

بررسی و شبیه سازی تنش شکست در لوله‌های حاشیه دار ساخته شده از مواد مرکب با تقویت کننده‌ی فیبری در بارگذاری‌های گوناگون

رضا مسعودی نژاد^۱ و پویان علایی^{۲*}

چکیده

در این پژوهش تنش شکست نمونه‌های لوله‌ای مواد مرکب با تقویت کننده‌ی فیبری با روش‌های آزمایشی مرتبط مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان داد که در طی فرایند باردهی، کشش بیشینه همیشه در نوک ترک پدیدار می‌شود و سپس با دور شدن از نوک ترک کاهش می‌یابد. هم‌چنین، در نمونه‌های مورد آزمایش پس از این که بار اعمالی از ۴۰۵ نیوتن بزرگ‌تر می‌شود، یک ناحیه‌ی تبدیل پلاستیکی که بسیار نزدیک نوک ترک است، در ناحیه‌ی سخت‌شونده بوجود می‌آید که آغاز شکافت لوله‌ها از این ناحیه شروع می‌شود. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی با روش‌های اجزا محدود نیز با آزمایش‌های تجربی تطابق بسیار خوبی دارند. هم‌چنین، نتایجی که از این پژوهش بدست آمده است می‌تواند بمنظور تامین رهیافتی برای تحلیل رفتار و طراحی لوله‌های مواد مرکب مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: تنش شکست، کشش، نوک ترک، شبیه سازی، اجزا محدود.

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک و عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی شهر کرد.

۲- کارشناس مهندسی مکانیک، شرکت سازه نوین بافت.

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: Pouyan.alaei@gmail.com

پیشگفتار

مواد مرکب تقویت شده، پتانسیل استفاده در سازه‌ها و اجرا در کاربردهای مواد سبک وزن تولیدی را دارند [۴-۱]. یکی از رایج‌ترین مشکلات در طراحی سازه‌های مواد مرکب با تقویت فیبر، تعیین ویژگی‌های مکانیکی مواد مرکب است. در این‌جا ویژگی‌های ماده‌ی زمینه و فیبرهای ارایه شده به وسیله‌ی تولید کننده در فرآیند طراحی مفید نمی‌باشند، بنابراین، پیش از طراحی سازه‌ی یک ماده‌ی مرکب، انجام آزمایش‌هایی جهت ارزیابی ویژگی‌های آن ضروری است. استفاده از روش تولید مشابه در آماده سازی نمونه‌ها مانند زمان تولید نمونه، دارای اهمیت است [۵-۹]. تخمین مقاومت به تعیین ویژگی‌ها و تحلیل شکست مواد مرکب تقویت شده، به آزمایش‌های پیشرفته با باردهی تک محوری و چند محوری وابسته است.

ساختارهای سیلندری چند لایه‌ای

معادله‌های ساختاری برای مواد مرکب ایزوتروپیک که عملکرد مکانیکی و ساختاری حرارتی خوب لایه‌های ناهم‌جهت و لایه‌های موازی شده را دارند، می‌توان بر اساس محاسبه‌ی لوله‌ها به‌عنوان پوشش‌های مواد مرکب چند لایه‌ای که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند فرمول‌بندی کرد [۱۰ و ۱۱]. بسته به نوع تقویت، لایه‌های نامنظم WB^1 کم و بیش با یک فیبر پوشش داده شده‌اند و ساختار بافتی نمی‌تواند به سادگی از درون لایه‌های جداگانه‌ی UD^2 به‌عنوان بخشی از آزمایش شدت-فشار یا تحلیل شکست جدا شود [۱۱].

برای محاسبه‌ی زمینه‌های شدت و فشار سه بعدی ساختارهای لوله‌ای چند لایه، از قواعد محاسبه بر حسب ابزارهای نرم افزاری استفاده می‌شود [۱۲]. مدل‌های شبیه سازی تحلیلی استفاده شده، تغییر فیزیکی و تنظیم فراسنج‌های مکانیکی پیچیده را فراهم می‌نماید و در نتیجه، ابزار طراحی کارآمدی برای مهندسان ارایه می‌دهد.

