



دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۷۹ تا ۱۸۶

Vol. 48, No. 2, Summer 2016, pp. 179-186



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک

AmirKabir Journal of Science & Research
Mechanical Engineering
ASJR-ME

بررسی تجربی و عددی گسترش ترک در رگه‌های بال سنجاک

حامد رجبی^{۱*}، علی شفیعی^۲، ابوالفضل درویزه^۳، هاشم بابایی^۴

۱- مدرس، مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی احرار، رشت

۲- محقق، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد لاهیجان، دانشگاه آزاد اسلامی، لاهیجان

۳- استاد، مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی احرار، رشت

۴- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

(دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۹ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۱۹)

چکیده

بال‌های حشرات ساختارهای حیاتی پیچیده‌ای هستند که دارای رفتار مکانیکی جالب توجهی می‌باشند. بال‌ها اساساً از رگه‌ها و پوسته‌ها تشکیل شده‌اند. پوسته‌های تشکیل‌دهنده بال از لحاظ مکانیکی از چقرمگی بالایی برخوردار نیستند. اما به‌طور کلی مجموعه ساختار بال مقاومت بسیار بالایی در برابر گسترش ترک دارد. در این مقاله، ترکیبی از روش‌های عکس‌برداری با میکروسکوپ الکترونی، آزمون کشش و شبیه‌سازی عددی به‌منظور بررسی نقش رگه‌ها بر مکانیزم چقرمگی بال مورد استفاده قرار گرفته است. مدلسازی عددی رشد ترک در رگه بر مبنای روش المان محدود توسعه یافته است. خواص مکانیکی الاستیک خطی و قانون کشش-جدایش خطی به‌منظور شبیه‌سازی رفتار ساختاری ماده تشکیل‌دهنده رگه استفاده می‌شود. عکس‌های میکروسکوپی نشان می‌دهند که رگه‌های بال دارای ساختار میکروسکوپی توخالی متشکل از لایه‌های ساخته‌شده از کیتین و پروتئین می‌باشند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهند که تمامی لایه‌های سازنده رگه با تنش ناشی از شرایط بارگذاری خارجی مواجه می‌شوند. اما حضور پروتئین نقش مهمی در جلوگیری از رشد ترک ایفا می‌کند. مقایسه نتایج نشان‌دهنده مطابقت مطلوب بین مدلسازی‌های عددی انجام شده و نتایج تجربی می‌باشد.

کلمات کلیدی:

بال سنجاک، میکروسکوپ الکترونی، روش المان محدود توسعه یافته، آزمون کشش، رشد ترک.

۱- مقدمه

الکترونی فیلیپس ایکس.ال ۳۰ استفاده شده است. برای آماده‌سازی نمونه‌ها به‌منظور عکس‌برداری میکروسکوپی، ابتدا نمونه‌ای از بال سنجاقک از گونه اوداناتالیبولیدا^۱ انتخاب شده و به‌مدت بیست و چهار ساعت در دمای اتاق قرار داده می‌شود تا خشک گردد. بال انتخاب شده به‌وسیله میکروتوم در اندازه‌های مناسب برش داده می‌شود. برش‌های تهیه شده پس از چسباندن شدن بر روی پایه مخصوص به داخل دستگاه پوشاننده انتقال داده می‌شوند و به وسیله لایه نازکی از آلیاژ طلا-پالادیوم پوشانیده می‌گردند. در نهایت نمونه‌ها برای انجام بررسی‌های میکروسکوپی در داخل دستگاه میکروسکوپ الکترونی قرار می‌گیرند.

۲-۲- آزمون کشش

تست کشش بر روی نمونه‌های رگه به‌منظور بررسی رفتار شکست آن‌ها تحت اثر تنش عمودی خارجی انجام می‌شود. دلیل انتخاب این نوع تست در این است که بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که بارهای وارد بر بال حشره ضمن پرواز عمدتاً سبب ایجاد تنش‌های عمودی در رگه‌ها می‌شود [۱۰]. بنابراین، احتمالاً تست کشش ساده‌ترین راه برای شبیه‌سازی این تنش‌های عمودی است. تست کشش انجام شده در این مقاله، مبتنی بر روش به کار گرفته شده در مراجع [۱۰ و ۲] برای محاسبه خواص مکانیکی بال سنجاقک و بال ملخ است. برای انجام تست کشش نمونه‌های بال جلوی سنجاقک با مشخصه‌های فیزیکی مشابه انتخاب شده و با دقت از بال جدا می‌شوند. دو لبه رگه به‌صورت جداگانه به یک فریم مقوایی به‌وسیله چسب سیانوآکریلات^۲ چسبانده می‌شوند. علت استفاده از این فریم اطمینان از عدم آسیب دیدن نمونه پیش از قرار گرفتن در دستگاه تست کشش می‌باشد. نمونه‌ها مطابق شکل ۱ در دستگاه تست کشش اینسترون ۵۵۶۶^۳، با مشخصات لودسل^۴ ۰/۱ نیوتن تا ۱ کیلونیوتن و سرعت ۰/۰۰۵ تا ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه، قرار می‌گیرند. پس از قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه ارتباط در طرف فریم مقوایی با یکدیگر قطع می‌شود. سرعت بارگذاری برابر ۰/۰۵ میلی‌متر بر دقیقه و برای اعمال بار در راستای محور رگه می‌باشد. قبل از اعمال بارگذاری شکاف بسیار ریز (در حدود ۰/۱ میلی‌متر) و کاملاً سطحی بر روی رگه و در وسط آن، به‌عنوان ترک اولیه، ایجاد می‌شود. عمق ترک ایجاد شده در حدی است که از لایه کیتینی خارجی فراتر نمی‌رود. دلیل ایجاد این ترک ایجاد امکان بررسی رفتار رگه‌های بال در صورت وجود یک آسیب اولیه است. به‌علاوه اینکه طول ترک اولیه می‌تواند در جهت محاسبه چقرمگی شکست رگه‌های بال مورد استفاده قرار گیرد. تعداد نمونه‌های مورد استفاده برای انجام تست کشش ۸ عدد بوده است. با توجه به اینکه فرایند خشک شدن می‌تواند سبب تغییر خواص مکانیکی بال‌های حشرات گردد، همه نمونه‌های تست از بال سنجاقک‌های زنده انتخاب می‌شوند. علاوه بر این تلاش می‌شود

