



مدل سازی میکرومکانیک شکست مواد مرکب با الیاف تک جهته تحت اثر بارگذاری عرضی

محمد طاهای ابدی

دانشیار، مهندسی مکانیک، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران
تهران، صندوق پستی ۸۳۴-۱۴۶۶۵، abadi@ari.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
مدل میکرومکانیکی برای تحلیل شکست مواد مرکب تقویت شده با الیاف تک جهته در بارگذاری عرضی ارائه می شود که علاوه بر مدل سازی رفتار غیرخطی زمینه در اثر بارگذاری بیش از حد تسلیم آن، قابلیت مدل سازی عیوب ناشی از جدایش بین زمینه و الیاف و ترک های زمینه را دارد. میکروساختار مواد مرکب با استفاده از سلول های واحد و با فرض متناوب بودن میکروساختار توصیف می شود که در آن الیاف به صورت منظم یا غیرمنظم توزیع شده است. مدل میکرومکانیک برای تعیین استحکام عرضی مواد مرکب با زمینه ی آلومینیوم و الیاف کربن استفاده می شود که الیاف با توجه به صلیبیت بالای آن ها با مدل الاستیک خطی همسانگرد و زمینه با مدل الاستیک-پلاستیک همسانگرد توصیف می شود. معیار پیدایش عیوب در زمینه براساس معیار حداکثر کرنش اصلی و با توجه به میزان کرنش نهایی ماده ی زمینه توصیف می شود که افزایش تنش اعمالی پس از پیدایش عیب منجر به کاهش سفتی ماده و در نهایت ایجاد ترک در ماده ی زمینه می شود. اتصال بین زمینه با استفاده از مدل چسبناکی توصیف و پیدایش عیوب در آن با توجه به میزان استحکام محوری و برشی اتصال تعیین می شود. مدل میکرومکانیک برای مطالعه ی اثر توزیع هندسی الیاف در میکروساختار، درصد حجمی الیاف، اثر استحکام اتصال بین زمینه و الیاف استفاده شده و نواحی ایجاد عیوب و نحوه ی گسترش آن ها، علاوه بر نمودارهای تنش-کرنش در ماده مرکب تعیین می شود.	دریافت: ۹۴/۹/۲۴ پذیرش: ۹۴/۱۲/۲۰ کلیدواژگان: جدایش زمینه و الیاف ترک زمینه میکرومکانیک استحکام شکست

Micromechanical fracture modeling of unidirectional composite material under transverse loading

Mohammad Tahaye Abadi

Aerospace Research Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran
P.O.B. 14665-834, Tehran, Iran, abadi@ari.ac.ir

Keywords

Fiber-matrix debonding
Matrix cracking
Micromechanics
Fracture strength

Abstract

A micromechanical model is presented to analyze the fracture response of unidirectional composite materials considering the nonlinear behavior of matrix material under loading more than the yield strength as well as the fiber-matrix debonding and matrix cracking. The composite microstructure is characterized with repeating unit cell with regular or random fiber-packing patterns. The micromechanical model is employed for composite material with aluminum matrix and carbon fibers. The high rigidity fibers are modeled as linear isotropic elastic material, while matrix material is characterized with elastic-plastic model. The damage initiation stage in matrix material is described by principal strain criterion accompanied with damage evolution considering stiffness degradation up to crack formation. The bonding between fiber and matrix is modeled using cohesive model, in which damage initiation criterion depends on the normal and shear strength of the cohesive zone. The micromechanical model is employed to study the effects of fiber distribution, fiber volume fraction, fiber-matrix bonding strength on the crack propagation through the microstructure as well as the stress-strain graph up to the fracture of microstructures.

۱- مقدمه

توجه به خواص آبدوست^۱، رطوبت زمینه مجاور الیاف را در حین فرآیند ساخت کاهش می دهد که منجر به افت استحکام زمینه در نواحی تماس با الیاف می گردد [۱]. سطح الیاف شیشه برای رفع این مشکل با ترکیب

اتصال بین زمینه و تقویت کننده تأثیر قابل توجهی بر استحکام مکانیکی مواد مرکب دارد و بررسی این اتصال از موضوعات تحقیقاتی است که از ابتدای ساخت این مواد مطرح بوده است. الیاف شیشه مورد استفاده در مواد مرکب با

1. Hydrophilic

Please cite this article using:

Tahaye Abadi, M., "Micromechanical fracture modeling of unidirectional composite material under transverse loading", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 1, pp. 93-106, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

برای تحلیل میکرومکانیک پاسخ شکست مواد مرکب با الیاف تک‌جهته تحت اثر بارگذاری عرضی به تعداد زیادی متغیر به عنوان ورودی تحلیل نیاز است که کلیه این متغیرها مستقیماً توسط تولیدکنندگان اجزای تشکیل‌دهنده مواد مرکب ارائه نمی‌شود و نیاز است روش‌های آزمایشگاهی برای تعیین آنها توسعه داده شود. تعیین خواص اتصال بین زمینه و الیاف شامل ثابت‌های سفتی و استحکام اتصال در راستای محوری و برشی، پیچیدگی زیادی دارد. در تحقیقات پیشین سعی شده بود با ساخت نمونه‌های خاص و بررسی تک رشته الیاف خواص اتصال بین زمینه و الیاف را تعیین نمایند ولی در نهایت پیگوت^۵ [۱۱] در مقاله خود بیان کرد این نتایج با شرایط واقعی و استفاده از تعداد زیادی رشته الیاف در ساختار مواد مرکب متفاوت است. پس از آن پژوهشگران تلاش کردند [۴] خواص اتصال بین زمینه و الیاف را به صورت ترکیبی از روش‌های عددی و آزمایشگاهی تعیین نمایند به طوری که استحکام اتصال بین زمینه و الیاف طوری تغییر داده شود تا بیشترین انطباق بین نتایج عددی و آزمایشگاهی ایجاد شود. پس نتایج آزمایشگاهی برای صحنه‌گذاری روش عددی استفاده نمی‌شد بلکه از ترکیب نتایج عددی و آزمایشگاهی برای تعیین ورودی مناسب برای تحلیل میکرومکانیک استفاده می‌شد.

مقاله حاضر مدل میکرومکانیکی برای تحلیل پاسخ مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف تک‌جهته تحت اثر بارگذاری عرضی ارائه می‌نماید که علاوه بر مدل‌سازی رفتار غیرخطی زمینه در اثر بارگذاری بیش از حد تسلیم آن، قابلیت مدل‌سازی عیوب ناشی از جدایش بین زمینه و الیاف و ترک‌های زمینه را دارد. مدل میکرومکانیک ضمن تعیین حداکثر ظرفیت تحمل مواد مرکب در بارگذاری عرضی، رفتار ماده را تا شکست کامل توصیف می‌نماید. نتایج این تحلیل برای ارائه مدل شکست مواد مرکب قابل استفاده است. میکروساختار مواد مرکب با استفاده از سلول‌های واحد و با فرض متناوب بودن میکروساختار توصیف می‌شود که در آن الیاف به صورت منظم یا غیرمنظم توزیع شده است. مدل میکرومکانیک برای تعیین استحکام عرضی مواد مرکب با زمینه‌ی آلومینیوم و الیاف کربن استفاده می‌شود که الیاف با توجه به صلبیت بالای آنها با مدل الاستیک خطی همسانگرد و زمینه با مدل الاستیک - پلاستیک همسانگرد توصیف می‌شود که ارتباط بین تنش- کرنش با رابطه‌ی رامبرگ- اسکود^۶ بیان می‌شود. معیار پیدایش عیوب در زمینه براساس معیار حداکثر کرنش اصلی و با توجه به میزان کرنش نهایی ماده‌ی زمینه توصیف می‌شود که افزایش تنش اعمالی پس از پیدایش عیب منجر به کاهش سفتی^۷ ماده و در نهایت ایجاد ترک در ماده‌ی زمینه می‌گردد. اتصال بین زمینه با استفاده از مدل چسبناکی توصیف می‌گردد که پیدایش عیوب در آن با توجه به میزان استحکام محوری و برشی اتصال تعیین می‌شود. مدل میکرومکانیک برای مطالعه‌ی اثر توزیع هندسی الیاف در میکروساختار، درصد حجمی الیاف، اثر استحکام اتصال بین زمینه و الیاف استفاده می‌شود و نواحی ایجاد عیوب و نحوه‌ی گسترش آنها، علاوه بر نمودارهای تنش - کرنش در ماده مرکب تعیین می‌گردد.

۲- مدل میکرومکانیک

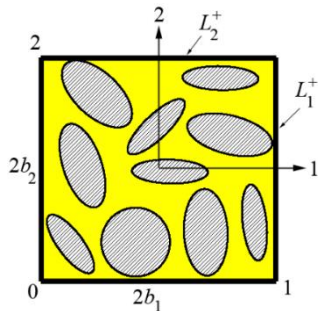
پاسخ مواد مرکب به هندسه‌ی میکروساختار، خواص اجزای تشکیل‌دهنده و نحوه‌ی اتصال اجزای مختلف وابسته است. میکروساختار مواد مرکب که بیانگر

سیلیس و هیدروژن^۱ پوشش داده می‌شود که با رطوبت رزین واکنش داده و گازی تولید می‌نماید که به صورت دفع‌کننده رطوبت^۲ عمل می‌کند. از طرف دیگر، این گاز با ماده پلیمری واکنش برقرار می‌کند و موجب بهبود اتصال بین زمینه پلیمری و الیاف شیشه می‌گردند. الیاف کربن در سطوح خود لایه‌ای ترد و شکننده دارند که باعث جدایش آسان زمینه و الیاف می‌گردند. لایه اکسیدی در سطح الیاف با فرآیند اکسیداسیون ایجاد می‌شود تا این مشکل برطرف گردد و اتصال بهتری بین زمینه و الیاف ایجاد گردد [۲]. اگرچه این عملیات موجب بهبود اتصال بین زمینه و الیاف می‌گردد ولی بررسی آزمایشگاهی مواد مرکب نشان می‌دهد یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های شکست مواد مرکب جدایش بین زمینه و الیاف است. افزایش قابل توجه تنش به صورت موضعی در این نواحی و احتمال تجمع عیوب، از مهم‌ترین عوامل ایجاد شکست در اتصال بین زمینه و الیاف است [۳]. جدایش بین مواد زمینه و الیاف و ترک‌های ریز در زمینه عامل شکست مواد مرکب تحت اثر بارگذاری عرضی تعیین شده است که این ترک‌ها ممکن است به لایه‌های دیگر در مواد مرکب چند لایه منتشر شود و حتی عاملی برای جدایش بین لایه‌ای در این مواد می‌گردد [۴].

مطالعات آزمایشگاهی مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف تک‌جهته تحت اثر بارگذاری عرضی نشان داده است که جدایش بین زمینه و الیاف مهم‌ترین مکانیزم شکست است [۵]. هابای برونکن^۳ و همکارانش [۴] تصاویری از میکروساختار ماده مرکب اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن با استفاده از میکروسکوپ الکترونیکی تهیه کردند که بارگذاری محوری عرضی به این مواد اعمال می‌شد. این تصاویر نشان می‌دهد ترک در ماده مرکب از نواحی اتصال بین زمینه و الیاف شروع می‌شود و پس از قطع اتصال در نواحی بین زمینه و الیاف، پل باریکی از جنس زمینه بین این نواحی ایجاد می‌شود که منجر به تغییر شکل پلاستیک و در ادامه پیدایش ترک‌هایی در مواد زمینه تحت اثر تنش بیش از حد می‌گردد که شکست کامل ماده مرکب تحت اثر بارگذاری عرضی پس از رشد کامل ترک در زمینه اتفاق می‌افتد. تصاویر جدایش بین زمینه و الیاف با روش تصویر برداری با پرتو ایکس تهیه شده است [۶]. توزیع هندسی الیاف در زمینه اثر قابل توجهی بر میزان تنش در نواحی مشترک و در نتیجه جدایش بین زمینه و الیاف دارد [۷]. پس استحکام عرضی مواد مرکب به عواملی شامل خواص اجزای تشکیل‌دهنده، خواص اتصال بین اجزاء، توزیع هندسی الیاف، قطر الیاف و حتی میزان تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند ساخت وابسته است [۸]. مدل‌سازی میکرومکانیک روش مناسبی برای تعیین استحکام مواد مرکب تحت اثر بارگذاری مورد نظر است. تاکنون روش‌های میکرومکانیک متعددی برای تعیین استحکام عرضی مواد مرکب با قابلیت مدل‌سازی شرایط پیدایش و رشد عیوب در میکروساختار ارائه شده است [۷]. سلول‌های واحدی با فرض متناوب بودن میکروساختار مواد مرکب در این مدل‌های میکرومکانیک در نظر گرفته شده است که الیاف به صورت منظم یا تصادفی در آنها توزیع شده است [۹]. لیورکا^۴ و همکارانش [۱۰] مدل میکرومکانیکی برای ماده مرکب کربن- اپوکسی برای مطالعه‌ی رشد ترک و تعیین استحکام نهایی ارائه دادند. آنها مدل چسبناکی برای بررسی اتصال بین زمینه و الیاف همراه با رفتار غیرخطی برای زمینه ناشی از اعمال تنش بیش از حد در نظر گرفتند.

