



بررسی تأثیر هیمولیمف بر رفتار بیومکانیکی رگ‌های بال سنجاک

صالح مبصری^۱، اعظم زارع^۲، حامد رجبی^۳

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

۳- مورفولوژی کاربردی و بیومکانیک، مؤسسه زیست‌شناسی، دانشگاه کیل، کیل، آلمان

azare@miau.ac.ir

چکیده:

ماده تشکیل دهنده بال‌های سنجاک، ماده‌ای مرکب پیچیده‌ای با کارایی مکانیکی چشمگیر می‌باشد. این ماده حیاتی، ضمن برخورداری از نسبت استحکام به وزن بالا، دارای استحکام خستگی بالایی بوده و قادر است نیروهای دینامیکی اعمال شده در حین پرواز را به خوبی تحمل کند. بال‌های سنجاک، دارای یکسری مکانیزم غیر فعال همچون تغییرات ضخامت رگ‌ها، مفاصل رگ‌ها، وجود گرادبان ماده، چروکیدگی و جریان خون هستند. در این میان، جریان خون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این رو هدف این پژوهش، بررسی تأثیر جریان خون بر تغییر شکل رگه بال ضمن پرواز می‌باشد. در این مقاله، برای اولین بار با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی بر هم کنش سیال-جامد، تأثیر خون سنجاک، موسوم به هیمولیمف، در دو حالت ساکن و متحرک بر سختی خمشی، سختی پیچشی و رفتار کمانش رگه بررسی شده است. برای آنالیز رفتار رگه، از روش دینامیک سیالات محاسباتی و آکوستیک در نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده می‌شود. رفتار رگه به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شود و هیمولیمف به صورت یک سیال نیوتنی غیر قابل تراکم در هر دو حالت ساکن و متحرک فرض می‌گردد. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی عددی نشان دهنده آن است که حضور هیمولیمف درون رگ‌ها، موجب افزایش مقاومت رگه در برابر خمش، پیچش و کمانش می‌شود. همچنین جریان هیمولیمف درون رگه، موجب افزایش سختی خمشی، سختی پیچشی و مقاومت کمانشی می‌گردد. نتایج حاصل از این پژوهش، می‌تواند پایه‌ای برای مدلسازی واقع‌بینانه‌تری از جریان هیمولیمف درون رگه بال سنجاک و اثر آن روی تغییر شکل بال باشد.

کلید واژگان: بال سنجاک، رگه، هیمولیمف، بیومکانیک

Investigation of the effect of hemolymph on biochemical behavior of dragonfly wing veins

Saleh Mobasseri¹, Azam Zare² and Hamed Rajabi³

1-Department of Mechanical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran

3-Institute of Zoology, Functional Morphology and Biomechanics, Kiel University, Kiel, Germany

†Corresponding Author Email: azare@miau.ac.ir

Abstract:

Dragonfly wings are composite materials with impressive mechanical performance. This biological material in addition to a high strength to weight ratio, has a high fatigue strength and can support forces applied to the wings in flight. There is a series of passive mechanisms in dragonfly wings, such as changes in the thickness of the veins, vein joints, material gradient, corrugation and hemolymph (blood) flow. Only a few studies, however, have focused on the blood flow. Therefore, the purpose of this study is to investigate the effect of hemolymph flow on the deformation of wing veins during flight. In this paper, for the first time, we use a computational solid-fluid interaction analysis to model the hemolymph in the veins in both stationary and moving states. We analyze the effect of hemolymph on the bending stiffness, torsional stiffness and buckling behavior of a modelled vein. The behavior of the vein is simulated using the computational fluid dynamic and acoustic methods in the finite element software package ABAQUS. The behavior of the vein is assumed to be linear elastic, and hemolymph is assumed to be a non-Newtonian incompressible fluid in both stationary and nonstationary states. Numerical results indicate that the presence of hemolymph in the vein increases its strength against bending, torsion and buckling deformations. The flow of hemolymph also increases the bending.

Keywords: Dragonfly wing, vein, hemolymph, biomechanics

سنجاک را بر روی ۱۲ مدل از بال جلو و عقب بررسی کردند و این مدل‌ها را تحت تنش‌های نرمال و برشی قرار دادند. نتایج آنها بیانگر این است که میان رگ‌ها، غشاءها و چروکیدگی‌های بال ارتباط پیچیده‌ای وجود دارد که می‌تواند تأثیر به‌سزایی در تغییر شکل بال حشرات بگذارد. همچنین نشان دادند که وجود رگ‌های عرضی، کاهش فرکانس طبیعی بال را به دنبال دارد. در این مقاله، تأثیر حضور سیال درون رگ حشرات موسوم به هیمولیمف^۲ بر رفتار بیومکانیکی بال سنجاک مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، رگ بال سنجاک با طول ۰/۱ میلی‌متر همچون تیر یک سر گیردار، در نظر گرفته شده است و اثر متقابل سیال هیمولیمف بر روی سختی خمشی^۳ و سختی پیچشی^۴ رگ بال به صورت عددی به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی^۵ و آکوستیک^۶ مورد بررسی قرار گرفته است. جریان هیمولیمف و برهم کنش لایه‌های الاستیک رگ توسط نرم افزار آباکوس^۷ شبیه سازی شده است. هیمولیمف به عنوان یک جریان سیال نیوتنی غیر قابل تراکم با سرعت ورودی mm/s ۰/۲۶ و فشار خروجی N/mm^2 10^{-6} در نظر گرفته شده است.