بال‌های حشرات نمونه‌هایی عالی از طراحی مهندسی در طبیعت هستند. بال‌ها سازه‌های کامپوزیتی بسیار سبک وزنی هستند که از عملکرد مطلوبی در برابر نیروهای خارجی دینامیکی که ضمن پرواز به بال‌های حشره وارد می‌شوند، برخوردارند و در دوران حیات حشره دچار تخریب نمی‌شوند. در این بین شاید بتوان بال سنجاقک را به‌عنوان یکی از بهترین مثال‌ها برشمرد [۱-۴]. بال‌ها به‌عنوان اندام‌های پروازی سنجاقک، حشره را قادر می‌سازند که از قابلیت مانور بالا و پروازی پایدار برای مدتی طولانی برخوردار باشد. بی‌تردید، مجموعه ساختار میکروسکوپی و ماکروسکوپی، نقش مهمی در ارتقای رفتار مکانیکی بال دارند.

ایجاد نقصان و ترک در ساختارهای حیاتی به‌دلیل قرار گرفتن تحت تنش‌های محیطی اجتناب‌ناپذیر است. بسیاری از این ساختارها مانند ساقه گیاهان، استخوان و پوست انسان و حیوانات دارای قابلیت خودترمیمی هستند به‌گونه‌ای که می‌توانند نقصان یا ترک ایجادشده را ترمیم کنند [۵-۷]. اما بال‌های سنجاقک دارای چنین قابلیتی نیستند [۸]. بنابراین، تنها راه‌حل برای حفظ قابلیت پرواز در صورت پیدایش آسیب‌های احتمالی این است که تا جایی که می‌توان از گسترش ترک در بال جلوگیری نمود. بررسی‌های تجربی انجام‌شده توسط نویسندگان مقاله و سایر پژوهشگران بر روی بال‌های سنجاقک و ملخ نشان می‌دهد که وجود یک نوار باریک در اطراف لبه بال، که به رگه محیطی موسوم است، می‌تواند به توزیع تنش در بال حشره کمک کند و این امر را ممکن می‌سازد که از پارگی پوسته بال و ایجاد ترک در آن، در حد امکان، جلوگیری شود [۹]. مطالعات انجام شده توسط دیرکر و تیلور [۱۰] بر روی گونه‌ای از ملخ صحرائی نشان می‌دهد که وجود رگه‌های عرضی چقرمگی بال را به میزان ۵۰٪ افزایش می‌دهند. به‌عبارت دیگر رگه‌ها به‌صورت موانعی در برابر رشد ترک در بال حشره ایفای نقش می‌کنند. حال سوال اینجاست که رگه‌ها به‌عنوان مکانیزم‌های اصلی جلوگیری‌کننده از رشد ترک در بال، خود چگونه در برابر گسترش ترک رفتار می‌کنند؟ به‌عبارت دیگر کدام ویژگی در ساختار میکروسکوپی یا ماکروسکوپی رگه‌ها سبب عملکرد آن‌ها به‌عنوان موانع اصلی رشد ترک در بال حشره می‌شود؟

در نبود هرگونه مطالعه تجربی یا عددی در خصوص بررسی خواص و رفتار مکانیکی رگه‌های بال‌های حشرات، در این مطالعه تلاش شده‌است که با بررسی‌های میکروسکوپی، انجام آزمون‌های تجربی کشش و مدلسازی المان محدود، چگونگی گسترش ترک در رگه‌های بال سنجاقک مورد بررسی قرار گیرد. نتایج حاصل از این مقاله می‌تواند در راستای ساخت بال‌های سازه‌های پرنده با مقاومت زیاد در برابر رشد ترک استفاده شود.

۲- روش‌ها

۲-۱- عکس‌برداری میکروسکوپی

برای بررسی ساختار میکروسکوپی رگه‌های بال از میکروسکوپ

- 1 Philips XL 30 SEM
- 2 Odonata libellulidae
- 3 Cyanoacrylate
- 4 Instron 5566
- 5 Load cell

که کل فرآیند انجام تست در کمتر از ۱۰ دقیقه پایان پذیرد.