1. Silane (SiH₄)
2. Hydrophobic
3. Hobbiebruncken
4. Llorca

5. Piggott
6. Ramberg-Osgood relationship
7. Stiffness



شکل ۱ هندسه اولیه سلول واحد تکرارشونده

در هندسه مرجع لبه‌های سلول واحد موازی با محورهای دستگاه مختصات دکارتی ثابتی است که مبدأ این دستگاه مختصات در مرکز سلول واحد قرار دارد. مؤلفه‌های بردار موقعیت اولیه نقاط در داخل یا مرزهای سلول واحد با (X_1, X_2) نشان داده می‌شود و مؤلفه‌های بردار موقعیت کنونی نقاط با توابع $(x_1(x_1, x_2), x_2(x_1, x_2))$ توصیف می‌شوند. اضلاع سلول واحد در هندسه مرجع که عمود بر محور i است با L_i^+ و L_i^- نشان داده می‌شود که این لبه‌های محور i را به ترتیب در فاصله‌ی $X_i = +b_i$ و $X_i = -b_i$ قطع می‌کند. جابه‌جایی نقطه‌ای که در هر مرز واقع شده است با استفاده از جابه‌جایی نقطه واقع در رأس سلول واحد توصیف می‌شود که در شکل ۱ با نقاط شماره‌ی صفر، یک و دو معرفی شده است. نقاط واقع در رأس سلول واحد اصطلاحاً نقاط مرجع نامیده می‌شود. مؤلفه‌های بردار موقعیت نقطه مرجع شماره I با توابع $(x_1^{(I)}, x_2^{(I)})$ توصیف می‌شود. موقعیت جدید هر نقطه که بر روی مرز L_i^- واقع شده است نسبت به نقطه‌ی صفر اندازه‌گیری می‌شود و نقاط واقع بر سطوح L_1^+ و L_2^+ به ترتیب نسبت به نقاط یک و دو اندازه‌گیری می‌شود. این نقاط اصطلاحاً نقاط مرجع نامیده می‌شوند.

شرایط مرزی متناوبی به مرزهای سلول واحد تکرارشونده اعمال می‌شود. سازگاری دو مرز در مقابل یکدیگر براساس شرایط مرزی متناوب بدین صورت بیان می‌شود:

(الف) شرایط سینماتیکی: به منظور جلوگیری از نفوذ یا جلوگیری از جدایش دو سلول واحد مجاور هم باید دو سطح تغییر شکل یکسانی داشته باشند [۱۶].

$$x_{i(-b_1, x_2)} - x_i^{(0)} = x_{i(b_1, x_2)} - x_i^{(1)} \quad i = \{1, 2\} \quad (1-f)$$

$$x_{i(x_1, -b_2)} - x_i^{(0)} = x_{i(x_1, b_2)} - x_i^{(2)} \quad i = \{1, 2\} \quad (1-b)$$

(ب) شرایط مرزی طبیعی: نیروهای سطحی در دو مرزهای مجاور هم و واقع بر دو سلول واحد مجاور هم باید پیوسته باشند. برای این منظور شرایط تعادل بیان می‌کند مقدار نیروهای سطحی در دو سطح مقابل هم باید برابر ولی در جهت مخالف با یکدیگر باشد [۱۳]. نیروهای سطحی که بر سطوح مرزی سلول واحد تکرارشونده اعمال می‌شود با توجه به تانسور تنش کوشی^۴ اعمالی بر هندسه تغییر شکل یافته‌ی یا تنش نامی اعمالی بر هندسه مرجع بیان می‌شود. از آنجا که پیوستگی نیروهای سطحی برای دو نقطه‌ی متناظر در لبه‌های مقابل هم در هندسه مرجع تعریف می‌شود تانسور تنش نامی و هندسه مرجع برای بیان شرایط مرزی طبیعی در قید متناوبی استفاده می‌شود.

$$-P_{1j(-b_1, x_2)}^{RUC} = P_{1j(b_1, x_2)}^{RUC} \quad j = \{1, 2\} \quad (2-f)$$

$$-P_{2j(x_1, -b_2)}^{RUC} = P_{2j(x_1, b_2)}^{RUC} \quad j = \{1, 2\} \quad (2-b)$$

4. Cauchy

هندسه‌ی اجزای مختلف، نحوه‌ی توزیع و درصد حجمی آنها است به دو دسته میکروساختارهای متناوب^۱ و میکروساختارهای همگن آماری^۲ تقسیم‌بندی می‌شود [۱۲].

میکروساختارهای متناوب با استفاده از یک سلول واحد تکرارشونده توصیف می‌شود که جزء اولیه برای ایجاد میکروساختار است و با تکرار آن در دو یا سه راستای عمود بر هم می‌توان میکروساختار متناوب را ایجاد کرد. بنابراین کل آرایه‌ای از سلول واحد تکرارشونده تحت اثر بارگذاری یکنواخت ماکروسکوپیکی دارای پاسخ یکسانی با سلول واحد تکرارشونده تحت اثر همین بارگذاری است.

میکروساختارهای همگن آماری پیچیده‌تر است زیرا معمولاً تعریف دقیق توپولوژی ساختار آن مشکل و گاهی غیرممکن است. ساختارهای نامتقارن با کوچک‌ترین المان حجمی تحت عنوان المان حجمی توصیف‌گر^۳ میکروساختار ارزیابی می‌شوند که دارای کسر حجمی یکسانی از فازهای مختلف است و این فازها با تابع آماری یکسانی مطابق با ماده‌ی ناهمگن در المان حجمی توزیع شده است. به منظور دستیابی به هدف اصلی تحلیل میکرومکانیک یک المان حجمی همگن شده متناظر با المان حجمی توصیف‌گر مواد ناهمگن تعریف می‌شود. هنگامی که چنین المان حجمی همگن شده تحت اثر گرادین تغییر شکل یکنواختی در مرزهای آن باشد توزیع تنش یکنواختی در مرزهای جسم علاوه بر کل حجم المان حجمی ایجاد می‌شود. چنین شرایط مرزی که شرایط مرزی همگن جابه‌جایی و نیروهای سطحی نامیده می‌شود برای تعیین رفتار ماکروسکوپیکی معادل المان حجمی توصیف‌گر استفاده می‌شود. این المان از مواد ناهمگن باید طوری انتخاب شود که اعمال شرایط مرزی جابه‌جایی یکنواخت منجر به ایجاد شرایط مرزی نیروی سطحی یکنواخت شود و یا برعکس، اعمال شرایط مرزی نیروی سطحی یکنواخت منجر به ایجاد شرایط مرزی جابه‌جایی یکنواخت شود. چنین شرایط مرزی برای محاسبه انرژی یکسان در هر دو المان حجمی توصیف‌گر و همگن شده معادل تحت اثر تغییر شکل یکسان ضروری است. از آنجا که ناهمگنی مواد چند مرتبه کوچک‌تر از ابعاد کلی جسم است تغییر شکل اطراف یک ناخالصی را می‌توان با تقریب خوبی با تغییر شکل اطراف ناخالصی‌های موجود در همسایگی آن برابر دانست [۱۳]. مشاهدات آزمایشگاهی [۱۴] این موضوع را تصدیق می‌کند و نشان داده است تغییر شکل اطراف یک المان حجمی را می‌توان به علت کوچک بودن ابعاد آن با تقریب خوبی با تغییر شکل المان حجمی در همسایگی آن یکسان دانست. ابعاد المان حجمی در مقایسه با ابعاد کلی میکروساختار به اندازه‌ی کافی کوچک انتخاب می‌شود تا خواص مؤثر آن مستقل از ابعاد و موقعیت انتخاب المان حجمی در داخل میکروساختار باشد. بنابراین میکروساختاری که با المان حجمی متناوب توصیف می‌شود سطوح آن به صورت متناوب تغییر شکل می‌دهد. مدل‌سازی تغییر شکل متناوب نتایج مناسبی ارائه می‌کند که منجر به برآورد دقیق خواص مواد ناهمگن مختلفی شده است [۱۵]. بنابراین در این تحقیق از سلول واحد تکرارشونده برای توصیف میکروساختار مواد مرکب در تحلیل میکرومکانیک مواد مرکب استفاده می‌شود.

سطح مقطع میکروساختار متناوب از ماده‌ی ناهمگنی در نظر بگیرید که هندسه‌ی اولیه سلول واحد تکرارشونده‌ی در آن مطابق با شکل ۱ به صورت یک مستطیل به ابعاد $2b_1 \times 2b_2$ است.

1. Periodic microstructures
2. Statistical homogeneous microstructures
3. Representative Volume Element (RVE)

که β ثابت چنین تعریف می‌شود:

$$\beta = K \left(\frac{\sigma_Y}{E} \right)^{\frac{1}{n}-1} \quad (7)$$

جزء دوم رابطه‌ی رامبرگ- اسکود بیانگر ارتباط غیرخطی بین تنش و کرنش برای مقدار تنش کمتر از حد تسلیم است؛ ولی از آنجا که مقدار کرنش پلاستیک که با این رابطه در مقدار تنش تسلیم محاسبه می‌شود بسیار کوچک است منجر به خطای بسیار کمی در محاسبات می‌شود. کرنش پلاستیک در تنش تسلیم مطابق با رابطه‌ی (۶) برابر با $\beta \frac{\sigma_Y}{E}$ است که برای مواد رایج عدد بسیار کوچکی است و مقدار آن متناظر با تنش نهایی مطابق با رابطه‌ی (۶) برابر است با:

$$\varepsilon_p^f = \beta \frac{\sigma_Y}{E} \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_Y} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

بنابراین ضریب β برابر است با:

$$\beta = \left[\frac{\sigma_Y}{E \varepsilon_p^f} \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_Y} \right)^{\frac{1}{n}} \right]^{-1} \quad (9)$$

تنش تسلیم و تنش نهایی برای آلومینیوم آلیاژی مقادیر ۲۷۰ و ۴۲۰ مگاپاسکال و درصد افزایش طول در شکست مقدار ۱۵ درصد اندازه‌گیری شده است و توان کرنش سختی برای آلومینیوم مقدار ۰/۱۷ گزارش شده است [۱۹]. پس مقدار ضریب β برای ماده‌ی آلومینیوم زمینه با جایگذاری مقادیر مدول الاستیک، کرنش شکست، توان کرنش سختی، استحکام تسلیم و نهایی در رابطه‌ی (۹) برابر با ۲/۸۹۱ است.