۲- توصیف و شبیه سازی مدل رگ

در این بخش رویکردها، روش‌ها و خواص مواد تشکیل دهنده رگ مورد بررسی قرار خواهند گرفت. در قسمت اول، ریز ساختار رگ و هندسه آن ارائه خواهد شد و در قسمت دوم، خواص مکانیکی رگ توضیح داده می‌شود. در قسمت سوم، بارگذاری و شرایط مرزی جهت انجام تحلیل‌های خمشی، پیچش رگ، توصیف می‌گردند و در نهایت، مدلسازی خمشی، پیچش و کمانش بررسی خواهند شد.

۲-۱- ریزساختار رگ

مطالعات و تصاویر میکروسکوپی بیانگر آن است که رگ‌های بال سنجاک، ساختاری کامپوزیتی دارند که از شش لایه قابل تشخیص تشکیل شده‌اند که در شکل ۱، نمایی از لایه‌های مختلف رگ نشان داده شده است [۲۱]، هیمولیمف، در مرکز رگ قرار دارد. همچنین، ضخامت لایه‌های مختلف رگ در جدول ۱ ارائه گردیده است.

تحقیقات و مطالعات متعددی بر روی سیستم‌های زیستی صورت گرفته که از اوایل قرن بیستم میلادی توجه افرادی همچون تامسون [۱] را جلب کرده است. ساختار هندسی مواد بیولوژیکی تأثیر به‌سزایی بر رفتار مکانیکی آنها دارند و لذا باید با دقت بیشتری در طراحی سیستم‌های مهندسی مورد استفاده قرار گیرند [۶-۲]. در این میان، بال‌های حشرات یکی از نمونه‌های بسیار خوب و شگفت‌انگیز از طراحی مهندسی در طبیعت می‌باشند. این بال‌ها، سازه‌های کامپوزیتی بسیار سبکی می‌باشند که در برابر نیروهای آیرودینامیکی مقاومت کافی از خود نشان می‌دهند؛ بنابراین می‌توان بال‌های سنجاک را یکی از بهترین مثال‌ها در نظر گرفت [۱۱-۷]. بال‌های سنجاک، این حشره را قادر می‌سازد که مانورها و پروازهایی طولانی مدت داشته باشد. بدون شک، ساختارهای میکروسکوپی و ماکروسکوپی بال سنجاک، می‌تواند رفتار و عملکرد مکانیکی این سازه‌ی کامپوزیتی طبیعی را بهبود ببخشد [۷]. تنش‌های محیطی، فشار و بارهای خارجی می‌تواند منجر به ایجاد ترک در سازه‌های حیاتی شود. بسیاری از ساختارهای طبیعی همچون پوست بدن انسان و استخوان، داری قابلیت خود ترمیمی هستند و می‌توانند نقص و ترک ایجاد شده را ترمیم و برطرف نمایند [۱۲-۱۳]؛ این در حالی است که بال‌های سنجاک دارای چنین قابلیت و توانایی نیستند [۷، ۱۴]. بال‌های حشرات در طول پرواز تحت اثر نیروهای اینرسی، آیرودینامیکی والاستیک قرار می‌گیرند. نیروهای اینرسی از به حرکت درآمدن بال، تغییر در جهت بال زنی و تغییر در شتاب بال ایجاد می‌گردند. در حین پرواز حشرات، نیروهای آیرودینامیکی از طریق هوا به بال وارد شده و نیروهای الاستیک نیز به وسیله ماهیچه‌های بدن حشره ایجاد می‌گردند. این نیروها موجب ایجاد تنش و تغییر شکل در بال‌های حشرات می‌شوند [۱۷-۱۵]. مطالعات اولیه درباره مکانیک بال حشرات، توسط ووتن انجام گرفت [۱۸]. نتایج وی بیانگر آن است که بسیاری از ویژگی‌های مورفولوژی بال، با کنترل شکل سه بعدی آن ارتباط دارند. علاوه بر این، طراحی مکانیکی بال‌های حشرات توسط ووتن مورد مطالعه قرار گرفت [۱۹]. رجبی و همکارانش، ضمن بررسی خواص ریز ساختاری و خصوصیات مورفولوژی بال، فرکانس طبیعی بال جلویی سنجاک را محاسبه کردند و با نتایج حاصل از تست‌های آزمایشگاهی مطابقت دادند [۱۰]. رجبی و همکارانش، رفتار مکانیکی محل اتصالات رگ‌های را تحت بارگذاری خارجی شبیه سازی و محاسبه نمودند. نتایج آنها بیانگر آن است که هندسه و حضور نوعی ماده پرتئینی موسوم به رزیلین^۱ بر انعطاف پذیری محل اتصال رگ‌ها تأثیر دارد. همچنین نتایج آنها نشان می‌دهد که وجود رگ‌های عرضی نقش مهمی در انتقال تنش به رگ‌های طولی دارند [۹]. در تحقیقی دیگر، اثر اتصال رگ‌ها که می‌تواند به طور قابل توجهی بر تغییر شکل بال و عملکرد پرواز حشرات تأثیر بگذارد، توسط رجبی و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت [۲۰]. آنها اثر عناصر ساختاری بال

