



روش نانوفوذگری شبیه‌سازی شده برای تعیین مایکرو تنش‌پسماند یک لایه تک‌جهته کامپوزیتی

محمود مهرداد شکرپه^{*}، محمد حسن شاعلی^۲

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 ۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
 * تهران، صندوق پستی، ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، shokrieh@iust.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>آزمون نفوذگری روشی است که از طریق بررسی رفتار ماده در پاسخ به عمل نفوذگری روی جسم به اطلاعاتی در مورد آن دست می‌یابد. از مهم‌ترین اطلاعاتی که می‌توان از این پاسخ گرفت، مدول الاستیسیته و همچنین تنش‌پسماند نهفته در جسم است. کامپوزیت‌ها ترکیبی از دو یا چند ماده متفاوت هستند و تنش‌های پسماند نیز به دلیل همین اختلاف و ناهمگونی ایجاد می‌شود. با توجه به اثرات مخربی که این نوع تنش‌ها بر عملکرد سازه‌های کامپوزیتی دارند، تعیین مقدار و توزیع آن‌ها ضروری است. در کامپوزیت‌های لایه‌ای، برای تعیین تنش‌های پسماند در مقیاس میکرومکانیک روش‌های تجربی و مکانیکی وجود دارد، اما برای تعیین تنش‌های پسماند در مقیاس مایکرومکانیک روشی تجربی و مکانیکی که بتواند این تنش‌ها را اندازه‌گیری کند، وجود ندارد. هدف از پژوهش حاضر، شبیه‌سازی المان محدود آزمون نفوذگری برای تعیین مدول الاستیسیته و همچنین مایکرو تنش‌پسماند در یک لایه تک‌جهته کامپوزیتی است. برای این منظور، المان حجمی معرف مناسبی از کامپوزیت در نظر گرفته شده و نفوذگر مجازی روی آن انجام شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته تخمین زده شده برای الیاف، به این روش، به عمق نفوذ نفوذگر وابسته است، اما تنش‌پسماند محاسبه شده، مستقل از عمق نفوذ نفوذگر است. برای بررسی تاثیر ماتریس روی نتایج نفوذگری در الیاف، علاوه بر مدل‌سازی کامپوزیت، یک ماده همسانگرد که خواصی مشابه با الیاف شیشه دارد نیز مدل‌سازی شده است و نتایج آن با نتایج کامپوزیت مقایسه شده‌است.</p>	<p>دریافت: ۹۴/۴/۲۳ پذیرش: ۹۴/۷/۱۹</p> <p>کلیدواژگان: تعیین تنش‌های پسماند مایکرومکانیک شبیه‌سازی روش نفوذگری کامپوزیت روش اجزاء محدود</p>

Simulated nano-indentation method for estimation of micro-residual stresses of a unidirectional composite ply

Mahmood Mehrdad Shokrieh*, Mohammad Hasan Shaali

Composites Research Laboratory, Center of Excellence in Experimental Solid Mechanics and Dynamics, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

*P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, shokrieh@iust.ac.ir.

Keywords
 Determination of residual stresses
 Micromechanics
 Simulated indentation composites
 Finite element method

Abstract
 Indentation test is a method in which the behavior of a material, in response to the indentation can provide a variety of information. Residual stresses within the body and modulus of elasticity are of the most important information that can be obtained from this response. A composite material is a combination of two or more different materials and due to this difference and heterogeneity a residual stress occurs in them. Considering the destructive effects of this kind of stresses on performance of composite structures, it is necessary to determine the magnitudes and distribution of them. Currently there are some mechanical experimental methods for determining macro residual stresses in laminated composites. However, there is no mechanical experimental method for determination of micro residual stresses in a unidirectional ply. In this research, a finite element simulation of the indentation test for determining the modulus of elasticity and micro-residual stresses of a unidirectional composite ply is presented. For this purpose, an appropriate representative volume element of the unidirectional composite ply has been considered and a virtual indentation has been applied on it. The results show that the estimated modulus of elasticity for the fiber in this way depends on the penetration depth, while the estimated residual stresses are independent of the penetration depth. To evaluate the effect of matrix on the results of the indentation in fibers, an isotropic material with similar properties to the glass fiber, has been modeled and the results were compared with the results of indentation on composites.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Shokrieh, M. M. and Shaali, M. H., "Simulated nano-indentation method for estimation of micro-residual stresses of a unidirectional composite ply", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 1-12, 2016.

۱- مقدمه

۱-۱- مروری بر تنش پسماند

تنش پسماند عبارت است از تنش که در جسم وجود دارد، بدون آنکه جسم تحت بار خارجی و یا گرادیان‌های دمایی قرار داشته باشد. بخشی از مقاومت جسم صرف غلبه بر این تنش‌ها می‌گردد. ناهمخوانی حرارتی یا عملیات مکانیکی-حرارتی در طی مراحل ساخت، در بسیاری از قطعات و دستگاه‌های مهندسی که از مواد مختلف ساخته شده‌اند (شامل سرامیک‌ها، فلزات و شیشه-ها) می‌توانند تنش پسماند ایجاد کنند. تنش‌های پسماند در مواد همسانگرد، در اثر فرآیندهای ساخت نظیر جوشکاری، نورد، ماشین‌کاری و غیره ایجاد می‌گردند. در یک لایه کامپوزیتی تک‌جهته پس از اتمام مرحله پخت در کوره، درجه حرارت آن‌ها از دمای پخت به دمای محیط کاهش می‌یابد. به علت عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی الیاف و ماتریس، انقباض و انبساط حرارتی متفاوت لایه‌های متوالی به دلیل اختلاف جهات اصلی آن‌ها و انجماد غیریکنواخت قطعه به علت گرادیان‌های دمایی شدید در فرآیند ساخت، تنش‌های پسماند به وجود می‌آید [۱].

در کامپوزیت‌ها عموماً در چندلایه‌های با ضخامت پایین، تنش‌های پسماند در دو مقیاس مایکرومکانیک و مکرومکانیک مورد بررسی قرار می‌گیرند. تنش‌های مایکرو به دلیل عدم تطابق در ضرایب انبساط حرارتی الیاف و ماتریس به وجود می‌آیند، درحالی‌که اختلاف در جهات اصلی لایه‌ها عامل تشکیل تنش‌های ماکرو است. در هر یک از لایه‌های مربوط به یک چندلایه به دلیل عدم تطابق در ضرایب انبساط حرارتی اجزای اصلی کامپوزیت، تنش‌های مایکرو نیز وجود دارند که بر میدان تنش‌های پسماند چندلایه مؤثر هستند. طبق تحقیقات پیشین [۲]، صرف نظر کردن از مایکرو تنش‌های پسماند، می‌تواند منجر به خطای قابل ملاحظه‌ای در پیش‌بینی تنش‌های پسماند هر یک از لایه‌های یک چندلایه‌ای کامپوزیتی گردد.

تنش‌های پسماند تأثیر عمده‌ای بر خواص کامپوزیت‌ها دارند. این تنش‌ها باعث ترک برداشتن ماتریس، لایه‌لایه شدن سازه، پاره شدن الیاف و تاب خوردگی چندلایه‌های نامتقارن شده و تأثیر قابل توجهی در کاهش استحکام نهایی سازه دارند. در برخی از موارد، مقدار تنش‌های پسماند در راستای عمود بر الیاف در یک جسم ارتوتروپ به قدری بالاست که می‌تواند باعث ایجاد ترک‌های عرضی در ماتریس شده و قطعه سریع‌تر از آنچه پیش‌بینی شده تخریب گردد. تنش‌های پسماند درون لایه‌ای سبب به وجود آمدن تنش‌های برشی و عمودی بین لایه‌ای و تقویت اثر مرزی شده که این موضوع می‌تواند به ترک خوردگی ماتریس و یا تورق لایه‌ها منتهی گردد [۳]. تأثیر تنش‌های پسماند در شکل ظاهری چندلایه‌های کامپوزیتی نامتقارن، تاب خوردگی یا کم‌انداختن قطعه است. بنابراین تعیین تنش‌های پسماند از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر این تنش‌ها نادیده فرض شده و یا به درستی محاسبه نگردند، ضریب اطمینان بیشتری در طراحی مورد نیاز بوده که منجر به تولید قطعات غیر بهینه گردیده و وزن سازه را افزایش می‌دهد.

در حال حاضر روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تنش پسماند موجود است. روش‌های مرسوم را می‌توان به دودسته تقسیم‌بندی نمود. روش‌های مبتنی بر آزادسازی تنش و روش‌های مبتنی بر بررسی خواص فیزیکی. روش‌های مبتنی بر آزادسازی تنش، شامل یک روش کرنش سنجی (مثل روش سوراخ‌کاری^۱ و شیارزنی^۲) برای مواد حجیم و یک روش انحناء سنجی (مثلاً روش برداشتن لایه^۳) برای یک سیستم لایه و غشاء می‌تواند به صورت

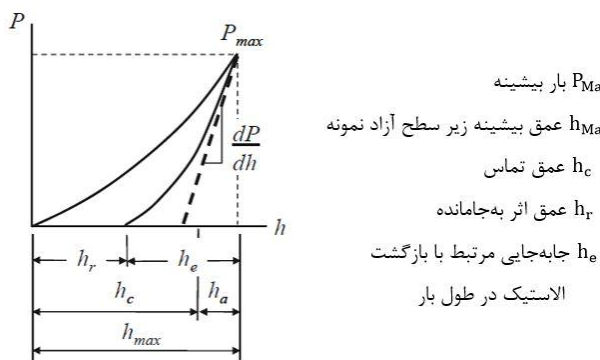
مستقیم و مخرب، تنش پسماند را بدون هیچ نمونه مرجعی اندازه‌گیری کند. هرچند ذات مخرب این روش‌ها، کاربری گسترده این روش‌ها را در صنعت محدود می‌کند. درحالی‌که روش‌های مبتنی بر بررسی خواص فیزیکی (مثل پراش اشعه ایکس^۴، امواج ماورا صوت، بارک‌هاوزن^۵، پراش نوترونی و طیف‌سنجی رامان^۶) می‌توانند تنش‌های پسماند را به صورت غیرمستقیم و غیرمخرب به دست آورند. جداسازی اثرات ذاتی ریزساختاری بر روی خواص فیزیکی از اثرات تنش پسماند، همواره دشوار خواهد بود، لذا این روش‌ها برای انجام مقایسه نیاز به آماده‌سازی سطح مرجع بدون تنش دارند.