اتصال بین الیاف و زمینه و جدایش بین آنها در اثر بارگذاری اعمالی به سلول واحد با استفاده از مدل چسبناک در سطح مشترک بین آنها توصیف می‌گردد. در این مدل ضخامتی برای ناحیه اتصال بین زمینه و الیاف در نظر گرفته نمی‌شود و با فرض اولیه اتصال کامل بین سطوح زمینه و الیاف، نیروی سطحی عمود بر سطح و تنش برشی مماس در دو راستای عمود بر هم با توجه به میزان جابه‌جایی در راستای آنها بدین صورت محاسبه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix} \quad (10)$$

که t_n و t_s به ترتیب نیروی سطحی و جابه‌جایی محوری در راستای عمود بر سطح الیاف، t_t و δ_s به ترتیب نیروی سطحی برشی و جابه‌جایی در راستای محور s ، t_t و δ_t به ترتیب نیروی سطحی برشی و جابه‌جایی در راستای محور t است که محورهای s و t مماس بر سطح الیاف و عمود بر یکدیگر هستند. از طرفی K_{nn} ، K_{ss} ، K_{tt} مقادیر سفتی در راستای محورهای n ، s و t است. مقادیر سفتی اتصال به صورت آزمایشگاهی یا براساس خواص ماده زمینه تعیین می‌شود. در روش آزمایشگاهی نمونه‌ای از اتصال تحت اثر بارگذاری محوری یا برشی قرار داده می‌شود و میزان نیرو و جابه‌جایی متناظر آن اندازه‌گیری می‌شود و مقدار سفتی با استفاده از شیب نمودار نیرو در واحد سطح - جابه‌جایی تعیین می‌شود. برای محاسبه سفتی براساس مدول الاستیک زمینه، ضخامتی برای اتصال فرض می‌شود و با توجه به نسبت مقادیر E/T_c و G/T_c به ترتیب سفتی محوری و برشی تعیین می‌شود که T_c ضخامت اتصال، E مدول الاستیک و G مدول برشی است. مقادیر سفتی در این مقاله با توجه به خواص الاستیک زمینه و فرض ضخامت واحد برای اتصال تعیین می‌گردد.

که P_{ij}^{RUC} مؤلفه‌های تنش نامی در سلول واحد تکرار شونده است. برای ارتباط هندسه‌ی تغییر شکل یافته در مقیاس میکروسکوپی و ماکروسکوپی فرض می‌شود تانسور گرادیان تغییر شکل در نقطه‌ای از میکروساختار برابر با میانگین حجمی این تانسور در سلول واحد متناظر با آن نقطه باشد. از آنجا که تانسور گرادیان تغییر شکل براساس هندسه‌ی اولیه تعریف می‌شود میانگین حجمی در کل حجم اولیه سلول واحد تعیین می‌شود. از میانگین گیری حجمی تانسور گرادیان تغییر شکل در کل حجم سلول واحد و استفاده از قضیه‌ی گوس^۱ نتیجه می‌شود [۱۷]:

$$F_{ij} = \frac{x_i^{(j)} - x_i^{(0)}}{2b_j} \quad (\text{No summation on } j) \quad (3)$$

اصل بقای انرژی برای بیان ارتباط بین تانسورهای تنش در مقیاس ماکروسکوپی و میکروسکوپی استفاده می‌شود. لذا در نقطه‌ی معینی از میکروساختار باید نرخ انرژی داخلی در مقیاس ماکروسکوپی برابر با نرخ انرژی داخلی مورد نیاز برای اعمال تغییر شکل به سلول واحد مرتبط به آن نقطه باشد [۱۳]. این اصل برای حالتی که سلول واحد تحت اثر تنش عرضی است بدین صورت ساده می‌شود:

$$P_{22} = \frac{1}{L_2^+} \int_{L_2^+} t_2(x_1, b_2) dX_1 \quad (4)$$

که P_{22} تنش محوری نامی در مقیاس ماکروسکوپی و t_2 مؤلفه‌ی تنش سطحی در راستای محور ۲ است.

۳- خواص مواد

ماده مرکب متشکل از الیاف کربن و زمینه‌ی آلومینیوم در این تحقیق بررسی می‌شود که الیاف آن در سلول واحد با توجه به استحکام بسیار بالای در مقایسه با زمینه و استحکام اتصال بین زمینه و الیاف، به صورت ماده الاستیک خطی همسانگرد در نظر گرفته می‌شود. مدول الاستیک الیاف کربن تغییرات زیادی با توجه به شرایط ساخت دارند و به سه دسته مدول متوسط (IM)، مدول بالا (HM) و مدول فوق‌العاده بالا (UHM) تقسیم بندی می‌شوند [۱۸]. در این تحقیق مدول الاستیک و ضریب پواسون به ترتیب مقدار ۲۵۰ گیگاپاسکال و ۰/۲ انتخاب می‌شود. زمینه آلومینیومی به صورت ماده الاستیک - پلاستیک مدل‌سازی می‌گردد که رفتار آن در ناحیه‌ی پلاستیک براساس معیار فون - میزز بیان شده و کارسختی آن به صورت همسانگرد در نظر گرفته می‌شود. مدول الاستیک و ضرایب پواسون زمینه به ترتیب ۷۰ گیگاپاسکال و ۰/۳۳ است و ارتباط بین تنش و کرنش واقعی براساس رابطه‌ی رامبرگ- اسکود توصیف می‌شود به طوری که کرنش ایجاد شده در ماده از جمع کرنش الاستیک و کرنش پلاستیک بدست می‌آید. کرنش الاستیک با استفاده از رابطه‌ی خطی و برحسب تنش اعمالی و مدول الاستیک توصیف می‌گردد در صورتی که مقدار کرنش پلاستیک با رابطه‌ی نمایی بیان می‌شود. در این صورت ارتباط تنش و کرنش برای بارگذاری تک‌جهته را می‌توان طبق رابطه (۵) نوشت.

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma}{E} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

که K ضریب استحکام و n توان کرنش سختی است. اگر σ_Y تنش تسلیم ماده باشد این رابطه را می‌توان بدین صورت بیان کرد (رابطه ۶).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \left(\frac{\sigma_Y}{E} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^{\frac{1}{n}} = \frac{\sigma}{E} + \beta \frac{\sigma_Y}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_Y} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

1. Gauss

شاخص عیب بیان می‌شود که تغییرات این شاخص با توجه به جابه‌جایی معادل در ناحیه اتصال تعیین می‌شود که مقدار جابه‌جایی معادل با استفاده از رابطه‌ی (۱۳) تعیین می‌شود. در این تحقیق از مدل ریاضی خطی برای تعیین شاخص عیب برحسب جابه‌جایی استفاده می‌شود که توسط کامانهو^۱ و داویلا^۲ ارائه شده است [۲۰]. بنابراین روش محاسبه شاخص عیب و افت استحکام ماده بدین صورت است که قبل از ارضا شرایط ایجاد عیب طبق رابطه‌ی (۱۱)، شاخص عیب صفر است و بعد از ایجاد عیب در اتصال، مقدار شاخص عیب برحسب جابه‌جایی معادل در هر لحظه محاسبه می‌شود. باید توجه شود مقدار شاخص عیب با افزایش مقدار جابه‌جایی معادل افزایش می‌یابد ولی مقدار شاخص عیب در اثر باربرداری و کاهش جابه‌جایی معادل تغییر داده نمی‌شود و برابر بیشترین مقدار ایجاد شده در تاریخچه بارگذاری است.

گاهی ظرفیت تحمل اتصال بین زمینه و الیاف موجب جابه‌جایی ناگهانی نقاط واقع در سطح مشترک نسبت به یکدیگر می‌شود که موجب واگرایی روش تحلیل می‌شود. برای رفع این مشکل، تنش لازم برای ایجاد جابه‌جایی نسبی بین نقاط واقع در سطح مشترک متناسب با سرعت جابه‌جایی است که ضریب ویسکوزیته به عنوان ضریب تناسب معرفی می‌شود.

افزایش بارگذاری در سلول واحد علاوه بر ایجاد ترک در سطح اتصال بین زمینه و الیاف و جدایش بین آنها، منجر به رشد ترک به داخل زمینه می‌شود. معیار پیدایش عیوب در مواد شکل‌پذیر مانند آلومینیوم براساس مدل جوانه‌زنی حفره‌های میکروسکوپی، رشد و به هم پیوستگی آنها توصیف می‌شود [۲۱]. این مدل‌ها براساس کرنش پلاستیک معادل بیان می‌شود [۲۲] که مقدار مؤلفه‌های کرنش پلاستیک با مدل‌های پلاستیک ماده مانند فون میزز یا جانسون-کوک^۳ و یا دراکر-پراگر^۴ تعیین می‌شود. در این تحقیق نرخ مؤلفه‌های کرنش پلاستیک با استفاده از مدل پلاستیک فون میزز محاسبه می‌شود. نرخ کرنش پلاستیک معادل برحسب مؤلفه‌های نرخ کرنش پلاستیک بدین صورت بیان می‌شود.

$$\dot{\epsilon}_{eq}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p} \quad (14)$$

که $\dot{\epsilon}_{eq}^p$ نرخ کرنش پلاستیک معادل و $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ مؤلفه‌های نرخ کرنش پلاستیک است و جمع در اندیس‌های تکراری در این رابطه در نظر گرفته می‌شود. مقادیر کرنش پلاستیک با انتگرال‌گیری از نرخ کرنش پلاستیک محاسبه می‌شود و با مقدار مجاز کرنش پلاستیک معادل مقایسه می‌شود. در صورتی که کرنش پلاستیک معادل در نقاطی از ماده‌ی زمینه‌ی آلومینیومی سلول واحد مطابق با شکل ۲ برابر با $\bar{\epsilon}_0^p$ است عیوب در زمینه ایجاد می‌شود. در این تحقیق فرض می‌شود میانگین تنش اعمالی اثری بر کرنش پلاستیک معادل و کرنش متناظر با پیدایش عیوب ندارد. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است افزایش کرنش پلاستیک معادل موجب کاهش ظرفیت تحمل تنش در ماده پس از پیدایش عیب به‌طور می‌شود که مشابه با اتصال چسبناک با استفاده از شاخصی D توصیف می‌شود. مقدار تنش در زمینه پس از پیدایش عیب برحسب این شاخص مطابق با شکل ۲ بدین صورت تعیین می‌شود.

$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma} \quad (15)$$

استحکام اتصال بین دو سطح در مدل چسبناک با استفاده از استحکام کششی عمود بر سطح و استحکام برشی مماس بر سطوح در دو راستای عمود بر هم محاسبه می‌شود. در صورتی که تنش کششی یا تنش برشی اعمالی به ناحیه‌ی اتصال از مقادیر استحکام متناظر آنها مساوی شود عیب در اتصال ایجاد می‌شود و با افزایش تنش‌های اعمالی، استحکام اتصال کاهش می‌یابد که نحوه‌ی تغییرات آن می‌تواند به‌صورت خطی یا غیرخطی نسبت به مقدار افزایش تنش تغییر داده شود. شایان ذکر است تنش فشاری عمود بر سطح موجب ایجاد عیب در اتصال نمی‌شود و افزایش تنش کششی تا مقدار استحکام عمود بر سطح باعث ایجاد عیب می‌شود در صورتی که عیوب ناشی از تنش برشی وابسته به جهت اعمالی تنش برشی مماس نیست. بنابراین معیار پیدایش عیب بدین صورت بیان می‌شود:

$$\max \left\{ \frac{t_n}{S_n}, \frac{t_s}{S_s}, \frac{t_t}{S_t} \right\} = 1 \quad (11)$$

که S_n استحکام محوری در راستای عمود بر سطح الیاف، S_s استحکام برشی در راستای محور s ، S_t استحکام برشی در راستای محور t است. عملگر $\langle \dots \rangle$ برای متغیر مثبت برابر با متغیر و برای متغیر منفی برابر صفر است. پس از پیدایش عیب در سطح تماس، استحکام اتصال بین الیاف و زمینه با توجه به میزان تنش اعمالی کاهش می‌یابد. کمیت اسکالری تحت عنوان شاخص عیب برای توصیف میزان کاهش ظرفیت تحمل در سطوح معیوب تعریف می‌شود که مقدار آن قبل از ایجاد عیب و در لحظه‌ی ایجاد آن صفر است. شاخص عیب نسبت کاهش استحکام در اتصال دارای عیب به مقدار اولیه استحکام اتصال بدون عیب تعریف می‌شود. پس شاخص عیب با افزایش بارگذاری به‌صورت پیوسته از مقدار صفر افزایش می‌یابد و مقدار آن با حذف کامل ظرفیت تحمل بار برابر با یک می‌شود که در این لحظه جدایش بین الیاف و زمینه ایجاد می‌شود. بنابراین ظرفیت تحمل بار در راستای عمود و مماس بر سطح تماس زمینه با الیاف پس از پیدایش عیب و با افزایش تغییر شکل در نواحی معیوب بدین صورت محاسبه می‌شود.