^۲-Hemolymph

^۳- Bending Rigidity (EI)

^۴-Torsional Rigidity (GJ)

^۵- Computational fluid dynamics (CFD)

^۶-Acoustic

^۷-Abaqus

^۱-Resilin

جدول (۱) - ضخامت لایه‌های مختلف رگه بال سنجاقک [۲۱]

ضخامت (μm)	لایه رگه
۰/۸	اپی کیوتیکل ^۸
۳/۹	اگزو کیوتیکل ^۹
۶/۹	مزو کیوتیکل ^{۱۰}
۱/۴	اگزو کیوتیکل ^۲
۱۶/۴	اندو کیوتیکل ^{۱۱}
۴	لایه‌ی مخلوط ^{۱۲}



شکل ۱: تصویر میکروسکوپی رگه بال [۲۱]

جدول (۳): خواص مکانیکی هیمولیمف [۲۷-۲۸]

مقدار عددی	خاصیت مکانیکی
$1/0.5 \times 10^{-6}$	چگالی (kg/mm^3)
$2/4 \times 10^{-9}$	ضریب لزجت ^{۱۶} (Ns/mm^2)
۳۷۶۰۰۰	مدول حجمی ^{۱۷} (N/mm^2)

۳-۲- شرایط مرزی و بارگذاری

رگه بال، به صورت تیر یک سر گیردار به طول ۰/۱ میلی‌متر مدلسازی می‌شود. شرایط بارگذاری به گونه‌ای است که تغییر شکل کمتر از ۵٪ طول مدل باشد [۲۹]. جهت محاسبه میزان خمش، پیچش و کمانش مدل رگه (شکل ۲)، شرایط مرزی متفاوتی اعمال می‌گردند. به منظور بررسی خمش رگه بال، یک جابجایی به اندازه^۳ 2×10^{-3} متر به انتهای آزاد رگه وارد می‌شود تا ممان خمشی به محور طولی رگه اعمال شود. در تحلیل پیچش، به اندازه‌ی ۰/۷۵ درجه پیچشی به انتهای آزاد رگه وارد می‌شود تا ممان پیچشی نسبت به محور طولی رگه اعمال گردد [۲۱]. در تحلیل کمانش نیروی فشاری نرمال به میزان ۰/۰۰۱ مگاپاسکال در انتهای آزاد مدل رگه اعمال می‌شود. هندسه رگه و نوع شبکه مورد استفاده، در شکل ۲ نشان داده شده است.

ناحیه مورد بررسی، شرایط مرزی و شبکه مورد استفاده در مطالعه هیمولیمف، در شکل ۳ نشان داده شده است. شرایط مرزی مورد استفاده عبارتند از:

- ۱- در ورودی، سرعت ثابت 0.026 mm/s تخصیص داده شده است [۲۶]
- ۲- در خروجی، فشار ثابت 10^{-6} N/mm^2 اعمال گردیده است [۳۰]
- ۳- روی دیواره رگه، شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است.

۴-۲- مدلسازی خمش

رگه به صورت تیر یک سر گیردار در نظر گرفته شده است به گونه‌ای که جابجایی الاستیک^{۱۸} δ در انتهای آزاد به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۳۱]:

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} \quad (1)$$

آنالیز خمش توسط نرم افزار آباکوس روی رگه‌ای به طول ۰/۱ میلی‌متر با اعمال جابجایی^۳ 2×10^{-3} متر در انتهای آزاد رگه در جهت Y - صورت می‌پذیرد. نیروی عکس العمل لازم جهت اعمال جابجایی محاسبه می‌گردد که نتیجه آن، محاسبه سختی خمشی (EI) توسط رابطه (۱) می‌باشد.

۲-۲- خواص مکانیکی رگه

اطلاعات تجربی راجع به خواص مکانیکی بال حشرات و هیمولیمف، به صورت محدود در مقالات ارائه شده است [۲۵-۲۲]. مدول الاستیسیته^{۱۲}، چگالی^{۱۴} و ضریب پواسون^{۱۵} مورد استفاده در این شبیه سازی در جدول ۲ درج شده است [۲۱]. همچنین، خصوصیات هیمولیمف به عنوان سیال نیوتنی غیرقابل تراکم در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول (۲): خواص مکانیکی لایه های رگه‌ی بال [۲۱]، مدول