روش دیگری که می‌توان به فهرست روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند اضافه کرد، روش نفوذگری کاربردی است (خصوصاً نانوفوذگری) که به‌عنوان روشی قدرتمند در تعیین رفتار مکانیکی حجم‌های کوچک ماده در دو دهه‌ی گذشته به سرعت گسترش پیدا کرد. نفوذگری کاربردی، اندازه‌گیری طیف گسترده‌ای از خواص مکانیکی (مانند سختی، سفتی، مقاومت تسلیم، توان کار سختی^۷، توان تنش خزشی^۸، چقرمگی شکست) همچنین خواص مکانیکی کوچک‌مقیاس (مثل اثر اندازه‌ی نفوذگری، انتقال فاز نیمه‌رساناها تحت فشار، تغییر شکل ناهمگن آلیاژهای غیر متبلور) را تنها با بررسی منحنی نیرو-جابجایی (p-h) نفوذگری و بدون نیاز به مشاهده اثر سختی به‌وسیله میکروسکوپ، امکان‌پذیر کرد [۴].

۱-۲- مروری بر روش نانوفوذگری

هدف اصلی آزمایش نانوفوذگری استخراج سفتی و سختی ماده نمونه با استفاده از بررسی تجربی بار نفوذگر و عمق نفوذ است. در یک آزمایش نوعی، نیرو و عمق نفوذ طوری ثبت شده‌اند که بار به کار گرفته شده از صفر تا مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و سپس از نیروی بیشینه تا صفر کم می‌شود [۵].

تحلیل پاسخ بخش اولیه باربرداری الاستیک، تخمین‌هایی از مدول‌های الاستیک ماده نفوذگری شده ارائه می‌دهد. شکل منحنی بار-جابجایی برای رایج‌ترین نفوذگرها خیلی شبیه هستند و مطابق با شکل ۱ می‌باشند.



شکل ۱ منحنی بار-جابجایی برای رایج‌ترین نفوذگرها [۵]

روش الیور-فار رایج‌ترین روش برای تخمین و محاسبه سطح تصویر شده تماس و محاسبه مدول الاستیک در مواد معمولی است [۶،۵]. مساحت تصویر شده تماس A، تحت بیشترین بار نفوذ با نفوذگر مخروطی، بر اساس عمق تماس h_c تخمین زده می‌شود.

$$A = \pi(h_c \tan \theta)^2 \quad (1)$$

4. X-ray diffraction
5. Magnetic Barkhausen Noise
6. Raman spectra
7. Work-hardening exponent
8. Creep stress exponent

1. Hole-drilling
2. Saw-cutting
3. Layer-removal

دومحوره‌ی برابر بر روی نیروی عمودی نفوذگری را می‌توان از مؤلفه‌ی انحرافی تنش انتخاب‌شده تعریف کرد.

$$P_R = \frac{2}{3} \sigma_R A_C \quad (5)$$

در این رابطه P_R تأثیر تنش‌پسماند روی نیروی نفوذگری است و می‌تواند به‌عنوان اختلاف نیروی P بین حالت بدون تنش و حالت تنش‌دار در یک عمق نفوذ ثابت، به‌صورت تجربی اندازه‌گیری شود. در تحقیقات بعدی [۹] آن‌ها با معرفی نسبت تنش (K) به‌عنوان نسبت مؤلفه‌ی کوچک‌تر تنش‌پسماند درون صفحه‌ای σ_R^y به مؤلفه‌ی بزرگ‌تر σ_R^x به‌نحوی که $\sigma_R^y = K \sigma_R^x$ مدلسازان را توسعه دادند. با قرار دادن نسبت تنش K در رابطه‌ی قبلی، به عبارت زیر دست یافتند:

$$P_R = \frac{-(1+K)}{3} \sigma_R^x A_C \quad (6)$$

یافته‌ها نشان می‌دهند که نتایج تجربی توافق خوبی با این روابط دارد. احتمالاً این مدل گسترده‌ترین کاربرد را در متون علمی دارد. این احتمالاً به دلیل آن است که در کار آن‌ها اکثرآ از آزمایش مایکرونفوذگری در بارهای زیاد استفاده می‌شود (در مقابل نانوفوذگری) و لذا جابه‌جایی نسبتاً اندک منحنی که در نانوفوذگری به وجود می‌آید را بزرگ‌تر می‌کند [۴]. مدل سورش و گیاناکوپولوس [۷] محدود است به تنش‌پسماند دومحوره‌ی برابر در حالی که مدل لی و همکارانش [۹] راهی برای در نظر گرفتن تنش‌پسماند دومحوره ارائه می‌دهد.

تلجت و فار^۴ [۱۰] با استفاده از شبیه‌سازی‌های المان محدود روی نفوذگری کروی تأثیرات عمده‌ای از تنش‌پسماند دومحوره‌ی برابر را روی رفتار نیرو-جابه‌جایی (P-h) در مرحله‌ی انتقال الاستیک به پلاستیک مشاهده کردند. سوادنر^۵ و همکارانش [۱۱] برای اینکه دریابند که آیا این تأثیرات به‌صورت تجربی قابل‌اندازه‌گیری است، روی چند دیسک از آلیاژهای مختلف آلومینیوم صیقل داده‌شده که می‌توانستند تا حد تعیین‌شده‌ی تنش کششی یا فشاری دومحوره‌ی برابر پیدا کنند، آزمایشات نانوفوذگری کروی را انجام دادند. آن‌ها دریافتند که تنش کششی با افزایش پلاستیسیته، منحنی‌های P-h نانوفوذگری را به عمق‌هایی که به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر بودند، انتقال می‌دهد. درحالی‌که تنش فشاری تأثیر عکس دارد. سوادنر و همکارانش [۱۱] بر اساس این مشاهدات، دو روش متفاوت را برای اندازه‌گیری تنش‌پسماند با استفاده از نفوذگر کروی، ارائه دادند. روش اول بر این اساس است که عمق اندازه‌گیری شده‌ای که تسلیم در آن اتفاق می‌افتد، از تنش، به‌گونه‌ای که با مکانیک تماس هرترز قابل‌تحلیل است، تأثیر می‌پذیرد. این روش احتمالاً نیاز به شعاع نفوذگر بسیار بزرگی در آزمایش‌ها دارد. روش دوم سوادنر و همکارانش بر اساس مشاهدات تجربی از رابطه‌ی بین فشار تماس و شاخصی بی‌بعد از پلاستیسیته است. طبق مشاهدات آن‌ها، نمودارها به‌اندازه‌ای که به مقدار نسبی تنش دومحوره‌ی اعمالی بسیار نزدیک است، به‌صورت عمودی جابه‌جاشده‌اند.

علاوه بر مدل‌های تئوری که مرور شد، برخی محققین از شبیه‌سازی‌های عددی برای یافتن تأثیر تنش‌پسماند روی رفتار نفوذگری کاربردی استفاده کردند [۱۲، ۱۳].

در تحقیق حاضر، ابتدا مایکروتنش‌های پسماند در یک تک‌لایه‌ای کامپوزیتی پلیمری با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار آباکوس بدست آمده‌است و سپس به صورت معکوس، با شبیه‌سازی آزمایش

شیب اولیه منحنی باربرداری یعنی سفتی تماس را می‌توان توسط مشتق تحلیلی زیر به دست آورد.

$$S = \left(\frac{dP}{dh} \right)_{h=h_{max}} \quad (2)$$

که h_{max} بیشترین عمق نفوذ در طی آزمایش است. رابطه بین شیب اولیه منحنی باربرداری، مساحت تماس و مدول الاستیسیته کاهش‌یافته E_{eff} به‌صورت زیر است [۶].

$$E_{eff} = \frac{S \sqrt{\pi}}{2\beta \sqrt{A}} \quad (3)$$

β ضریب تصحیحی است که درواقع وظیفه آن تصحیح شیب اولیه منحنی باربرداری، به علت ساده‌سازی‌ها و فرضیاتی است که انجام‌گرفته‌است. رایج‌ترین دلیلی که این ضریب تصحیح مورد‌استفاده قرار می‌گیرد، مربوط به اختلاف هندسه بین نفوذگر هرمی و نفوذگر متقارن مخروطی است، که اساس معادلات تحلیلی را تشکیل می‌دهد. دائو و همکارانش، با یک تحلیل المان محدود کاملاً سه‌بعدی، مقدار β را برای یک نفوذگر مخروطی معادل $1/0.595$ تعیین کردند [۵].

رابطه بین مدول الاستیسیته کاهش‌یافته، خواص الاستیک ماده و خواص الاستیک نفوذگر به این صورت است [۶].

$$\frac{1}{E_{eff}} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (4)$$

که در آن زیر نگاشت i نمایانگر نفوذگر است.

۱-۳- تعیین تنش‌پسماند از طریق نفوذگری

پژوهش‌های فراوانی برای تعیین تنش‌های پسماند به‌وسیله‌ی نفوذگری کاربردی در حال انجام است [۴]. زیرا این روش غیر مخرب مکانیکی می‌تواند محدودیت‌های روش‌های مرسوم شامل روش‌های مخرب مکانیکی و غیر مخرب فیزیکی را از میان بردارد. در ادامه به برخی از این روش‌ها اشاره می‌شود.

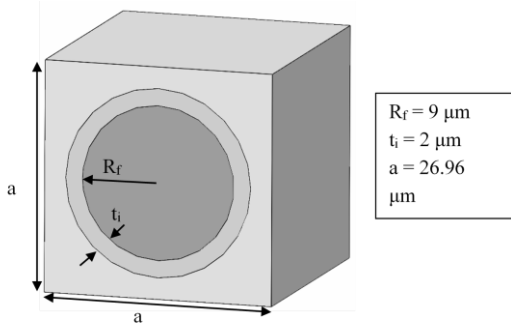
روش سورش و گیاناکوپولوس [۷] یکی از مشهورترین این روش‌ها است. روش آن‌ها، روشی ساده به‌وسیله‌ی نفوذگری با نفوذگر نوک‌تیز، برای تعیین تنش‌پسماند است. این روش بر پایه‌ی دو فرض قرار دارد: اولاً آن‌که تنش‌پسماند دومحوره‌ی برابر الاستیک سطحی^۱، در عمقی که نفوذگر روی آن تأثیر دارد یکنواخت باشد؛ ثانیاً تنش‌پسماند دومحوره‌ی برابر در سطح نفوذگری شده^۲، با یک تنش هیدرواستاتیک به‌علاوه‌ی یک مؤلفه‌ی تنش تک‌محوره که می‌تواند یک نیروی نفوذگری تفاضلی ایجاد کند، معادل خواهد بود. این محققین تأثیر یک تنش‌پسماند را روی شکل منحنی نفوذگری بررسی کردند و با در نظر گرفتن تغییرات در سطح تماس، تنش‌پسماند را تخمین زدند. هرچند چون در آزمایشات نانوفوذگری تأثیر تنش روی سطح تماس نسبتاً ناچیز است، این روش فقط زمانی کاربرد دارد که تنش‌پسماند خیلی بزرگ باشد (تقریباً نزدیک تنش تسلیم) و فقط در موادی که برآمدگی^۳ ماده در آن‌ها چشمگیر باشد. این باعث محدودیت این روش در کاربردهای عملی در حالت عمومی می‌شود [۴].