$$t_n = \begin{cases} (1 - D)T_n & t_n \geq 0 \\ T_n & t_n < 0 \end{cases} \quad (12\text{-الف})$$

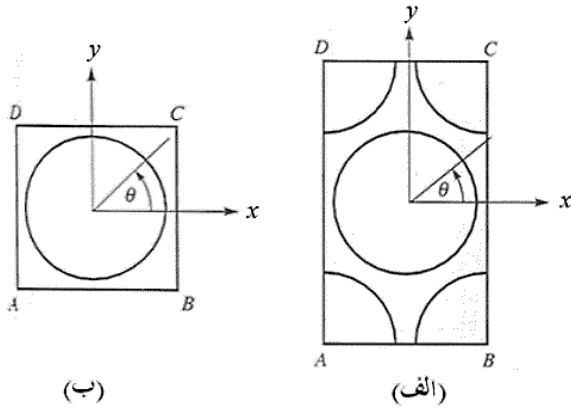
$$t_s = (1 - D)T_s \quad (12\text{-ب})$$

$$t_t = (1 - D)T_t \quad (12\text{-ج})$$

که D شاخص عیب، T_n مقدار استحکام محوری، T_s و T_t مقادیر استحکام برشی است که این مقادیر استحکام براساس رفتار تنش - کرنش اتصال بدون عیب و براساس میزان کرنش ماده تعیین می‌گردند. حالت اول رابطه‌ی (۱۲-الف) در شرایطی انتخاب می‌شود که تنش محوری اعمالی به سطح مشترک الیاف و زمینه به صورت کششی و بیش از ظرفیت تحمل اتصال باشد. در صورتی که حالت دوم رابطه‌ی (۱۲-الف) برای شرایط بارگذاری محوری فشاری است که تمایلی به ایجاد عیوب در سطح اتصال زمینه و الیاف ندارد و تغییری در استحکام اتصال ایجاد نمی‌کند. کرنشی که موجب جدایش زمینه از الیاف می‌شود با توجه به طول ویژه المان برحسب جابه‌جایی در محل اتصال بیان می‌شود. جابه‌جایی معادل ناشی از جابه‌جایی در راستای عمود و مماس بر سطح اتصال بدین صورت تعریف می‌شود.

$$\delta_m = \sqrt{(\delta_n)^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2} \quad (13)$$

که δ_n جابه‌جایی کششی عمود بر سطح مشترک زمینه و الیاف، δ_s و δ_t میزان جابه‌جایی برشی در دو راستای مماس بر سطح مشترک است. میزان کاهش استحکام اتصال ناشی از ایجاد عیب در مقایسه با اتصال سالم بر حسب



شکل ۳ سلول واحد با آرایش مربعی الیاف (ب) سلول واحد با آرایش شش ضلعی

بهمنظور ارزیابی خواص ماده مرکب تحت اثر بارگذاری جابه جایی محوری در راستای محور ۲، تانسور گرادیان تغییر شکل برای تغییر شکل ماکروسکوپی بدین صورت بیان می شود.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

که λ_1 و λ_2 به ترتیب مقادیر نسبت افزایش طول سلول واحد در راستای محورهای ۱ و ۲ در مقیاس ماکروسکوپی است.

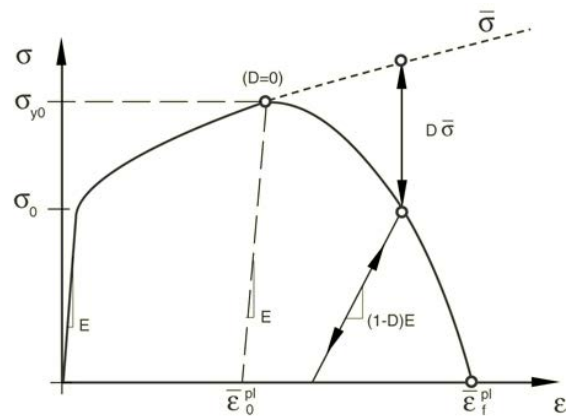
اعمال نیروی کششی در راستای محور ۲ در نظر گرفتن مقدار معینی برای مقدار λ_2 ایجاد می شود در صورتی که مقدار تغییر طول در راستای محور ۱ براساس شرایطی محاسبه می شوند که نیروهای سطحی عمود بر این محور صفر است. جابه جایی نقطه مرجع در بارگذاری کششی در راستای محور ۲ با استفاده از رابطه (۳) را می توان بدین صورت محاسبه کرد.

$$u_2^{(2)} = 2b_2(\lambda_2 - 1), u_1^{(2)} = 0 \quad (17)$$

نقطه مرجع صفر در معادلات فوق ثابت در نظر گرفته شده است تا از جابه جایی صلب سلول واحد جلوگیری شود بدون آنکه لطمه ای به کلی بودن نتایج بدست آمده از تحلیل میکرومکانیک وارد باشد.

کرنش عرضی نهایی مورد نظر برحسب جابه جایی عرضی نقطه مرجع شماره ۲ محاسبه می شود. کل مقدار جابه جایی به تعداد معینی نمو جابه جایی تقسیم می شود و جابه جایی عرضی در هر نمو افزایش داده می شود. هندسه ی تغییر شکل یافته و توزیع تنش در کل سلول واحد سلول واحد با حل معادلات تعادل و معادله ی مشخصه ی مواد تشکیل دهنده و شرایط اتصال و معیارهای شکست در اتصال بین زمینه و الیاف و ماده زمینه با تحلیل اجزای محدود غیرخطی تعیین می شود. در صورتی که نتایج تحلیل غیرخطی بعد از تعداد ۸ تکرار همگرا نشد نمو جابه جایی به یک چهارم مقدار قبلی خود کاهش داده می شود و تحلیل غیرخطی تکرار می شود. در صورت همگرایی تحلیل غیرخطی نیروی سطحی اعمالی به سطح L_2^+ مطابق با رابطه (۴) و با انتگرال گیری تنش محوری در راستای محور ۲ محاسبه می شود و با تقسیم نتیجه بر مساحت سطح L_2^+ مقدار تنش ماکروسکوپی اعمالی به سلول واحد تعیین می شود. مقدار کرنش ماکروسکوپی با توجه به مقدار جابه جایی نقطه مرجع و ابعاد سلول واحد تعیین می شود. این مراحل تا اعمال کرنش عرضی مورد نظر تکرار می شود.

بارگذاری سلول واحد برای تحلیل استحکام محوری مواد مرکب در جهت عمود بر الیاف به صورت افزایش طول در راستای محور ۲ در نظر گرفته می شود. یک چهارم سلول واحد با توجه به تقارن سلول واحد و بارگذاری



شکل ۴ شماتیکی از نمودار تنش - کرنش با در نظر گرفتن کاهش پیوسته ظرفیت تحمل بار ناشی از ایجاد عیب در ماده

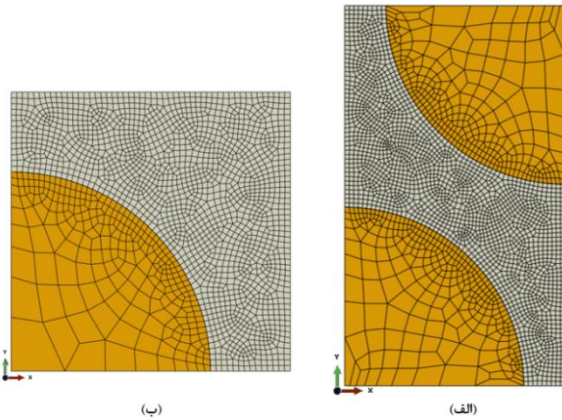
که σ و $\bar{\sigma}$ به ترتیب تنش در ماده ی بدون عیب و پس از ایجاد عیب است. مقدار شاخص عیب در لحظه ی پیدایش عیب صفر است ولی پس از اعمال کرنش پلاستیک معادل بیشتر از حد مجاز به صورت پیوسته تا مقدار یک افزایش داده می شود که در این حالت کرنش پلاستیک معادل برابر با ϵ_f^p است و ماده مقاومتری در برابر تغییر شکل ندارد و در این نواحی ترک ایجاد می شود. مقدار کرنش پلاستیک معادل در لحظه ی ایجاد ترک برحسب طول ویژه المان^۱ و میزان جابه جایی تعریف می شود. کرنش پلاستیک معادل براساس کرنش گسیختگی آلومینیوم و مقدار ۰/۱۵ انتخاب شده است که در این حالت ترک (یا جدایش بین دو قسمت ماده زمینه) ایجاد می شود.

۴- نتایج

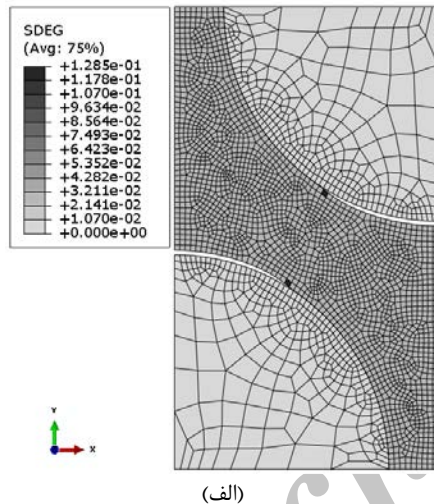
همان طور که در بخش اول بیان شد جدایش بین زمینه و الیاف در مواد مرکب تقویت شده با الیاف تک جهته در بارگذاری محوری در راستای عمود بر الیاف مهم ترین عامل در ایجاد عیوب و شکست مواد مرکب است. بنابراین در این تحقیق پاسخ میکرومکانیک مواد مرکب تحت اثر بارگذاری عرضی تعیین می گردد که در آن اثر جدایش بین زمینه و الیاف علاوه بر شکست در زمینه در نظر گرفته می شود. ساختار مواد مرکب به صورت متناوب در نظر گرفته می شود به طوری که کل ساختار مواد مرکب را می توان از تکرار سلول واحد در سه راستای عمود بر هم ایجاد نمود. در این بخش فرض می شود توزیع الیاف در میکروساختار متناوب مواد مرکب به صورت منظم و الیاف با آرایش مربعی یا شش ضلعی توزیع شده است که هندسه ی آنها در شکل ۳ نشان داده شده است. سطوح المان با توجه برای اعمال شرط متناوبی بودن تغییر شکل و با توجه به تقارن هندسی سلول واحد در بارگذاری عرضی مسطح باقی می ماند. با توجه به تقارن هندسی سلول واحد و بارگذاری اعمالی یک چهارم هندسه سلول واحد تحلیل می شود و جابه جایی در سطوح تقارن صفر در نظر گرفته می شود. درصد حجمی الیاف در آرایش منظم مربعی و شش ضلعی برحسب ابعاد سلول واحد و قطر الیاف تعیین می شود. در این بخش درصد حجمی الیاف ۶۰ درصد کل حجم سلول واحد در نظر گرفته می شود که در این صورت نسبت شعاع الیاف به ابعاد سلول واحد با آرایش الیاف مربعی ۰/۸۷۴ است. در سلول واحد با آرایش شش ضلعی نسبت ابعاد ارتفاع به پهنا $\sqrt{3}$ است و با توجه به کسر حجمی ۶۰ درصد الیاف، نسبت شعاع الیاف به کوچک ترین ابعاد سلول واحد مقدار ۰/۸۱۳ محاسبه می شود.

