

ارزیابی و توسعه مدل ریزمکانیکی ماتریس واسطه با استفاده از آزمونهای مشخصه سازی خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی

Evaluation and Development of Bridging Micromechanics Model Using Mechanical Properties of Composite Materials Characterization Tests

محمود ذبیح پور*، سعید ادیب نظری، علی عابدیان

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوا فضا، صندوق پستی ۱۱۳۶۵/۸۶۳۹

دریافت: ۸۳/۱۰/۲۹، پذیرش: ۸۴/۶/۱

چکیده

برای اجتناب از لزوم انجام آزمونهای پرهزینه و زمانبر برای تعیین خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی، استفاده از مدل‌های ریزمکانیکی راه حل مناسبی است. مدل‌های ریزمکانیکی متعددی برای پیش‌بینی خواص ارائه شده‌اند. در این مقاله یکی از جدیدترین آنها یعنی مدل ماتریس واسطه، بررسی شده است. برای تعیین خواص مکانیکی از طریق این مدل، تنها اطلاع از خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده و درصد حجمی الیاف کافی است. اما، برای حصول به پیش‌بینی دقیق‌تر، خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده از طریق فرایند بازیابی و تعدادی آزمایش خواص مکانیکی ماده کامپوزیتی حاصل می‌شود. اگرچه تعداد این آزمایشها در مقایسه با تعداد کل آزمایشهای مشخصه‌سازی اندک است، اما همچنان وابسته به آن است. این وابستگی از آن جا ناشی می‌شود که لازم است خواص اتصال ماتریس - الیاف حاصل به شکل تصحیح خواص ماتریس در روابط مدل وارد شود. در این پژوهش نشان داده شد که با این فرایند حداقل تعداد آزمایش برای تصحیح خواص مواد تشکیل دهنده، یک آزمایش عرضی ماده کامپوزیتی است. همچنین، با ارائه روابطی برای اجزای ماتریس واسطه، مدلی برای تعیین استحکام با در نظر گرفتن اثر عدم وجود اتصال کامل ارائه شده است. مقادیر حاصل کاهش قابل توجهی در اختلاف نتایج را نشان می‌دهند. به این ترتیب می‌توان تعداد آزمایشهای مشخصه‌سازی مورد لزوم را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی

اتصال الیاف - ماتریس،
مواد کامپوزیتی، خواص مکانیکی،
مدل ریزمکانیکی ماتریس واسطه،
آزمونهای مشخصه سازی

مقدمه

استحکام مواد کامپوزیتی تک جهته ارائه شده است [۱،۳]. مدل ماتریس واسطه جدیدترین مدل برای تعیین خواص مکانیکی کامپوزیتهاست. از مزایای این مدل می‌توان به در نظر گرفتن رفتار پلاستیک ماتریس در کامپوزیتها اشاره کرد. بنابراین، رفتار غیر خطی

تاکنون مدل‌های ریزمکانیکی متعددی برای پیش‌بینی خواص کشسان مواد کامپوزیتی پیشنهاد شده است. از آن جمله می‌توان به روشهای اختلاط، اختلاط اصلاح شده و مدل ماتریس واسطه (bridging model) اشاره کرد [۱،۲]. اما، بندرت مدلی برای پیشگویی مقادیر

Key Words

fiber/matrix interface,
composite materials, mechanical prop-
erties, bridging micromechanics model,
characterization tests

که در آن [S] از معادله زیر تعریف می شود:

$$[d\sigma] = [S] \{d\varepsilon\} \quad (7)$$

در حالت کلی، ماتریس [A] به شکل زیر است:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ \cdot & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ \cdot & \cdot & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ \cdot & \cdot & \cdot & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{55} & a_{56} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{66} \end{bmatrix} \quad (8)$$

در مواد کامپوزیتی با خاصیت همسانگرد عرضی ۵ عضو قطری این ماتریس مستقل هستند [9]. اعضای ماتریس واسطه با جایگزینی معادله (۸) در (۶) و توجه به این نکته که ماتریس نهایی [S] باید متقارن باشد، یعنی $S_{ij} = S_{ji}$ و $i, j = 1, 2, \dots, 6$ بدست می آید. انجام این مراحل پانزده معادله غیرخطی را درکلی ترین حالت نتیجه می دهد. از حل این معادله ها، مقادیر اعضای غیرقطری ماتریس [A] معین می شود. همچنین، برای رفتار غیرخطی ماتریس خواهیم داشت [۱۰]:

$$E_m = \begin{cases} E^m & \text{for } \tau_i^m \leq \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_y^m \\ E_T^m & \text{for } \tau_i^m > \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_y^m \end{cases} \quad (9)$$

$$G_m = \begin{cases} \frac{E^m}{2(1+\nu^m)} & \text{for } \tau_i^m \leq \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_y^m \\ \frac{E_T^m}{3} & \text{for } \tau_i^m > \frac{\sqrt{2}}{3} \sigma_y^m \end{cases} \quad (10)$$