محاسبات در مورد ساختار لوله‌ی حاشیه‌ای شده در یک سیستم هم‌پایه انجام شده‌اند. برای محاسبه‌ی پوشش

سیلندر تقویت شده با فیبر چند لایه، مواد مرکب به حالت شکسته شده در لایه‌های اساسی WB ، جهت‌گیری تصادفی فیبر در نظر گرفته می‌شود. تحلیل شدت-فشار ساختارهای مواد مرکب ایجاد شده از لایه‌های اساسی بافته شده‌ی تقویت شده که برخلاف ساختار فیبری پیچیده، به‌وسیله‌ی تئوری لایه‌ای که در آن‌ها در صورت همگونی‌های ساختاری یاد شده بر حسب ضریب‌های کاهش دهنده‌ی خاص بافت، مورد ملاحظه قرار می‌گیرند، را تحت تأثیر قرار می‌دهد. پس از حل معادلات تفاضلی توصیف شده برای هر لایه‌ی اساسی WB ، لایه‌ها به وسیله‌ی شرایط مرزی متحد می‌شوند. ارتباطات مکانیکی ساختاری بسیار پیچیده و فراسنج‌های تولید که معمولاً تعیین آن‌ها سخت است، در عمل فشارهای تحریک شده به وسیله‌ی درجه حرارت، اغلب لحاظ نمی‌شوند. با این حال، در کاربردهای بسیار دقیق، چنین تاثیراتی را نمی‌توان نادیده گرفت، بویژه زمانی که دلایل ساختاری سبب اختلال در جریان نیرو در فیبرها می‌گردند [۱۲].

در حالی‌که روش تحلیلی، نشانه‌های ارزشمند و اساسی را در مورد سیستم تقویت بافتی و مواد زمینه فراهم می‌نماید، شبیه سازی با اجزا محدود و بهینه سازی، بیش‌تر سبب تنظیم بهتر ساختار تقویت کننده‌ی بافتار در نواحی باردهی شده‌ی لوله‌های نمونه می‌گردد.

تحلیل شکست و روش پژوهش

به دلیل پیچیدگی هندسه و سازوکارهای شکست مواد مرکب تقویت شده از لحاظ بافتی، یک تحلیل شکست ساختاری آسان سبب مشکلات بسیاری می‌شود زیرا ترکیب بندی ریز ساختاری از اهمیت حیاتی برای توصیف عملکرد آسیب برخوردار است. تحلیل آسیب موفقیت آمیز، نخست به تعیین واقع گرایانه‌ی همه‌ی سازوکارهای آسیب نیازمند است. آسیب به طور قراردادی به‌عنوان تنزل پیشرفتی مواد به دلیل رشد ریز شکاف‌ها می‌باشد. ایجاد شکاف‌های ریز یک سازوکار، برای عملکرد غیرخطی مواد مرکب تقویت شده از لحاظ بافتی مهم است. برخلاف ایجاد شکاف ریز زمینه‌ای، حالت‌های شکست مانند شکست فیبر یا شکست فشردگی مشاهده می‌شود که در عمل دارای اهمیت‌اند. انتخاب متغیرهای آسیب به گونه‌ی چشم‌گیری

¹ - Woven Balanced

² - Unidirectional

به سازوکارهای آسیب قابل جداسازی و شناخته شده بستگی دارد.

بمنظور توصیف عملکرد شکست اولیه‌ی مواد مرکب چند لایه‌ای تقویت شده فیبری ایزوتروپیک، چند معیار مهم شکست وجود دارد. در مقایسه با معیارهای شکست تقابلی که حالت‌های شکست گوناگونی را با یک معیار شکست مربوط می‌سازند، معیارهای شکست فیزیکی نشان دهنده‌ی پیشرفتی اساسی هستند زیرا آن‌ها قادر به توصیف حالت‌های شکست غالب به گونه‌ای مستقل با شرایط شکست تطبیق یافته‌اند. در اصل، معیارهای ایجاد شده به وسیله‌ی پاک و شورمن [۱۲] و کانتز و فروند [۱۳]، برای تحلیل شکست لایه‌های چند جهتی بسیار مناسب‌اند. لانگ کامپ [۱۱]، قابلیت تطبیق این معیارها را برای تحلیل نقصان گروه‌های ویژه‌ی مواد مرکب تقویت شده از لحاظ ساختاری نشان داده است.

