.

بر استحکام به‌دست آمده، نشان می‌دهد، مقدار اثرپذیری نتایج از پارامترها بسیار کم است و این موضوع از مزایای آزمون VNR است. زیرا، کم‌بودن مقدار اثرپذیری نتایج از پارامترها بدین معنی است که خطاهای جزئی حین آزمون که اجتناب‌ناپذیر هم هستند، نتایج به‌دست آمده را با خطای قابل توجهی همراه نمی‌کند. مقایسه نتایج

مراجع

- Vasilie V.V. and Morozo E.V., *Mechanics and Analysis of Composite Materials*, Elsevier, UK, 95, 2001.
- Lee S. and Munro M., Evaluation of In-Plane Shear Test Methods for Advanced Composite Materials by the Decision Analysis Technique, *J. Compos.*, **17**, 13-22, 1986.
- Chatterjee S.N., Adams D.F., and Oplinger D.W., Test Methods for Composites, Status Report, **3**, Shear Test Methods, 1993.
- Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Rail Shear Method, American Society for Testing and Materials, ASTM D7078/7078M-05, 2005.
- Adams D.O., Moriarty J.M., Gallegos A.M., and Adams D.F., The V-Notched Rail Shear Test, *J. Compos. Mater.*, **41**, 281-297, 2005.
- Adams D.O., Moriarty J.M., Gallegos A.M., and Adams D.F., Development and Evaluation of the V-Notched Rail Shear Test for Composite Laminates, Federal Aviation Administration Report DOT/FAA/AR-03/63, FAA Office of Aviation Research, Washington, DC, 2003.
- Totry E., Gonzalez C., Llorca J., and Molina-Aldareguia J.M., Mechanisms of Shear Deformation in Fiber-Reinforced Polymers: Experiments and Simulations, *Int. J. Fract.*, **158**, 197-209, 2009.
- Paeppegem W.V., Baere I.D., and Degrieck J., Modelling the Non-linear Shear Stress-Strain Response of Glass Fibre-Reinforced Composites. Part I: Experimental Results, *Compos. Sci. Technol.*, **66**, 1455-1464, 2006.
- Totry E., Gonzalez C., and Llorca J., Mechanical Behavior of Composite Materials in Shear: Experiments and Simulations, *Anales de Mecanica de la Fractura*, **26**, 187-192, 2009.
- Totry E., Molina-Aldareguia J.M., Gonzalez C., and Llorca J., Effect of Fiber, Matrix and Interface Properties on the In-Plane Shear Deformation of Carbon-Fiber Reinforced Composites, *Compos. Sci. Technol.*, **70**, 970-980, 2010.
- Daiyan H., Andreassen E., Grytten F., Osnes H., and Gaarder R.H., Shear Testing of Polypropylene Materials Analysed by Digital Image Correlation and Numerical Simulations, *Exp. Mech.*, **52.9**, 1355-1369, 2012.
- Johnson J.D., *Development and Evaluation of the Combined Loading Modification to the V-Notched Rail Shear Test Method for Composite Laminates*, MSc Thesis, University of Utah, 2010.
- Litz D.J., *Development of the Combined Loadnig Shear Test Method and Shear Strain Measurement in the V-Notched Rail Shear Test*, MSc Thesis, University of Utah, 2012.
- Gude M., Hufenbach W., Andrich M., Mertel A., and Schirner R., Modified V-Notched Rail Shear Test Fixture for Shear Characterisation of Textile-Reinforced Composite Materials, *Polym. Test.*, **43**, 147-153, 2015.
- Tatipalli V.R., *Analytical Modification of the V-Notched Rail Shear Test Apparatus for Dynamic Testing*, MSc Thesis, Jawaharlal Nehru Technological University, India, 2008.
- Raju K.S., Dandayudhapani S., and Thorbole C.K., Characterization of In-Plane Shear Properties of Laminated Composites at High Strain Rates, *J. Aircraft*, **45.2**, 493-497, 2008.
- Taheri-Behrooz F. and Shokrieh M.M., Mechanical Properties Characterization of Unidirectional Glass/Epoxy Composites, Iran Composites Institute, Technical Report, 2008.