الاستیسیته N/mm^2 و چگالی kg/mm^3

ضریب پواسون	چگالی	مدول الاستیسیته	لایه رگه
۰/۳	$1/2 \times 10^{-6}$	$2/85 \times 10^3$	اپی کیوتیکل
۰/۳	$1/2 \times 10^{-6}$	$6/17 \times 10^3$	اگزو کیوتیکل ۱
۰/۳	$1/1 \times 10^{-6}$	$4/0.85 \times 10^3$	مزو کیوتیکل
۰/۳	$1/2 \times 10^{-6}$	$6/17 \times 10^3$	اگزو کیوتیکل ۲
۰/۳	1×10^{-6}	2×10^3	اندو کیوتیکل
۰/۳	$1/1 \times 10^{-6}$	3×10^3	لایه مخلوط

- ⁸ -Epicuticle
- ⁹ -Exocuticle
- ¹⁰ -Mesocuticle
- ¹¹ -Endocuticle
- ¹² -Mixed layer
- ¹³ -Young's modulus
- ¹⁴ -Density
- ¹⁵ -Poisson's ratio

- ¹⁶ -Viscosity
- ¹⁷ -Bulk modulus
- ¹⁸ -Deflection

۲- رگه با حضور هیمولیمف ساکن بدون جریان (رگه با سیال ساکن).

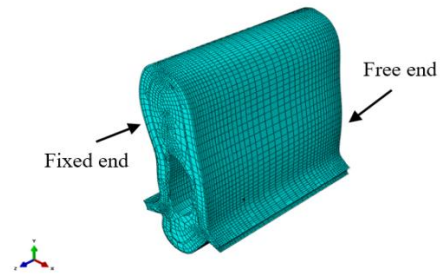
۳- رگه با حضور جریان هیمولیمف (رگه با سیال متحرک). در هر مورد، مراحل شبیه سازی المان محدود رگه و هیمولیمف به گونه‌ای است که ابتدا تمام خصوصیات مورد نیاز لایه‌های رگه و سیال هیمولیمف در نرم افزار وارد می‌شود. سپس ناحیه مورد نظر، توسط شبکه‌های سه بعدی شش گوشه^{۱۹} شبکه بندی می‌گردند. مشخصات شبکه مورد استفاده در جدول ۴ ارائه شده است. در مرحله بعد، آنالیز دینامیکی با اعمال شرایط مرزی انجام می‌شود و در نهایت، برهم کنش سیال هیمولیمف با لایه‌های رگه، توسط روش دینامیک سیالات محاسباتی و آکوستیک در نرم افزار آباکوس بررسی خواهد شد.

جدول (۴)- مشخصات شبکه بندی رگه و هیمولیمف

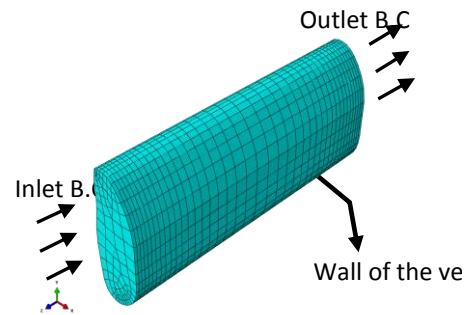
حالت	ناحیه مورد	تعداد گره‌ها		
		کمانش	خمش	پیچش
رگه بدون سیال	رگه	۲۸۲۵۴	۴۸۰۰۶	۴۸۰۰۶
	هیمولیمف	---	---	---
رگه با سیال ساکن	رگه	۲۸۲۵۴	۴۸۰۰۶	۴۸۰۰۶
	هیمولیمف	۳۱۶۲	۴۷۸۸	۴۷۸۸
رگه با سیال محرک	رگه	۲۸۲۵۴	۴۸۰۰۶	۴۸۰۰۶
	هیمولیمف	۶۴۹۹	۴۷۸۸	۴۷۸۸

۳-۱- نتایج تحلیل خمش و پیچش رگه

در تحلیل‌های خمش و پیچش، حداکثر تنش اصلی^{۲۰} و کانتورهای توزیع فشار در سه حالت رگه بدون سیال، رگه با سیال ساکن و رگه با سیال متحرک به ترتیب در شکل‌های (۴ الف)، (۴ ب)، (۵ الف) و (۵ ب) نشان داده شده است. نتایج بیانگر آن است که وجود هیمولیمف درون رگه، موجب افزایش حداکثر تنش اصلی در رگه می‌شود. با توجه به کانتورهای تنش و فشار واضح است که حضور هیمولیمف درون رگه منجر به کاهش فشار در لایه‌های مختلف رگه می‌گردد. همچنین در جدول ۵، مقادیر مربوط به سختی خمشی، سختی پیچشی و نیروی عکس العمل ارائه شده است. مقادیر سختی خمشی و سختی پیچشی رگه، در شکل ۶ به صورت مقایسه‌ای نشان داده شده است. نتایج، نشان دهنده‌ی آن است که جریان هیمولیمف، سختی خمشی و پیچشی رگه را افزایش می‌دهد.