برای حالت بارهای صفحه ای، اعضای ماتریس به شکل زیر نوشته می شود:

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_{11}^m \\ d\sigma_{22}^m \\ d\sigma_{12}^m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ \cdot & a_{22} & a_{26} \\ \cdot & \cdot & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_{11}^f \\ d\sigma_{22}^f \\ d\sigma_{12}^f \end{Bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_{11}^f \\ d\sigma_{22}^f \\ d\sigma_{12}^f \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ \cdot & b_{22} & b_{26} \\ \cdot & \cdot & b_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_{11} \\ d\sigma_{22} \\ d\sigma_{12} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

ماتریس در تعیین خواص کامپوزیتها لحاظ می شود [۷-۳]. یکی از مهمترین دلایل توسعه مدل های ریزمکانیکی، گریز از لزوم انجام آزمایشهای فراوان، نسبتاً دشوار و هزینه بر به منظور مشخصه سازی مواد کامپوزیتی است. انجام این آزمونها از یک طرف با محدودیت سازوکارهای ساده دستگاههای آزمایش و از طرف دیگر با الزام رعایت استانداردهای معتبر مواجه است. با انجام سه دسته آزمونهای کشش، فشار و برش داخل صفحه ای خواص کشسان و استحکام ماده کامپوزیتی در راستاهای پایه بدست می آید.

اصول نظری

مدل ریزمکانیکی ماتریس واسطه

به کمک مدل ماتریس واسطه ابتدا تنشهای داخلی ایجاد شده در الیاف و ماتریس معین می شود، سپس معیارهای شکست روی این میدانهای تنش اعمال می شود. معیار گسیختگی حداکثر تنش اصلی مواد همسانگرد (isotropic) برای کامپوزیت به شکل اصلاح شده بکار گرفته شده است [۸،۹].

محاسبه میدان تنش در مواد تشکیل دهنده

در الیاف به فرض همسانگرد عرضی، رفتار کشسان خطی در نظر گرفته می شود. رابطه تنش و کرنش الیاف عبارت است از:

$$\{d\varepsilon^f\} = [S^f] \{d\sigma^f\} \quad (1)$$

اگر برای ماتریس رفتار همسانگرد و کشسان - پلاستیک فرض شود:

$$\{d\varepsilon^m\} = [S^m] \{d\sigma^m\} \quad (2)$$

اکنون با ارائه رابطه اصلی مدل با معادله (۳) ماتریس واسطه [A] تعریف می شود:

$$\{d\sigma^m\} = [A] \{d\sigma^f\} \quad (3)$$

با جایگزینی این معادله در معادله های توزیع تنش، تنشهای ایجاد شده در الیاف و ماتریس بر اساس تنشهای اعمالی بدست می آید:

$$\{d\sigma^f\} = (V_f [I] + V_m [A])^{-1} \{d\sigma\} \quad (4)$$

$$\{d\sigma^m\} = [A] (V_f [I] + V_m [A])^{-1} \{d\sigma\} \quad (5)$$

$$[S] = (V_f [S^f] + V_m [S^m] [A]) (V_f [I] + V_m [A])^{-1} \quad (6)$$

$$E_{11} = (V_f + V_m a_{11}) / (V_f s_{11}^f + V_m a_{11} s_{11}^m) \quad (26)$$

$$E_{22} = \frac{(V_f + V_m a_{11})(V_f + V_m a_{22})}{(V_f + V_m a_{11})(V_f s_{22}^f + a_{22} V_m s_{22}^m) + V_f V_m (s_{21}^m - s_{21}^f) a_{12}} \quad (27)$$

$$G_{12} = (V_f + V_m a_{12}) / (V_f / G_{12}^f + V_m a_{12} / G^m) \quad (28)$$

معیار و اماندگی

از معادله های بخش قبل، میدان تنش ایجاد شده در الیاف و ماتریس را می توان در اثر بارگذاری اعمال شده بدست آورد. با استفاده از معادله (29) تنشهای اصلی در الیاف و ماتریس جداگانه بدست می آید:

$$\det \left(\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} - \sigma [I] \right) = 0 \quad (29)$$

با محاسبه تنشهای اصلی در هریک از دو بخش الیاف و ماتریس و در نظر گرفتن معیارهای ذیل می توان استحکام ماده کامپوزیتی را از راه برابر شدن تنشهای حداکثر در الیاف یا ماتریس به مقادیر بحرانی متناظر استحکام آنها معین کرد.

$$\sigma' \geq \sigma_u^T \quad (30)$$

$$\sigma^r \leq -\sigma_u^c \quad (31)$$

که در آنها

$$\sigma' \geq \sigma^r \geq \sigma^c \quad (32)$$

در این معادله ها σ_u^T و σ_u^c به ترتیب استحکام کششی و فشاری در ماتریس یا الیاف است.

