



(بررسی و تحلیل تجربی پارامترهای هندسی در مواد مرکب پلیمری با نانو افزودنی Ti_2O_3 تحت اثر دو پین سری)

محمدهادی محضری

مریی دانشگاه فنی حرفه ای مرکز اسلام آبادغرب

محسن اسدپور

مریی دانشگاه فنی حرفه ای مرکز اسلام آبادغرب

چکیده :

در این پژوهش با توجه به نیاز و پیشرفت روز افزون صنایع دریایی و هوایی و همچنین لزوم استفاده آن ها از آلیاژهای سبک و مستحکم و همچنین مبحث تعمیر و نگهداری این صنایع بسیار مورد توجه است. کشتی ها و هواپیما ها نمونه ای از این نوع سازها هستند که ایجاد و رشد ترک در بدنه آن ها بسیار رایج است. اخیرا برای تعمیر این نوع ترک ها از وصله های کامپوزیتی استفاده می شود، که این نوع وصله ها به انواع مختلفی تقسیم می شوند. شکل های مختلف از این وصله ها و بارگذاری ها، مورد آزمایش های گوناگون گسیختگی، شکست، ترک، تغییر شکل و ... قرار می گیرند.

هدف از انجام این پژوهش بررسی دقیق اثر افزودنی نانو Ti_2O_3 به مواد مرکب پلیمری تحت اثر اتصالات مکانیکی بوده و سعی شده رابطه بین درصد افزودنی نانو و پارامترهایی چون نیروی گسیختگی یافت شود و نیز همچنین اهداف :

1- بررسی پارامترهای هندسی مواد مرکب بافته شده به منظور افزایش استحکام و مقاومت در برابر نیروهای کشش و تنش

2- بررسی اثر نانو افزودنی روی عمر سازه

3- بررسی نرخ بار گذاری در فواصل بین دو پین و لبه می باشد.

واژگان کلیدی: نانوکامپوزیت، مواد مرکب پلیمری، استحکام فلز Ti



مقدمه

امروزه اهمیت و قابلیت‌های فراوان مواد مرکب بر کسی پوشیده نیست و در حوزه‌های متعددی، این مواد رقیب سرسختی برای مواد سنتی محسوب می‌شوند. معروفترین خواص مورد توجه این مواد، نسبت مقاومت به وزن (مقاومت ویژه) و نیز سفتی به وزن (سفتی ویژه) بالای آنها است که باعث کاربرد گسترده این مواد در صنایع هوافضا نیز شده است. با وجود خواص ویژه و مناسب این مواد، هنوز مشکلات جدی در استفاده از این مواد مطرح است. به عنوان نمونه پیچیدگی‌ها و ناشناختگی‌های به مراتب بیشتر این مواد نسبت به مواد سنتی است که در بسیاری از موارد، با در نظر گرفتن ضرایب اطمینان بالا، سعی در جبران این کمبودها می‌شود. از طرفی استفاده از ضرایب اطمینان بالا در زمان طراحی، خود باعث افزایش وزن نهایی سازه‌ها شده و از مزیت نسبی مواد مرکب می‌کاهد. لذا بررسی و شناخت دقیق تر خواص این مواد، می‌تواند امکان استفاده مناسبتر از خواص بالقوه آنها را افزایش دهد. از سوی دیگر، تمایل به استفاده حداکثر از قابلیت تحمل بار مواد، همواره محرک خوبی برای تحقیق در زمینه ایجاد و رشد خرابی در سازه‌ها بوده است. هدف نهایی این تلاش‌ها، ایجاد امکان اعمال بار بیشتر برای مدت طولانی تر به صورت مطمئن و ایمن بر سازه‌ها می‌باشد. یکی از راهکارهایی که در سالیان اخیر مورد توجه قرار رفته است استفاده از الیاف با اشکال مختلف می‌باشد. در این میان استفاده از الیاف مثلی با توجه به هندسه آنها و نحوه قرارگیری شان در ماتریس باعث افزایش مقاومت ماده مرکب به خصوص مقاومت برشی می‌شود.

بنابراین مطالعه رفتار این مواد با این الیاف و پارامترهای تاثیر گذار بر روی مقاومت نهایی یکی از موضوعاتی است.

که نیازمند بررسی بیشتر می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه در شکست مواد مرکب فرض الاستیک بودن رفتار دقیق نبوده بررسی رفتار مواد پلیمری با فرض الاستیک-پلاستیک بودن نیز نیازمند بررسی بیشتر بوده که در این پژوهش به آن پرداخته خواهد شد. تحقیقات بسیاری در زمینه رفتار مواد مرکب در مقیاس میکرو انجام گرفته است. میکرومکانیک و ماکرومکانیک یک تقسیم بندی مناسب جهت بررسی رفتار مواد مرکب می‌باشد. به عبارت دیگر میکرومکانیک، تحلیل رفتار ماده مرکب در تعامل با مواد سازنده بوده، در حالیکه ماکرومکانیک، تحلیل رفتار ماده مرکب در مقیاس سازه بکار گرفته شده می‌باشد. خواص یک لایه می‌تواند با استفاده از نتایج تست در حالت ساخته شده تعیین و یا به صورت ریاضی بر پایه خواص مواد سازنده تخمین زده شود. به عبارت دیگر می‌توان خواص یک لایه را از طریق روشهای میکرومکانیکی پیشگویی کرد و یا خواص یک لایه را از طریق وسایل فیزیکی و در مقیاس ماکرومکانیکی اندازه گیری نمود. علم میکرومکانیک وقتی به علم ماکرومکانیک ترجیح داده می‌شود که خصوصیات موادی به خصوصیات سازه ای در آنالیز ترجیح داده شود. در صورت طراحی دقیق و کامل می‌توان نشان داد که پیشگویی‌های میکرومکانیکی از خواص یک لایه مبتنی بر خصوصیات اجزای تشکیل دهنده، با خواص اندازه گیری شده مطابقت دارند.

تحلیل میکرومکانیکی، دارای محدودیت‌های می‌باشد که لازم است فرضیه‌های میکرومکانیکی با آزمایش دقیق مورد تایید قرار گیرند.



فرضیات در نظر گرفته شده در این تحقیق عبارتند از:

-الیاف به صورت تک جهته در رزین قرار می گیرند.

-سطح مقطع الیاف مثلی شکل می باشد.

-رفتار الیاف بصورت خطی و رفتار ماتریس (رزین) الاستیک-پلاستیک کامل فرض می شود.

-مواد مرکب تحت بارگذاری کششی در راستای الیاف قرار می گیرد.

-جنس رزین از پلیمر می باشد.

-ارتباط رزین با الیاف به هیچ عنوان قطع نمی شود.

-با در نظر داشتن سختی و استحکام بالای الیاف مثلی از برش در الیاف صرف نظر می شود.

-ترک بر حسب بریده شدن فیبرها و ماتریس اطراف آنها است (به عبارت دیگر فرض میشود ترک سبب بریده شدن کامل فیبر می شود).