لی و همکارانش [۸] با تفسیر تأثیر تنش‌پسماند دومحوره‌ی برابر، به‌عنوان مؤلفه‌ی عمودی، در قسمت انحرافی تانسور تنش ایده‌ی سورش و گیاناکوپولوس را اصلاح کردند. آن‌ها دریافتند که تأثیر یک تنش‌پسماند

1. Elastic equi-biaxial residual stress at the Surface
2. Equi-biaxial residual stress at the indented surface
3. Pile-up

4. Taljat and Pharr
5. Swadener

برای القای مایکرو تنش‌پسماند حرارتی در کامپوزیت، کاهش دمای ۱۲۰ درجه‌ای به‌طور یکنواخت به کل مدل اعمال شده‌است. در شکل ۳، نمایی از ویژگی‌های هندسی کامپوزیت انتخاب‌شده در این پژوهش نمایش داده شده‌است. R_f شعاع الیاف، t_i ضخامت ناحیه فاز مشترک و a نشان‌دهنده‌ی ابعاد ماتریس است.



شکل ۳ المان حجمی نمونه‌ی کامپوزیت

۴- یافتن المان حجمی معرف مناسب

در مدل‌سازی تنش‌های پسماند در کامپوزیت‌های الیافی، مهم‌ترین مسئله معرفی یک المان حجمی شاخص است، به‌نحوی که بتواند به‌خوبی نماینده کامپوزیت بوده و دقت قابل قبولی داشته باشد. در این قسمت تلاش شده‌است تا المان حجمی مناسبی برای انجام شبیه‌سازی نفوذگری انتخاب شود. المان حجمی مناسب باید تا حد امکان کوچک باشد تا تعداد المان‌ها و به تبع آن زمان انجام تحلیل زیاد نشود. از سوی دیگر لازم است که المان حجمی به اندازه‌ی بزرگ باشد که بتواند نماینده مناسبی برای شرایط واقعی باشد. سطح بالایی المان مناسب برای نفوذگری باید دارای شرایط مرزی آزاد باشد. چراکه نفوذگری در مرکز الیاف سطحی انجام خواهد گرفت (مطابق شکل ۲).

توزیع خواص در فاز مشترک^۱ تقریباً از خاصیت توده‌ای الیاف در سطح مشترک الیاف و فاز مشترک آغاز می‌شود و به تدریج تا خاصیت توده‌ای ماتریس، در سطح مشترک دیگر تغییر می‌یابد.

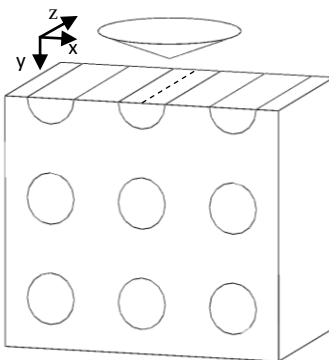
برای مدل کردن ناحیه‌ی فاز مشترک، از این ایده استفاده شد که ناحیه‌ی به ضخامت ۲ مایکرومتری را به تعدادی زیر ناحیه در مدل تبدیل کرده و برای هر یک از این زیر ناحیه‌ها خواص مکانیکی متفاوت از لایه‌های مجاور داده‌شود و مقادیر خواص بر روی لایه‌ها به نحوی انتخاب شود که در امتداد کل ناحیه‌ی فاز مشترک از یک الگوی تغییر خواص خطی در این ناحیه پیروی کند. در اینجا فاز مشترک به صورت ۶ لایه‌ای مدل شده است.

شرط مرزی که به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفت، شرط جابجایی یکسان تمام نقاط روی وجوه خارجی المان‌های حجمی در راستای عمود بر آن وجه است. به این ترتیب تمام نقاط یک وجه در یک صفحه جابجا خواهند شد. با توجه به شرایط مرزی و هندسه المان‌های حجمی انتخاب‌شده، این شرط در واقع همان شرایط مرزی تقارن، نسبت به وجه موردنظر را القاء خواهد کرد. در این بخش، تأثیر افزودن سلول‌های مجاور روی تنش‌های پسماند موجود در الیاف سطحی بررسی شده‌است. تمامی وجوه خارجی دارای شرط جابجایی یکسان تمام نقاط روی وجوه در راستای عمود بر آن وجه هستند، بجز وجوه بالایی که آزاد هستند. در اینجا تنش‌پسماند در رشته سطحی شاخص قرار گرفته‌است. سلول‌های واحد به دو صورت عمودی و افقی به المان حجمی اضافه شده‌اند.

نفوذگری، این تنش‌ها محاسبه خواهد شد. تاکنون هیچ روش مکانیکی، برای این منظور مورد استفاده قرار نگرفته‌است. علاوه بر تنش‌پسماند، مدول الاستیسیته نیز به این روش تخمین زده خواهد شد. در این تحقیق، از میان روش‌های نفوذگری که برای تعیین تنش‌پسماند بیان شد، با توجه به محدودیت‌های مسئله مورد بررسی و نیز کاستی‌هایی که خود روش‌ها دارند، روش لی [۹] انتخاب شد.

۲- انتخاب نقطه مناسب برای نفوذ نفوذگر

برای مدل کردن کامپوزیت الیافی تک‌چته، چیدمان‌های مختلفی در نظر گرفته می‌شود که هر یک از نظم خاصی پیروی می‌کند، ولی در واقع توزیع الیاف در ماتریس به‌صورت تصادفی است. به همین دلیل فاصله بین هر دو تکرار شده در یک کامپوزیت واقعی، متفاوت است. این باعث می‌شود توزیع تنش در ماتریس، در بین هر دو تکرار شده‌ای متفاوت باشد. در مقابل مقدار تنش در الیاف از توزیع یکنواخت‌تری برخوردار است [۱۴]. به همین دلیل، از این به بعد، مقدار تنش‌ها در الیاف، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. تنش‌ها در خود الیاف هم دارای توزیع است و بنابراین باید نقطه خاصی از الیاف را شاخص قرار داده و بررسی کرد. برای انتخاب این نقطه، باید نسبت به آزمایش نفوذگری روی کامپوزیت در شرایط واقعی توجه نمود و این نقطه باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که ساخت نمونه مناسب برای انجام آزمایش امکان‌پذیر باشد. به نظر می‌رسد بهترین گزینه، همان مرکز الیاف باشد. نفوذ در مرکز الیاف مطابق با شکل ۲ خواهد بود. برای انتخاب نقطه مناسب برای نفوذ، باید به اندازه کافی از دوسر کامپوزیت دور شد تا تغییرات تنش‌های پسماند در راستای طولی الیاف بسیار کوچک شوند و تنش‌های پسماند به یک مقدار ثابت برسند. شایان ذکر است که قسمت اعظم طول کامپوزیت (کامپوزیت با الیاف بلند) دارای همین مقادیر تنش‌ها هستند و تنها بخش بسیار کوچکی از دو سر کامپوزیت دارای تغییرات تنش‌پسماند هستند.



شکل ۲ نفوذ در الیاف، به‌صورت عمود بر راستای محوری الیاف

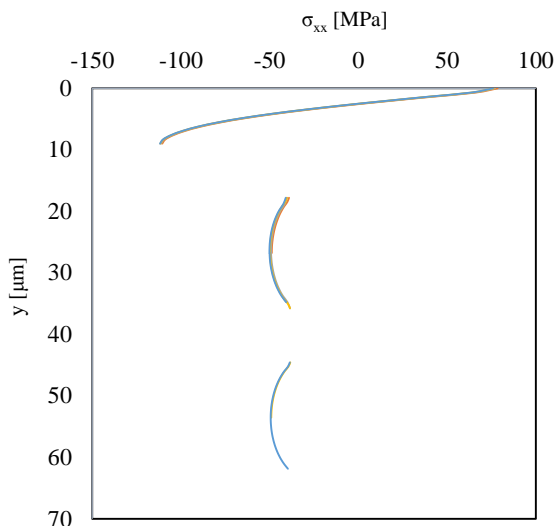
۳- خواص مواد

خواص مکانیکی مواد مورد نظر در شبیه‌سازی کامپوزیت در جدول ۱ آورده شده‌است. مواد به‌صورت الاستیک-کاملاً پلاستیک مدل شده‌اند و برای الیاف شیشه از استحکام تسلیم فشاری استفاده شده‌است، چراکه ناحیه زیر نفوذگر در طی عملیات نفوذگری تحت تنش فشاری قرار می‌گیرد و به تسلیم می‌رسد. گفتنی است که استحکام تسلیم کششی برای الیاف شیشه ۳۵۰۰ MPa است. درصد حجمی الیاف با توجه به مقادیر داده شده ۲۵٪ است. خواص با توجه به منابع [۱۵] و [۱۶] انتخاب شده‌اند. در مدل‌ها فرض شده است که تک رشته‌ها به‌صورت یکنواخت در ماتریس غوطه‌ور شده‌اند و شکل موجی ندارند.

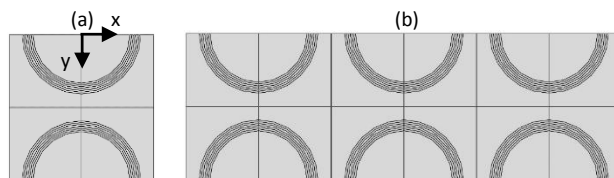
جدول ۱ خواص مواد

ρ [g/cm^3]	α [$10^{-6} K^{-1}$]	ν	σ_y [MPa]	E [GPa]	ماده	ناحیه
۲/۶	۵/۵	۰/۱۸	۱۱۰۰	۷۳	الیاف شیشه	الیاف
۱/۲	۱۰۰	۰/۲۷	۱۴۰	۳/۵	پلی‌استر	ماتریس

ابتدا تأثیر افزودن سلول‌های واحد به صورت افقی، مطابق شکل ۴ مورد بررسی قرار گرفته‌است.