مانتزل میلر و همکارانش [۱۴]، مدلی را بر اساس CDM برای تحلیل غیرخطی مواد مرکب پس از شکست اولیه پیشنهاد کردند. مدل بر اساس لایه‌ها، سه فراسنج آسیب را معرفی می‌کند. دو فراسنج با جهت‌های لایه‌ی اصلی در سطح مرتبط هستند و یک فراسنج دیگر نشان دهنده‌ی تأثیر آسیب بر برش می‌باشد.

بر اساس این فرض که عملکرد شکست یک لایه‌ی شکاف خورده را می‌توان از لحاظ مسوسکوپیکالی فرآیندسازی کرد، مقادیر ثابت طراحی لایه‌های تحت تأثیر پس از آشکار شدن نخستین شکست، کاهش می‌یابند. هافنباک و همکارانش قابلیت تطبیق این روش را در ترکیب با شرایط شکست اولیه، بمنظور توصیف عملکرد تنزلی همه‌ی گروه‌های مواد مرکب بافتی نشان داده‌اند [۱۵-۱۷].

با این حال، عملکرد همه‌ی این مدل‌ها بسیار حساس است و به تعیین تجربی فراسنج‌های آسیب ایجاد شده، بستگی دارد. بر این اساس می‌بایست تأکید ویژه‌ای روی مشاهده‌ی تجربی کاهش سختی و ایجاد شکاف صورت گیرد.

طرح نخست لوله‌ی نمونه‌ی تقویت شده با الیاف کربن، در شکل ۲ آورده شده است. برای آزمایش‌های ماده‌ی جامع در باردهی تک محوری، روش‌های آزمایش نوینی

ایجاد شد. در بین آزمایش‌ها، آزمایش‌های فشار داخلی- فشردگی و کششی به گونه‌ی ترکیبی ایجاد شدند. بلوک‌های لاستیک سیلندری با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر درون لوله قرار گرفتند. این بلوک‌ها به وسیله‌ی فشار دهنده‌های استیلی ثابت شده، در حفاظ دستگاه آزمایش کشش، فشرده شدند (شکل ۳). اندازه‌ی تغییر مکان فشاردهنده‌ها، افزایش نیروی فشار دهنده‌ها و افزایش نیروی فشردگی ثبت شد. انتشار صوتی و اندازه‌ی تغییر مکان فراسنج‌های سطح تقریبی ماده، کامپوزیتی بودند. توده‌ی چرخ‌های الاستیک با طلق پوشیده شده‌اند. هم‌چنین، از انواع گریس‌های آزمایش شده مانند گریس سیلیکون و غیره استفاده شد و مشخص گردید که تاثیر اصطکاک قابل چشم پوشی است. افزون بر این، اندازه‌گیری آزمایش‌های فشردگی الاستیک در نمونه‌های لوله‌ای با دیواره‌ی بسیار ضخیم انجام شد [۱۸].

بمنظور تأیید تجربی معیارهای شکست، ایجاد روش‌های آزمایش که کاربرد چند محوری مورد هدف بار را امکان پذیر می‌سازند، ضروری است. به این دلیل، روند آزمایش برای آزمایش‌های پیچشی- فشاری، کشش و آزمایش‌های فشار داخلی بر قطعات آزمایشی لوله‌ی تقویت شده‌ی دو جهتی و تک جهتی، انجام بررسی‌هایی را در فضای فشار امکان پذیر می‌کند.