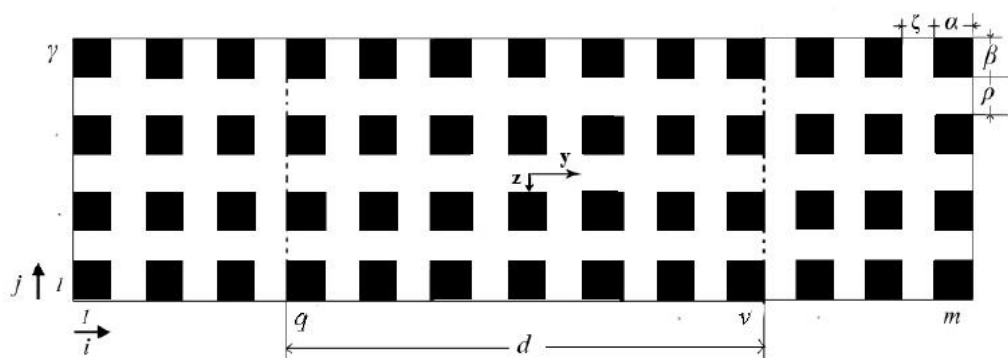
تحلیل تجربی پارامترهای هندسی در مواد مرکب پلیمری با نانو افزودنی Ti_2O_3 بافته شده تحت اثر دو پین سری هدف پژوهش حاضر است در این پروژه علاوه بر موارد فوق اثر ترک و توزیع تنش ناشی از حضور دو پین سری مورد مطالعه قرار گرفته است .

مدل منظور شده برای چند لایه ی مرکب

مقطع چند لایه ی مرکب را با یک پین مطابق شکل (3-5) در نظر می گیریم . m معرف تعداد فیبرهای قرار گرفته در هر لایه و y تعداد کل لایه ها است . m عددی فرد در نظر گرفته شده است . هر فیبر با دو اندیس i و j مشخص می شود به قسمتی که i مشخص کننده شماره ی فیبر در هر لایه و j بیان گر شماره ی لایه مورد نظر است . براساس شکل (3-5) ، q و v به ترتیب معرف اولین و آخرین فیبر بریده شده توسط سوراخ می باشند . کسر حجمی الیاف از رابطه ی (1) محاسبه می شود .

$$V_f = \frac{V_f}{V_f + V_m} = \frac{S_f}{S_f + S_m} = \frac{m\gamma\alpha\beta}{(m\alpha + \zeta(m-1))(\gamma\beta + \rho(\gamma-1))} \quad (1)$$

در رابطه ی (1) ، α و β به ترتیب معرف طول و عرض فیبر مستطیل شکل می باشند . () فاصله ی افقی بین دو فیبر مجاور در هر تک لایه و ρ فاصله ی عمودی بین دو فیبر قرار گرفته در دو لایه ی متوالی است . در این تحقیق فرض می شود که فاصله ی پین از هر لبه یکسان است . با توجه به تقارن موجود انتظار می رود توزیع تنش در همسایگی پین متقارن باشد .



شکل 1: مقطع چند لایه ی مرکب

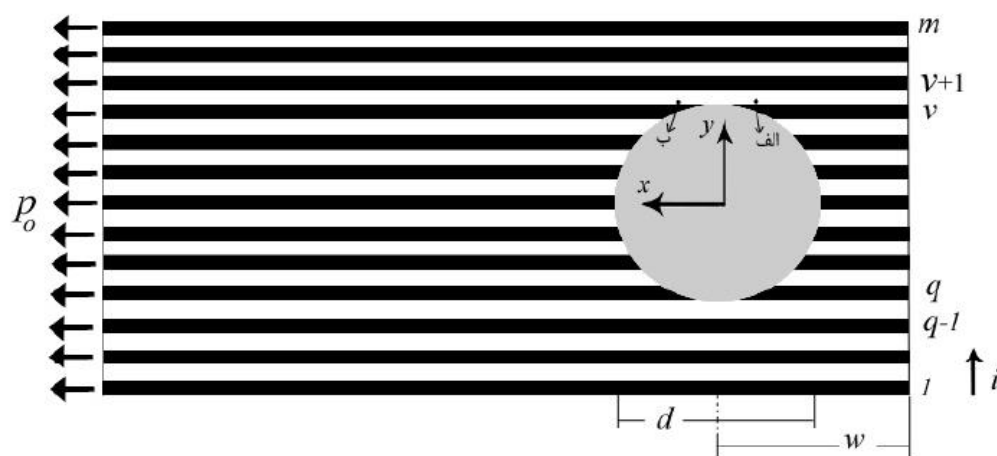
شکل (2) نمای فوقانی چند لایه ی مرکب را همراه با پارامترهای هندسی موثر در سیستم مختصات انتخاب شده نشان می دهد. مطابق شکل (2)، پارامتر w فاصله ی لبه ی آزاد پشت پین تا مرکز سوراخ در نظر گرفته شده است.

چنانچه r فیبرهای بریده شده به وسیله سوراخ باشد عرض صفحه، ضخامت صفحه و قطر سوراخ به صورت ذیل محاسبه می شوند. قابل ذکر است که فاصله مرکز سوراخ تا لبه ای که بار کششی بر آن اعمال می شود بسیار بزرگتر نسبت به w در نظر گرفته شده است.

$$e = m\alpha + \zeta(m-1) \quad (2)$$

$$h = \beta\gamma + \rho(\gamma-1) \quad (3)$$

$$D = r\alpha + \zeta(r-1) \quad (4)$$



شکل 2: چند لایه ی مرکب تحت اثر پین

استخراج روابط براساس فرضیه ی شیرلگ برای چند لایه ی مرکب

هدف از این بخش بررسی توزیع تنش ناشی از حضور پین در چند لایه ی مرکب است . برای استخراج روابط ، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است :

- فیبر و ماتریس همگن فرض شده اند
- فیبر و ماتریس دارای رفتار الاستیک خطی می باشند
- از اثر برش در فیبر صرف نظر شده است
- از لقی بین سوراخ و پین چشم پوشی شده است
- از اصطکاک بین پین و سوراخ صرف نظر شده است



- M تعداد فیبرهای قرار گرفته در هر لایه و r فیبرهای بریده شده توسط سوراخ، اعدادی فرد می باشند
- شعاع دو پین در حالی که به صورت موازی قرار گرفته اند برابر فرض شده است
- در این قسمت با حل دسته معادلات دیفرانسیل تعادل مربوط به تمامی فیبرها و به همراه شرایط مرزی، مقدار بار و جابجایی برای تمامی فیبرها در چند لایه ی مرکب محاسبه می شود.
- مقدار تنش عمودی در فیبری دلخواه، مطابق قانون هوک از رابطه ی (3-6) حاصل می شود.