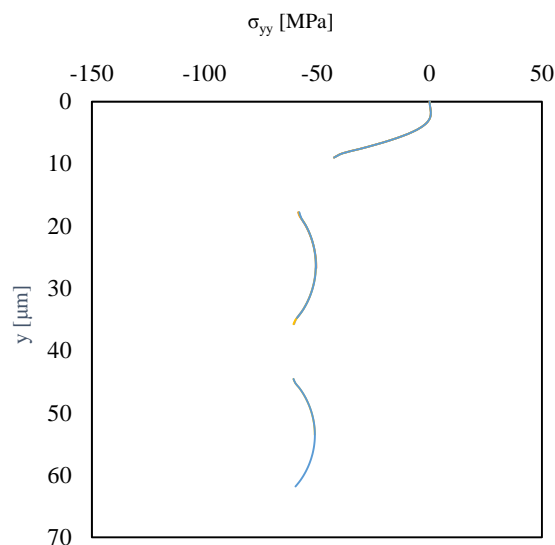
شکل ۶ توزیع تنش پسماند σ_{xx} در الیاف



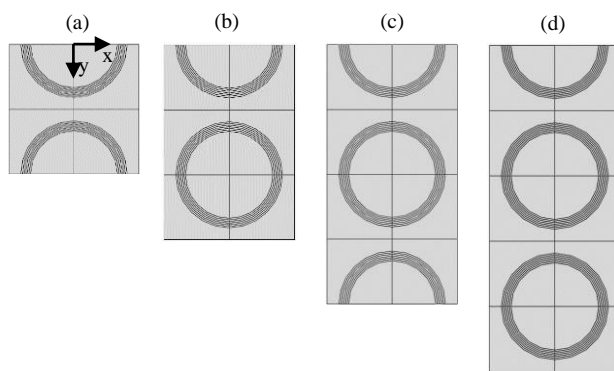
شکل ۴ المان‌های حجمی در نظر گرفته‌شده برای بررسی تأثیر افزودن سلول‌ها به صورت افقی

بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزودن سلول‌ها به المان حجمی شاخص به صورت افقی، هیچ تأثیری روی توزیع تنش‌های پسماند نخواهد گذاشت و توزیع تنش پسماند در تمامی سلول‌های واحد نمایش داده‌شده در شکل ۴ کاملاً یکسان است.

در ادامه تأثیر افزودن سلول‌ها به صورت عمودی، مطابق شکل ۵ بررسی شده‌است. در شکل ۶ و شکل ۷ و شکل ۸ به ترتیب توزیع تنش‌های σ_{xx} و σ_{yy} در الیاف و در امتداد محور y ، برای چهار المان حجمی که در شکل ۵ نمایش داده‌شده است، رسم شده‌است. چون مقادیر داده‌ها بسیار به هم نزدیک است، نمودارهای مربوط به هر چهار شکل ۵-a تا ۵-d تقریباً روی هم افتاده‌اند.



شکل ۷ توزیع تنش پسماند σ_{yy} در الیاف



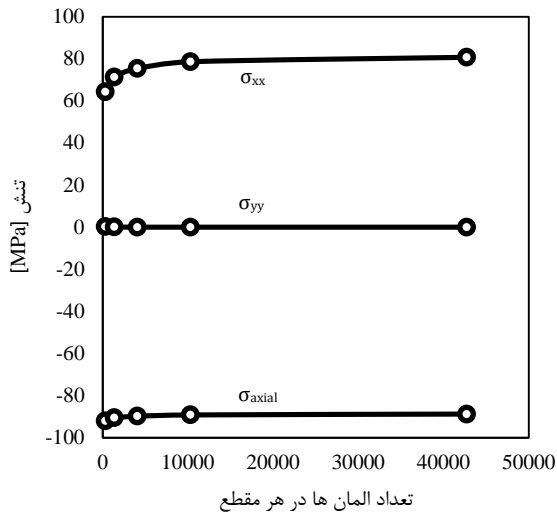
شکل ۵ المان‌های حجمی در نظر گرفته‌شده برای بررسی تأثیر افزودن سلول‌ها به صورت عمودی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در شکل ۶ و شکل ۷ و شکل ۸، چون توزیع تنش‌ها در چهار المان حجمی معرف نمایش داده‌شده در شکل ۵ بسیار نزدیک به هم بدست آمده، نمودارها روی هم افتاده‌اند و تمیز دادن آن‌ها در شکل‌ها مشکل است. بنابراین افزودن سلول‌ها به صورت عمودی نیز تأثیر چندانی روی توزیع تنش پسماند در الیاف نداشته‌است. لذا همان المان حجمی در شکل ۵، برای مدل‌سازی کفایت می‌کند.

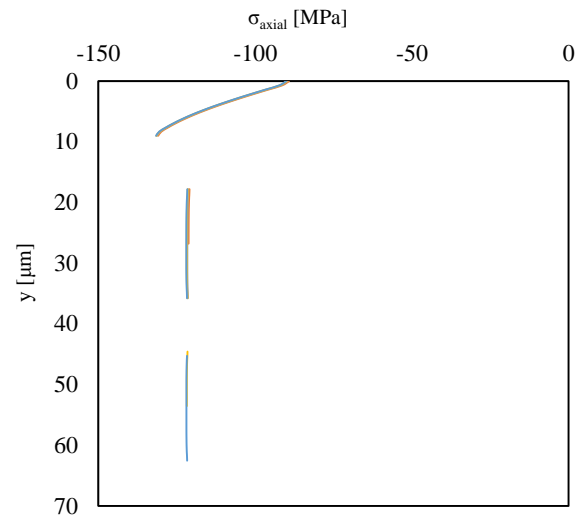
۵- شبیه‌سازی آزمایش نفوذگر

در این بخش، به وسیله شبیه‌سازی آزمایش نفوذگری، به تحلیل مسائل زیر پرداخته شده است:

- (۱) یافتن مدول الاستیسیته شیشه
- (۲) یافتن مدول الاستیسیته تکرشته شیشه در کامپوزیت
- (۳) یافتن تنش یکنواخت اعمال‌شده در تکرشته شیشه در کامپوزیت
- (۴) یافتن تنش یکنواخت اعمال‌شده در شیشه
- (۵) یافتن تنش پسماند حرارتی در تکرشته شیشه در کامپوزیت



شکل ۹ بررسی تأثیر تعداد المان‌ها روی تنش پسماند



شکل ۸ توزیع تنش پسماند σ_{axial} در الیاف

در اینجا نفوذگر به صورت مخروطی با نیم زاویه راس $70/3^\circ$ درجه مدل شده است. این مدل می‌تواند نماینده‌ی نفوذگرهای ویکرز و برکوویچ باشد [۵]. نوک نفوذگرهای واقعی هیچ گاه به صورت ایده‌آل تیز نیست و معمولاً در نفوذگرهای برکوویچ شعاع نوک حدود 200 nm است که در این مدل نیز این شعاع نوک در نظر گرفته شده است. نفوذگر به صورت صلب مدل شده است، چراکه طبق پژوهش‌های پیشین [۱۸]، به دلیل اینکه نفوذگرها سفتی بسیار بالایی دارند، این اغماض چندان تأثیری روی نتایج ندارد. همچنین ضریب اصطکاک بین نفوذگر و نمونه، صفر در نظر گرفته شده، چون این مورد هم تأثیر خاصی روی نتایج ندارد [۱۸]. بین نفوذگر و سطح نمونه، تماس سطح به سطح تعریف شده و سطح نفوذگر به عنوان سطح پایه^۱ و سطح نمونه به عنوان سطح پیرو^۲ انتخاب شده است. برای تعیین نحوه حرکت نسبی دو سطح نسبت به هم، گزینه لغزش محدود^۳ و برای تعیین قیود مکانیکی تماس، روش تماس جبرانی^۴ انتخاب شده است.

برای هر پنج مساله‌ی بیان شده، از مدل هندسی و مش‌بندی شکل ۱۰ استفاده شده است. در مدل استفاده شده برای یافتن تنش و مدول الاستیسیته در شیشه، خواص تکررشته به کل نواحی مدل اعمال شده است. نفوذگری در دو مرحله: (۱) بارگذاری تا عمق نفوذ بیشینه و (۲) باربرداری تا جدایی کامل از سطح نمونه انجام شد. در طی بارگذاری، دو نوع تغییر شکل یا جابجایی در نمونه به وجود می‌آید. یکی تغییر شکل پلاستیک و دیگری تغییر شکل الاستیک که باعث یک بازگشت الاستیک در طی باربرداری می‌شود. پس از باربرداری، به دلیل تغییر شکل پلاستیک، در محل نفوذگری، اثری از نفوذگر باقی خواهد ماند.

نمونه‌ای از تغییر فرم پلاستیک و توزیع تنش پس از نفوذگری روی شیشه و تکررشته شیشه در کامپوزیت در حالتی که عمق نفوذ بیشینه برای هر دو 200 nm است، در شکل ۱۱ و نمودار بار-جابجایی مربوط به آن در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. نرخ بارگذاری و باربرداری در همه موارد 5 nm/s بوده است. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشخص است، بازگشت

استفاده از مدل‌های دوبعدی در مسائل مختلف، می‌تواند تحلیل‌های المان محدود را بسیار آسان‌تر کند و از هزینه‌های تحلیل بکاهد. محققین پیشین نشان داده‌اند که می‌توان نفوذگری را به صورت دوبعدی مدل کرد و نتایج شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی، در شرایط تقارن محوری تفاوت اندکی با هم دارند [۱۷]. با این وجود، به دلیل شرایط مرزی و نوع بارگذاری‌ها، امکان استفاده از مدل دو بعدی در این پژوهش وجود ندارد. لذا به منظور کاهش زمان تحلیل و با کمک شرایط تقارن صفحه‌ای، مدل سه بعدی به صورت یک‌دوم تحلیل شده است. شکل ۱۰، نمایی از شبکه‌بندی مدل استفاده شده برای نفوذگری است و صفحه‌ی نمایش داده شده در شکل ۱۰-ب، صفحه تقارن است. نفوذگر به صورت پوسته صلب مدل شده است. شرایط مرزی شامل جابجایی یکسان تمام نقاط روی هر وجه خارجی در راستای عمود بر آن وجه می‌باشد، به جز صفحه بالایی که آزاد است. صفحه زیرین نیز در راستای y مقید شده است. نفوذگر فقط اجازه حرکت در راستای عمود بر سطح نمونه (محور y) را دارد. به منظور افزایش دقت در بررسی توزیع تنش، المان‌ها در زیر ناحیه نفوذگری به شدت ریز شده‌اند.