لایه‌های کیتین و پروتئین به ترتیب ۰/۶۸ و ۱۰ کیلوژول بر متر مربع تعیین می‌گردد [۱۴].

شرایط مرزی و نحوه بارگذاری به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که تست کشش انجام شده بر روی نمونه‌ها، رگه را شبیه‌سازی نماید (شکل ۲). به این منظور مدل رگه در یک سمت کاملاً مقید شده و در سمت دیگر نیرویی کششی در راستای محوری و با سرعتی معادل ۰/۰۵ میلی‌متر بر دقیقه به آن اعمال می‌شود.

۳-۲- مدل‌سازی

۳-۲-۱- مدل‌سازی ساختار سه لایه

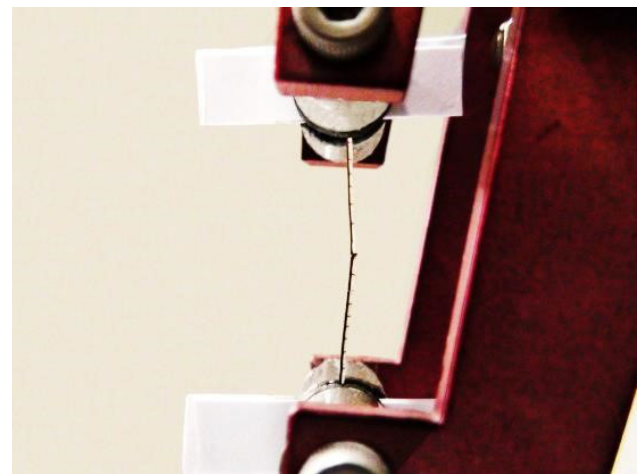
برای مدل‌سازی ساختار رگه از اطلاعات حاصل از عکس‌های میکروسکوپی استفاده شده و نرم‌افزار المان محدود اباکس^۶ به این منظور به کار گرفته می‌شود. مدل ساخته شده تشکیل شده از سه لایه استوانه‌ای است که ضخامت در نظر گرفته شده برای سه لایه معادل ضخامت متوسط نمونه‌های اندازه‌گیری شده و به ترتیب از داخل به خارج عبارت از ۷/۶۹، ۷/۱۱ و ۶/۳۵ میکرومتر می‌باشد. مشخصات هندسی مدل، شرایط مرزی آن و محل قرارگیری ترک اولیه در شکل ۲ دیده می‌شود. ترک اولیه با ایجاد یک صفحه در تماس با مدل اصلی تعریف می‌شود. موقعیت این صفحه، مکان ترک را مشخص می‌نماید. موقعیت، ابعاد و مشخصات ترک اولیه بر روی مدل همانند ترک ایجاد شده در آزمایش تجربی می‌باشد. برای مش‌بندی از المان مکعبی سالیید با نام C3D8 استفاده شده‌است. امکان بررسی تجربی اتصال لایه‌های رگه با یکدیگر بسیار دشوار است. اما اینطور به نظر می‌آید که لایه‌ها از اتصال مستحکم برخوردارند [۱۲]. به این دلیل، پیوند لایه میانی با دو لایه دیگر به صورت اتصال کامل فرض می‌شود.

۳-۳-۲- شبیه‌سازی، پیدایش و گسترش ترک

برای مطالعه و بررسی گسترش ترک از روش المان محدود توسعه‌یافته^۷ استفاده می‌شود که مبتنی بر قانون کشش-جدایش^۸ است. به‌طور کلی ناحیه پلاستیک بین دو لبه ترک در یک ماده ناحیه چسبناک^۹ نامیده می‌شود. هرگاه یک المان مدل توسط یک ترک به دو قسمت تقسیم شود، روش المان محدود توسعه‌یافته بین دو قسمت جدا شده المان، المانی چسبناک در نظر می‌گیرد. المان چسبناک سبب می‌شود که پیوند بین دو لبه المان به‌طور ناگهانی قطع نشود، بلکه این جدایش به‌طور تدریجی اتفاق بیافتد. در روش المان محدود توسعه‌یافته، مدل‌سازی رفتار شکست در یک ماده شامل دو مرحله است: (۱) نخست تعیین معیار پیدایش ترک و سپس (۲) چگونگی گسترش ترک.

در مرحله اول، همانطور که از نام آن مشخص است، معیار پیدایش شکست با تعیین مقادیر استحکام نهایی ماده تعریف می‌شود. معیار پیدایش ترک به بررسی پیدایش ترک در بخش‌هایی از مدل می‌پردازد که فاقد ترک می‌باشند. مرحله دوم مشخص‌کننده چگونگی جدایش دو لبه ترک از هم است. این ترک می‌تواند تازه به‌وجود آمده یا از پیش در ماده موجود باشد. برای این منظور، رفتار المان‌های چسبناک تعریف می‌شود که مبتنی بر قانون کشش-جدایش می‌باشد. قانون کشش-جدایش رابطه بین تنش در یک المان مستعد شکست را نسبت به کرنش ایجاد شده در آن است تعریف می‌کند.