آزمایش‌های پیچشی- فشاری و کششی

در آزمایش‌های پیچشی- فشاری و کششی، ترکیب فشار بحرانی شکست همراه باردهی به کمک یک دستگاه آزمایش چند محوری کنترل شده از لحاظ گسترش بار با یک شدت سنج پیچشی - انبساطی ایجاد شد. این شدت سنج ثبت انبساط و انحراف و نیز جریان متوالی شکست را امکان پذیر می‌کند.

آزمایش‌های انجام شده روی لوله‌ی آزمایشی حاشیه‌دار شده از یک سو، بمنظور تعیین فشارهای شکست و نیز زاویه‌های شکست مرتبط و از سوی دیگر، بمنظور مشخص کردن انواع شکست اولیه بکار می‌روند. افزون بر این، دانستن زاویه‌ی شکست با جزئیات آن از پدیده‌ی شکست پیچیده شده در ساختارهای مواد مرکب حاشیه دار شده مشخص می‌شود. داده‌های بسیاری که از آزمایش

و بارهای ترکیبی نشان داده می شوند، که نتایج بدست آمده را تایید می کنند.

نتایج

بررسی فشار داخلی، کشش و پیچش روی نمونه های لوله ای استفاده شده، کمترین خطا را در بر می گیرد که به دلیل فرآیندسازی مکانیکی ویژه و نوع بار می باشد. در فرآیند تولید لوله های تقویت شده فیبری، بهترین نوع نوار پیچاندن می باشد که این تکنولوژی گرفتن اضافی مواد، هوای موجود و مسطح کردن لایه های مواد مرکب را تضمین می کند.

در ایجاد شکاف ریز زمینه ای، شکست فیبر یا شکست فشردگی، در عمل دارای اهمیت اند. انتخاب متغیرهای آسیب به گونه ای چشم گیری به سازوکارهای شناخته شده بستگی دارد. مقایسه ای روش های بررسی، بسته به فشار لاستیک درون نمونه لوله ای، با استفاده از روش های انتخاب شده ی تولید، رضایت بخش است. در این آزمایش ها، حالت های شکست که روی شکنندگی کششی و بی ثباتی شکست فشردگی تاثیر می گذارند، مورد تحلیل قرار گرفت.

نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از این پژوهش به شرح زیر می باشند:
 (۱) در تمام مراحل فرایند باردهی، کشش بیشینه همیشه در نوک ترک پدیدار می شود و سپس با دور شدن از نوک ترک کاهش می یابد. فشار و کشش نزدیک نوک ترک با افزایش بار اعمالی افزایش می یابد. انتشار فشار در مقابل نوک ترک چهار ویژگی متفاوت را نشان می دهد که به شرح زیر می باشند:

الف) زمانی که بار اعمالی پایین تر از ۸۶ نیوتن باشد، ماده در مقابل نوک ترک در حالت الاستیک است و فشار بیشینه در نوک ترک پدیدار شده و با دور شدن از نوک ترک کاهش می یابد (شکل ۷)

ب) زمانی که بار اعمالی بین ۸۶ تا ۱۷۱ نیوتن افزایش یابد، یک وضعیت ثابت فشار اندک در فاصله ای نزدیک به نوک ترک پدیدار می شود که با افزایش بارها طول وضعیت ثابت فشار افزایش می یابد (شکل ۸).

پیچشی- فشاری و کشش بدست می آید، توضیح پدیده ی شکست فیزیکی اولیه را امکان پذیر می سازد و ناکافی بودن معیارهای شکست کلی را نشان می دهد.

آزمایش های فشار داخلی

بمنظور تحلیل عملکرد شکست، از یک دستگاه آزمایش فشار داخلی استفاده شد. فشار کشسانی σ_1 به وسیله ی فشار داخلی بکار می رود، در حالی که نیروی فشار محوری با فشار σ_2 تحریک می شود. فشار فشردگی σ_3 بیش از ۱۰ MPa ایجاد شده که به وسیله ی فشار داخلی اولیه که در تحلیل شکست در نظر گرفته نمی شود، تولید می شود. در این آزمایش ها، این که حالت های شکست تا چه اندازه روی شکنندگی کششی و بی ثباتی شکست فشردگی تاثیر می گذارند، مورد تحلیل قرار می گیرد.