1. Characteristic element length

حتی‌الامکان جلوگیری کرد. بررسی تحلیل غیرخطی در شرایط مختلف نشان داده ضریب ویسکوزیته کوچک $0.1/0.1$ پاسکال ثانیه برای همگرایی نتایج مناسب است.



شکل ۴ هندسه اولیه و المان‌بندی سلول واحد دارای توزیع الیاف با آرایش منظم (الف) شش ضلعی (ب) مربعی



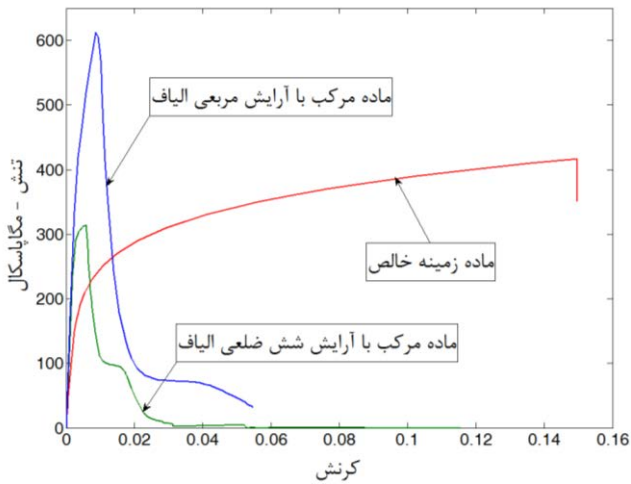
شکل ۵ تغییر شکل سلول واحد با آرایش الیاف شش ضلعی و میزان تغییر شاخص عیب تحت اثر کرنش عرضی (الف) $1/34$ درصد، (ب) $5/22$ درصد

نظر گرفته می‌شود و جابه‌جایی عمود بر لبه سلول واحد در خطوط تقارن صفر در نظر گرفته می‌شود. هندسه متقارن سلول واحد و شرط متناوب بودن تغییر شکل سطوح آن ایجاب می‌کند لبه‌های عمود بر محورهای ۱ و ۲ به صورت مستقیم و موازی با حالت اولیه باشد [۲۳]. بنابراین لبه‌ی خارجی عمود بر محورهای ۱ و ۲ به صورت مستقیم و در راستای این محور جابه‌جا می‌شود.

پاسخ سلول واحد تحت اثر بارگذاری عرضی با استفاده از نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس^۱ تعیین می‌شود. شکل ۴ هندسه اولیه سلول‌های واحد ماده مرکب با ۶۰ درصد الیاف و المان‌بندی متناظر آنها را نشان می‌دهد که دارای آرایش منظم الیاف شش ضلعی و مربعی است. اندازه کلی المان در زمینه $1:50$ اندازه کلی سلول واحد است و اندازه سطح الیاف در تماس با زمینه نیز با اندازه یکسان با زمینه المان‌بندی شده است تا با انطباق گره‌های المان‌های الیاف و زمینه در مرز مشترک هندسه اولیه، دقت محاسبه افزایش یابد. به علت صلبیت بالای الیاف در مقایسه با زمینه، تغییر شکل کمی در المان‌های الیاف ایجاد می‌شود اندازه المان‌ها در داخل الیاف در مقایسه با سطح آن بزرگ‌تر انتخاب می‌شود. نسبت اندازه‌ی ویژه المان به کوچک‌ترین ابعاد کلی سلول واحد شش ضلعی و مربعی $0.22/0.1$ است. در اثر خطای عددی ممکن است در هندسه اولیه نفوذ یا جدایش مجازی در سطح مشترک بین زمینه و الیاف وجود داشته باشد که برای رفع این مشکل در مرحله‌ی اول تحلیل موقعیت نقاط در سطح تماس اصلاح می‌شود تا نقاط دارای جدایش و نفوذ مجازی حذف شود و اتصال کاملی بین الیاف و زمینه در ابتدای تحلیل ایجاد شود. برای این منظور دو مجموعه از گره‌ها مربوط به ماده‌ی زمینه و ماده‌ی الیاف واقع در مرز مشترک تعیین می‌گردد. فاصله‌ی بین هر گره واقع بر مجموعه مربوط به ماده‌ی الیاف با کلیه گره‌های واقع بر مجموعه مربوط به ماده‌ی زمینه تعیین می‌شود و اگر این فاصله کمتر از حد مجازی باشد گره زمینه جابه‌جا می‌شود تا منطبق به گره متناظر خود در الیاف گردد. بنابراین اگر نفوذ یا جدایشی بین دو گره در تماس با هم به علت خطای عددی ناشی از المان‌بندی سلول واحد وجود داشته باشد با اعمال این روش حذف می‌شود. مقدار حد مجاز جابه‌جایی گره‌ها بر حسب کسری از کوچک‌ترین ابعاد المان و برابر با $1:100$ ابعاد کوچک‌ترین المان انتخاب می‌شود.

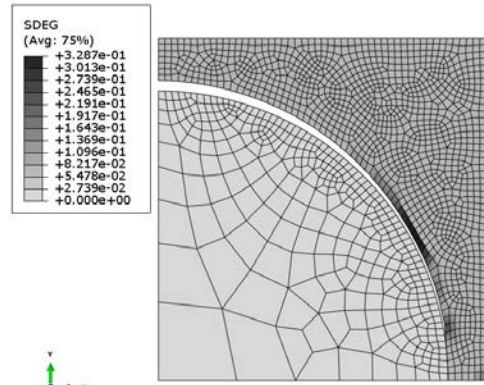
شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب تغییر شکل سلول واحد دارای آرایش الیاف شش ضلعی و مربعی را تحت اثر کرنش محوری عرضی مختلف در راستای محور ۲ نشان می‌دهد. تغییر شکل عرضی علاوه بر جدایش بین الیاف و زمینه، موجب ترک در زمینه می‌شود که برای بررسی وضعیت زمینه، مقدار شاخص عیب در زمینه بر روی هندسه‌ی تغییر شکل یافته در این شکل نشان داده شده است. در این تحلیل استحکام محوری و برشی اتصالی زمینه با الیاف به ترتیب 200 و 150 مگاپاسکال است. کرنشی که موجب پیدایش ترک در زمینه می‌شود 15 درصد در نظر گرفته شده است و جابه‌جایی که موجب ایجاد ترک در زمینه و ناحیه اتصال بین زمینه و الیاف می‌گردد برابر با $1:100$ کوچک‌ترین ابعاد سلول واحد انتخاب شده است. به منظور حذف تغییر شکل ناگهانی در گره‌های سلول واحد تحت اثر ترک اتصال بین زمینه و الیاف، اثر ویسکوزیته در مرز مشترک در نظر گرفته می‌شود. اگرچه ماده به صورت ویسکوز رفتار نمی‌نماید ضریب ویسکوزیته برای همگرایی نتایج عددی تعریف می‌شود. برای این منظور کمترین مقدار ضریب ویسکوز انتخاب می‌شود تا علاوه بر تأمین شرایط همگرایی، از بروز اثر ویسکوز در ماده

1. Abaqus

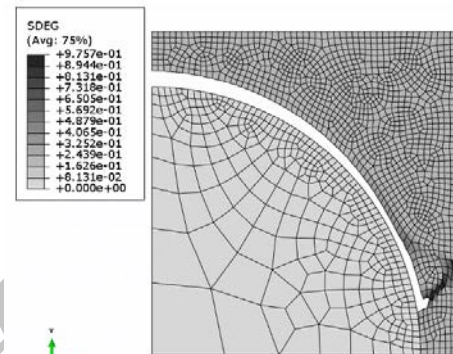


شکل ۷ نمودار تنش - کرنش برای ماده زمینه خالص و ماده مرکب با ۶۰ درصد حجمی الیاف تقویت‌کننده با دو توزیع منظم برای آرایش الیاف

همان‌طور که در شکل ۵ و شکل ۶ نشان داده شده است شاخص عیب در زمینه در شرایط جدایش بین زمینه و الیاف کمتر از یک است. پس ایجاد ترک و رشد آن در زمینه در کرنش‌های بیشتری اتفاق می‌افتد که موجب افت مجدد تنش لازم برای تغییر شکل عرضی سلول واحد مطابق با شکل ۷ می‌شود و دو مرحله افت ناگهانی برای هر دو سلول واحد در نمودار تنش - کرنش وجود دارد. از آنجا که مقدار تنش معادل عرضی در سلول واحد از تقسیم نیرو به سطح اولیه آن محاسبه می‌شود جدایش بین الیاف و زمینه موجب می‌شود سطح کمتری از الیاف تحت اثر تنش قرار گیرد و ظرفیت تحمل سلول واحد کاهش می‌یابد. پس مقدار تنش لازم برای تغییر شکل سلول واحد پس از جدایش بین زمینه و الیاف از مقدار تنش در زمینه خالص بدون عیب و تحت اثر کرنش یکسان کمتر است که این موضوع در شکل ۷ با مقایسه نمودارهای متناظر با سلول واحد و زمینه خالص مشهود است. پیدایش ترک در اتصال بین زمینه و الیاف موجب آزادسازی تنش اعمالی به الیاف و افت ناگهانی در نمودار تنش - کرنش می‌شود. پس از پیدایش ترک و آزادسازی تنش در الیاف، سطح تحمل‌کننده بارگذاری خارجی در سلول واحد تا حد زیادی به زمینه محدود می‌شود و مقدار سطح پس از پیدایش ترک تغییر زیادی نمی‌کند و بدون تغییر در سطح تحمل‌کننده بارگذاری خارجی، ترک در نیروی ثابتی رشد می‌نماید که منجر به افقی شدن نمودار تنش - کرنش می‌گردد. در نهایت افزایش سطح تنش در زمینه موجب پیدایش ترک در زمینه می‌گردد که با افت دیگری در نمودار تنش - کرنش همراه است. شاخص عیب در سطح مشترک ناحیه‌ی اتصال زمینه به الیاف به‌منظور شناسایی محل شروع ترک و میزان رشد آن در کرنش‌های مختلف بررسی می‌شود. برای این منظور نمودار شاخص عیب در سطح مشترک نسبت به زاویه تماس در کرنش‌های مختلف برای هر دو سلول واحد در شکل ۸ نشان داده شده است. مقدار شاخص عیب در سلول واحد دارای توزیع الیاف با آرایش شش‌ضلعی و در قسمتی از سطح مشترک که از زاویه صفر درجه (این زاویه در شکل ۳ نشان داده شده است) شروع می‌شود مطابق با شکل ۸-الف صفر است و با افزایش کرنش عرضی هیچ عیبی در این نواحی ایجاد نمی‌شود. کاهش پهنای سلول واحد در راستای محور افقی عاملی برای ایجاد تنش فشاری در سطح مشترک زمینه و الیاف می‌گردد و مکانیزم غالب برای پیدایش عیوب در این نواحی فقط تنش برشی است. نتایج تحلیل نشان



(الف)



(ب)

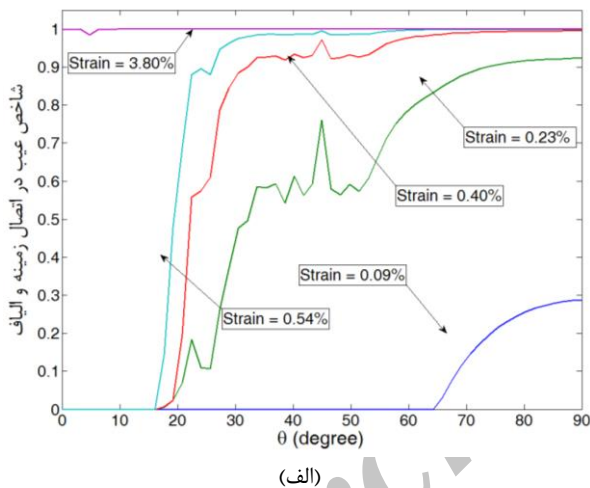
شکل ۶ تغییر شکل سلول واحد با آرایش الیاف مربعی و میزان تغییر شاخص عیب تحت اثر کرنش عرضی (الف) ۱/۷۸ درصد (ب) ۲/۹۲ درصد