بررسی‌های پیشین انجام شده نشان‌دهنده این است که بال‌های حشرات، پیش از پیدایش شکست، همانند مواد ترد رفتار می‌کنند و از رفتاری شبه الاستیک برخوردارند [۲ و ۱۰]. از این رو، در این مقاله، معیار مورد استفاده برای پیش‌بینی پیدایش شکست ماده، معیار حداکثر تنش اصلی^{۱۰} است. شبیه‌سازی‌های ارائه شده پیشین توسط نویسندگان مقاله نیز بیانگر دقت مطلوب این تئوری در پیش‌بینی رفتار مکانیکی بال حشرات و پوسته سازنده بال و اندام آن‌ها (کیوتیکل^{۱۱}) است [۱۵-۲۱]. بر اساس این معیار، هنگامی که حداکثر تنش اصلی در المانی از مدل به مقدار استحکام نهایی ماده برسد، ترک در المان مذکور ایجاد می‌شود. ترک در المان، در جهت عمود بر حداکثر تنش اصلی ایجاد شده در آن



شکل ۱: انجام تست کشش بر روی رگه بال سنجاک

۳-۳-۲- خواص مکانیکی و شرایط مرزی

ماده کیتین سازنده لایه‌های بیرونی و داخلی رگه به صورت یک ماده ایزوتروپیک با مدول یانگ ۳۰ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۳ و چگالی ۱۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته می‌شود [۱۱]. لایه میانی رگه از جنس پروتئین با مدول یانگ ۱ گیگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۴۵ و چگالی ۱۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب است [۱۱]. مقادیر استحکام نهایی برای لایه‌های کیتین ۴۰ مگاپاسکال [۱۲] و برای لایه پروتئین ۳/۷۵ مگاپاسکال [۱۳] در نظر گرفته می‌شود. همچنین انرژی شکست برای

7 Extended finite element method (XFEM)
8 Traction-separation law
9 Cohesive zone
10 Maximum principal stress criterion
11 Cuticle

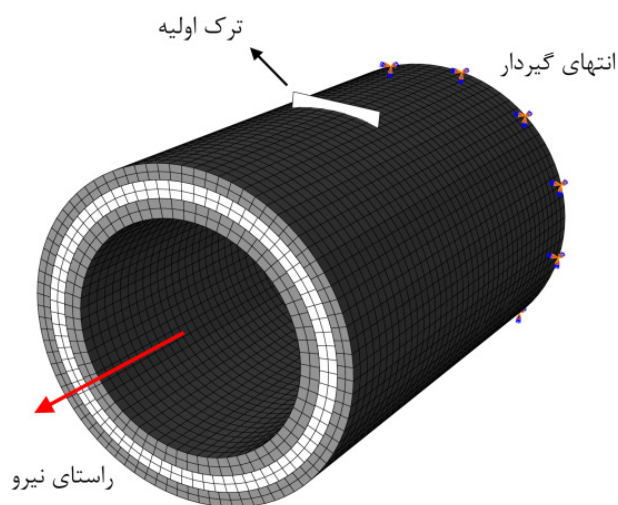
بیرونی و داخلی عمدتاً از جنس کیتین و لایه میانی به صورت ترکیبی از کیتین و پروتئین است. حضور این لایه میانی می‌تواند سبب افزایش قابلیت انعطاف‌پذیری بال پیش از پیدایش شکست شود. به علاوه اینکه وجود پروتئین در لایه میانی می‌تواند با افزایش قابلیت جذب انرژی حین تغییر شکل الاستیک (برجهنگی^۲) سبب افزایش مقاومت رگه در برابر پیدایش و رشد ترک شود. ضخامت متوسط لایه‌های تشکیل‌دهنده رگه (۷ نمونه بررسی شده) به ترتیب از داخل به خارج ۷/۶۹، ۷/۱۱ و ۶/۳۵ میکرومتر است. بررسی سطح شکست رگه‌ها نشان می‌دهد که لایه‌های تشکیل‌دهنده رگه از سطح شکست شبیه مواد ترد برخوردارند.

۳-۲- پیدایش و گسترش ترک در رگه

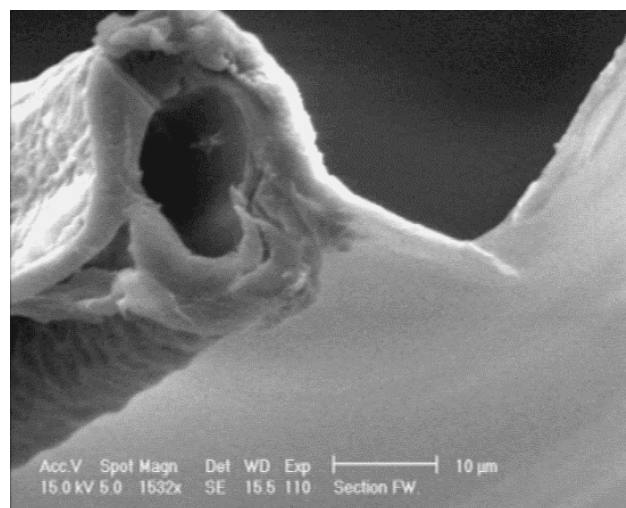
نتایج به دست آمده از تحلیل عددی در شکل ۴ آورده شده است. در این شکل توزیع تنش اصلی حداکثر بر اساس مگاپاسکال، در شش مرحله زمانی، به طور جداگانه برای سه لایه اصلی رگه ارائه شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مشاهده بهتر رشد ترک در لایه‌های رگه، ضمن نمایش جداگانه لایه‌ها، برش‌هایی طولی به اندازه یک چهارم از مدل اصلی در این جدول نشان داده شده‌اند.