طی این بررسی، اندازه ی تغییر مکان فشار دهنده ها و افزایش نیروی فشردگی ثبت گردید. انتشار صوتی و اندازه ی تغییر مکان فراسنج های سطح، مانند ماده ی مرکب بود. برای نمونه لوله طی بررسی های فشار در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل، پیستون های استیلی که به چرخ های لاستیکی درون نمونه فشار وارد می کنند و نیز چهار حس گر صوتی تحت فشار را می توان مشاهده کرد. توده ی چرخ های الاستیک با طلق پوشیده شده اند. هم چنین، انواع متفاوت گریس های آزمایش شده مانند گریس سیلیکون و غیره وجود دارند. هم چنین، مشخص شد که تأثیر اصطکاک قابل چشم پوشی است.

تحلیل با روش های اجزا محدود

شرایط باردهی پیچیده با روش های اجزا محدود با استفاده از برنامه ی ANSYS و IDEAS نیز تحلیل می شود و نتایج تجربی بدست آمده را تایید می نماید. مدل ها با عناصر پوسته ای ایجاد شدند و ترکیبات باری متفاوت نیز اعمال شد. در شکل های ۶-۴، هر لوله ۱۲ لایه با فیبرهایی در راستاهای متناوب است که حتی با ۶ لایه ی تاثیرگذار نیز پاسخگو می باشد. به عنوان مثال، نمونه های لوله ای متفاوت، تحت بارهای ترکیبی در شکل های ۶-۴، پس از شبیه سازی در FEM نشان داده می شوند. در این شکل ها، نتایج متنوع از بارهای تک محور

پیش‌بینی می‌شود آغاز شکافت در لوله‌ها در ناحیه‌ی تغییر شکل پلاستیکی روی دهد.

سپاسگزاری

با تشکر از مهندسان و کارکنان عزیز واحدهای متالورژی و آزمایشگاهی "شرکت سازه نوین بافت" بویژه مهندس پویان علایی، سرپرست واحد متالورژی و هم‌چنین، باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد که در انجام این پروژه همکاری صمیمانه‌ای داشتند.

منابع

- 1- O. Allix, P. Ladeveze, "Damage mechanics for 3D composites. In: Bathias C, M. Uemara, editors. Advanced Composites Materials II, Leading Part for the XXIst Century, Proceedings of the Second Japan – France Joint Seminar on Composite Materials, SIRPE, Paris, Tsukuba, Japan, 123-135, 1991.
- 2- O. Allix, M. Dommange, M. Gratton, PL. Hereil, A multi-scale approach for the response of a 3D carbon/carbon composite under shock loading. *Comp Sci Tech* 2001; 61(3):409–415.
- 3- A. Legendre, *Le matériau Carbone: des céramiques noires aux fibres de carbone*. Eyrolles. 1992.
- 4- D.R. Hayhurst, I.D. Felce, Creep rupture under triaxial tension. *Eng Fract Mech* 1986; 25:645–664.
- 5- W. Chmielowski, *Określanie Właściwości Materiałowych Długowłoknistego Kompozytu Polimerowego*, Praca Dyplomowa, IMiMT Politechnika Wroclawska, 2002.
- 6- W. Hufenbach, L. Kroll, V. Lustig, M. Gude, Versagensverhalten Gewickelter Faserverbundstrukturen Bei Mehrachsiger Beanspruchung. *Tagungsband zur Technomer*, 99, 11.–13.11.1999, Chemnitz, Bd. 1, A11, pp. 1–9.
- 7- W. Hufenbach, L. Kroll, A. Langkamp, M. Gude, Realistische versagenskriterien für Faserverbundstoffe mit spröder matrix, in: Hg.K. Schulte, K.U. Kainer (Eds.), *Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*,

(ج) زمانی که بار اعمالی بین ۱۷۱ تا ۴۰۵ نیوتن افزایش یابد، یک ناحیه‌ی فشار الاستیک کوچک مشابه (الف)، نزدیک نوک ترک پدیدار می‌شود و در نزدیکی ناحیه‌ی فشار الاستیک بالا، یک فشار ثابت پایین بوجود می‌آید (شکل ۹).