بسته به عمق نفوذهای مختلف، بین 60000 تا 66000 المان در مدل‌های استفاده شده است. المان‌های استفاده شده از نوع C3D8R، یعنی المان‌های مکعبی ۸ نقطه‌ای هستند و با ناحیه بندی‌های مختلف، سعی شده تمامی شبکه‌بندی‌ها به صورت آجری بسیار منظم انجام شوند.

در شکل ۹، برای بررسی تأثیر اندازه و تعداد المان‌های مدل بر تنش پسماند، مقدار تنش پسماند در مرکز تکررشته سطحی در شکل ۵، شاخص قرار گرفته است. با توجه به شرایط مرزی، توزیع تنش در طول المان حجمی (راستای z) یکنواخت خواهد بود. به همین دلیل محور افقی در شکل ۹ با عنوان تعداد المان‌ها در هر مقطع عمود بر محور z انتخاب شده است.

همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است، وقتی تعداد المان‌ها تقریباً از 10000 المان در هر مقطع تجاوز می‌کند، نتایج به ثبات می‌رسند. مقایسه نتایج شکل ۹ با نتایج شکل ۶ و شکل ۷ و شکل ۸ در $\nu=0$ تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

روش لی، برای نفوذگرهای تیز توسعه یافته است، بنابراین می‌توان از نفوذگرهای ویکرز، برکوویچ و مخروطی استفاده کرد.

1. Master
2. slave
3. Finite sliding
4. Penalty contact

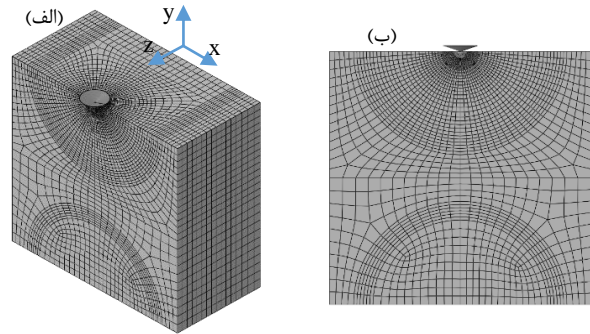
این اختلاف ۸ نانومتری، به این دلیل است که در کامپوزیت، در زیر تکرشته ماتریس نرم وجود دارد. این ماتریس نرم در زیر تکرشته، باعث می‌شود که در نیروی ثابت نفوذگری، جابجایی بیشتری دیده شود یا اینکه در جابجایی ثابت، در کامپوزیت نسبت به تکرشته شیشه، نیروی کمتری دیده شود.

۵-۱- یافتن مدول الاستیسیته شیشه

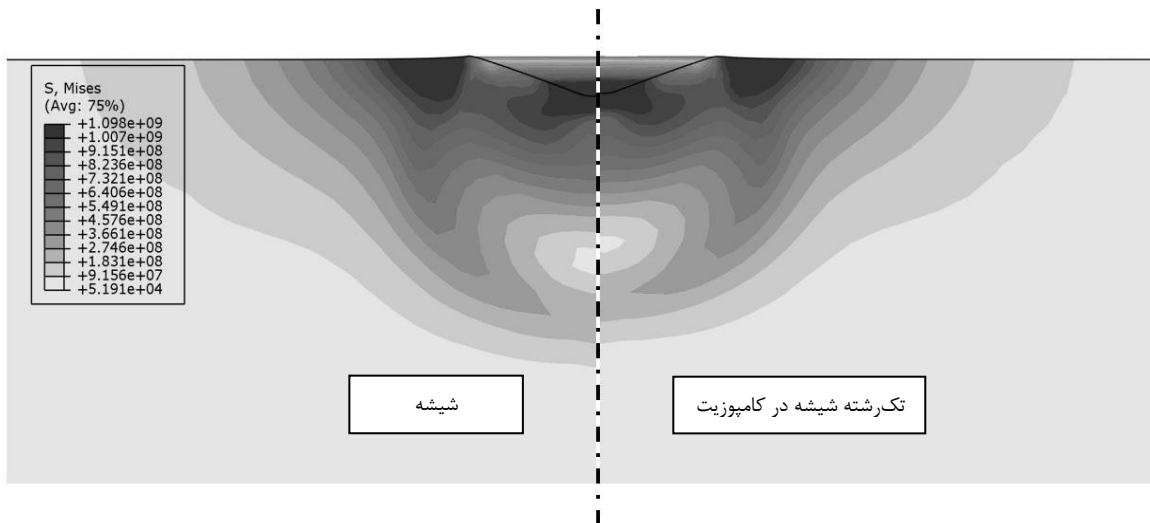
در این بخش سعی شده تا مدول الاستیسیته شیشه، با استفاده از نتایج نفوذگری، استخراج شود. عمق نفوذ بیشینه ۲۰۰ nm انتخاب شده است. چون نفوذگر به صورت صلب مدل شده است، رابطه الیور-فار [۶] برای تعیین مدول الاستیسیته را می‌توان به فرم رابطه (۷) نوشت.

$$E = E_{eff}(1 - \nu^2) \quad (7)$$

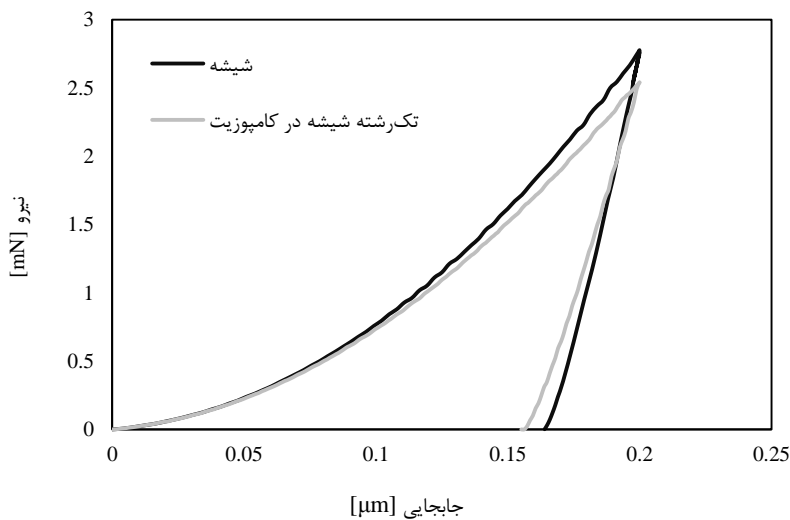
الاستیک شیشه در طی باربرداری ۳۶ بوده است، در حالی که بازگشت الاستیک برای تکرشته شیشه در کامپوزیت ۴۴ بوده است.



شکل ۱۰ الف) نمای ایزومتریک و ب) نمای روبرو از شبکه‌بندی مدل استفاده شده برای نفوذگری



شکل ۱۱ نمونه‌ای از تغییر فرم پلاستیک باقی‌مانده در محل نفوذگری وقتی بیشینه عمق نفوذ ۲۰۰ nm است

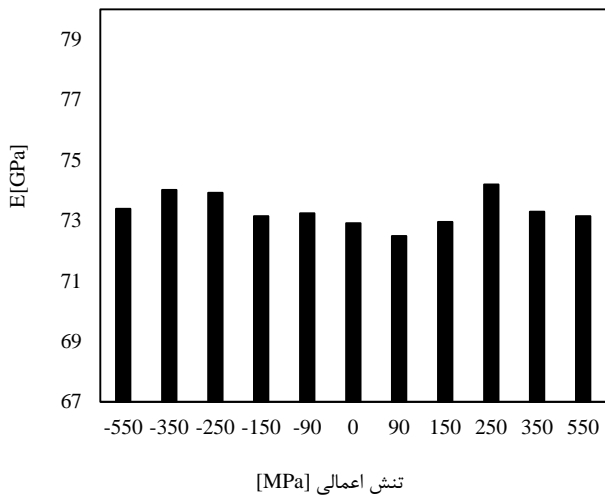


شکل ۱۲ نمودار بار-جابجایی مربوط به نفوذگری شیشه و تکرشته شیشه در کامپوزیت با عمق نفوذ بیشینه ۲۰۰ nm

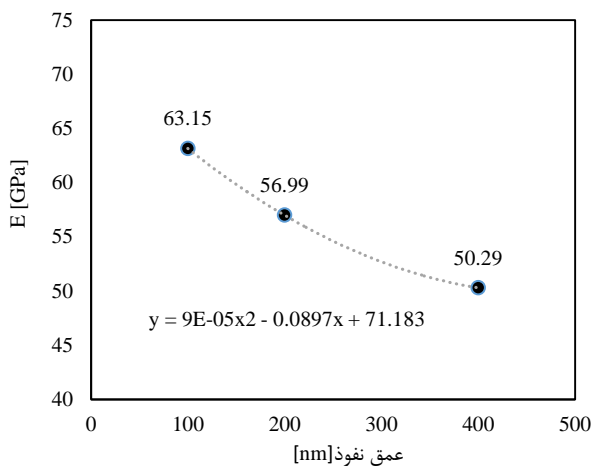
شیب اولیه منحنی باربرداری است و طبق نمودار بار-جابجایی برای شیشه در شکل ۱۲، مقدار آن ۸۸/۵۲ kN/m تعیین شده است.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، مقدار ضریب تصحیح β برای نفوذگر مخروطی معادل ۱/۰۵۹۵ است و ضریب پواسون ν برای شیشه ۰/۱۸ است. S

عمق نفوذ در تکرشته شیشه در کامپوزیت یافته شود. برون‌یابی برای یافتن مدول الاستیسیته تکرشته در کامپوزیت در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۴ رابطه مدول الاستیسیته با تنش اعمالی در شیشه



شکل ۱۵ برون‌یابی برای یافتن مدول الاستیسیته تکرشته در کامپوزیت

طبق شکل ۱۵، مقادیر مدول الاستیسیته تخمین زده‌شده برای تکرشته، با افزایش عمق نفوذگری کاهش می‌یابد و هر چه عمق نفوذگری کمتر شود، مقادیر تخمین زده‌شده به مدول الاستیسیته تکرشته نزدیک‌تر می‌شود. دلیل این پدیده وجود ماتریس نرم در اطراف الیاف سفت است و هر چه عمق نفوذگری بیشتر می‌شود، تأثیر ماتریس روی نتایج بیشتر خواهد شد. برای حذف تأثیر ماتریس، باید عمق نفوذگری را تا نزدیک صفر کاهش داد. برای این منظور، داده‌ها به سمت عمق صفر برون‌یابی شده‌اند. لذا یک تابع چند جمله‌ای درجه دو بر داده‌ها برازش شده‌است. این تابع، در عمق صفر، مقدار $71/2$ GPa را پیش‌بینی می‌کند که به مدول الاستیسیته تکرشته که 73 GPa می‌باشد، بسیار نزدیک است.