$$\sigma_{i,j} = E_f \frac{du_{i,j}}{dx} \quad (5)$$

$U_{i,j}$ ، جابجایی متناظر با فیبر (i,j) می باشد. مقدار نیرو در هر فیبر براساس رابطه ی (5) محاسبه می گردد.

$$p_{i,j} = \sigma_{i,j} A_f = E_f A_f \frac{du_{i,j}}{dx} \quad (6)$$

مولفه های تنش برشی در ماتریس براساس رابطه های ذیل محاسبه می شوند.

$$\tau_{zx} = G_m \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (7)$$

$$\tau_{yx} = G_m \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (8)$$

در رابطه های (7) و (8) G_m ، مدول برشی ماتریس است. به این دلیل که نیروی کششی اعمال شده در راستای محور x عمل می کند از تغییرات جابجایی قائم و افقی فیبر نسبت x صرف نظر شده است. با بازنویسی روابط فوق می توان نوشت.

$$(\tau_{zx})_{i,j+1} = \frac{G_m}{\rho} (u_{i,j} - u_{i,j+1}) \quad (9)$$

$$(\tau_{yx})_{i+1,j} = \frac{G_m}{\zeta} (u_{i,j} - u_{i+1,j}) \quad (10)$$

باتوجه به چگونگی قرار گیری الیاف در چند لایه، می توان فیبرها را تقسیم بندی نمود:

- نوع الف: فیبرهایی که در همسایگی آن ها چهار فیبر قرار دارند. $[2 \leq i \leq m-1, 2 \leq j \leq \gamma]$
 - نوع ب: فیبرهایی که در همسایگی آن ها فقط دو فیبر قرار دارند. به عنوان مثال $[i=1, j=\gamma]$
 - نوع پ: فیبرهایی که در همسایگی آن ها فقط سه فیبر قرار دارند. به عنوان مثال $[j=\gamma, 2 \leq i \leq m-1]$
- معادله ی تعادل برای تمامی فیبرها به توجه به فرضیه ی شیرلگ به صورت ذیل نوشته می شود. برای فیبرهای نوع الف مطابق شکل (3-7)، معادله تعادل برابر است با:

$$\frac{dp_{i,j}}{dx} dx + \beta \{ (\tau_{yx})_{i+1,j} - (\tau_{yx})_{i-1,j} \} dx + \alpha \{ (\tau_{zx})_{i,j-1} - (\tau_{zx})_{i,j+1} \} dx = 0 \quad (11)$$

برای فیبرهای نوع ب، براساس شکل (3-8) معادله تعادل برابر است با:

$$\frac{dp_{i,j}}{dx} dx + \beta \{ (\tau_{yx})_{i+1,j} \} dx + \alpha \{ (\tau_{zx})_{i,j-1} \} dx = 0 \quad (12)$$

قابل ذکر است که برای دیگر فیبرهای نوع ب معادله ی تعادل به صورت مشابه استخراج می شود.



فیبرهای نوع الف:

$$E_f A_f \frac{d^2 u_{i,j}}{dx^2} + \frac{G_m \beta}{\zeta} \{u_{i+1,j} + u_{i-1,j} - 2u_{i,j}\} + \frac{G_m \alpha}{\rho} \{u_{i,j+1} + u_{i,j-1} - 2u_{i,j}\} = 0 \quad (13)$$

$$[2 \leq i \leq m-1, 2 \leq j \leq \gamma]$$

فیبرهای نوع ب:

$$E_f A_f \frac{d^2 u_{1,2}}{dx^2} + \frac{G_m \beta}{\zeta} \{u_{2,1} - u_{1,1}\} + \frac{G_m \alpha}{\rho} \{u_{1,2} - u_{1,1}\} = 0, [i = j = 1] \quad (14)$$

$$E_f A_f \frac{d^2 u_{m,1}}{dx^2} + \frac{G_m \beta}{\zeta} \{u_{m-1,1} - u_{m,1}\} + \frac{G_m \alpha}{\rho} \{u_{m,2} - u_{m,1}\} = 0, [i = m, j = 1] \quad (15)$$

$$E_f A_f \frac{d^2 u_{1,\gamma}}{dx^2} + \frac{G_m \beta}{\zeta} \{u_{2,\gamma} - u_{1,\gamma}\} + \frac{G_m \alpha}{\rho} \{u_{1,\gamma-1} - u_{1,\gamma}\} = 0, [i = 1, j = \gamma] \quad (16)$$

$$E_f A_f \frac{d^2 u_{m,\gamma}}{dx^2} + \frac{G_m \beta}{\zeta} \{u_{m-1,\gamma} - u_{m,\gamma}\} + \frac{G_m \alpha}{\rho} \{u_{m,\gamma-1} - u_{m,\gamma}\} = 0, [i = m, j = \gamma] \quad (17)$$

حل معادلات دیفرانسیل

معادلات دیفرانسیل حاکم بر روابط (34-3) الی (42-3) نمایانگر دو سری معادلات جابجایی کامل برای چندلایه‌ی مرکب با N فیبر می‌باشند. معادلات تعادل حاصل به صورت ماتریسی به صورت ذیل نوشته می‌شوند.

$$[U''] - [L][U] = [0] \quad (18)$$

در جایی که:

$$[U'']^T = [U''_{1,1}, U''_{1,2}, \dots, U''_{m-1,\gamma}, U''_{m,\gamma}] \quad (19)$$

$$[U]^T = [U_{1,1}, U_{1,2}, \dots, U_{m-1,\gamma}, U_{m,\gamma}] \quad (20)$$



ماتریس $[L]$ برای چندلایه‌ی مرکب با آرایش $[0_p]$ و دارای 5 فیبر در هر لایه، به صورت ذیل نوشته می‌شود.

(21)

$$[L] = \begin{bmatrix} \phi + \varphi & -\phi & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\phi & \varphi + 2\phi & -\phi & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\phi & \varphi + 2\phi & -\phi & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\phi & \varphi + 2\phi & -\phi & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\phi & \phi + \varphi & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\varphi & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi + 2\varphi & -\phi & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & -\phi & 2\phi + 2\varphi & -\phi & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & -\phi & 2\phi + 2\varphi & -\phi & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & -\phi & 2\phi + 2\varphi & -\phi & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & -\phi & \phi + 2\varphi & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varphi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & 0 & \phi + \varphi & -\phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & -\phi & \varphi + 2\phi & -\phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & -\phi & \varphi + 2\phi & -\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & -\phi & \varphi + 2\phi & -\phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\varphi & 0 & 0 & 0 & -\phi & \phi + \varphi \end{bmatrix}$$

برای حل این دستگاه معادلات دیفرانسیل، با توجه به این که معادلات دیفرانسیل مرتبه‌ی دوم با ضرایب ثابت می‌باشند از یک تابع نمایی به صورت ذیل استفاده می‌شود.