(د) پس از این که بار اعمالی از ۴۰۵ نیوتن بیشتر شود، یک فشار بیشینه در یک فاصله‌ی اندک از نوک ترک پدیدار می‌شود (شکل ۱۰).

(۲) پس از این که بار اعمالی بزرگ‌تر از ۴۰۵ نیوتن شود، یک ناحیه‌ی تبدیل پلاستیکی بوجود می‌آید که بسیار نزدیک نوک ترک در ناحیه‌ی سخت شونده است.

WILEY-VCH-Verlag, Weinheim, 1999, pp. 319–324.

8- W. Hufenbach, R. Böhm, L. Kroll, A. Czulak, Braided Composite Pipe Elements for Applications in Chemical Apparatus Engineering, Glasgow, 2004.

9- W. Hufenbach, L. Kroll, R. Böhm, A. Langkamp, A. Czulak, Piping elements from textile reinforced composite materials for apparatus construction, 12th International Scientific Conference AMME, 2003.

10- P. Zajac, W. Blazejewski, A. Czulak, R. Böhm, *Badania Kompozytowych Probek Rurowych do Oceny Właściwości Materiału Kompozytowego*. *Materiały polimerowe Pomierania — Plast* 2004. Miedzdroje, 2.6.4.6.2004.

11- A. Langkamp, Bruchmodebezogene Versagensmodelle von Faser- und Textilversterkten Verbundwerkstoffen Mit Polymeren, Keramischen Sowie Metallischen Matrices, Dissertation TU Dresden, 2002.

12- A. Puck, H. Schürmann, Failure analysis of FRP laminates by means of physically based phenomenological models, *Composites Sci. Technol.* 58 (1998) 1045–1067.

13- R.G. Cuntze, A. Freund, The predictive capability of failure mode concept-based strength criteria for multidirectional laminates, *Composite Sci. Technol.* 64 (3–4) (2004) 343–377.

14- A. Mantzenmiller, J. Lubliner, R.L. Taylor, A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites, Mech. Mater. 20 (2), pp. 125–152, 1995.

15- L. Kroll, Zur Auslegung Mehrschichtiger Anisotroper Faserverbundstrukturen, Dissertation TU Clausthal, 1992.

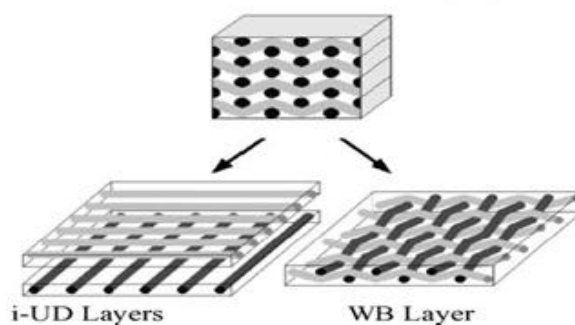
16- A. Puck, Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten, Carl Hanser Publishers, Munich Vienna, 1996.

17- R. G. Cuntze et al., Neue Bruchkriterien

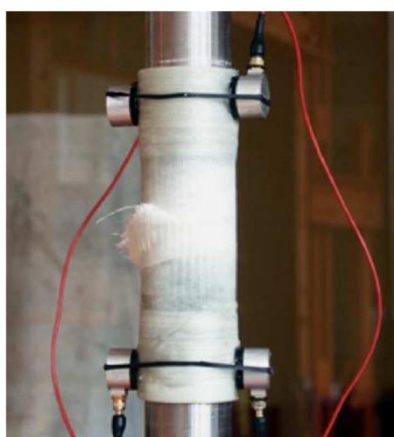
und Festigkeits Nachweise Unter Mehrachsiger Beanspruchung—Modellbildung und Experiment. Progress Report VDI, vol. 5, no. 506, Dusseldorf, VDI Verlag, 1997.