۵-۳- یافتن تنش یکنواخت اعمال‌شده در تکرشته شیشه در کامپوزیت

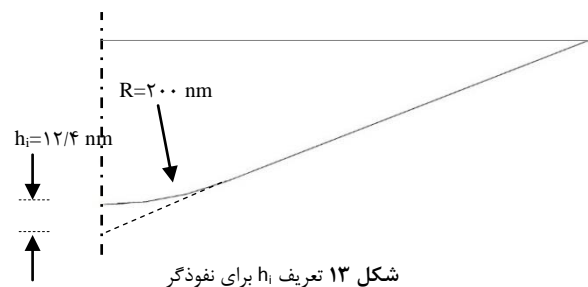
در این بخش ابتدا یک تنش تک‌محوره در جهت تکرشته، به نحوی به کامپوزیت اعمال‌شده‌است که تنش مشخصی را در تکرشته ایجاد کند و

h_c عمق تماس در بار بیشینه است و می‌توان آن را با استفاده از رابطه پیش‌نهاد شده توسط الیور و فار، به صورت تابعی از عمق نفوذ بیشینه، بار بیشینه و شیب اولیه منحنی باربرداری، تخمین زد.

$$h_c = h_{max} - \varepsilon \frac{F_{max}}{S} \quad (8)$$

اما چون این تخمین دقیق نیست و با مقداری خطا همراه است، در این پژوهش از نتایج شبیه‌سازی برای تعیین h_c استفاده شده‌است.

طبق شکل ۱۳، به دلیل وجود شعاع نوک، عمق نفوذگر از مخروط کامل مقداری کمتر است. این اختلاف در اینجا با h_i نامگذاری شده‌است. برای اینکه رابطه (۱)، بتواند به درستی سطح تماس را تعیین کند، باید مقدار h_i را به h_c اضافه کرد. برای شعاع نوک 200 nm، $h_i = 12/4$ nm به دست می‌آید.



شکل ۱۳ تعریف h_i برای نفوذگر

در اینجا برای عمق نفوذ بیشینه 200 nm، مقدار عمق تماس h_c ، از شبیه‌سازی $186/1$ nm به دست آمده که باید آن را با $12/4$ جمع کرد. با استفاده از رابطه الیور-فار، $h_c = 177/4$ به دست می‌آید.

با توجه به داده‌های بالا، مقدار مدول الاستیسیته برای شیشه معادل $72/92$ GPa به دست آمد که به مقدار واقعی آن یعنی 73 GPa بسیار نزدیک است. مقدار مدول الاستیسیته با استفاده از رابطه الیور-فار برای تعیین h_c ، $76/2$ GPa به دست می‌آید، که مقداری خطا دارد.

۵-۱-۱- وابستگی مدول الاستیسیته به تنش اعمالی در شیشه

در این بخش، هدف بررسی تأثیر تنش روی مدول الاستیسیته استخراج‌شده از روش الیور-فار است. در شکل ۱۴، شیشه تحت تنش‌های تک‌محوره مختلفی واقع شده است و در هر حالت تنش، مدول الاستیسیته به دست آمده‌است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مدول الاستیسیته از تنش اعمالی مستقل است. اندک تفاوت‌هایی که در نمودار مشاهده می‌شود به دلیل خطاهای عددی و عدم توانایی در استخراج دقیق مساحت تماس است.

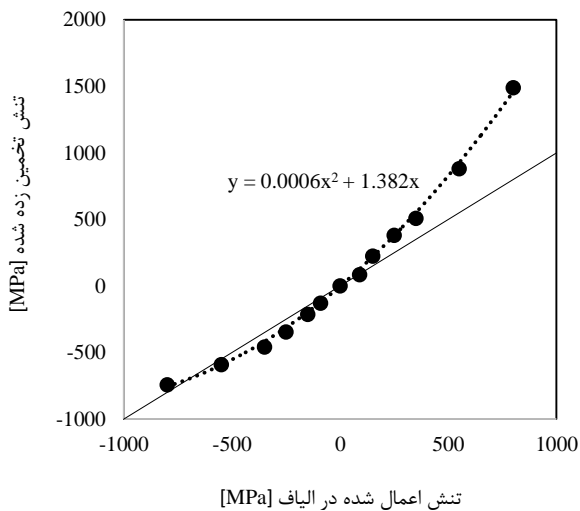
۵-۲- یافتن مدول الاستیسیته تکرشته شیشه در کامپوزیت

در یک ماده تک فاز، مدول الاستیسیته تخمین زده‌شده به وسیله آزمایش نفوذگری، به عمق نفوذگری وابسته نیست. اما در مواد دو یا چند فازی، به دلیل اینکه خواص مکانیکی هر فاز با دیگری متفاوت است، بسته به نحوه نفوذگری، ممکن است خواص اندازه‌گیری شده، به عمق نفوذ وابستگی داشته باشد.

مثلاً در این مسئله، به دلیل اینکه محیط اطراف الیاف، یعنی ماتریس و ناحیه فاز مشترک، روی نتایج نفوذگری در تکرشته تأثیر می‌گذارند، پس احتمالاً مدول الاستیسیته تخمین زده‌شده برای تکرشته، به عمق نفوذ وابسته خواهد بود. در اینجا سعی شده‌است وابستگی مدول الاستیسیته به

سپس از طریق شبیه‌سازی آزمایش نفوذگری، این تنش‌ها تخمین زده شده‌است. نمونه‌ای از اعمال تنش تک‌محوره در شکل ۱۶ آورده شده‌است. یادآوری می‌شود که تنش تسلیم تکرشته شیشه در مدل استفاده‌شده، ۱۱۰۰ MPa می‌باشد و در اینجا سعی شده‌است تنش‌های مختلفی، از مقادیر کم تا مقادیر نزدیک به تنش تسلیم الیاف، به صورت کششی و فشاری، اعمال شود.

برای بررسی عملکرد و دقت روش لی [۹] در تخمین تنش پسماند از منحنی شکل ۱۸ استفاده شد. در این منحنی، محور افقی تنش‌هایی است که به صورت پیش فرض در تکرشته اعمال شده‌است و محور عمودی تنش‌هایی است که از شبیه‌سازی آزمایش نفوذگری و از روش لی به دست آمده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش لی تنش‌های فشاری را به خوبی پیش‌بینی کرده‌است در صورتی که در حالت کششی، خطای روش با افزایش تنش بیشتر می‌شود و تنش‌ها را بیشتر از مقدار واقعیشان تخمین می‌زند. به نظر می‌رسد می‌توان رابطه بین تنش‌های اعمال‌شده و تنش‌های تخمین زده‌شده را با یک تابع درجه‌دو تعریف کرد. ممکن است به ذهن خواننده خطور کند که این تابعیت درجه‌دو می‌تواند ناشی از هندسه متقابل الیاف و ماتریس و وجود ماتریس نرم در محیط الیاف باشد، اما همان‌طور که در مقدمه بیان شد، تمام این بررسی‌ها در مدلی که خواص تمامی نواحی آن از تکرشته شیشه است، نیز انجام خواهد شد. مدل شیشه‌ای مذکور، یک ماده تک‌فازی است و دیگر مثل کامپوزیت یک ماده چند فازی محسوب نمی‌شود که نتایج آن بخواهد از فازهای دیگر تأثیر بپذیرد.

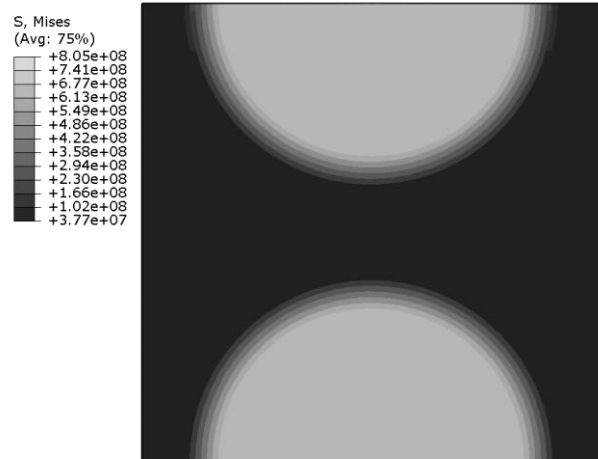


شکل ۱۸ رابطه بین تنش‌های اعمال‌شده و تنش‌های تخمین زده شده در تکرشته در کامپوزیت

۵-۳-۱- بررسی وابستگی نتایج پیش‌بینی تنش پسماند در تکرشته در کامپوزیت به عمق نفوذ

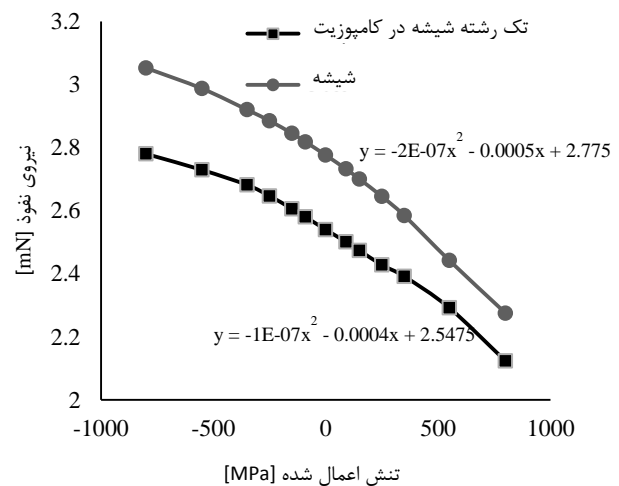
در بخش ۲-۵، مشاهده شد که برای به دست آوردن مدول الاستیسیته در تکرشته در کامپوزیت، داده‌ها بایستی در عمق نفوذ صفر، برون‌یابی شود تا تأثیرات ماتریس و ناحیه فاز مشترک از نتایج نفوذگری در الیاف حذف شود. در اینجا وابستگی تنش‌های پسماند پیش‌بینی‌شده به عمق نفوذ، در تکرشته در کامپوزیت بررسی شده‌است. برای این منظور به کامپوزیت تنش‌های مشخصی القا شده‌است و سپس در سه عمق نفوذ بیشینه‌ی ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰، تنش‌ها از روش لی تعیین شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود با تغییر عمق نفوذ بیشینه‌ی نفوذگری، نتایج تغییری چندانی نکرده‌است. این نشان می‌دهد که در کامپوزیت، نتایج پیش‌بینی تنش پسماند توسط روش لی، از عمق نفوذگری مستقل است. برای به دست آوردن مدول الاستیسیته تکرشته در کامپوزیت، داده‌ها بایستی در عمق نفوذ صفر، برون‌یابی شود تا تأثیرات ماتریس و ناحیه فاز مشترک از نتایج نفوذگری در

شکل ۱۶ توزیع تنش در کامپوزیت در اثر اعمال بار کششی تک‌محوره ۸۰۰ MPa



شکل ۱۶ توزیع تنش در کامپوزیت در اثر اعمال بار کششی تک‌محوره ۸۰۰ MPa

در شکل ۱۷ رابطه بین تنش یکنواخت اعمال‌شده به تکرشته شیشه در کامپوزیت و نیروی نفوذگری در آن نشان داده شده‌است.