$$[U] = [R]e^{\lambda_k \xi} \quad (22)$$

ضمن جایگذاری رابطه‌ی (20) در دستگاه معادلات دیفرانسیل می‌توان نوشت:

$$[R]\lambda_k e^{\lambda_k \xi} - [L][R]e^{\lambda_k \xi} = [0] \quad (23)$$

رابطه‌ی (22) را در نظر بگیرید.

$$[L][R] = \varpi_k [R] \quad (24)$$

چنانچه λ_k مقدار منفی مجذور ϖ_k فرض شود می‌توان نوشت:



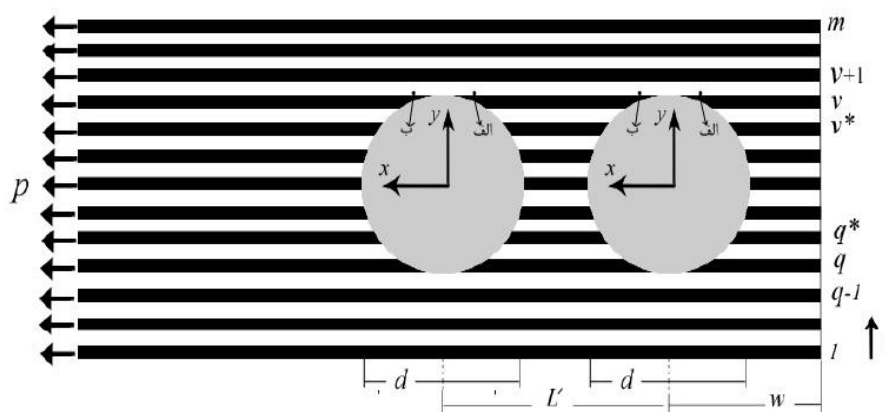
$$\lambda_k = -\sqrt{\varpi_k} \quad (25)$$

در رابطه فوق ϖ_k و $[R]$ به ترتیب مقادیر ویژه و بردارهای ویژه ماتریس $[L]$ می باشند. جواب عمومی دسته معادلات، ترکیب خطی جواب ها است. با در نظر گرفتن رابطه ی (20) جواب عمومی دسته معادلات به صورت زیر خواهد بود.

$$[U] = D_1[R]e^{\lambda_1 \xi} + E_1[R]e^{-\lambda_1 \xi} + \dots + D_N[R]e^{\lambda_N \xi} + E_N[R]e^{-\lambda_N \xi} \quad (26)$$

شرایط مرزی برای قرارگیری دو پین به صورت سری

در بخش گذشته شرایط مرزی مربوط به حالت هایی که در چند لایه ی مرکب فقط یک پین و یا دو پین به صورت موازی وجود داشت، ذکر شد. با در نظر گرفتن رابطه های فوق و شکل (3) شرایط مرزی مربوط به حالتی که در چند لایه ی مرکب دو پین به صورت سری حضور دارد بیان خواهد شد. مختصات محلی بی بعد در لبه ی فیبرهای بریده شده قرار دارد. برای فیبرهای بریده شده ی قرار گرفته در بین دو پین مختصات محلی در لبه ی بریده شده توسط اولین سوراخ در نظر گرفته شده است.



شکل 3 نما از بالای چند لایه ی مرکب تحت اثر دو پین سری

q و v به ترتیب اولین و آخرین فیبر بریده شده توسط اولین سوراخ و q^* و v^* طور مشابه اولین و آخرین فیبر بریده شده توسط دومین سوراخ در نظر گرفته شده است. اولین شرط مرزی در لبه ی آزاد قرار گرفته در فاصله ی w از مرکز سوراخ اول می باشد که به طور مشابه، رابطه ی (3-64) برای تمامی فیبرهای کوتاه قرار گرفته در پشت سوراخ اول در نظر گرفته می شود. دومین شرط مرزی مربوط به فیبرهای سالم قرار گرفته در مرز بین ناحیه یک و دو و مرز بین ناحیه دو و سه می باشد. مقدار جابجایی و بار در مرزهای نامبرده برای فیبرهای سالم برابر می باشد که به صورت رابطه های (27) تا (30) بازنویسی می شود.

$$(u_{i,j}^{**})_{x_{i,j}=0} = (u_{i,j}^*)_{x_{i,j}=0}, [1 \leq i \leq q-1, 1 \leq j \leq \gamma], [v+1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq \gamma] \quad (27)$$

$$(p_{i,j}^{**})_{x_{i,j}=0} = (p_{i,j}^*)_{x_{i,j}=0}, [1 \leq i \leq q-1, 1 \leq j \leq \gamma], [v+1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq \gamma] \quad (28)$$



$$(u_{i,j}^{**})_{x_{i,j}=L'} = (u_{i,j})_{x_{i,j}=}, [1 \leq i \leq q^* - 1, 1 \leq j \leq \gamma], [v^* + 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq \gamma] \quad (29)$$

$$(p_{i,j}^{**})_{x_{i,j}=L'} = (p_{i,j})_{x_{i,j}=}, [1 \leq i \leq q^* - 1, 1 \leq j \leq \gamma], [v^* + 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq \gamma] \quad (30)$$

سومین شرط مرزی به طور مشابه با حالت تک پین، در محل تماس پین با فیبرهای قرار گرفته در پشت سوراخ می باشد. همان طور که ذکر شده برای شبیه سازی تماس بین پین و سوراخ از المان های خطی استفاده شده است که سختی المان های جایگزین شده با سختی عمودی در سطح تماس بین دو سطح برابر می باشد. برای دومین سوراخ سومین شرط مرزی با در نظر داشتن رابطه ی (23) و (24) در حالت بی بعد به صورت زیر خلاصه می گردد.

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^N F_k [R]_{i+m(j-1)}^k \lambda_k e^{\lambda_k l_{i,j}} - \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i+m(j-1)}^k \lambda_k e^{-\lambda_k l_{i,j}} + A \phi \left(\sum_{k=1}^N F_k [R]_{i-1+m(j-1)}^k e^{-\lambda_k \hat{\Delta}_{i,j,i-1,j}} + \right. \\ & \left. \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i-1+m(j-1)}^k e^{-\lambda_k \hat{\Delta}_{i,j,i-1,j}} - \sum_{k=1}^N F_k [R]_{i+m(j-1)}^k e^{\lambda_k l_{i,j}} - \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i+m(j-1)}^k e^{-\lambda_k l_{i,j}} \right) \tan \theta_{i,j} \\ & + \phi A \tan \theta_{i,j} \left(\sum_{k=1}^N F_k [R]_{i+mj}^k e^{\lambda_k l_{i,j}} + \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i+mj}^k e^{-\lambda_k l_{i,j}} + \sum_{k=1}^N F_k [R]_{i+m(j-2)}^k e^{\lambda_k l_{i,j}} \right. \\ & \left. + \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i+m(j-2)}^k e^{-\lambda_k l_{i,j}} - \sum_{k=1}^N F_k [R]_{i+m(j-1)}^k - \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i+m(j-1)}^k e^{-\lambda_k l_{i,j}} \right) \\ & + \Gamma^* \left(\sum_{k=1}^N F_k [R]_{i+m(j-1)}^k e^{\lambda_k l_{i,j}} + \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i+m(j-1)}^k e^{-\lambda_k l_{i,j}} \right) = 0, [q^* < i < v^*, 1 < j < \gamma] \end{aligned} \quad (31)$$

رابطه ی (31) برای فیبرهایی با مختصات y مثبت نوشته شده است. برای فیبرهایی با مختصات y منفی رابطه ای به طور مشابه نوشته می شود.