شکل (۲)- نمای سه بعدی و شبکه بندی مدل رگه



شکل (۳)- نمای سه بعدی و شبکه بندی سیال هیمولیمف

۲-۵- مدلسازی پیچش

مدل رگه با سطح مقطع یکنواخت که تحت تأثیر پیچش قرار می‌گیرد، به اندازه زاویه ϕ متناسب با گشتاور اعمال شده، می‌پیچد [۳۱]:

$$\phi = \frac{TL}{GJ} \quad (۲)$$

به گونه‌ای که L ، T و G به ترتیب گشتاور، طول تیر، مدول برشی و ممان اینرسی می‌باشند. برای تیری با شعاع مقطع r ، گشتاور T عبارت است از:

$$T = Fr \quad (۳)$$

رفتار پیچشی رگه، توسط نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار خواهد گرفت و نیروی مورد نیاز جهت ایجاد پیچش به اندازه 0.75° محاسبه می‌گردد. سپس سختی پیچشی (GJ) توسط معادله (۲) محاسبه خواهد شد.

۲-۶- مدلسازی کمانش

آنالیز کمانش، با استفاده از نیروی فشاری نرمال به میزان 0.01 مگاپاسکال در انتهای آزاد مدل رگه انجام می‌شود که نتیجه‌ی آن، به دست آمدن نیروهای کمانشی مورد نیاز در مودهای مختلف می‌باشد.

۳- نتایج عددی

شبیه سازی عددی برای محاسبه سختی خمشی، سختی پیچشی و نیروی کمانش رگه بال سنجاکف، تحت شرط مرزی خاص ارائه شده در قسمت ۲-۳ مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس مدل سه بعدی از لایه‌های مختلف رگه بال و جریان هیمولیمف، سه حالت مختلف مورد بررسی قرار خواهد گرفت که عبارتند از:

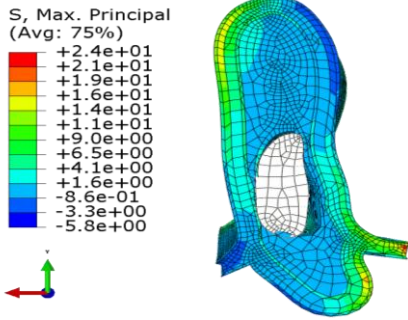
۱- رگه خالی بدون حضور هیمولیمف (رگه بدون سیال).

¹⁹- Hexahedral

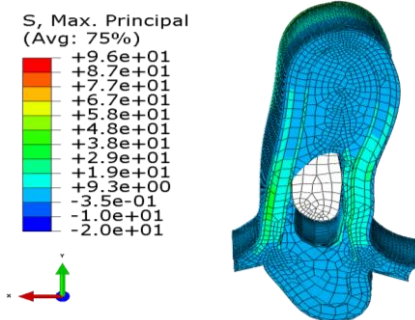
²⁰- Maximum Principal Stress

جدول (۵) - مقادیر سختی خمشی، سختی پیچشی و نیروهای عکس العمل در تحلیل‌های خمش و پیچش در سه حالت مختلف رگه

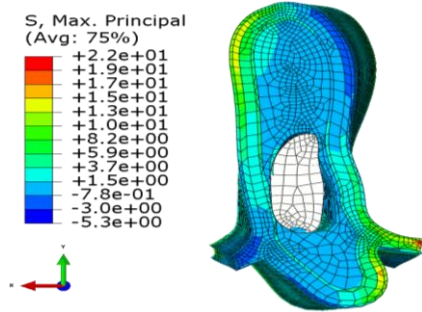
حالت رگه	نیروی عکس العمل رگه در تحلیل خمش (mN)	سختی خمشی EI (N)) ^۲ mm	نیروی عکس العمل رگه در تحلیل پیچش (mN)	سختی پیچشی GJ (N)) ^۲ mm
رگه بدون سیال	۰/۰۴۶۷۳	۰/۰۰۷۷۸۸	۴/۶۸×۱۰ ^{-۱۱}	-۱۱ ۲/۱۵×۱۰
رگه با سیال ساکن	۰/۰۷۰۱۹	۰/۰۱۱۶۹۹	۱/۵۸×۱۰ ^{-۱۰}	-۱۱ ۸/۴۸×۱۰
رگه با سیال متحرک	۰/۰۷۱۴۴	۰/۰۱۱۹۰۷	۱/۲۱×۱۰ ^{-۱۰}	-۱۰ ۵/۵۵×۱۰



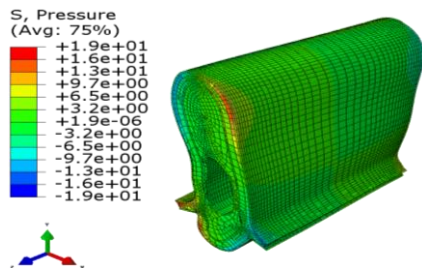
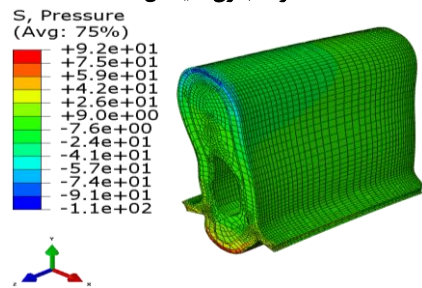
حالت ۳:
رگه با سیال متحرک
(الف)