مرحله ۱ نشان‌دهنده شروع رشد ترک در لایه بیرونی است. به وضوح می‌توان تمرکز تنش در نوک ترک را مشاهده کرد. بدیهی است که دلیل شروع رشد ترک از لایه بیرونی وجود ترک اولیه در آن می‌باشد. وجود ترک در لایه بیرونی سبب می‌شود که لبه‌های آزاد لایه بیرونی به لایه میانی فشار وارد کرده و این امر سبب پیدایش تنش در لایه میانی شود. همچنین در این مرحله، پیدایش تنش در لایه داخلی رگه نیز مشهود است. مرحله ۲ پدید آمدن یک ترک اولیه بسیار کوچک در لایه داخلی را نشان می‌دهد که تا حدود نصف ضخامت این لایه رشد کرده است. نکته حائز اهمیت در این مرحله این است که ترک اولیه در لایه خارجی بدون انتقال به لایه میانی به رشد خود ادامه می‌دهد. دیگر آنکه ترک اولیه در لایه داخلی در حالی شکل می‌گیرد که لایه میانی همچنان در برابر بروز ترک مقاومت می‌نماید. دلیل این پدیده را می‌توان با بیشتر بودن چقرمگی لایه میانی در مقایسه با لایه داخلی توجیه نمود. مرحله ۳ رشد بیشتر ترک در لایه خارجی را نشان می‌دهد ضمن اینکه ترک در لایه داخلی همچنان از نصف ضخامت این لایه فراتر نرفته است. در مرحله ۴ ترک همچنان در لایه خارجی در حال رشد است اما بخش کوچکی از این لایه که در برابر رشد ترک مقاومت می‌کند مانع از جدایش کامل دو نیمه این لایه از یکدیگر می‌شود. در این مرحله، ترک در لایه داخلی شروع به گسترش کرده و مقدار تمرکز تنش در لایه میانی بیشتر شده است. اما هنوز هیچ ترکی در لایه میانی مشاهده نمی‌شود. مرحله ۵ پیدایش ترک اولیه در لایه میانی را نشان می‌دهد. در این مرحله ترک در دو لایه خارجی و داخلی به طور کامل رشد کرده و بخش عمده‌ای از این دو لایه از تنش خالی شده است. در این مرحله این تنها لایه میانی است که در

شکل می‌گیرد. وقتی که ترک در یک المان به وجود می‌آید، المان مذکور به دو بخش تقسیم می‌شود و در این هنگام المان چسبناک در میان دو بخش المان وارد می‌گردد. در این مقاله، برای مشخص کردن رفتار ساختاری المان‌های چسبناک از قانون کشش-جدایش خطی استفاده شده است. پارامترهای مورد نیاز برای تعریف ترک به کمک روش المان محدود توسعه یافته شامل استحکام نهایی ماده و انرژی شکست آن می‌باشد که مقادیر آن‌ها در بخش ۲-۳-۲ آمده است.