تجربی

مواد

مدل ماتریس واسطه بر این اساس تدوین شده است که با مشخص بودن خواص کشسان و استحکام مواد تشکیل دهنده ماده کامپوزیتی و درصد حجمی الیاف، بتوان استحکام و خواص کشسان ماده کامپوزیتی حاصل

با جایگذاری معادله (12) در (11) معادله (13) بدست می آید:

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_{11}^m \\ d\sigma_{22}^m \\ d\sigma_{12}^m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ \cdot & a_{22} & a_{26} \\ \cdot & \cdot & a_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ \cdot & b_{22} & b_{26} \\ \cdot & \cdot & b_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_{11}^f \\ d\sigma_{22}^f \\ d\sigma_{12}^f \end{Bmatrix} \quad (13)$$

که در این معادله:

$$a_{11} = \frac{E_m}{E_f^f} \quad (14)$$

$$a_{22} = \nu / \delta \left(1 + \frac{E_m}{E_f^f} \right) \quad (15)$$

$$a_{33} = \nu / \delta \left(1 + \frac{G}{G_f^f} \right) \quad (16)$$

$$a_{12} = (s_{12}^f - s_{12}^m) (a_{11} - a_{22}) / (s_{11}^f - s_{11}^m) \quad (17)$$

$$a_{16} = \frac{d_{12} \beta_{11} - d_{11} \beta_{21}}{\beta_{11} \beta_{22} - \beta_{12} \beta_{21}} \quad (18)$$

$$a_{26} = \frac{d_{12} \beta_{22} - d_{22} \beta_{12}}{\beta_{11} \beta_{22} - \beta_{12} \beta_{21}} \quad (19)$$

$$d_{11} = (s_{16}^m - s_{16}^f) (a_{11} - a_{66}) \quad (20)$$

$$d_{12} = (s_{26}^m - s_{26}^f) (V_f + V_m a_{11}) (a_{22} - a_{66}) + (s_{16}^m - s_{16}^f) (V_f + V_m a_{66}) a_{12} \quad (21)$$

$$\beta_{11} = s_{12}^m - s_{12}^f \quad (22)$$

$$\beta_{12} = s_{11}^m - s_{11}^f \quad (23)$$

$$\beta_{22} = (V_f + V_m a_{22}) (s_{12}^m - s_{12}^f) \quad (24)$$

$$\beta_{21} = V_m (s_{12}^f - s_{12}^m) a_{12} - (V_f + V_m a_{11}) (s_{22}^f - s_{22}^m) \quad (25)$$

با قرار دادن ماتریسهای $[S]$ ، $[S]^f$ و $[S]^m$ و $[A]$ در معادله (6)، ماتریس $[S]$ محاسبه می شود. بنابراین، خواص کشسان ماده کامپوزیتی بر حسب خواص مواد تشکیل دهنده آن قابل حصول است.

آزمون کشش

این آزمون بر مبنای استاندارد ASTM D ۳۰۳۹/۳۰۳۹M انجام شده است [۱۱]. انتخاب ابعاد و اندازه نمونه‌ها، سرعت انجام آزمایش، فشار فکهای دستگاه روی قطعه، تنظیم راستای قطعه با امتداد اعمال نیروی دستگاه و کنترل عدم ایجاد خمش در قطعه از عوامل بسیار مهم اجرای این آزمون است.

آزمون برش داخل صفحه ای

به دلیل وجود سازوکار عمومی اعمال نیرو در اکثر دستگاههای آزمایش کشش و فشار برای تعیین خواص برش صفحه ای مواد کامپوزیتی ضروری است، بستها (fixture) برای استفاده از سازوکار ذکر شده به وضعیت برشی طراحی شوند. آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D ۴۲۵۵ انجام شد [۱۲]. مدول برشی (G_{12})، استحکام برشی و کرنش برشی حداکثر خواصی هستند که از نتایج پردازش شده این آزمایش حاصل می شوند. نحوه نصب قطعه درون بستها، دقت در نصب Extensometer روی قطعه، روش بستن پیچهای بستها و تراز راستای دستگاه از موارد مهم و قابل توجه در انجام این آزمایش است. برای مشخص کردن کسر حجمی الیاف در ماده کامپوزیتی، روش استاندارد سوزاندن استفاده شد [۱۳] که مقدار آن در قطعات آزمایشی $V_f = 0/5$ بدست آمده است. نتایج حاصل از آزمونها در برش داخل صفحه ای و کشش (در جهتهای ۰ و ۹۰) در جدول ۱ آورده شده است.