(ب)



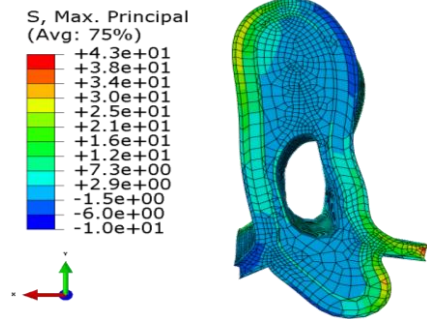
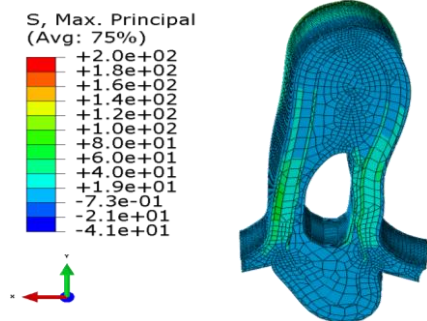
حالت ۱:
رگه بدون سیگنال



حالت ۲:
رگه با سیال ساکن

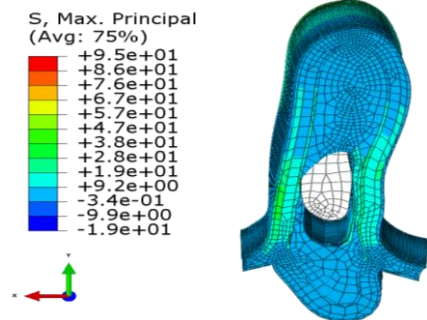
حالت ۱:

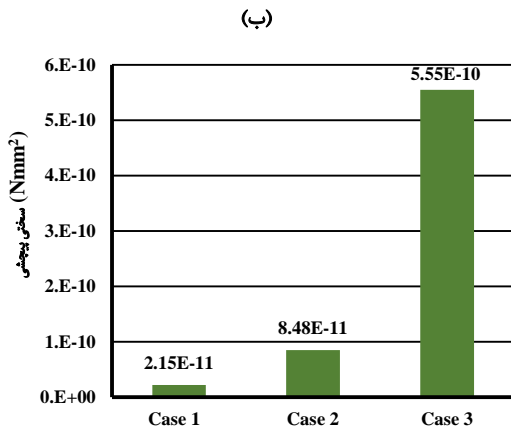
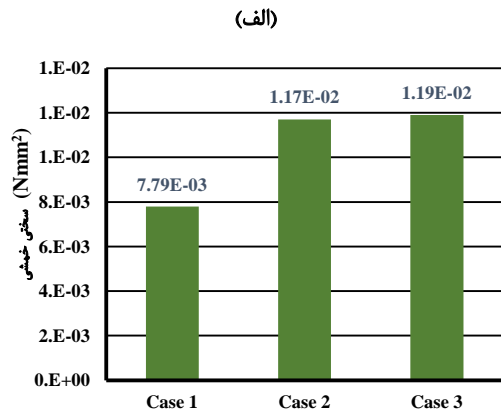
رگه بدون سیال



حالت ۲:

رگه با سیال ساکن

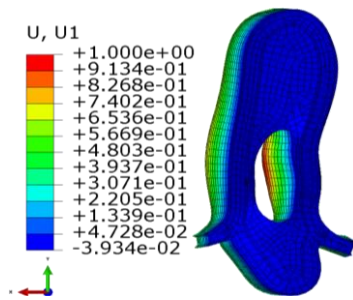




شکل (۶)- سختی خمشی (الف) و سختی پیچشی (ب) مربوط به مدل رگه در حالت ۱ (بدون سیال)، حالت ۲ (سیال ساکن) و حالت ۳ (سیال متحرک) شکل (۷)- کانتورهای جابجایی در آنالیز کماتش

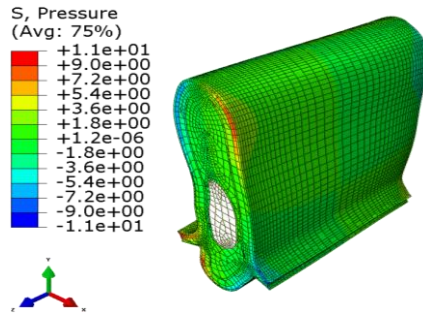
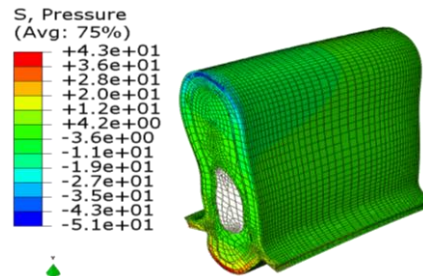
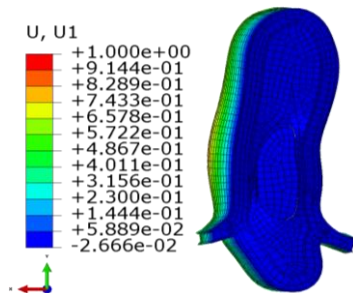
حالت ۱: رگه بدون سیال