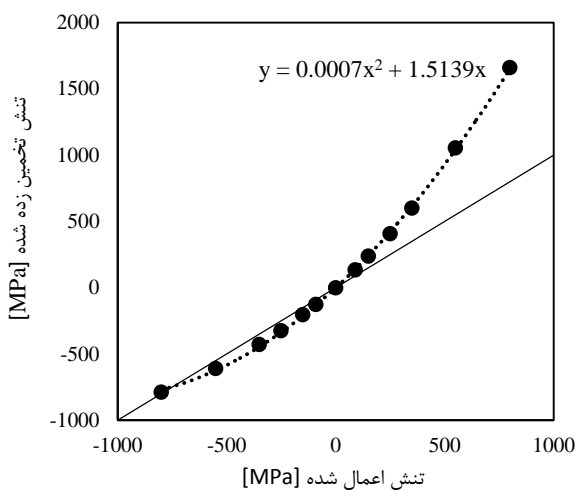
شکل ۱۷ رابطه بین تنش اعمال‌شده و نیروی نفوذگری در تکرشته شیشه در کامپوزیت و شیشه در عمق نفوذ بیشینه ۲۰۰ nm

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش تنش از حالت فشاری به کششی، نیروی نفوذگری کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد که رابطه بین نیروی نفوذگری و تنش اعمال‌شده، از یک منحنی درجه‌دو تبعیت می‌کند. این تابعیت درجه‌دو برای تنش‌های تک‌محوره توسط دیگر محققین نیز به دست آمده است [۱۹].

رابطه بین نیروی نفوذگری و تنش اعمال شده هم از یک منحنی درجه دو تبعیت می‌کند.

در شکل ۱۷ نیروی نفوذگری در عمق نفوذ بیشینه یکسان ۲۰۰ nm در تکرشته شیشه در کامپوزیت و شیشه، تحت تنش‌های مختلف مقایسه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نیروی نفوذگری در تکرشته در کامپوزیت کمتر است.

برای بررسی عملکرد و دقت روش لی در تخمین تنش پسماند در شیشه، از منحنی شکل ۲۰ استفاده شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش لی تنش‌های فشاری را در شیشه نیز به‌خوبی پیش‌بینی کرده‌است، در صورتی که در حالت کششی، خطای روش با افزایش تنش بیشتر می‌شود و تنش‌ها رابیشتر از مقدار واقعیشان تخمین می‌زند. خطاهای حاصله در حالت کششی در شیشه، حتی از خطاهای به‌دست آمده در حالت کششی برای تک رشته در کامپوزیت هم بیشتر است.



شکل ۲۰ رابطه بین تنش‌های اعمال شده و تنش‌های تعیین شده در شیشه

در اینجا نیز مثل تک رشته در کامپوزیت می‌توان رابطه بین تنش‌های اعمال شده و تنش‌های تخمین زده شده را با یک تابع درجه دو تعریف کرد. لذا با مقایسه شکل ۱۸ و شکل ۲۰ می‌توان به این نتیجه رسید که آن تابعیت درجه دو در تکرشته در کامپوزیت که در شکل ۱۸ دیده شد، ناشی از هندسه متقابل الیاف و ماتریس و وجود ماتریس نرم در محیط الیاف نبوده‌است.

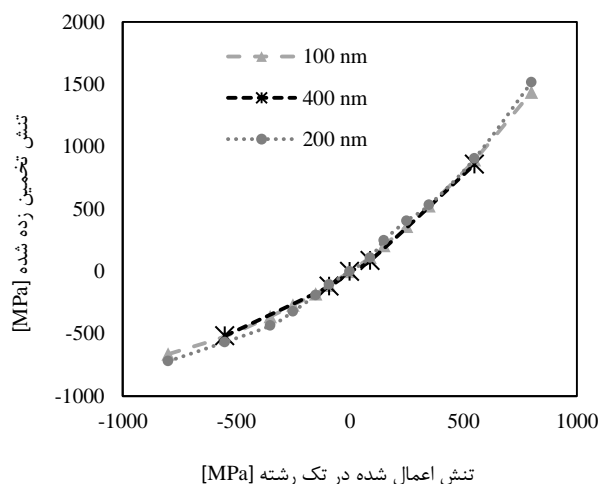
۴-۵-۱- بررسی وابستگی نتایج پیش‌بینی تنش پسماند در شیشه به عمق نفوذ

در این قسمت وابستگی تنش‌های پسماند پیش‌بینی شده به عمق نفوذ، در شیشه بررسی شده‌است. برای این منظور به شیشه تنش‌های مشخصی القا شده و سپس در دو عمق نفوذ بیشینه‌ی ۲۰۰ و ۴۰۰ nm، تنش‌ها از روش لی تعیین شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود با دو برابر کردن عمق نفوذگری نتایج تغییری نکرده‌است. این نشان می‌دهد که برای شیشه، نتایج از عمق نفوذگری مستقل است.

در شکل ۲۲ تفاوت تنش‌های پیش‌بینی شده در عمق نفوذ یکسان ۲۰۰ nm در شیشه و تکرشته در کامپوزیت، نمایش داده شده‌است. همان‌طور که از نمودار مشخص است، در بیشتر نواحی تنشی نمودارها تطابق خوبی با هم دارند و فقط وقتی تنش‌های کششی بزرگ باشد، نتایج مقاداری اختلاف

الیاف حذف شود اما در اینجا مشاهده شد که برای یافتن تنش پسماند، نیازی به این کار نیست و نتایج مستقیماً قابل استفاده است.

همان‌طور که قبلاً گفته شد، برای تعیین مدول الاستیسیته از منحنی نیرو-جابجایی نفوذگری، از رابطه الیور-فار استفاده می‌شود. رابطه الیور-فار و در نتیجه مدول الاستیسیته، به شیب منحنی باربرداری در بار بیشینه $(dP/dh)_{hmax}$ وابسته است و مقدار $(dP/dh)_{hmax}$ خود به نحوه‌ی جابجایی ناحیه‌ی زیر نفوذگر در لحظه ابتدای باربرداری وابسته است. این جابجایی ترکیبی از بازگشت الاستیک ناحیه نفوذگری شده در الیاف و بازگشت الاستیک ماتریس است. لذا می‌توان استنباط کرد که مدول الاستیسیته محاسبه شده، از عمق نفوذ تأثیر می‌پذیرد. اما وابستگی اصلی رابطه لی و همکارانش برای تخمین تنش پسماند، به اختلاف نیروی نفوذگری به‌وجودآمده در عمق ثابت، در اثر تنش پسماند است. اگرچه این رابطه به عمق تماس h_c (یا سطح تماس A_c) نیز وابسته است، اما بررسی‌های انجام شده در این پژوهش، نشان می‌دهد که این رابطه، به نیروی نفوذگری بسیار حساس‌تر است. چون این نیروها، هر دو در یک ترکیب مادی و یک هندسه اندازه‌گیری می‌شوند، می‌توان انتظار داشت که تا عمق نفوذ خاصی که به اندازه کافی از ضخامت ماده فاز اول (در اینجا ضخامت الیاف) کوچک‌تر باشد، می‌توان بدون تأثیر پذیری از دیگر فازها (در اینجا ناحیه فاز مشترک و ماتریس) تنش پسماند را تخمین زد.



شکل ۱۹ رابطه بین تنش‌های اعمال شده و تنش‌های تخمین زده شده در تکرشته در کامپوزیت، در عمق نفوذهای مختلف

گفتنی است که برای اعمال نفوذ در عمق‌های مختلف، مشبندی مقداری تغییر کرده‌است، با این وجود نتایج به‌خوبی بر هم منطبقند.

۴-۵- تعیین تنش اعمالی به شیشه از طریق نفوذگری

در این بخش ابتدا یک تنش تک‌محوره مشخص به مدل شیشه اعمال شده و سپس از طریق شبیه‌سازی آزمایش نفوذگری، این تنش تخمین زده شده‌است. برخلاف شکل ۱۶ برای کامپوزیت، در اینجا تنش اعمال شده به مدل، در تمامی نقاط تنش یکسانی را ایجاد می‌کند. در شکل ۱۷ رابطه بین تنش یکنواخت اعمال شده به شیشه و نیروی نفوذگری نشان داده شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در اینجا نیز مثل تکرشته در کامپوزیت، با افزایش تنش از حالت فشاری به کششی، نیروی نفوذگری کاهش می‌یابد و

داده شده‌است، این ویژگی را ندارد و تنش‌ها در عمق متغیر هستند. به همین دلیل میانگینی از تنش در عمق نفوذ نفوذگر معیار واقع شده تا بتوان این میانگین تنش را از نتایج استخراج کرد.

طبق نمودارهای توزیع تنش در تکرشته شیشه در کامپوزیت در شکل ۶ و شکل ۷ و شکل ۸ به ترتیب میانگین تنش‌های σ_{xx} و σ_{yy} و σ_{axial} در عمق نفوذ نفوذگر که در اینجا ۲۰۰ nm است، مقادیر ۷۵+ و ۰ و ۹۰+ است. همان‌طور که گفته شد، روش لی و همکارانش جمع جبری تنش‌های سطحی را تعیین می‌کند.

$$P_R = \frac{-(\sigma_R^x + \sigma_R^y)}{3} A_C \quad (9)$$

که در آن P_R اختلاف نیروی نفوذگری است و σ_R^x و σ_R^y تنش‌های پسماند سطحی هستند. لذا مقدار مورد انتظار برای پیش‌بینی، $۹۰+۷۵$ یعنی ۱۵MPa- است. نتایج مدل‌سازی در جدول ۲ آمده‌است.