نتایج و بحث

بررسی مراحل

برای تعیین مقادیر پیش بینی شده خواص در جهتهای گفته شده به کمک مدل ریزمکانیکی ماتریس واسطه، یک کد رایانه ای تدوین شد. نتایج

را معین کرد. بدین منظور، برای ارزیابی پیش بینی خواص به کمک این مدل لازم است ابتدا اطلاعات ورودی مدل برای مواد مورد استفاده در آزمونهای مشخصه سازی معین شود. سپس، نتایج خواص از آزمونهای مواد کامپوزیتی با نتایج پیش بینی شده از مدل مقایسه شود. جدول ۱ اطلاعات خواص مکانیکی رزین و الیاف بکار رفته را در نمونه های آزمایش ارائه می دهد که در آن الیاف شیشه مورد استفاده از نوع UDE با کد تجاری ۹۲۱۴۵ ساخت شرکت Cs-interglas و رزین مصرفی از نوع اپوکسی L۲۰-SL است. خواص مکانیکی الیاف از اطلاعات فنی شرکت سازنده و خواص مربوط به رزین با انجام آزمونهای کشش و برش ویژه ماتریس بدست آمد، به منظور اختصار مطلب از شرح آنها در این مقاله اجتناب شده است. قطعات آزمایش مواد کامپوزیتی با ترکیب همان سامانه رزین و الیاف، کسر حجمی الیاف $V_f = 0/5$ و به روش لایه گذاری دستی تهیه شدند.

دستگاهها

در این پژوهش، دستگاه اندازه گیری کشش Servohydraulic Instron ۸۵۰۲ به همراه اندازه گیرهایی از نوع Extensometer ۲۶۲۰ بکار گرفته شد.

روشها

ساخت نمونه ها به روش لایه گذاری دستی انجام شد. در ادامه اجرای آزمونهای مشخصه سازی مواد کامپوزیتی برنامه ریزی شد. این آزمونها بر مبنای استانداردهای ASTM انجام شده است. اجابت نیازمندیها و توجه به توصیه های این استانداردها برای دستیابی به نتایج قابل قبول با پراکندگی اندک ضروری است. در صورت عدم امکان ارزیابی و انتخاب عوامل اجرای آزمایش، توصیه های استاندارد می تواند راهگشا باشد. پس از انجام آزمونها، نتایج پردازش و مقادیر مورد قبول (بر اساس وضعیت و اماندگی) در محاسبات آماری لحاظ شد. به این ترتیب مقادیر نهایی خواص معین شد.

جدول ۱ خواص مکانیکی مواد.

خواص								مواد
E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	ν_{12}	G_{12} (GPa)	σ_y^m (MPa)	E_T (GPa)	X (MPa)	Y (MPa)	
۷۳	۷۳	۰/۲۵	۲۹/۲	—	—	۲۴۰۰	—	الیاف
۲/۹۱	۲/۹۱	۰/۳۵	—	۳۴/۹۰	۲/۰۱	۵۵	—	ماتریس
۳۷/۹۶	۱۰/۲۶	۰/۲۹	۴/۴۳	—	—	۵۸۹/۷۸	۴۸/۶۸	لایه کامپوزیت (از آزمایش)
۳۷/۲۲	۸/۸۰	۰/۳	۳/۴۸	—	—	۶۰/۷۱	۵۲/۶۸	لایه کامپوزیت (از مدل ماتریس واسطه)
—	—	—	—	—	—	۵۸۲/۳	۵۲/۱۸	لایه کامپوزیت (از مدل ماتریس واسطه تصحیح شده)

خواص کشسان تجربی و نظری اختلاف اندکی دارند. منابع ایجاد این اختلاف را می توان به موارد زیر نسبت داد.

فرضیات مدل

در فرضیات مدل در نظر نگرفتن مواردی مانند: کیفیت اتصال، ترتیب و چیدمان الیاف، اثر اندازه و قطر الیاف، معایب ناشی از ساخت (حبابها و حفره ها در ماتریس) و انحراف زاویه الیاف از مقدار نظری را می توان علت ایجاد اختلاف مقادیر تجربی و نظری دانست.

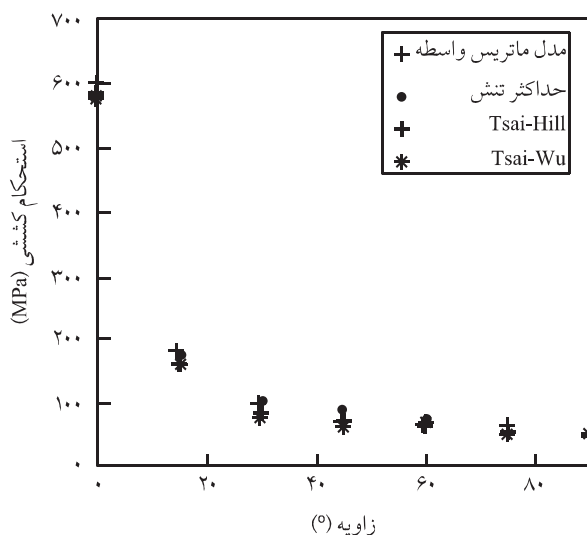
پراکندگی و خطا در اندازه گیریها و محاسبات