شکل ۷ نمودار تنش - کرنش عرضی ماده مرکب با ۶۰ درصد حجمی ۶۰ درصد الیاف را نشان می‌دهد که از تحلیل میکرومکانیک سلول‌های واحد با آرایش شش‌ضلعی و مربعی الیاف محاسبه شده است و با نمودار تنش - کرنش زمینه‌ی خالص مقایسه شده است. مقدار نیروی لازم برای تغییر شکل عرضی سلول واحد از تحلیل اجزای محدود تعیین می‌شود و تنش عرضی با توجه به سطح اثر آن محاسبه می‌شود. همچنین مقدار کرنش عرضی از نسبت میزان جابه‌جایی عرضی به ارتفاع اولیه سلول واحد محاسبه می‌گردد. مدول الاستیک عرضی ماده مرکب یا شیب نمودار در مقادیر کرنش کم برای هر دو آرایش تقریباً یکسان است و مقدار آن از مدول الاستیک زمینه خالص بیشتر است. افزایش بارگذاری عرضی موجب پیدایش عیوب در سطح زمینه و الیاف و در نهایت جدایش بین زمینه و الیاف می‌گردد که به علت افزایش میزان تغییر شکل عرضی با تغییر نیروی کمتر، موجب تغییر شیب نمودار در اثر ایجاد ترک در زمینه و الیاف می‌گردد. تغییر شیب نمودار تنش - کرنش در سلول واحد با آرایش مربعی الیاف در تنش بیشتری در مقایسه با سلول واحد با آرایش شش‌ضلعی مشاهده می‌شود. کرنشی که موجب پیدایش عیوب در ناحیه مشترک الیاف و زمینه و در زاویه ۹۰ درجه می‌شود برای سلول واحد با آرایش شش‌ضلعی و مربعی الیاف به ترتیب برابر با ۰/۵۷ و ۱/۱۴ درصد است. از آنجا که مقدار تنش در نمودار تنش - کرنش در این مقادیر کرنش بیشترین مقدار را دارد استحکام عرضی مواد مرکب به شرایط اتصال زمینه و الیاف مستقیماً وابسته می‌گردد و برای دستیابی به استحکام بیشتر باید شرایط اتصال را بهبود داد. تنش ناشی از کرنش عرضی تا مقدار معینی در هر دو سلول واحد وجود دارد و با ایجاد و رشد ترک در ناحیه‌ی مشترک الیاف و زمینه، مقدار تنش لازم برای اعمال کرنش به شدت کاهش می‌یابد.

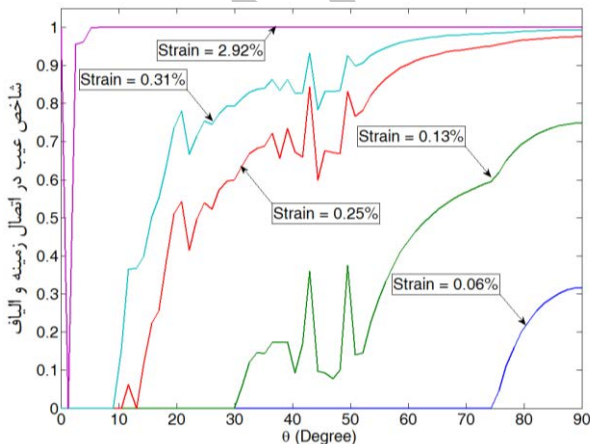
۵- بحث و بررسی

مقایسه نتایج تحلیل سلول واحد با آرایش مختلف الیاف نشان می‌دهد استحکام عرضی و نمودار تنش-کرنش بعد از ایجاد عیوب در مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف تک‌جهته به میکروساختار ماده مرکب بسیار وابسته است و با تغییر آرایش الیاف از مدل مربعی به شش ضلعی تغییر قابل توجهی در استحکام کششی عرضی ماده مرکب ایجاد می‌شود.

اگرچه جدایش بین زمینه و الیاف در زاویه ۹۰ درجه در هر دو میکروساختار ایجاد می‌شود ولی مقدار رشد آن در مرز مشترک در سلول واحد با آرایش الیاف مربعی بیشتر از سلول واحد با آرایش شش ضلعی است. جدایش بین زمینه و الیاف موجب می‌شود مقدار تنش در زمینه افزایش یابد که منجر به پیدایش عیب و ترک در زمینه می‌گردد. در هر دو سلول واحد نقطه شروع ترک زمینه در مرز مشترک الیاف با زمینه است ولی زاویه شروع ترک زمینه در سلول واحد با آرایش الیاف شش ضلعی بیشتر از سلول واحد با آرایش الیاف مربعی است و مسیر متفاوتی برای رشد ترک زمینه در هر سلول‌های واحد مشاهده می‌شود. مدل میکرومکانیک ارائه‌شده برای بررسی استحکام کششی مواد مرکب با درصد حجمی مختلف و دو میکروساختار مختلف استفاده می‌گردد.



(الف)



(ب)

شکل ۸ تغییرات شاخص عیب در زوایای مختلف در سطح تماس زمینه - الیاف سلول‌های واحد با توزیع الیاف در آرایش (الف) شش ضلعی (ب) مربعی

می‌دهد که در کل بارگذاری مقدار تنش برشی از استحکام برشی اتصال زمینه و الیاف کمتر است و جدایش کامل الیاف و زمینه در اثر بارگذاری به‌ویژه در این نواحی ایجاد نمی‌شود. شکل ۸- الف نشان می‌دهد شاخص عیب در سطح نزدیک به زاویه ۹۰ درجه در اثر بارگذاری عرضی بیشترین مقدار را دارد که علت آن افزایش تنش کششی عمود بر سطح الیاف در اثر بارگذاری عرضی است. عیوب در این نواحی در کرنش‌های عرضی کم و به مقدار ۰/۱۸ درصد (یا مقدار ۰/۰۱۸) مشاهده شده است ولی مقدار شاخص عیب آن کمتر از ۱ است و تنش اعمالی قادر به جدایش زمینه از الیاف در این مقدار کرنش نیست.

افزایش کرنش عرضی مقدار شاخص عیب را در سطح نزدیک به زاویه ۹۰ درجه به مقدار ۱ می‌رساند به طوری که زاویه‌ی جدایش بین زمینه و الیاف در کرنش عرضی ۰/۵۷ درصد تقریباً ۳۵ درجه می‌شود و با افزایش کرنشی عرضی به مقدار ۱/۳۳ درصد به مقدار ۴۵ درجه می‌رسد. پیدایش عیوب در زمینه و رشد ترک در آن موجب می‌شود بارگذاری ناشی از تنش کششی و برشی در سطح مشترک زمینه و الیاف کاهش یابد و مقدار زاویه جدایش بین زمینه و الیاف در اثر کرنش عرضی از مقدار مشخصی بیشتر نشود.

مقدار شاخص عیب در سطح مشترک زمینه و الیاف سلول واحد با توزیع الیاف در آرایش مربعی مطابق با شکل ۸- ب تغییر قابل توجهی با سلول واحد با آرایش شش ضلعی وجهی دارد. جدایش کامل زمینه و الیاف در این نوع سلول واحد ایجاد می‌شود زیرا پیدایش عیوب در زمینه در کرنش‌های بیشتری ایجاد می‌شود به طوری که اثر تنش برشی در سطح زمینه و الیاف در زاویه صفر موجب تضعیف اتصال و جدایش زمینه از الیاف در این ناحیه می‌شود. جدایش بین زمینه و الیاف مشابه با سلول واحد قبلی از زاویه ۹۰ درجه شروع می‌شود با این تفاوت که مقدار کرنشی که منجر به شروع ترک در این ناحیه می‌شود بیشتر از سلول واحد با آرایش الیاف شش ضلعی است. پس از ایجاد ترک در زاویه ۹۰ درجه، ترک در مرز مشترک با اعمال کرنشی عرضی به زاویه‌های کمی رشد می‌کند و در نهایت موجب انقطاع کامل زمینه از الیاف می‌شود.

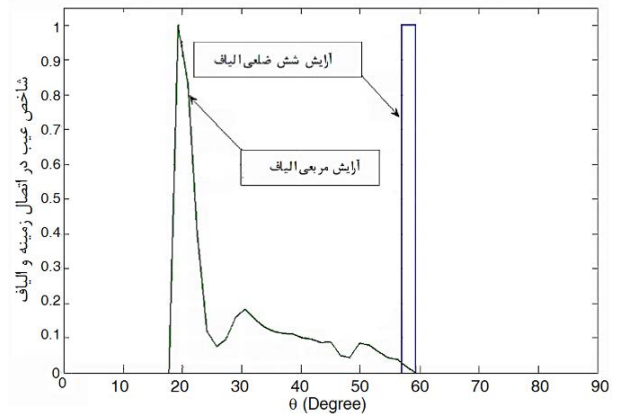
توزیع تنش در زمینه و الیاف ناشی از تغییر شکل عرضی اعمالی به زمینه با رشد ترک در مرز مشترک به شدت تغییر می‌یابد و موجب می‌شود مقدار تنش در قسمتی از الیاف کاهش یابد و مقدار تنش در نواحی از زمینه افزایش قابل توجه داشته باشد به طوری که موجب پیدایش عیوب و در نهایت ترک در زمینه می‌شود. بررسی مدل میکرومکانیک نشان می‌دهد رشد ترک در زمینه از سطح اولیه مشترک با الیاف شروع می‌شود.

شکل ۹ مقدار شاخص عیب را در زمینه برای سلول واحد شش ضلعی و مربعی نشان می‌دهد که این شاخص برای شناسایی محل ایجاد ترک در مرز مشترک قابل استفاده است. کرنش عرضی ۲/۱۶ در سلول واحد با آرایش الیاف شش ضلعی موجب می‌شود مقدار شاخص عیب در زمینه برابر مقدار واحد گردد که این کرنش متناظر با شروع ترک در زمینه است.

ترک در یک المان زمینه و واقع بر مرز مشترک در زاویه ۵۸ درجه شروع می‌شود. این ترک در داخل زمینه رشد می‌کند و با ترک ایجادشده در سطح مشترک زمینه و الیاف در سطح دیگر متصل می‌شود و موجب شکست کامل سلول واحد می‌گردد. سلول واحد با آرایش الیاف مربعی در کرنش عرضی بیشتر و در مقدار ۳/۲۵ شروع ترک در زمینه و در زاویه ۱۹ درجه در سطح مشترک را پیش‌بینی می‌کند که این ترک مطابق با شکل ۹ تا سطح تقارن سلول واحد پیش می‌رود.

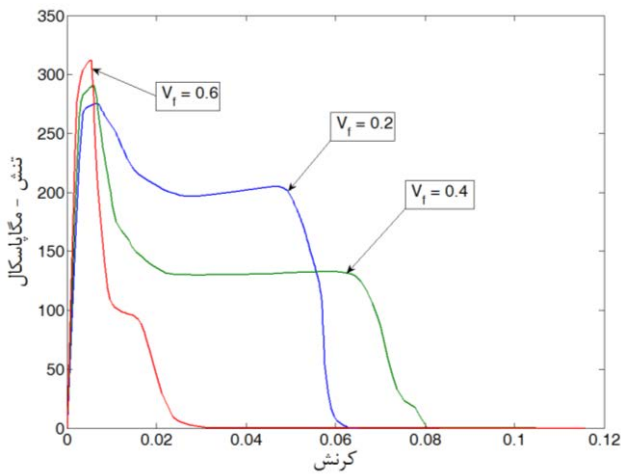
مواد مرکب در بارگذاری عرضی تأثیر دارد مقدار استحکام محوری و برشی اتصال بین زمینه و الیاف است.