در رابطه ی (67-3)، $\hat{\Delta}_{i,j,i-1,j}$ براساس رابطه ی (68-3) جایگزین می شود.

$$\hat{\Delta}_{i,j,i-1,j} = l_{i,j} - l_{i-1,j} \quad (32)$$

چهارمین شرط مرزی مربوط به فیبرهای بریده شده ای می باشد که هیچ گونه تماسی با سطح خارجی پین ندارند. مقدار بار شعاعی در فیبرهای نامبرده برابر صفر در نظر گرفته می شود. رابطه ی (79-3) برای فیبرهای بریده شده توسط دومین سوراخ در مختصات محلی مربوطه برقرار می باشد. برای فیبرهای بریده شده توسط اولین سوراخ در ناحیه ی دو به صورت ذیل بازنویسی می شود.

(33)



$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^N F_k [R]_{i+m(j-1)}^k \lambda_k - \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i+m(j-1)}^k \lambda_k + A\phi \left(\sum_{k=1}^N F_k [R]_{i-1+m(j-1)}^k e^{\lambda_k \cdot \Delta t_{i,j,i-1,j}} \right. \\ & \left. + \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i-1+m(j-1)}^k e^{-\lambda_k \cdot \Delta t_{i,j,i-1,j}} + \sum_{k=1}^N F_k [R]_{i+m(j-1)}^k + \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i+m(j-1)}^k \right) \tan \theta_{i,j} + \bullet / \Delta A \phi \tan \theta_{i,j} \cdot \\ & \left(\sum_{k=1}^N F_k [R]_{i+mj}^k + \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i+mj}^k + \sum_{k=1}^N F_k [R]_{i+m(j-2)}^k + \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i+m(j-2)}^k - 2 \sum_{k=1}^N F_k [R]_{i+m(j-1)}^k \right. \\ & \left. - 2 \sum_{k=1}^N H_k [R]_{i+m(j-1)}^k \right) = \bullet, [q < i < v, 1 < j < \gamma] \end{aligned}$$

شبیه سازی اتصالات پینی

برای شبیه سازی اتصالات مکانیکی از نرم افزار Ansys استفاده شده است. برای بررسی توزیع تنش در اتصالات مکانیکی، تک لایه ی مرکبی از جنس گرافیت اپوکسی در نرم افزار اجزاء محدود Ansys شبیه سازی شده است. برای شبکه بندی از المان Solid186 استفاده شده است. مطابق (3-15) به طور مشابه فیبر و ماتریس به طور جداگانه ایجاد شده اند. پین صلب فرض شده است لذا برای شبیه سازی اثر پین، جابجایی شعاعی فیبرها و ماتریس های قرار گرفته در لبه ی پشتی سوراخ را محدود می کنیم. به ازای مقادیر ذیل تک لایه ی مرکبی از جنس گرافیت اپوکسی شبیه سازی شده است.

$$\begin{cases} m=15, r=9 \\ \alpha=\beta=0.001 \\ \zeta=0.0003 \\ E_f=250 \text{ GPa} \\ E_m=4/2 \text{ GPa} \end{cases}$$



یافته ها

یافته های حاصل از تمرکز تنش برای چند لایه ی مرکب پلیمری با نانو افزودنی TiO_2 به شرح زیر است:



شکل 4 دستگاه مورد استفاده محاسبات تمرکز تنش



شکل 5 فیکسچر طراحی و ساخته شده جهت استفاده از پین های صلب



خواص مادی چندلایه مرکب

خواص مادی فیبر و ماتریس در جدول (1-4) داده شده است. ماده مرکب از جنس گرافیت اپوکسی و پین صلب در نظر گرفته شده است.

نتایج تمرکز تنش در حالت بار ثابت برای چندلایه‌ی مرکبی با آرایش $[0_3]$ و به ازای m برابر 15 استخراج شده است. فیبرها مربع شکل

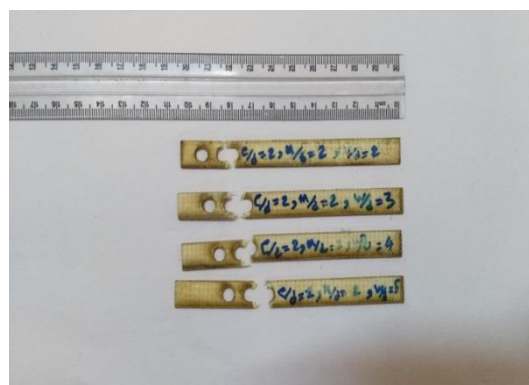
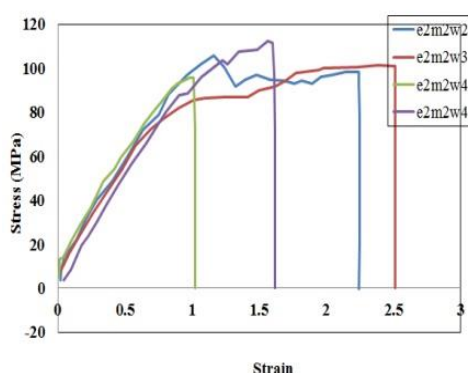
و به طول ضلع 0/001 (متر) انتخاب شده‌اند. مقدار ρ و k نیز 0/0002 (متر) در نظر گرفته شده است.

جدول 1-4: خواص مکانیکی مواد مورد بررسی .