منظور پراکندگی و خطا در پردازش و تعیین مدولها و تعیین تجربی درصد حجمی الیاف از روش سوزاندن است. در ادامه از موارد گفته شده منابع ایجاد خطا در بخش تجربی را کنار گذاشته و روی فرضیات مدل بحث می شود. روابطی که برای خواص کشسان ماده کامپوزیتی بر اساس مدل ریز مکانیکی ماتریس واسطه بدست آمده اند در بخشهای قبلی ارائه شده اند (معادله های (۲۶) تا (۲۸)). برای در نظر گرفتن آثار مورد یاد شده، اجزای مستقل ماتریس واسطه به شکل زیر تعریف می شود:

$$a_{11} = (1 - K_1) + (K_1) E_m / E_{11}^f \quad (33)$$

$$a_{22} = K_2 + (1 - K_2) E_m / E_{22}^f \quad (34)$$

$$a_{66} = K_3 + (1 - K_3) G_m / G_{11}^f \quad (35)$$



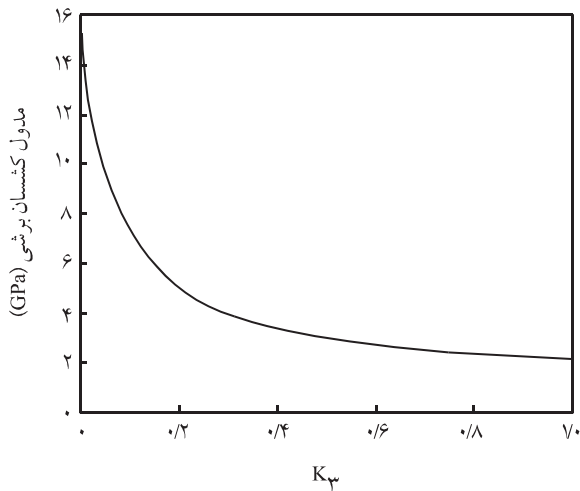
شکل ۱ استحکام کششی لایه در زوایای مختلف الیاف (محاسبات مدل و معیارهای ریز مکانیک).

مربوط به خواص و استحکام ماده کامپوزیتی در جدول ۱ آمده است. مقادیر استحکام بر حسب زوایای مختلف الیاف با اعمال روابط مدل و با تصحیح استحکام ماتریس (که در ادامه توضیح داده می شود) محاسبه و در شکل ۱ ترسیم شد. برای مقایسه، متناظر با همان زوایای مقادیر استحکام محاسبه شده از آزمونهای مشخصه سازی و معیارهای متداول ریز مکانیک در شکل ۱ ارائه شده است. با بررسی مقادیر جدول ۱ مشاهده می شود که اختلاف در خواص کشسان نسبتاً اندک، اما در مقادیر استحکام زیاد است. آنچه می توان در مورد اختلاف زیاد مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری شده استحکام بیان کرد، این است که در مدل ماتریس واسطه، فرض اتصال کامل (perfect bonding) بین ماتریس و الیاف در نظر گرفته می شود. در حالی که مشخص است اتصال کامل، اتصالی ایده ال است. افزون بر این، استحکام اتصال نیز به عنوان یکی از خواص، نقش تعیین کننده ای در استحکام ماده کامپوزیتی دارد. این مسأله در مدل مورد بحث لحاظ نشده است. اما، اگر بتوان کیفیت و استحکام اتصال را در مدل وارد کرد در این حالت بطور قطعی اختلاف مقادیر جدول ۱ کمتر خواهد شد (مثلاً با تصحیح استحکام ماتریس). به این منظور، ابتدا بر اساس فرایند بازیابی از نتایج آزمونهای مشخصه سازی، مقدار استحکام ماتریس تصحیح شده محاسبه شد. سپس، این مقدار که قاعدتاً کوچکتر از استحکام ماتریس خالص است. مجدداً به عنوان استحکام ماتریس در روابط مدل ماتریس واسطه و به کمک برنامه رایانه ای تدوین شده مورد استفاده قرار گرفت. از آنجا استحکام ماده کامپوزیتی در زوایای مختلف الیاف معین شد. ترتیبهای مختلفی از زوایای الیاف را برای اجرای فرایند بازیابی می توان در نظر گرفت، در این جا راستاهای طولی و عرضی در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن روش تعیین استحکام عرضی ماده کامپوزیتی و استفاده از مقادیر خواص نمونه جدول ۱ مقدار استحکام ماتریس برابر $33/489 \text{ MPa}$ معین شد. همچنین، از تعیین استحکام طولی نیز مقداری برای ماتریس حاصل شد. مقدار محاسبه شده برابر $47/68 \text{ MPa}$ است. در این حالت، متوسط این دو مقدار می تواند تقریب مناسبی باشد. بنابراین، مقدار استحکام ماتریس برابر $40/585 \text{ MPa}$ در نظر گرفته شد. با قرار دادن این مقدار و سایر خواص ماتریس و الیاف در مدل ماتریس واسطه، نتایج حاصل در جدول ۱ بدست آمد. به همین ترتیب با اعمال خواص ماتریس و الیاف به معادله (۱) تا (۳۶) می توان استحکام لایه را در هر زاویه ای از الیاف معین کرد (شکل ۱).