شکل ۲: مشخصات هندسی مدل، شرایط مرزی آن و محل قرارگیری ترک

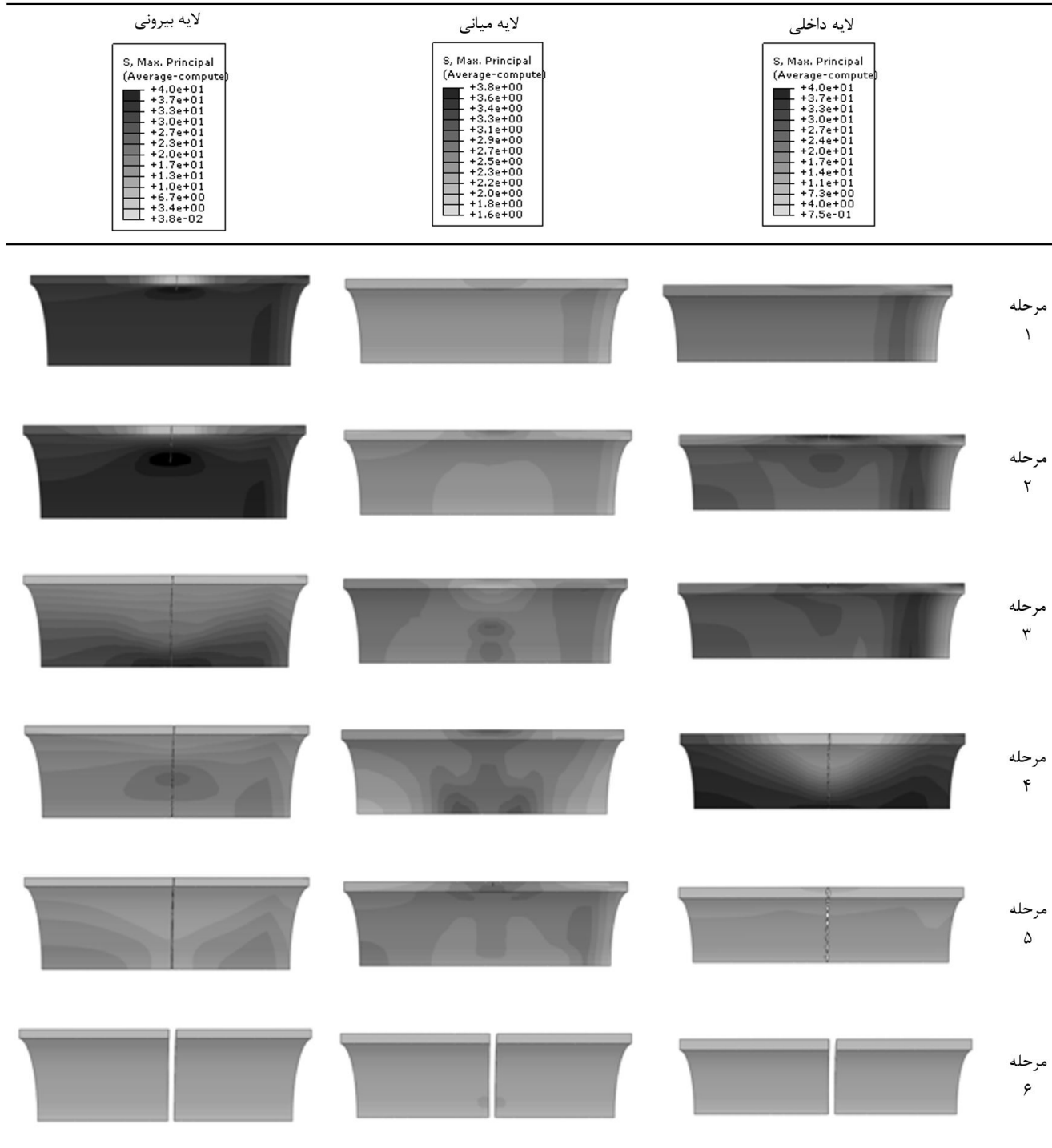


شکل ۳: عکس میکروسکوپی از رگه بال سنجاقک

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ساختار میکروسکوپی رگه

با استفاده از نتایج حاصل از عکس‌برداری میکروسکوپی، می‌توان دریافت که رگه‌های بال سنجاقک ساختارهایی لوله‌ای شکل و توخالی هستند که بطور کلی از سه لایه اصلی تشکیل یافته‌اند (شکل ۳). دو لایه



شکل ۴: توزیع تنش اصلی حداکثر برای سه لایه رگه در شش مرحله، مقادیر بر حسب مگاپاسکال

شبه‌سازی رفتار شکست رگه‌های بال برخوردار است. همانطور که در شکل ۵ دیده می‌شود، هر دو نمودار شامل سه نقطه حداکثری می‌باشند. اولین نقطه حداکثری در این دو نمودار مربوط به گسستگی لایه بیرونی رگه می‌باشد. نقطه دوم حداکثری که در سطح پایین‌تری نسبت به نقطه اول حداکثری است نشانگر گسست در لایه داخلی رگه است. آخرین نقطه حداکثری که در پایین‌ترین سطح تنش قرار دارد مربوط به لایه میانی رگه است. لایه میانی به دلیل تفاوت در جنس و برخورداری از چقرمگی بیشتر، آخرین لایه‌ای است که دچار گسست می‌شود. میزان خطا در مقدار تنش

برابر کشش از خود مقاومت نشان می‌دهد. به عبارت دیگر ترک زمانی در لایه میانی به وجود می‌آید که ترک در دو لایه دیگر تقریباً به طور کامل رشد نموده است. مرحله ۶ رشد کامل ترک در هر سه لایه و دونیم شدن رگه را نشان می‌دهد.

در شکل ۵ نمودار تنش - کرنش به دست آمده از یک نمونه تست تجربی و شبه‌سازی عددی نمایش داده شده است. کلیه نمونه‌ها در ۸ تست تجربی موفق انجام شده از رفتار نسبتاً مشابهی برخوردار بودند. مقایسه نتایج بیانگر این است که مدل ارائه شده از دقت مطلوبی در

رشد ترک در لایه میانی در کرنش بیشتری (تقریباً معادل ۲/۳٪) رخ می‌دهد.