شکل ۱۱ نمودارهای تنش- کرنشی را نشان می‌دهد که برای سه مقدار مختلف استحکام محوری در ماده مرکب با ۶۰ درصد حجمی الیاف برای سلول واحد با آرایش شش ضلعی الیاف محاسبه شده است. نتایج تحلیل میکرومکانیک نشان می‌دهد در صورتی که استحکام محوری اتصال بین زمینه و الیاف ۲۰۰ و ۲۵۰ مگاپاسکال باشد رفتار مشابهی برای میزان رشد ناحیه‌ی جدایش بین لایه‌ای و نواحی شکست در زمینه‌ی سلول واحد مشاهده می‌شود و فقط حداکثر تنش نهایی با افزایش استحکام اتصال بیشتر می‌گردد. هندسه‌ی نهایی سلول واحد بعد از شکست برای این مقادیر استحکام اتصال بین زمینه و الیاف به صورت شکل ۵- ب است. تضعیف اتصال بین زمینه و الیاف تا مقدار استحکام محوری ۱۵۰ مگاپاسکال موجب می‌شود میزان رشد ناحیه‌ی جدایش بین لایه‌ای تا مقدار بیشتری پیشروی نماید به طوری که ترک در زمینه در کرنش‌های بیشتری ایجاد شود. بنابراین نمودار تنش- کرنش متناظر با این استحکام محوری در شکل ۱۱ مقدار کرنش شکست بیشتری را نشان می‌دهد.

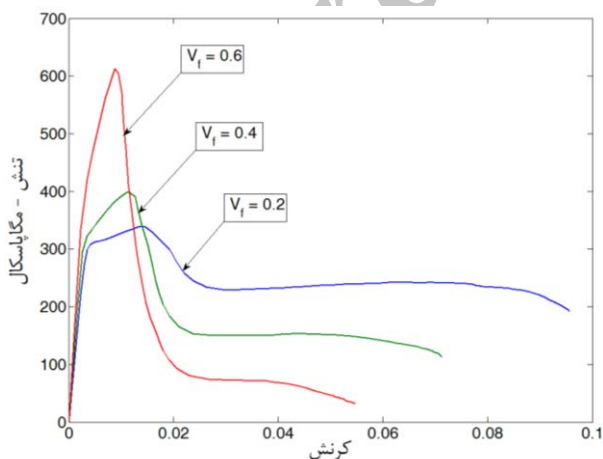


شکل ۹ تغییرات شاخص عیب ماده‌ی زمینه در زوایای مختلف در سطح تماس زمینه - الیاف سلول‌های واحد دارای آرایش مربعی (در کرنش عرضی ۳/۲۵ درصد) و شش ضلعی (در کرنش عرضی ۲/۱۶ درصد)

شکل ۱۰ نمودار تنش - کرنش را برای دو ماده مرکب با سه درصد حجمی مختلف الیاف شامل مقادیر ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد را برای دو سلول واحد با آرایش شش ضلعی و مربعی نشان می‌دهد که استحکام محوری و برشی اتصال بین زمینه و الیاف به ترتیب ۲۰۰ و ۱۵۰ مگاپاسکال است. شکل کلی نمودارهای تنش - کرنش در هر دو سلول واحد با درصد حجمی مختلف مشابه یکدیگر هستند و نمودار تنش در دو نقطه افت قابل توجهی دارد که به ترتیب ناشی از شروع جدایش بین زمینه و الیاف و ترک در زمینه است. مقایسه نمودارهای شکل ۱۰- الف و شکل ۱۰- ب نشان می‌دهد اختلاف کرنش برای ایجاد افت تنش بین این دو نقطه در سلول واحد با آرایش مربعی الیاف بیشتر از سلول واحد با آرایش شش ضلعی الیاف است. جدایش بین لایه‌ای در سلول واحد با آرایش شش ضلعی الیاف منجر به انتقال تنش زیادی به ماده زمینه بین دو الیاف مطابق با شکل ۵- الف و شکل ۵- ب می‌شود که عاملی برای شروع ترک در زمینه برای مقادیر مختلف کرنشی عرضی کمتر نسبت به کرنش ایجاد جدایش بین زمینه و الیاف است.



(الف)



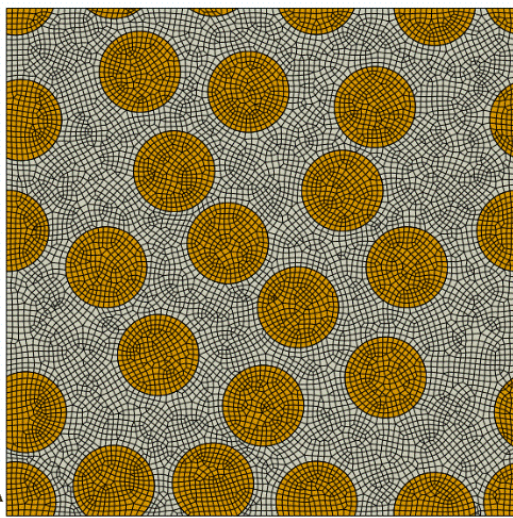
(ب)

شکل ۱۰ نمودار تنش - کرنش ماده مرکب با سه درصد حجمی مختلف الیاف و دارای سلول واحد با آرایش الف) شش ضلعی ب) مربعی

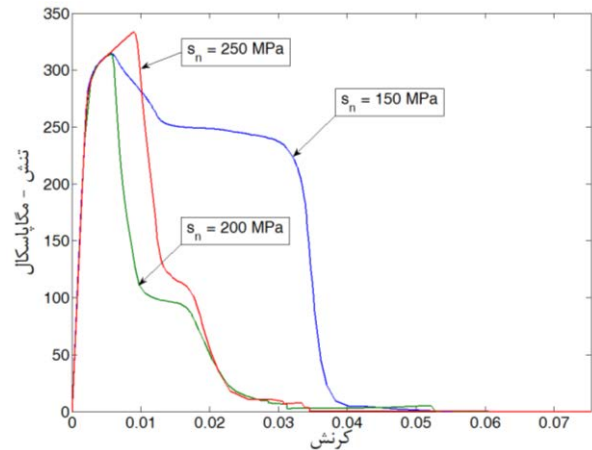
استحکام محوری عرضی ماده مرکب براساس مقدار حداکثر تنش قبل از افت ناگهانی تنش در نقطه اول تعیین می‌گردد که درصد حجمی الیاف در سلول واحد با آرایش شش ضلعی الیاف اثر بسیار کمی بر افزایش استحکام عرضی دارد و مقدار آن ۲۷۵/۶، ۲۹۰/۸ و ۳۱۲/۲ مگاپاسکال به ترتیب برای درصد حجمی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ است. در صورتی که استحکام عرضی ماده مرکب دارای سلول واحد با آرایش مربعی الیاف در کسر حجمی ثابت در مقایسه با سلول واحد با آرایش شش ضلعی الیاف مقادیر بیشتری دارد و درصد حجمی الیاف بر استحکام عرضی ماده مرکب تأثیر بیشتری دارد و مقدار آن ۳۳۸/۶، ۳۹۹/۸ و ۶۱۲/۲ مگاپاسکال به ترتیب برای درصد حجمی ۲۰، ۴۰ و ۶۰ است که مقادیر آنها از استحکام تسلیم زمینه (۲۷۰ مگاپاسکال) بیشتر است. همانطور که در بخش قبل بیان شد ناحیه‌ی جدایش بین زمینه و الیاف در زاویه‌ی بیشتری در سلول واحد با آرایش مربعی الیاف ایجاد می‌شود که مستلزم ایجاد کرنش بیشتری در زمینه و افزایش ظرفیت تحمل سلول واحد است که این موضوع با افزایش کسر حجمی و قطر الیاف شدت بیشتری دارد. ولی میزان رشد ترک در مرز مشترک الیاف و زمینه در سلول واحد با آرایش شش ضلعی الیاف محدود است که باعث افزایش ناچیزی در مقدار استحکام با افزایش کسر حجمی الیاف می‌شود. متغیر دیگری که بر نمودار تنش - کرنش

دیگر کاملاً آزاد است. جابه‌جایی نقطه‌ی مرجع ۲ با استفاده از رابطه‌ی (۱۷) با در نظر گرفتن مقدار معینی برای λ_2 تعیین می‌شود در صورتی‌که مقدار λ_1 براساس نتایج تحلیل مدل میکرومکانیک محاسبه می‌شود. شکل ۱۳ هندسه‌ی تغییر شکل‌یافته‌ی سلول واحد را تحت اثر کرنش عرضی ۲/۱ درصد نشان می‌دهد. در این تحلیل که استحکام کششی و برشی اتصال بین زمینه و الیاف به‌ترتیب ۲۰۰ و ۱۵۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است شروع عیوب در میکروساختار ماده مرکب در مرز مشترک بین زمینه و الیاف است و با رشد آن در برخی از نواحی و اعمال بارگذاری بیشتر به زمینه موجب ایجاد کرنش اصلی بحرانی در زمینه و در نتیجه پیدایش عیب در زمینه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۳ نشان داده شده است مقدار شاخص عیب در نوارهای باریک زمینه به مقدار بحرانی رسیده است و میکروساختار در آستانه تقسیم‌شدن به دو نیمه است. تغییر شکل بزرگ در لحظه‌ی تقسیم‌شدن میکروساختار مشاهده می‌شود در صورتی‌که نیروی کل لازم برای ایجاد کرنش عرضی تغییرات کمی دارد. لذا تغییر شکل بزرگ عاملی برای واگرایی نتایج و توقف تحلیل اجزای محدود قبل از تقسیم‌شدن میکروساختار می‌شود. استحکام میکروساختار و نمودار تنش - کرنش با استفاده از نتایج تحلیل تا این لحظه قابل استخراج است.

نمودار تنش - کرنش با تحلیل میکرومکانیک سلول واحد دارای توزیع تصادفی الیاف محاسبه می‌شود که نتایج آن با مقادیر متناظر در سلول‌های واحد دارای توزیع مربعی و شش ضلعی الیاف در شکل ۱۴ مقایسه شده است. ماده مرکب با توزیع تصادفی بیشترین استحکام را در مقایسه با میکروساختار دارای توزیع منظم مربعی یا شش ضلعی الیاف دارد زیرا تعداد زیادی الیاف در میکروساختار مواد مرکب برخلاف میکروساختار منظم وجود دارد که منجر به کاهش تمرکز تنش در مرز مشترک بین زمینه و الیاف و تأخیر در جدایش بین زمینه و الیاف می‌شود. از طرف دیگر، جدایش زمینه و الیاف منجر به ایجاد نواحی باریکی از زمینه در میکروساختار تصادفی می‌شود که تحت اثر بارگذاری بیش از حد است. بنابراین ترک در زمینه در میکروساختار با توزیع تصادفی الیاف در کرنش بسیار کمتری پس از پیدایش جدایش زمینه و الیاف در مقایسه با میکروساختار منظم مشاهده می‌شود.



شکل ۱۴ هندسه اولیه و المان‌بندی سلول واحد دارای ۴۰ درصد کسر حجمی الیاف با توزیع تصادفی



شکل ۱۱ نمودار تنش - کرنش برای ماده مرکب با ۶۰ درصد حجمی الیاف در سلول واحد با آرایش شش ضلعی الیاف و استحکام محوری مختلف اتصال زمینه و الیاف

همان‌طور که بیان شد پاسخ مواد مرکب در برابر بارگذاری عرضی به توزیع الیاف در میکروساختار وابستگی زیادی دارد و اختلاف قابل توجهی در استحکام محاسبه‌شده برای میکروساختار با آرایش مربعی و شش ضلعی الیاف وجود دارد. توزیع الیاف در میکروساختار مواد مرکب در واقعیت منظم معینی ندارد و الیاف به‌صورت تصادفی در میکروساختار توزیع می‌شود. پس سلول واحدی برای تحلیل میکرومکانیک مواد مرکب در نظر گرفته می‌شود که الیاف به‌صورت تصادفی در سطح آن توزیع شده است.