جدول ۲ نتایج نفوذگری در تکرشته در کامپوزیت دارای تنش پسماند حرارتی

عمق تماس [nm]	نیروی نفوذگری [mN]	نتایج بعد از اعمال بارگذاری حرارتی
۱۸۱/۱	۲/۵۵۴	نتایج قبل از اعمال بارگذاری حرارتی
۱۸۰/۱	۲/۵۴۵	نتایج بعد از اعمال بارگذاری حرارتی

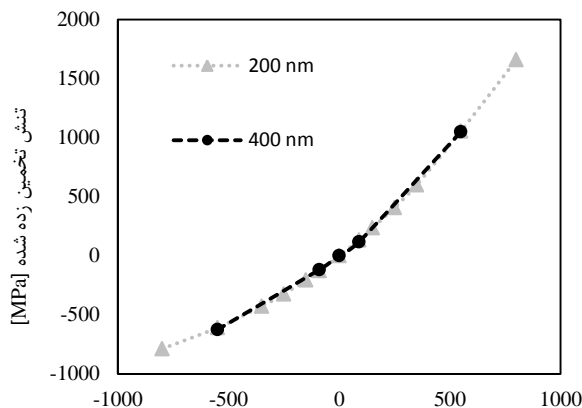
همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر بسیار به هم نزدیک هستند، به‌صورتی که عمق تماس تنها ۱ nm و نیروی نفوذگری تنها ۹ μ N اختلاف دارند. این نشان‌دهنده حساسیت بسیار بالای کار است و کوچک‌ترین خطایی می‌تواند نتایج را به‌شدت دور از انتظار کند.

با توجه به داده‌های بالا، طبق روش لی، مقدار ۳۰/۴ MPa- برای مجموع تنش‌های سطحی تکرشته شیشه در کامپوزیت به دست می‌آید، درحالی‌که مقدار ۱۵ MPa- مورد انتظار بود. هرچند که مقدار تنش به‌دست‌آمده دو برابر مقدار مورد انتظار است، اما با توجه به شرایط موجود، همین تخمین نیز بسیار مطلوب است.

چرا که اولاً روش‌های تعیین تنش‌های پسماند از طریق نفوذگری عموماً نیاز دارند که مقدار تنش پسماند موجود در مقایسه با تنش تسلیم ماده به اندازه کافی بزرگ باشد، درصورتی‌که در اینجا مقادیر تنش پسماند در تکرشته شیشه در کامپوزیت (۱۵ MPa-)، نسبت به تنش تسلیم الیاف شیشه (۱۱۰۰ MPa)، بسیار پایین‌تر است. ثانیاً همان‌طور که گفته شد، در این روش‌ها عموماً فرض بر این است که توزیع تنش پسماند سطحی در عمق ماده یکسان باشد درصورتی‌که توزیع تنش در اینجا، تغییرات شدیدی در راستای عمق دارد. ثالثاً این روش‌ها عموماً در حالتی که توزیع سطحی تنش پسماند به فرم برشی خالص باشد، قادر به تعیین تنش پسماند نیستند. در اینجا نیز توزیع تنش پسماند سطحی، به فرم برشی خالص نزدیک بود. چراکه یکی از تنش‌ها ۹۰ MPa- و دیگری ۷۵ MPa+ بود.

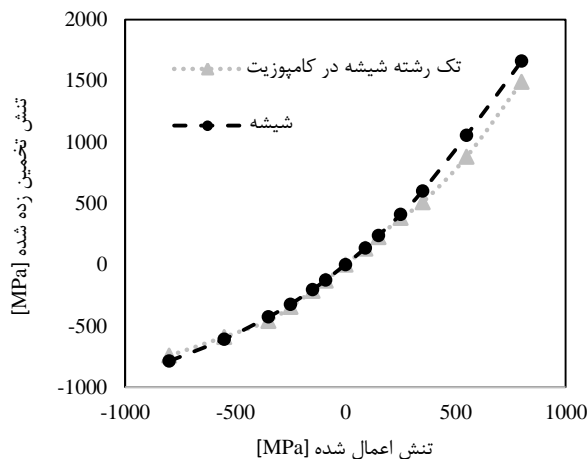
در انتها باید اشاره شود که خطاهای عددی، بخصوص در محیط explicit نرم‌افزار آباکوس در نتایج بی تأثیر نبوده‌است.

دارد. این نتیجه نیز بسیار جالب است و به استنتاجی که در انتهای بخش ۵-۴ بیان شد، صحه می‌گذارد.



تنش اعمال شده [MPa]

شکل ۲۱ رابطه بین تنش‌های اعمال‌شده و تنش‌های تعیین شده در شیشه در دو عمق نفوذ مختلف



تنش اعمال شده [MPa]

شکل ۲۲ مقایسه نتایج تخمین تنش در شیشه و تکرشته در کامپوزیت در عمق نفوذ بیشینه یکسان ۲۰۰ nm

قبلاً وقتی مشاهده شد که عمق نفوذ در تکرشته در کامپوزیت روی تخمین تنش پسماند، تقریباً بی تأثیر است (تا عمق نفوذی خاص)، این نتیجه‌گیری انجام شد که در کامپوزیت می‌توان بدون تأثیرپذیری از دیگر فازها، تنش پسماند را تخمین زد.

۵-۵- تعیین تنش پسماند حرارتی در تکرشته شیشه در کامپوزیت از طریق نفوذگری

در این قسمت، مایکروتنش‌های پسماند حرارتی در الیاف، از طریق شبیه‌سازی آزمایش نفوذگری تخمین زده شده‌است. یکی از شروط مشترک روش‌های تخمین تنش پسماند به‌وسیله نفوذگری، این است که تنش پسماند سطحی در عمق، ثابت باشد [۴]. اما توزیع تنش پسماند، در تکرشته موردنظر این پژوهش، همان‌گونه که در شکل ۶ و شکل ۷ و شکل ۸ نمایش

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در هر یک از لایه‌های مربوط به یک چندلایه کامپوزیتی به دلیل عدم تطابق در ضرایب انبساط حرارتی اجزای اصلی کامپوزیت، تنش‌های مایکرو وجود دارند که بر میدان تنش‌های پسماند چندلایه مؤثر هستند. طبق تحقیقات پیشین، صرف‌نظر کردن از مایکروتنش‌های پسماند، می‌تواند منجر به خطای قابل‌ملاحظه‌ای در پیش‌بینی تنش‌های پسماند هر یک از لایه‌های یک چندلایه کامپوزیتی گردد. در این پژوهش روش مکانیکی نانوفوذگر برای تعیین این تنش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

در شبیه‌سازی‌ها به مواد به دو صورت تنش اعمال شد. یکی به صورت تنش یکنواخت در راستای طولی و دیگری به صورت تنش حرارتی ناشی از عدم تطابق خواص حرارتی فازهای مختلف ماده. سپس به صورت معکوس، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی آزمایش نفوذگر این تنش‌ها محاسبه شدند. برای بررسی تأثیر ماتریس روی نتایج نفوذگر، شبیه‌سازی نفوذگر روی ماده‌ی تک فازی که خواص الیاف را داشته باشد و هندسه آن مشابه کامپوزیت باشد، نیز اعمال شد.

مهم‌ترین نتایجی که از بررسی‌ها به دست آمد، موارد زیر است:

- در طی تعیین مدول الاستیسیته تک‌رشته شیشه در کامپوزیت، به وسیله نفوذگر، حضور ماتریس روی خواص استخراج‌شده تأثیر می‌گذارد. این تأثیر وابسته به عمق نفوذ است. برای از بین بردن این تأثیر باید عمق نفوذ را به سمت صفر میل داد. بنابراین می‌توان با برون‌یابی داده‌های به‌دست‌آمده در عمق‌های مختلف، به مدول الاستیسیته الیاف دست یافت.
- مدول الاستیسیته استخراج‌شده از روش نفوذگر، از تنش اعمالی به جسم تقریباً مستقل است.
- مدول الاستیسیته استخراج‌شده از روش نفوذگر، در ماده تک فاز، از عمق نفوذ نفوذگر مستقل است.
- برای تعیین تنش‌پسماند در تک رشته در کامپوزیت، برخلاف مدول الاستیسیته، نیازی به برون‌یابی داده‌ها نیست و تنش‌های به‌دست‌آمده از عمق مستقل‌اند.
- رابطه بین تنش‌های پسماند درون جسم و تنش‌های پیش‌بینی‌شده از یک تابع درجه‌دو تبعیت می‌کند، بنابراین با داشتن سه نقطه از این منحنی می‌توان تمام نقاط آن را پیش‌بینی کرد.
- با وجود تغییرات شدید تنش در راستای عمق کامپوزیت، میانگین تنش‌های سطحی با خطای قابل قبولی به دست آمد.

۷- مراجع

- [1] Ghasemi, A. R., "Determination of Residual Stresses in Laminated Composites," In Persian, Ph.D Thesis, Iran University of Science and Technology, Iran, 2011, 2007.
- [2] Safarabadi, M., "Analytical Solution for Determination of Curing Residual Stresses in Composite Lamintes," In Persian, Ph.D Thesis, Iran University of Science and Technology, Iran, 2011.
- [3] Stango, R. J. and Wang, S. S., "Process-Induced Residual Thermal Stresses in Advanced Fiber-Reinforced Composite Laminates," Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 106, pp. 48-54, 1984.
- [4] Jang, J. I., "Estimation of residual stress by instrumented indentation: A review," Journal of Ceramic Processing Research, Vol. 10, pp. 391-400, 2009.
- [5] Fischer-Cripps, A. C., Nanoindentation: Springer Science & Business Media, 2011.
- [6] Oliver, W. C. and Pharr, G. M., "Measurement of Hardness and Elastic Modulus by Instrumented Indentation: Advances in Understanding and Refinements to Methodology," Journal of Materials Research, Vol. 19, pp. 3-20, 2004.
- [7] Suresh, S. and Giannakopoulos, a. E., "A New Method for Estimating Residual Stresses by Instrumented Sharp Indentation," Acta Materialia, Vol. 46, pp. 5755-5767, 1998.