الف

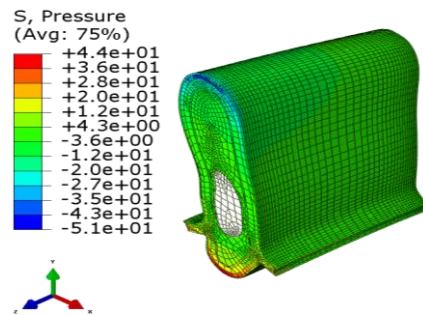


حالت ۲: رگه با سیال ساکن

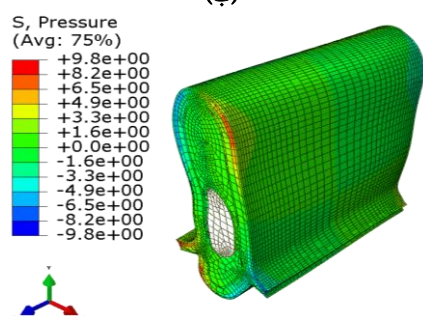
ب



حالت ۳:
رگه با سیال متحرک
(الف)



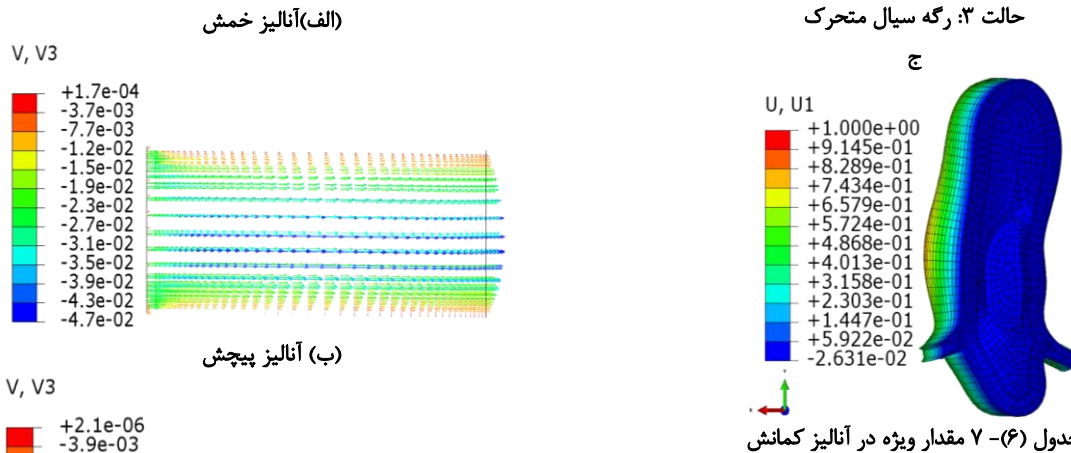
(ب)



شکل (۴): حداکثر تنش اصلی در تحلیل خمشی (الف) و تحلیل پیچشی (ب)

در سه حالت مختلف شکل

(۵): توزیع فشار در آنالیز خمشی (الف) و آنالیز پیچشی (ب) در سه حالت مختلف



جدول (۶) - مقدار ویژه در آنالیز کماتش

حالت ۳ رگه با سیال متحرک	حالت ۲ رگه با سیال ساکن	حالت ۱ رگه بدون سیال	
۴۴۶۸۰۲	۴۴۵۸۸۱	۴۳۳۳۵۱	۱
۵۳۵۵۲۷	۵۳۲۶۹۳	۵۰۴۴۱۵	۲
۵۴۷۴۵۱	۵۴۷۰۶۳	۵۳۸۴۷۵	۳
۵۵۷۰۷۰	۵۵۶۶۱۴	۵۵۲۷۷۲	۴
۵۸۵۰۰۳	۵۸۲۴۴۳	۵۶۲۴۰۷	۵
۶۴۲۰۵۶	۶۴۱۲۹۳	۶۱۴۲۹۱	۶
۶۵۲۹۹۷	۶۵۲۷۲۷	۶۳۰۸۶۷	۷

۲-۳- نتایج تحلیل کماتش رگه

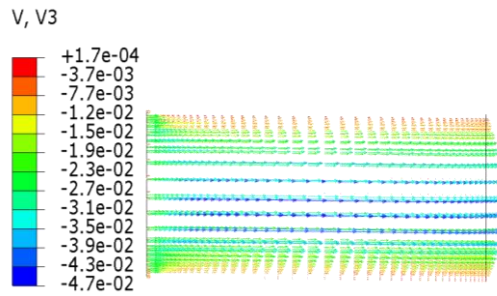
در آنالیز کماتش رگه، به کمک شبیه سازی عددی انجام شده، تعداد ۷ مقدار ویژه نیروی کماتش رگه در سه حالت رگه بدون سیال، رگه با سیال ساکن و رگه با سیال متحرک استخراج گردیده و در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که حضور سیال همولیمف، موجب افزایش مقدار نیروی لازم جهت کماتش رگه می‌شود. مقادیر ویژه ارائه شده در جدول ۶ بیانگر این نکته هستند که در حالت رگه با سیال متحرک که همولیمف دارای سرعت است، نیروی بیشتری برای کماتش رگه لازم می‌باشد. در شکل ۷، کانتورهای مربوط به جابجایی رگه در اثر فرآیند کماتش در سه حالت رگه بدون سیال، رگه با سیال ساکن و رگه با سیال متحرک نشان داده شده است.