سلول واحد با توزیع تصادفی الیاف با سطح مقطع دایره‌ای و شعاع یکتواخت در میکروساختار مطابق با شکل ۱۲ ایجاد می‌شود. میکروساختار ماده مرکب به‌صورت متناوبی فرض می‌شود که این میکروساختار با انتقال سلول واحد در دو راستای عمود برهم ایجاد می‌شود. توزیع الیاف در سلول واحد با الگوریتم جذب متوالی تصادفی^۱ [۲۴] تعیین می‌شود که منجر به ایجاد توزیع تصادفی همگن و همسانگرد الیاف در سلول واحد می‌شود. مختصات مرکز سطح مقطع دایره‌ای الیاف با قطر d در میکروساختار به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. اگر الیاف مرز سلول واحد را قطع نمایند الیاف دیگری باید در سلول واحد مجاور ایجاد شود تا سلول واحد متناوب باشد. وقتی الیاف جدید به میکروساختار افزوده می‌شود که فاصله‌ی بین مرکز یک الیاف مفروض با نزدیک‌ترین الیاف افزوده به میکروساختار بزرگ‌تر از مقدار معینی (1.1d) باشد. این شرط نه تنها مانع از هم‌پوشانی الیاف می‌شود بلکه منجر به ایجاد هندسه‌ی المان مناسب در ناحیه‌ی بین دو الیاف می‌شود. اگر سطح الیاف بیش از حد به سطوح مرزی سلول واحد نزدیک باشد المان‌بندی مناسبی نمی‌توان در این ناحیه‌ی باریک ایجاد کرد. برای حل این مشکل الیاف‌هایی مجاز به افزودن به میکروساختار است که فاصله‌ی سطح آن بزرگ‌تر از حد معینی (0.1d) باشد. وقتی این شرایط برقرار شد الیاف در موقعیت تصادفی ایجادشده به میکروساختار افزوده می‌شود و این روش تکرار می‌شود تا کسر حجمی ایجادشده نزدیک به مقدار مورد نظر شود. سلول واحد با سطح مقطع مربعی عمود بر راستای الیاف در نظر گرفته می‌شود و نسبت قطر الیاف به ابعاد سطح مقطع سلول واحد ۰/۰۵ انتخاب می‌شود.

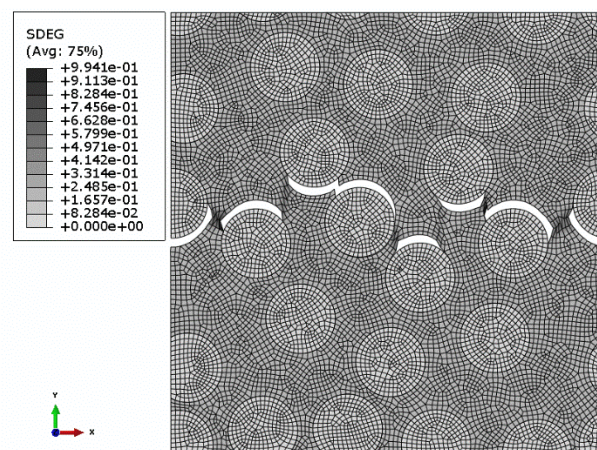
سلول واحد با توزیع تصادفی الیاف تحت اثر تغییر شکل معینی در راستای محور ۲ عمود بر الیاف قرار داده می‌شود در صورتی‌که ماده در راستای

1. random sequential adsorption algorithm

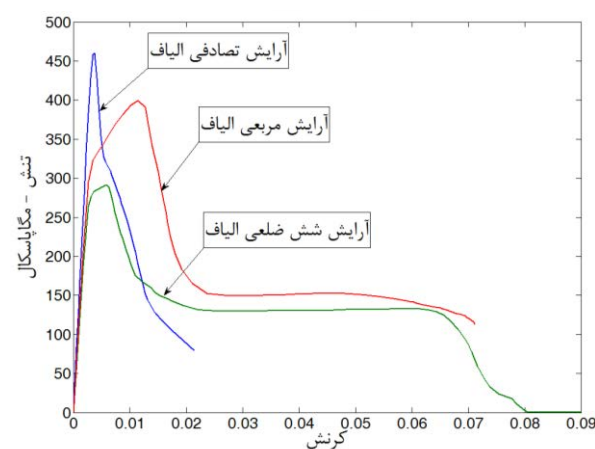
با آرایش الیاف مربعی است و مسیر متفاوتی برای رشد ترک زمینه در این دو نوع سلول واحد مشاهده می شود. ماده مرکب با توزیع تصادفی بیشترین استحکام را در مقایسه با میکروساختار دارای توزیع منظم مربعی یا شش ضلعی الیاف دارد زیرا تعداد زیادی الیاف در میکروساختار مواد مرکب برخلاف میکروساختار منظم در نظر گرفته می شود که منجر به کاهش تمرکز تنش در مرز مشترک بین زمینه و الیاف و تأخیر در جدایش بین زمینه و الیاف می گردد.

۷- مراجع

- [1]Plueddemann, E. P., Silane Coupling Agents, Springer, 1982.
- [2]Drzal, L. T., Rich, M. J., and Lloyd, P. F., "Adhesion Of Graphite Fibers To Epoxy Matrices: I. The Role Of Fiber Surface Treatment," The Journal of Adhesion, Vol. 16, No. 1, pp. 1-30, 1983.
- [3]Ghosh, S., Ling, Y., Majumdar, B., and Kim, R., "Interfacial Debonding Analysis In Multiple Fiber Reinforced Composites," Mechanics of Materials, Vol. 32, No. 10, pp. 561-591, 2000.
- [4]Hobbiebrunken, T., Hojo, M., Adachi, T., De Jong, C., and Fiedler, B., "Evaluation Of Interfacial Strength In Cf/Epoxy Using Fem And In-Situ Experiments," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 37, No. 12, pp. 2248-2256, 2006.
- [5]Gamstedt, E., and Sjögren, B., "Micromechanisms In Tension-Compression Fatigue Of Composite Laminates Containing Transverse Plies," Composites Science and Technology, Vol. 59, No. 2, pp. 167-178, 1999.
- [6]Martyniuk, K., Sørensen, B. F., Modregger, P., and Lauridsen, E. M., "3d In Situ Observations Of Glass Fibre/Matrix Interfacial Debonding," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 55, No. , pp. 63-73, 2013.
- [7]Hojo, M., Mizuno, M., Hobbiebrunken, T., Adachi, T., Tanaka, M., and Ha, S. K., "Effect Of Fiber Array Irregularities On Microscopic Interfacial Normal Stress States Of Transversely Loaded Ud-Cfrp From Viewpoint Of Failure Initiation," Composites Science and Technology, Vol. 69, No. 11, pp. 1726-1734, 2009.
- [8]Li, J., Liu, X., Yao, X., and Yuan, Y., "A Micromechanical Debonding Analysis Of Fiber-Reinforced Composites Due To Curing Residual Stress," Journal of Reinforced Plastics and Composites, p. 0731684415584952, 2015.
- [9]Vaughan, T., and McCarthy, C., "Micromechanical Modelling Of The Transverse Damage Behaviour In Fibre Reinforced Composites," Composites Science and Technology, Vol. 71, No. 3, pp. 388-396, 2011.
- [10]González, C., and LLorca, J., "Mechanical Behavior Of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymers Under Transverse Compression: Microscopic Mechanisms And Modeling," Composites Science and Technology, Vol. 67, No. 13, pp. 2795-2806, 2007.
- [11]Piggott, M., "Why Interface Testing By Single-Fibre Methods Can Be Misleading," Composites Science and Technology, Vol. 57, No. 8, pp. 965-9, 1997, 74.
- [12]Pindera, M.-J., Khatam, H., Drago, A. S., and Bansal, Y., "Micromechanics Of Spatially Uniform Heterogeneous Media: A Critical Review And Emerging Approaches," Composites Part B: Engineering, 40, 5, pp. 349-378, 2009.
- [13]Smit, R., Brekelmans, W., and Meijer, H., "Prediction Of The Mechanical Behavior Of Nonlinear Heterogeneous Systems By Multi-Level Finite Element Modeling," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 155, No. 1, pp. 181-192, 1998.
- [14]Dijkstra, K., and Gaymans, R., "Nylon-6 Rubber Blends. 2. Temperature Effects During High-Speed Deformation," Journal of materials science, Vol. 29, No. 12, pp. 3231-3238, 1994.
- [15]Buryachenko, V., Micromechanics Of Heterogeneous Materials, Springer, 2007.
- [16]Suquet, P., "Elements Of Homogenization For Inelastic Solid Mechanics," Homogenization techniques for composite media, Vol. 272, pp. 193-278, 1987.
- [17]Tahaye Abadi, M., "Characterization Of Heterogeneous Materials Under Shear Loading At Finite Strain," Composite Structures, Vol. 92, No. 2, pp. 578-584, 2010.
- [18]Hyer, M. W., Stress Analysis Of Fiber-Reinforced Composite Materials, DEStech Publications, Inc, 2009.
- [19]Callister, W. D., and Rethwisch, D. G., Fundamentals Of Materials Science And Engineering, Wiley, 2013.
- [20]Camanho, P. P., and Dávila, C. G., "Mixed-Mode Decohesion Finite Elements For The Simulation Of Delamination In Composite Materials," NASA Report, 2002.
- [21]Thomson, R. D., and Hancock, J., "Ductile Failure By Void Nucleation, Growth And Coalescence," International Journal of Fracture, Vol. 26, No. 2, pp. 99-112, 1984.



شکل ۱۳ هندسه تغییرشکل یافته سلول واحد دارای ۴۰ درصد کسر حجمی الیاف با توزیع تصادفی تحت اثر کرنش عرضی ۲/۱ درصد



شکل ۱۴ نمودار تنش - کرنش برای ماده مرکب با ۴۰ درصد حجمی الیاف در سلول واحد با آرایش تصادفی، شش ضلعی و مربعی الیاف

۶- نتیجه گیری

روشی میکرومکانیکی ارائه شده برای مدل سازی پاسخ مکانیکی مواد مرکب تقویت شده با الیاف تک جهته قابلیت شناسایی عیوب ناشی از جدایش زمینه و الیاف و ترک در زمینه را دارد. اتصال بین زمینه و الیاف را می توان با استفاده از دو پارامتر استحکام کششی و برشی و تعریف اتصال چسبناک توصیف کرد و معیار کرنش اصلی برای مدل سازی پیدایش ترک در زمینه قابل استفاده است. نتایج تحلیل میکرومکانیک نشان می دهد استحکام عرضی مواد مرکب تقویت شده با الیاف تک جهته به خواص اتصال بین زمینه و الیاف بسیار وابسته است و مقدار تنش لازم برای کرنش عرضی با شروع جدایش بین زمینه و الیاف به شدت افت می کند. استحکام عرضی مواد مرکب به میکروساختار ماده مرکب وابسته است به طوری که بیشترین و کمترین استحکام به ترتیب در میکروساختارهای با توزیع تصادفی الیاف و توزیع شش ضلعی الیاف محاسبه می شود. میزان رشد ترک در مرز مشترک در سلول واحد با آرایش الیاف مربعی بیشتر از سلول واحد با آرایش شش ضلعی است. جدایش بین زمینه و الیاف موجب می شود مقدار تنش در زمینه افزایش یابد که منجر به پیدایش عیب و ترک در زمینه می گردد. نقطه شروع ترک زمینه برای سلول های واحد با آرایش منظم الیاف در مرز مشترک الیاف با زمینه است ولی زاویه شروع ترک زمینه در سلول واحد با آرایش الیاف شش ضلعی بیشتر از سلول واحد

- [22]Agarwal, H., Gokhale, A., Graham, S., and Horstemeyer, M., "Void Growth In 6061-Aluminum Alloy Under Triaxial Stress State," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 341, No. 1, pp. 35.2003,42-
- [23]Abadi, M. T., "Micromechanical Modeling Of Heterogeneous Materials At Finite Strain," *Wiley Encyclopedia of Composites*, 2011.
- [24]Wang, J.-S., "Random Sequential Adsorption, Series Expansion And Monte Carlo Simulation," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 254, No. 1, pp. 179-184, 1998.

Archive of SID