18- W. Blazejewski, P. Chmielarczyk, A. Langkamp, Ciężniowe Badania Rur Kompozytowych W Złożonym Stanie Naprężenia, XIX Sympozjum Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, Jachranka 18–20, Października, 2000.

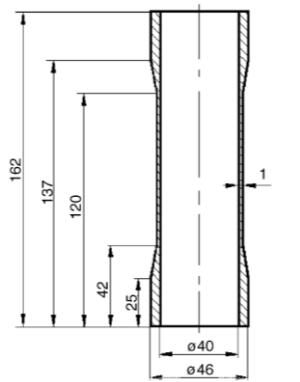
پیوستها



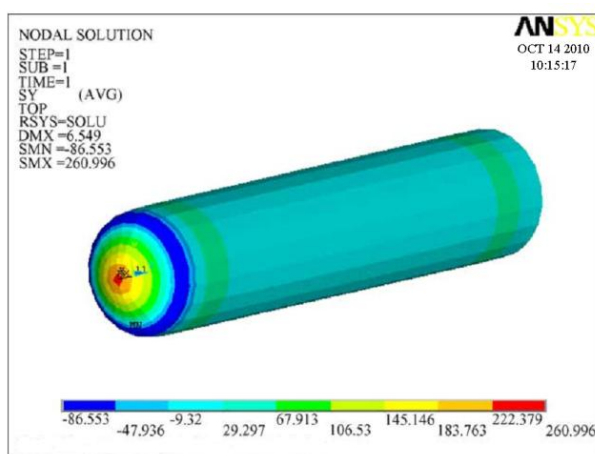
شکل ۱- مدل قرارگیری فیبرها در مواد مرکب [۱].



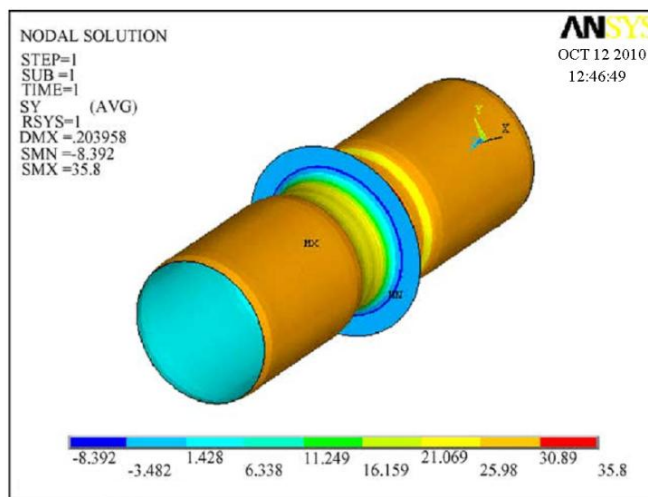
شکل ۲- طرح لوله نمونه.



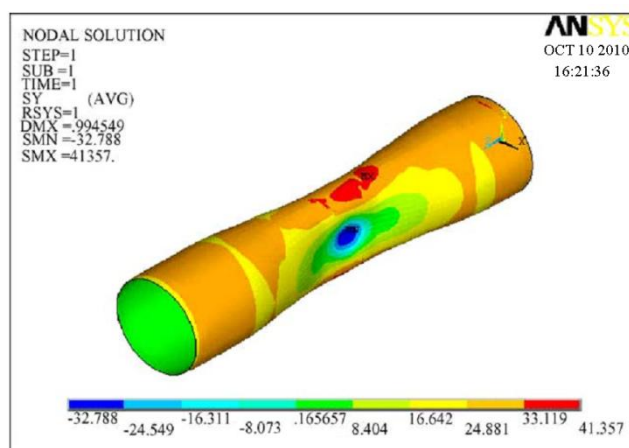
شکل ۳- لوله نمونه در حال آزمایش.