کانتورها نشان دهنده آن هستند که حضور سیال درون رگه، موجب کاهش میزان جابجایی رگه در آنالیز کماتش می‌شود.

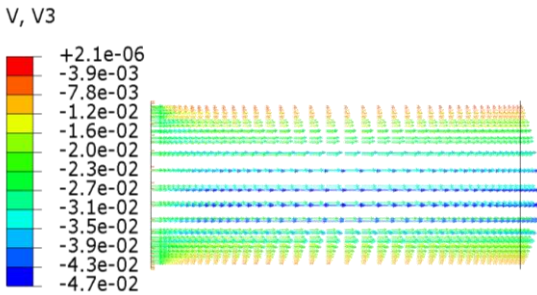
۳-۳- نتایج شبیه سازی همولیمف

در شکل ۸، بردارهای سرعت در راستای محوری برای جریان همولیمف درون رگه بال سنجاک در تحلیل‌های خمش، پیچش و کماتش نشان داده شده است. سرعت همولیمف درون رگه از مقدار صفر روی دیواره رگه (به دلیل اعمال شرط عدم لغزش در دیواره‌ها) تا مقدار ماکزیمم در مرکز رگه افزایش می‌یابد. پروفیل سرعت در جریان آرام همولیمف درون رگه، تحت شرایط بارگذاری در تحلیل‌های خمش و پیچش سهموی می‌باشد.

(الف) آنالیز خمش



(ب) آنالیز پیچش



۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، برای اولین بار با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی بر هم کنش سیال - جامد، تأثیر حضور همولیمف بر سختی خمشی، سختی پیچشی و رفتار کماتش رگه‌های بال سنجاک به طول ۰/۱ میلی‌متر به کمک روش دینامیک سیالات محاسباتی و آکوستیک در نرم افزار المان محدود آباکوس بررسی شده است. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی عددی بیانگر آن است که حضور همولیمف درون رگه موجب افزایش مقاومت رگه‌های بال سنجاک در برابر خمش، پیچش و کماتش می‌شود. همچنین جریان همولیمف درون رگه، موجب افزایش سختی خمشی، سختی پیچشی و مقاومت کماتشی می‌گردد.

۵- مراجع

- 1-Thompson, D. W. (1942). On growth and form. Cambridge University Press; New York: Macmillan
- 2- Rajabi, H., Ghoroubi, N., Darvizeh, A., Appel, E., & Gorb, S. N. (2016). Effects of multiple vein microjoints on the mechanical behaviour of dragonfly wings: numerical modeling. *Royal Society open science*, 3(3), 150610.
- 3- Sudhakar, Y., & Vengadesan, S. (2010). Flight force production by flapping insect wings in inclined stroke plane kinematics. *Computers & Fluids*, 39(4), 683-695.
- 4- Le, T. Q., Byun, D., Ko, J. H., Park, H. C., & Kim, M. (2010). Numerical investigation of the aerodynamic characteristics of a hovering Coleopteran insect. *Journal of Theoretical Biology*, 266(4), 485-495.
- 5- Le, T. Q., Ko, J. H., Byun, D., Park, S. H., & Park, H. C. (2010). Effect of chord flexure on aerodynamic performance of a flapping wing. *Journal of Bionic Engineering*, 7(1), 87-94.

6- Eshghi, S., Rajabi, H., Darvizeh, A., Nooraefar, V., Alitavoli, M., & Babaei, H. (2016). Simple finite element modeling of planar composite structures using digital image processing technique in Matlab.

7-Rajabi, H., Shafiei, A., Darvizeh, A., & Babaei, H. (2016). Experimental and Numerical Investigations of Crack Propagation in Dragonfly Wing Veins. *Mechanical Engineering*, 48(2).

8- Rajabi, H., & Darvizeh, A. (2013). Experimental investigations of the functional morphology of dragonfly wings. *Chinese Physics B*, 22(8), 088702.

9- Rajabi, H., Ghoroubi, N., Darvizeh, A., Dirks, J. H., Appel, E., & Gorb, S. N. (2015). A comparative study of the effects of vein-joints on the mechanical behaviour of insect wings: I. Single joints. *Bioinspiration & Biomimetics*, 10(5), 056003.

10- Rajabi, H., Moghadami, M., & Darvizeh, A. (2011). Investigation of microstructure, natural frequencies and vibration modes of dragonfly wing. *Journal of Bionic Engineering*, 8(2), 165-173.

11-Darvizeh, M., Darvizeh, A., Rajabi, H., & Rezaei, A. (2009). Free vibration analysis of dragonfly wings using finite element method. *International Journal of Multiphysics*, 3(1).