توسعه مدل ماتریس و ارائه مدل تعیین استحکام

خواص کشسان

همان طور که از نتایج آزمونها و محاسبات مشاهده می شود مقادیر

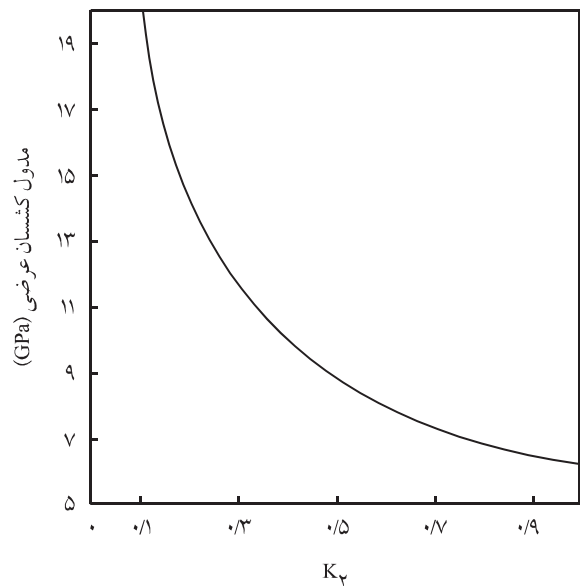


شکل ۳ تغییرات مدول کشسان برشی ماده کامپوزیتی بر حسب مقادیر مختلف K_3 .

فرض کرد به استثناء مقدار K_1^1 (مربوط به کیفیت اتصال ماتریس به الیاف است) که می تواند در اثر بارگذاریهای مختلف (مانند خستگی) تغییرات محسوسی داشته باشد. بنابراین:

$$K_i = (K_i^1 + \sum_{j=2}^n K_i^j) / n = (K_i^1 + C) / n \quad (37)$$

با اطلاع از تغییرات مدول در اثر بارگذاری می توان تغییر K_i و سپس تغییرات K_1^1 را بر حسب بارگذاری معین کرد.

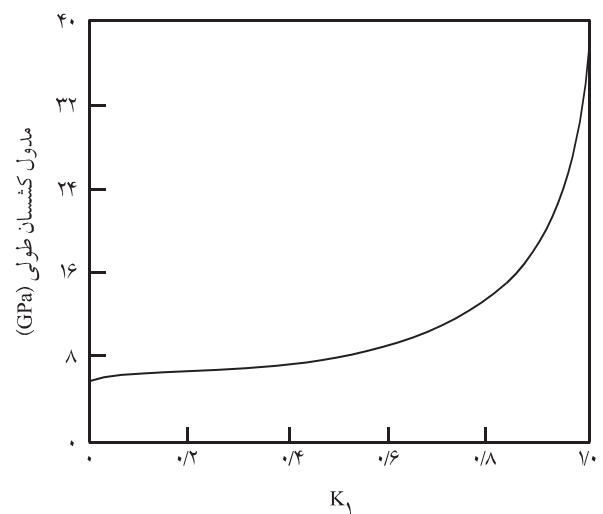


شکل ۴ تغییرات مدول کشسان عرضی ماده کامپوزیتی بر حسب مقادیر مختلف K_4 .

با این تعاریف، $K_i = 1$ متناظر با حالت ایده آل مدل ماتریس واسطه است. این معادله ها طوری تعریف شده اند که در حالت یکسان بودن مواد تشکیل دهنده ماده کامپوزیتی، ماتریس واسطه به ماتریس واحد تبدیل شود (همان طور که در حالت واقعی از آن انتظار می رود). با جایگذاری این تعاریف در روابط خواص کشسان مدل، این خواص بر حسب K_i بدست می آیند. شکلهای ۲ تا ۴ تغییرات خواص کشسان ماده کامپوزیتی را بر حسب مقادیر مختلف K_i نشان می دهد. با اعمال نتایج آزمایشها برای مدولها به این معادله ها (یا نمودارها)، مقادیر K_i متناظر با این خواص برابر $K_1 = 0.998$ ، $K_2 = 0.373$ و $K_3 = 0.245$ بدست می آیند که خود بیانگر کاستیهای موجود در نمونه واقعی ماده کامپوزیتی مورد آزمایش است. بطور کلی می توان نوشت:

$$K_i = \left(\sum_{j=1}^n K_i^j \right) / n \quad I=1,2,3 \quad (36)$$

در این معادله K_i^j ضرایب تصحیح برای در نظر گرفتن هر یک از آثار هندسی (موارد گفته شده در بخش فرضیات مدل)، n تعداد وضعیتهای در نظر گرفته شده، K_i^1 ضریب تأثیر کیفیت اتصال ماتریس - الیاف، K_i^2 ضریب معایب ناشی از ساخت در قطعه، K_i^3 ضریب ترتیب و چیدمان الیاف، K_i^4 ضریب اندازه و قطر الیاف و K_i^5 ضریب انحراف زاویه الیاف از مقدار نظری، همچنین $0 \leq K_i^j \leq 1$ است. هر وضعیت بارگذاری که باعث تغییر مقادیر شود کاهش مدول (سفتی) را در آن جهتها نتیجه خواهد داد. نکته و فایده اساسی در بیان این ضرایب به شکل گفته شده این است که می توان تمامی مقادیر را برای یک ماده کامپوزیتی ثابت



شکل ۲ تغییرات مدول کشسان طولی ماده کامپوزیتی بر حسب مقادیر مختلف K_1 .

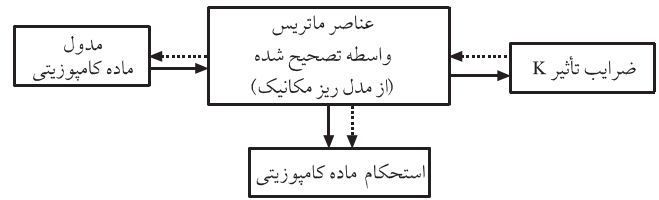
شده در ردیف انتهایی جدول ۱ بهبود قابل توجهی را در پیش بینی استحکام به کمک این مدل توسعه یافته (با اثر عدم وجود اتصال کامل) نشان می دهد.

نتیجه گیری

نتایج بررسی این پژوهش نشان می دهد که مدل ماتریس واسطه خواص مکانیکی ماده کامپوزیتی را با دقت مناسبی پیش بینی می کند. اما، اختلاف در مقادیر استحکام پیش بینی شده و نتایج تجربی نسبتاً زیاد است. این مسأله از آنجا ناشی می شود که استحکام اتصال ماتریس به الیاف در مدل لحاظ نشده است. با استفاده از نتایج آزمونها در روابط مدل ماتریس واسطه، مقدار بازیابی شده استحکام کششی ماتریس (که در آن استحکام اتصال نیز وارد شده است) بدست می آید. بنابراین، تنها در حالتی می توان از ماتریس واسطه بطور مستقیم و بدون نیاز به انجام آزمایش روی ماده کامپوزیتی در جهتایی مشخص استفاده کرد که استحکام اتصال در مدل وارد شود. محاسبات نشان می دهد اختلاف مقادیر پیش بینی شده با نظریه های متفاوت در محدوده وسیعی از تغییرات زاویه الیاف چندان تغییری ندارد (شکل ۱). همچنین، با روابط داده شده برای تصحیح اجزای ماتریس واسطه، مدلی برای تعیین استحکام با در نظر گرفتن اثر عدم وجود اتصال کامل ارائه می شود. نتایج پیش بینی شده همخوانی بسیار خوبی با مقادیر تجربی دارند. بنابراین، می توان تعداد آزمونهای مشخصه سازی مورد لزوم را کاهش داد. در نهایت باید توجه داشت که در محاسبات مدل از مقادیر خواص مکانیکی، استحکام مواد تشکیل دهنده و کسر حجمی الیاف استفاده می شود. اما، مقادیر این خواص از آزمونهای مکانیکی که به طور ذاتی با پراکندگی در نتایج همراه هستند، تعیین می شوند. بنابراین، بخشی از اختلاف در مقادیر، ناشی از وجود پراکندگی همیشگی در نتایج تجربی است.

علائم

[A] ماتریس واسطه، [S] ماتریس مدول، [dε] ماتریس تغییر تفاضلی میدان کرنش، [dσ] ماتریس تغییر تفاضلی میدان تنش، E_{11} مدول طولی کامپوزیت، E_{22} مدول عرضی کامپوزیت، E_m مدول ماتریس، G_{12} مدول برشی صفحه ای، V_f درصد حجمی الیاف، V_m درصد حجمی ماتریس، ν ضریب پواسون، σ_y تنش تسلیم، τ_0 تنش هشت وجهی (octahedral)، زیروند m خواص مربوط به ماتریس و زیروند f خواص مورد نظر مربوط به الیاف را نشان می دهد.



شکل ۵ طرح مدل تعیین استحکام ماده کامپوزیت در حالت عدم وجود اتصال کامل.