ماده	مدول الاستیسیته (GPa)
الیاف گرافیت	180
چسب اپوکسی	4/2

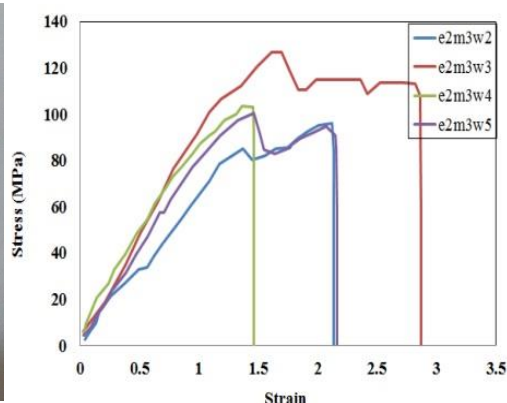
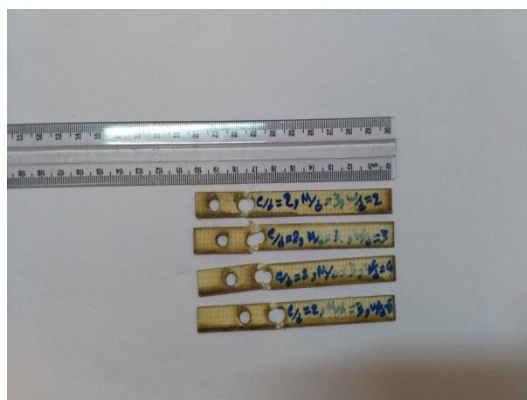
بررسی نتایج

تمرکز تنش در مواد مرکب تک جهته برابر با مقدار تنش فعلی فیبر نسبت به تنش اولیه آن بدون نقص بوده و محاسبه آن از جهات بسیاری حائز اهمیت می‌باشد. شکل زیر توزیع تنش برشی بی بعد در چندلایه مرکب تک جهته تحت اثر سوراخ بیضوی را نشان می‌دهد. q معرف نسبت قطر افقی سوراخ به قطر عمودی آن است. با بزرگ شدن سوراخ مشاهده می‌شود که مقدار تنش برشی افزایش می‌یابد. تنش برشی از جابجایی دو فیبر عمودی و یا افقی نسبت به هم به وجود می‌آید و در اثر به وجود آمدن تنش برشی در اطراف سوراخ و بریده شدن تعدادی از فیبرها در فیبرهای سالم مقدار نیرو بیشتر از حالت اولیه بدون سوراخ ایجاد می‌گردد.



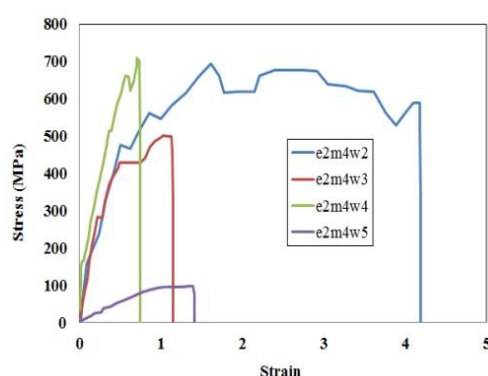
1- نمونه و نمودار تنش - کرنش چند لایه مرکب بافته شده با نانو افزودنی Ti_2O_3 با کمترین عرض (2mm) و فاصله بین دو پین (2mm)

با توجه به شکل فوق و برداشت از آن می‌توان بیان کرد کلیه نمونه‌ها در مقابل نیروهای تنش اختلاف بسیار فاحشی نسبت اختلاف نیروهای کششی نداشته‌اند اما در نیروهای کششی با توجه به تغییر فواصل پین‌ها تغییرات مقاومت نمونه در برابر این نیرو متفاوت است .



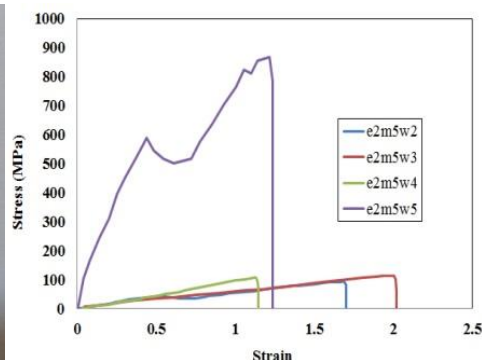
2- نمونه و نمودار تنش - کرنش چند لایه مرکب بافته شده با نانو افزودنی Ti_2O_3 با کمترین عرض (2mm) و فاصله بین دو پین (3mm)

با توجه به شکل فوق و مقایسه آن با شکل قبل می توان بیان کرد با افزایش فاصله بین دو پین مقاومت نمونه ها چه در مقابل نیروهای ناشی از تنش و کشش به طور محسوس افزایش یافته است .



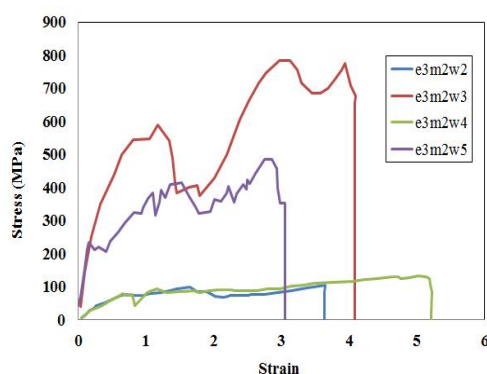
3- نمونه و نمودار تنش - کرنش چند لایه مرکب بافته شده با نانو افزودنی Ti_2O_3 با کمترین عرض (2mm) و فاصله بین دو پین (4mm)

با توجه به افزایش فاصله پین ها در شکل فوق می توان گفت تمرکز تنش به طور چشم گیر کاهش یافته همچنین مقاومت نمونه ها در مقابل نیروهای کششی متفاوت و گاهی با اختلاف زیاد است که می توان علت آن را تغییر در اندازه فاصله پین در مقایسه با یکدیگر بیان کرد به طوری که نمونه اول با توجه به فاصله بین دو پین نسبت به سایر نمونه ها بیشترین نرخ مقاومت در برابر گسیختگی را داشته است .



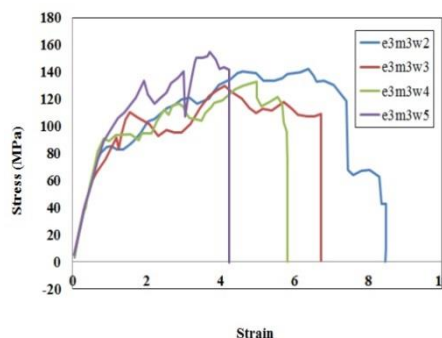
4- نمونه و نمودار تنش - کرنش چند لایه مرکب یافته شده با نانو افزودنی Ti_2O_3 با کمترین عرض (2mm) و فاصله بین دو پین (5mm)

با توجه به شکل فوق می‌توان بیان نمود مقاومت نمونه‌ها در برابر نیروهای کششی به طور چشم‌گیر کاهش یا افزایش نداشته‌اند اما در برابر مقاومت در مقابل تنش با توجه به افزایش فاصله بین دو پین به طور محسوس کاهش یافته‌اند غیر از نمونه آخر که مقاومت در برابر تنش بسیار چشم‌گیر بود و علت آن را می‌توان افزایش فاصله بین دو پین بیان کرد.