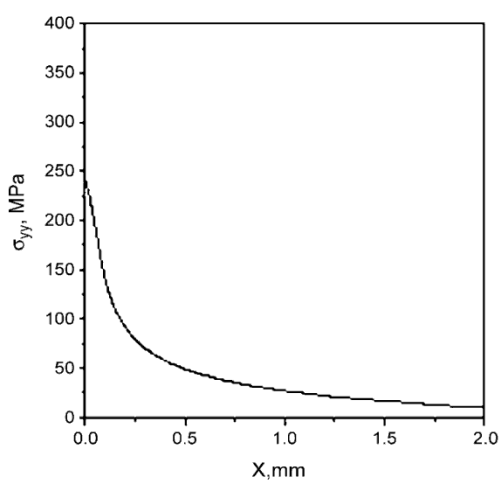
شکل ۴- توده بار (کشش، فشار درونی).



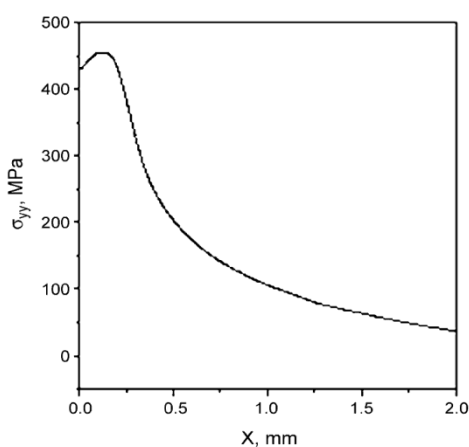
شکل ۵- لوله با بار محوری فشاری.



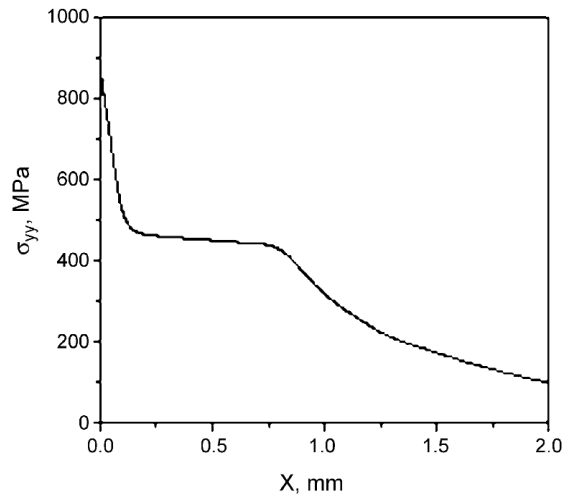
شکل ۶- لوله زیر بار خمشی.



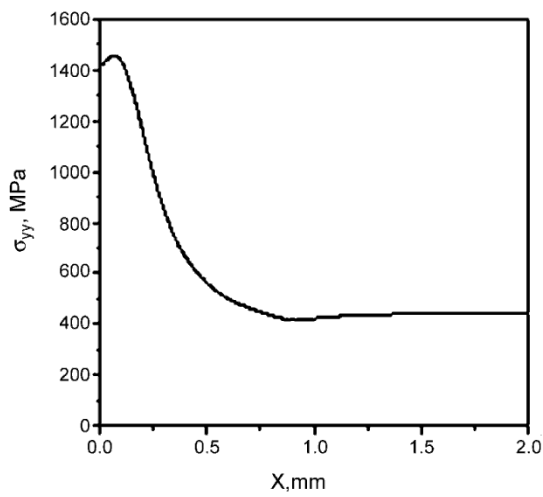
شکل ۷- توزیع بیشینه تنش نرمال در طول ترک برای حالت (الف).



شکل ۸- توزیع بیشینه تنش نرمال در طول ترک برای حالت (ب).



شکل ۹- توزیع بیشینه تنش نرمال در طول ترک برای حالت (ج).



شکل ۱۰- توزیع بیشینه تنش نرمال در طول ترک برای حالت (د).