۴- جمع‌بندی

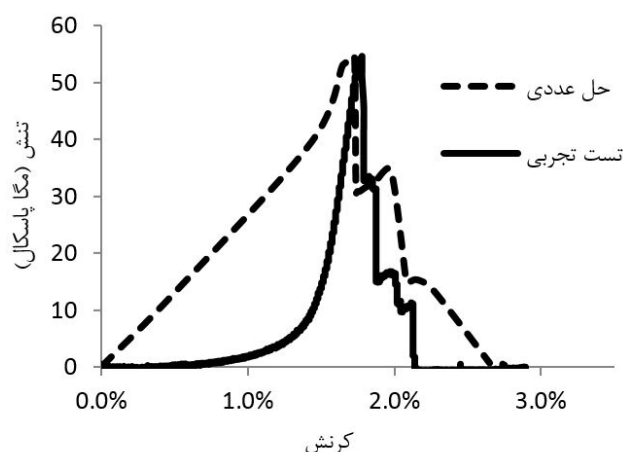
در این مقاله مجموعه‌ای از روش‌های میکروسکوپی، آزمون تجربی کشش و شبیه‌سازی المان محدود به منظور بررسی رفتار شکست رگه بال سنجاقک به کار گرفته شد. نتایج حاصل از بررسی‌های میکروسکوپی، نشان داد که رگه از سه لایه اصلی تشکیل شده است. دو لایه داخلی و خارجی عمدتاً از جنس کیتین ساخته شده‌اند و لایه میانی در مقایسه با دو لایه دیگر دارای مقادیر پروتئین بیشتری می‌باشد. بررسی نتایج حاصل از تست‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی نشان می‌دهد که رفتار مکانیکی رگه‌های بال تا هنگام بروز شکست را می‌توان با فرض رفتار الاستیک با دقت خوبی شبیه‌سازی نمود. شبیه‌سازی عددی تست کشش انجام شده بر روی رگه که چگونگی فرآیند رشد ترک در رگه را نشان می‌دهد حاکی از این است که لایه میانی پروتئینی در مقایسه با دو لایه داخلی و خارجی از مقاومت بیشتری در برابر رشد ترک برخوردار است. بروز و گسترش شکست از لایه بیرونی آغاز شده، در لایه داخلی ادامه یافته و به لایه میانی ختم می‌شود. نمودار تنش-کرنش به دست آمده از شبیه‌سازی عددی که دارای دقت مطلوبی از لحاظ پیش‌بینی تنش و کرنش در زمان وقوع شکست در هر لایه می‌باشد، نشان می‌دهد که روش مدل‌سازی و شبیه‌سازی ارائه شده می‌تواند برای بررسی رفتار شکست ساختارهای حیاتی مشابه به کار گرفته شود.

نتایج نشان می‌دهند که می‌توان ساختار کامپوزیتی رگه و همچنین چگونگی رفتار آن در برابر ایجاد و گسترش ترک را در فضای عددی، با تعیین خواص مکانیکی نسبتاً ساده، با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی نمود. شناخت ساختار رگه‌های بال حشرات و چگونگی رفتار آن‌ها در برابر گسترش ترک می‌تواند در مسیر طراحی، ساخت و به کارگیری سازه‌هایی با مقاومت بالا در برابر رشد ترک، با الگوبرداری از طبیعت، استفاده گردد.

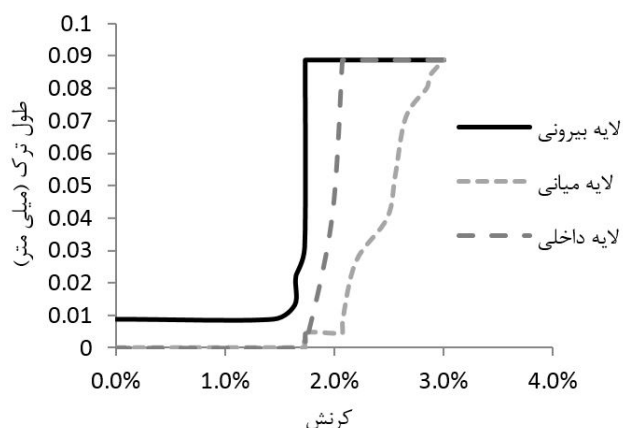
۵- مراجع

- [1] Rajabi, H., Moghadami, M. and Darvizeh. A., 2000. "Investigation of microstructure, natural frequencies and vibration modes of dragonfly wing," *Journal of Bionic Engineering*, 8(2), pp. 165-173.
- [2] Rajabi, H. and Darvizeh. A., 2013. "Experimental investigations of the functional morphology of dragonfly wings," *Chinese Physics B*, 22(8), pp. 088702.
- [3] Darvizeh, M., Darvizeh, A., Rajabi, H. and Rezaei. A., 2009. "Free vibration analysis of dragonfly wings using finite element method," *The International Journal of Multiphysics*, 3(1), pp. 101-110.
- [4] Rajabi, H., Ghoroubi, N., Darvizeh, A., Dirks, J-H.,

شکست پیش‌بینی شده در لایه‌های رگه توسط روش عددی ارائه شده در مقایسه با روش تجربی به ترتیب ۱/۸٪، ۷/۳٪ و ۷٪ می‌باشد. گفتنی است که تفاوت اولیه در شکل دو نمودار تجربی و عددی می‌تواند به دلیل عدم کشیدگی نمونه رگه تا لحظاتی پس از شروع تست تجربی باشد. کاهش شیب در نمودار تنش-کرنش پس از هر نقطه حداکثری بیانگر کاهش سفتی ماده تشکیل‌دهنده رگه‌های بال حشره پس از هر مرحله گسترش ترک است. به عبارت دیگر، بروز شکست در هر لایه سبب کاهش محسوس مقاومت رگه در برابر تغییر شکل اعمال شده می‌گردد.