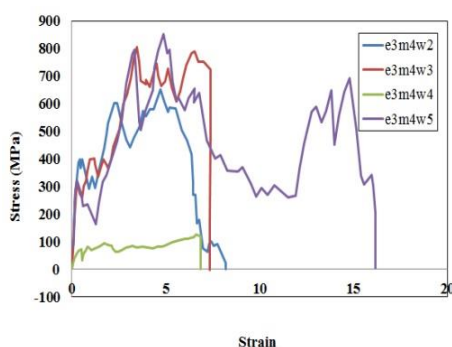
5- نمونه و نمودار تنش - کرنش چند لایه مرکب یافته شده با نانو افزودنی Ti_2O_3 با نسبت عرض به قطر پین (3mm) و فاصله بین دو پین نسبت به قطر (2mm)

با برداشت فوق می‌توان بیان کرد که با در نظر گرفتن افزایش عرض نمونه‌ها نرخ مقاومت در برابر نیروهای کششی بعضاً افزایش یافته و همچنین تحمل نیروهای ناشی از تنش نیز نسبت به شکل قبل فراتر رفته و عبور از فاز تنش تسلیم تا گسیختگی فراتر از قبل است.



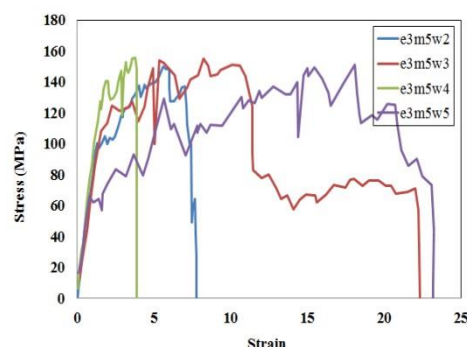
6- نمونه و نمودار تنش - کرنش چند لایه مرکب بافته شده با نانو افزودنی Ti_2O_3 با نسبت عرض به قطر بین (3mm) و فاصله بین دو بین نسبت به قطر (3mm)

با توجه به افزایش فاصله بین دو بین می توان بیان کرد مقاومت نمونه در مقابل کشش به طور چشم گیر افزایش یافته اما در مقایسه با شکل قبل بیشتر دچار گسیختگی شده اند . با توجه به افزایش فاصله بین ها مقاومت در مقابل تنش بیشتر است .



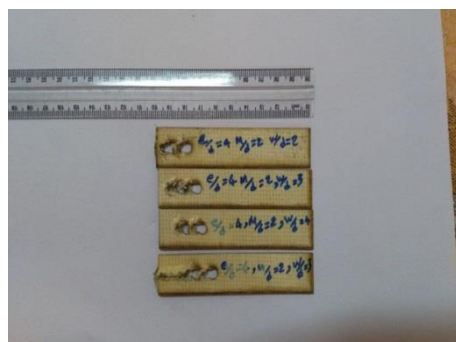
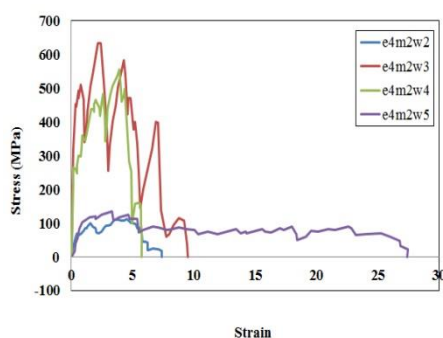
7- نمونه و نمودار تنش - کرنش چند لایه مرکب بافته شده با نانو افزودنی Ti_2O_3 با نسبت عرض به قطر بین (3mm) و فاصله بین دو بین نسبت به قطر (4mm)

با برداشت از شکل فوق می توان گفت با توجه به افزایش فاصله بین دو بین مقاومت نمونه ها در برابر نیروهای کششی به طور چشم گیر افزایش یافته اند اما مقاومت در برابر تنش با توجه به افزایش فاصله مرکز بین اول تا لبه بسیار محسوس نیست ولی عبور از ناحیه تنش تسلیم تا گسیختگی با نسبت افزایش فاصله مرکز بین اول تا لبه رابطه مستقیم دارد .



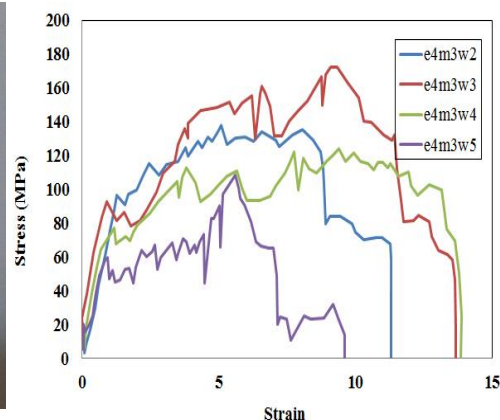
8- نمونه و نمودار تنش - کرنش چند لایه مرکب بافته شده با نانو افزودنی Ti_2O_3 با نسبت عرض به قطر بین (3mm) و فاصله بین دو پین نسبت به قطر (5mm)

با توجه به شکل فوق و در مقایسه با شکل قبل می توان بیان نمود با توجه به افزایش فاصله بین دو پین مقاومت فاصله بین دو پین مقاومت نمونه ها در برابر نیروی تنش به طور محسوس کاهش پیدا کرده اما در مقابل کشش مقاوم تر خود را نشان داده اند ولی تغییر شکل تا گسیختگی بسیار بیشتر از شکل است که از دلایل آن می توان به مقاومت چشم گیر در برابر کشش را نام برد .



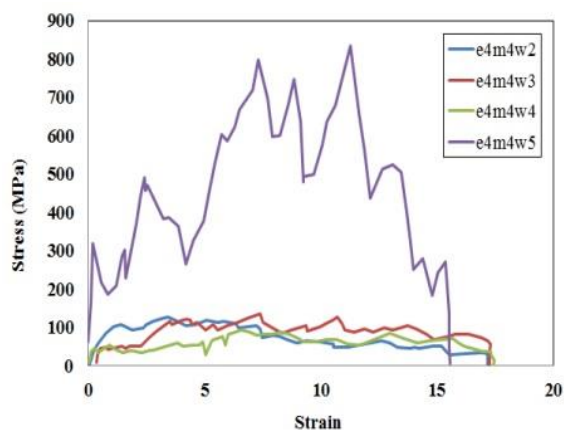
9- نمونه و نمودار تنش - کرنش چند لایه مرکب بافته شده با نانو افزودنی Ti_2O_3 با نسبت عرض به قطر بین (4mm) و فاصله بین دو پین نسبت به قطر (2mm)

با توجه به شکل فوق می توان دریافت با افزایش عرض نمونه ها مقاومت در برابر تنش بصورت بسیار محسوس رخ نداده و اما عبور از ناحیه تنش تسلیم تا گسیختگی کامل بسیار کاهش داشته که می توان از دلایل آن کاهش فاصله بین دو پین را نام برد به طوری که نمونه اول با توجه به فاصله کمتر بین دو پین نسبت به سایرین کمترین نرخ مقاومت در مقابل تنش را داشته و گسیخته شده اما نمونه آخر با توجه به افزایش فاصله مرکز پین اول تا لبه در مقابل کشش را در مقایسه سایر نمونه ها داشته است .