استحکام

همان طور که در بخشهای قبلی نشان داده شد استفاده از مقدار اصلاح شده استحکام ماتریس، به مقدار قابل ملاحظه ای مقادیر استحکام ماده کامپوزیتی را به مقدار واقعی نزدیک می کند. از این رو با مدل فعلی، حداقل یک آزمایش عرضی ماده کامپوزیتی ضروری است تا بتوان مقدار اصلاح شده را برای استحکام ماتریس در فرایند بازیابی بدست آورد. از آنجا که در وضعیتهای زاویه ای مختلف، نوع خاصی از استحکام ماتریس یا ترکیبی از آنها مهم خواهد بود. بنابراین، این تصحیح تقریبی است. اما، با توجه به این که اختلاف مقادیر پیش بینی شده با نظریه های متفاوت در محدوده وسیعی از تغییرات زاویه الیاف (از زاویه ۹۰ به صفر) چندان تغییری ندارد (شکل ۱) این اصلاح، تقریب مناسبی است. با در نظر گرفتن محیط سه فازی (الیاف - ماتریس - اتصال) و تعیین میدان تنش و خواص هر یک می توان مدلی جامعتر، دقیقتر اما پیچیده تری بدست آورد. مدل ارائه شده در این پژوهش همان طور که از آزمونهای مشخصه سازی مواد و محاسبات خواص کشسان بدست می آید مقادیر ضرایب K_i شرایطی غیر ایده ال را در اتصال الیاف - ماتریس (فاز سوم) ماده کامپوزیتی نشان می دهند. اکنون با مشخص بودن ضرایب K و اثر آنها در اجزای ماتریس واسطه، استحکام ماده کامپوزیتی معین می شود (شکل ۵). مسیر خط توپر مربوط به حالتی است که مقدار مدول تجربی معلوم باشد. از آنجا مقادیر تصحیح شده ماتریس واسطه و K_i سپس، به کمک این مقادیر در مدل ریز مکانیک، استحکام ماده کامپوزیتی بدست می آید. مسیر خط چین برای وضعیتی است که مقدار K_i از آزمایشهای آشکارسازی آسیب تعیین شده باشد (با جدایش الیاف از ماتریس) به کمک رابطه ارائه شده در اجزای ماتریس واسطه استحکام و مدول بدست می آید.

نکته حائز اهمیت در حالت اول آن است که مقادیر مدول ماده کامپوزیتی را می توان به وسیله فنون غیر مخرب بدست آورد و از آنجا مقدار استحکام را معین کرد. در حالی که برای بدست آوردن استحکام بطور تجربی تنها می توان آزمایش تخریبی انجام داد. بنابراین، هر تلاشی برای کاستن اهمیت انجام آزمایشهای مخرب با ارزش است. نتیجه ارائه

مراجع

1. Hyer M.W., *Stress Analysis of Fiber-reinforced Composite Materials*, Boston, WCB, McGraw- Hill, Chap. 3, 1997.
2. Tsai S.W. and Hahn H.T., *Introduction to Composite Materials*, Lancaster, Technomic, Chap. 9, 1980.
3. Chamis C.C., Mechanics of Composite Materials: Past, Present and Future, *J. Comps. Technol. Res.*, **11**, 3-14, 1989.
4. Huang Z.M., Ramakrishna S. and Tay A.O.A., A Micromechanical Approach to the Tensile Strength of Knitted Fabric Composite, *J. Comps. Mater.*, **33**, 1758-1791, 1999.
5. Huang Z.M., Teng X.C. and Ramakrishna S., Bending Behavior of Laminated Knitted Fabric Reinforced Beams, *Adv. Compos. Lett.*, **10**, 211-218, 2001.
6. Huang Z.M., Progressive Flexural Failure Analysis of Laminated Composites with Knitted Fabric Reinforcement, *Mechan. Mater.*, **36**, 239-260, 2001.
7. Huang Z.M., Gopal R., Fujihara K., Ramakrishna S. and Lohpl Foong W.C., Fabrication of a New Composite Orthodontic Arch-wire and Validation by a Bridging Micromechanics Model, *Bio-materials*, **24**, 2941-2953, 2003.
8. Huang Z.M., Micromechanical Strength Formula of Unidirectional Composites, *Mater. Lett.*, **40**, 164-169, 1999.
9. Huang Z.M., A Unified Micromechanical Model for the Mechanical Properties of Two Constituent Materials, Part II: Plastic Behavior, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, **13**, 344-362, 2000.
10. Gates T.S., Chen J.L. and Sun C.T., Micromechanical Characterization of Nonlinear Behavior of Advanced Polymer Matrix Composites, Deo R.B. and Sagff D.R. (Eds.), *Compos. Mater. Test. Design*, **12**, ASTM STP 1274, 295-319, 1996.
11. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standards, **15.03**, D 3039/D 3039 M, 1983.
12. Standard Guide for Testing In-Plane Shear Properties of Composite Laminates, Annual Book of ASTM Standards, **15.03**, D4255 1983, Reapprovedm 1994.
13. Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins, Annual Book of ASTM Standards, **8.02**, D2584, 85-86, 1968, Reapproved 1985.