شکل ۵: نمودار تنش کرنش حاصل از شبیه‌سازی عددی و یک نمونه تست کشش



شکل ۶: نمودار طول ترک کرنش برای سه لایه تشکیل‌دهنده رگه

در شکل ۶ نمودار طول ترک-کرنش حاصل از شبیه‌سازی عددی نشان داده شده است. نمودار به وضوح گویای ترتیب رشد ترک در سه لایه می‌باشد. به عبارت دیگر، شروع رشد ترک در هر لایه زمانی آغاز می‌شود که ترک در لایه قبلی تقریباً به طور کامل رشد کرده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود ترک در لایه میانی رگه در مقایسه با دو لایه دیگر با شیب ملایمتری رشد می‌کند. ترک در دو لایه داخلی و خارجی پس از پیدایش در کرنشی کمتر از ۱/۸٪ گسترش می‌یابد، در حالی که

- [15] Rajabi, H., Darvizeh, A., Shafiei, A., Taylor, D. and Dirks, J-H., 2015. "Numerical investigation of insect wing fracture behavior," *Journal of Biomechanics*, 48(1), pp. 89-94.
- [16] Darvizeh, A., Anami Rad, S., Darvizeh, M., Ansari, R. and Rajabi, H., 2014. "Investigation of microstructure and mechanical behavior of Woodlouse shells using experimental methods and numerical modeling," *Modares Journal of Mechanical Engineering*, 14, pp. 183-190.
- [17] Darvizeh, A., Shafiei, Darvizeh, M., Habibollahi H. and Rajabi, H., 2014. "Investigation of the effects of constructional elements on the biomechanical behavior of desert locust hind wing," *Modares Journal of Mechanical Engineering*, 14, pp. 235-244.
- [18] Rajabi, H., Monsef, M., Darvizeh, A. and Shafiei, A., 2014. "Numerical investigation of fracture behavior of beetle elytra," *4th International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application (CCFA-4)*, Tehran.
- [19] Rajabi, H., Bazargan, P., Pourbabaei, A., Darvizeh, A., Shafiei, A. and Eshghi, Sh., 2014. "Simulation of fatigue crack propagation in insect cuticle," *4th International Conference on Composites: Characterization, Fabrication and Application (CCFA-4)*, Tehran.
- [20] Darvizeh, A., Rajabi, H., Khaheshi, A., Etedadi, J. and Sobhani, M. K., 2011. "Morphological and numerical investigations of butterfly wing composite structure," *International Bionic Engineering Conference*, Boston.
- [21] Darvizeh, A., Rajabi, H., Khaheshi, A., Sobhani, M. K. and Etedadi, J., 2011. "Investigation of bee wing composite structure: A scanning electron microscopy study and numerical analysis," *International Bionic Engineering Conference*, Boston.
- Appel, E. and S. N. Gorb, 2015. "A comparative study of the effects of vein-joints on the mechanical behaviour of insect wings: I. Single joints," *Bioinspiration & Biomimetics*, 10(5), pp. 056003.
- [5] Taylor, D., Hazenberg, J. G. and Lee, T. C., 2007. "Living with cracks: damage and repair in human bone," *Nature materials*, 6(4), pp. 263-268.
- [6] Bloch, R., 1941. "Wound healing in higher plants," *The Botanical Review*, 7(2), pp. 110-146.
- [7] Martin, P., 1997. "Wound healing--aiming for perfect skin regeneration," *Science*, 276(5309), pp. 75-81.
- [8] Lai-Fook, J., 1968. "The fine structure of wound repair in an insect (*Rhodnius prolixus*)," *Journal of morphology*, 124(1), pp. 37-77.
- [9] Smith, C. W., Herbert, R., Wootton, R. J. and Evans, K. E., 2000. "The hind wing of the desert locust (*Schistocerca gregaria* Forskal). II. Mechanical properties and functioning of the membrane," *Journal of Experimental Biology*, 203(19), pp. 2933-2943.
- [10] Dirks, J-H. and Taylor, D., 2012. "Veins improve fracture toughness of insect wings," *PloS one*, 7(8), pp. e43411.
- [11] Chen, Y. L., Wang, X. Sh., Ren, H. H., Yin, H. and Jia. S., 2012. "Hierarchical dragonfly wing: Microstructure-biomechanical behavior relations," *Journal of Bionic Engineering*, 9(2), pp. 185-191.
- [12] Vincent, J. F. V. and Wegst, U. G. K., 2004. "Design and mechanical properties of insect cuticle," *Arthropod Structure & Development*, 33(3), pp. 187-199.
- [13] Fung, Y. C., 2013. "Biomechanics: mechanical properties of living tissues," *Springer*, New York.
- [14] Dirks, J-H., and Taylor, D., 2012. "Fracture toughness of locust cuticle," *The Journal of Experimental Biology*, 215(9), pp. 1502-1508.