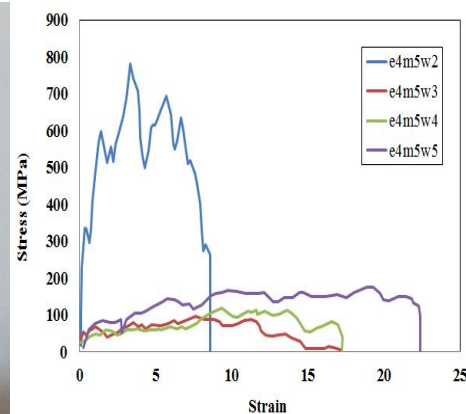
10- نمونه نمودار تنش - کرنش چند لایه مرکب بافته شده با نانو افزودنی Ti_2O_3 با نسبت عرض به قطر بین (4mm) و فاصله بین دو بین نسبت به قطر (3mm)

در مقایسه این شکل با شکل قبل می توان دریافت که با افزایش فاصله بین دو بین مقاومت در برابر نیروهای کششی به طور محسوس افزایش یافته اما در مقابل تنش بسیار ضعیف ترند اما عبور از ناحیه تنش تسلیم تا گسیختگی به لطف افزایش فاصله بین دو بین طولانی تر بوده است .



11- نمونه و نمودار تنش - کرنش چند لایه مرکب بافته شده با نانو افزودنی Ti_2O_3 با نسبت عرض به قطر بین (4mm) و فاصله بین دو بین نسبت به قطر (4mm)

از شکل فوق می توان برداشت کرد که با افزایش فاصله بین دو بین مقاومت نمونه ها در مقابل تنش تغییر ملموس نداشته اما استحکام کششی افزایش محسوسی داشته و هر چه فاصله مرکز بین اول تا لبه افزایش یافته مقاومت در برابر کشش بیشتر شده اما در نمونه آخر که بیشترین فاصله لبه تا مرکز اول را داشته بیشترین نرخ مقاومت در برابر تنش را داشته است .



12- نمونه و نمودار تنش – کرنش چند لایه مرکب بافته شده با نانو افزودنی Ti_2O_3 با نسبت عرض به قطر بین (4mm) و فاصله بین دو پین نسبت به قطر (5mm)

از شکل فوق می توان برداشت کرد که با افزایش کلی نمونه ها نسبت به نمونه ها قبل و افزایش فاصله آن نسبت به شکل قبل مقاومت در برابر نیروی کشش با توجه به افزایش فاصله لبه تا مرکز پین اول افزایش یافته است بجزء نمونه اول که می توان از دلایل آن برای مقاومت کمتر در برابر نیروی کشش فاصله کم لبه تا مرکز پین اول را بیان نمود .

در این پژوهش از یک روش تحلیلی برای بررسی توزیع تنش در چند لایه ی مرکب تحت تاثیر پین استفاده شد . در این پژوهش اثر دو پین با آرایش سری بر توزیع تنش در چند لایه ی مرکب ، مورد مطالعه قرار گرفت . در نهایت اثر ترک نامتقارن در توزیع تنش ناشی از حضور پین ، مورد بررسی قرار گرفت.

1- تعداد فیبرهای بریده شده و یا شعاع سوراخ یکی دیگر از پارامترهای موثر در توزیع تنش ناشی از حضور پین می باشد. بهترین شعاع سوراخ وابسته به دیگر پارامترهای هندسی می باشد. در حالت کلی نسبت $2 < e/d < 5/2$ در بیشتر حالات توصیه می شود.

2- مشاهده می شود که با افزایش فاصله پین مقدار بار به طور یکنواخت تری در فضای پشت سوراخ توزیع می گردد .

3- با ایجاد ترک در لبه ی سوراخ ، تنش برشی بی بعد S_{zx} در صفحه xz به وجود می آید . تنش برشی بی بعد با افزایش شعاع سوراخ ابتدا افزایش سپس کاهش می یابد . در شعاع های کم سوراخ با افزایش نسبت ابعادی w/d تنش برشی بی بعد S_{zx} کاهش می یابد .



4- نسبت ابعادی w/d یکی از پارامترهای موثر در توزیع تنش در اطراف پین می باشد . با افزایش نسبت ابعادی w/d بار به طور یکنواخت تری در فضای پشت پین توزیع می گردد.

5- شعاع سوراخ به عنوان یکی دیگر از پارامترهای موثر مطرح می شود . با افزایش فاصله ی بین دو پین ماکزیمم تمرکز تنش کششی ابتدا کاهش یافته و سپس به مقدار ثابتی نزدیک می شود .

6- با افزایش فاصله مرکز پین اول از لبه مقاومت کلی در برابر کشش افزایش یافته و مقاومت فضای پشت پین اول نیز افزایش یافته ا



منابع

- [1]- T. Okabe, N. Takeda, Y. Kamoshida, M. Shimizu, W.A. Curtinc, A 3D shear-lag model considering micro-damage and statistical strength prediction of unidirectional fiber-reinforced composites, *Composites Science and Technology* 61 (2001) 1773–1787.
- [2]- S. Okabe, T. Okabe, Stress concentrations near a fiber break in unidirectional composites with interfacial slip and matrix yielding, *International Journal of Solids and Structures* 41 (2004) 4263–4277.
- [3]- Analytical study of two pin-loaded holes in unidirectional fiber-reinforced composites. *Journal of Applied Mechanics*, Tr. ASME, (2013), <http://dx.doi.org/10.1115/1.4007226>.
- [4]- Robati H., Attar M. M., Analytical study of a pin-loaded hole in unidirectional laminated composites with triangular and circular fibers, *Journal of Applied Mechanics*, Tr. ASME, (2013), <http://dx.doi.org/10.1115/1.4007212>.
- [5]- Attar M. M., Haghpahani M., Micro mechanisms of load transfer in a hybrid unidirectional fiber-reinforced epoxy composite with broken fibers, *The 2th International Conference on Composites, (CCFA-2) 2010, Kish Island, Iran.*



(Experimental investigation and analysis of geometrical parameters in polymer composite materials with Ti2O3 nano additive under the effect of two series pins)

Hadi Mahzari

Mohsen Asadpor

In this research, due to the increasing needs and progress of the marine and aviation industries, as well as the need to use light and strong alloys, as well as the topic of maintenance and repair of these industries, ships and airplanes are examples of these types of devices. It is very common to create and grow cracks in their bodies. Recently, composite patches are used to repair these types of cracks, and these types of patches are divided into different types. Different forms of these patches and loadings are subjected to various tests of rupture, fracture, crack, and deformation. And... they are placed.

The purpose of this research is to investigate the effect of adding nano Ti2O3 to polymer composite materials under the effect of mechanical joints and try to find the relationship between the percentage of nano addition and parameters such as breaking force, and also the objective

- 1-Examining the geometrical parameters of woven composite materials in order to increase strength and resistance to tension and tension forces
- 2-Investigating the effect of nano additives on the life of the structure
- 3-Check the loading rate in the distance between two pins and pin and edge

Keywords: Nanocomposite, polymer composite material, strength of Ti metal