



بررسی عددی گرادیان ماده با استفاده از روابط سفتی متفاوت با در نظر گرفتن گرادیان سفتی پوسته‌ی بال سنجاک

افسانه وحدانی¹، ابوالفضل درویشه^{2*}، مجید علی طاوولی³، حامد رجبی⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

4- دکتری تخصصی، مهندسی مکانیک، دانشگاه کیل، کیل

*گیلان، رشت، صندوق پستی 4199613776، adarvizeh@guilan.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

دریافت: 1399/05/25

پذیرش: 1400/03/30

کلیدواژه‌گان:

گرادیان ماده

روش اجزای محدود

ساختار زیستی

میکروسکوپ لیزری روبشی

بیومکانیک

بیومیمتیک

بیشتر مواد طبیعی کامپوزیت‌هایی هستند که می‌توانند دامنه گسترده‌ای از خواص مواد مانند مدول الاستیک را نشان دهند. کیوتیکل حشرات یکی از این مواد طبیعی است. نوع گرادیان کیوتیکل در قسمت‌های مختلف بدن حشرات به طرز چشمگیری متفاوت است. به دلیل ابعاد کوچک نمونه‌های کیوتیکل، انجام آزمایش‌های تجربی بسیار چالش برانگیز، پرهزینه و وقت‌گیر است. شناخت عملکرد ساختارهای کیوتیکلی و خصوصیات درجه‌بندی شده‌ی آن‌ها می‌تواند به طراحی و توسعه‌ی مواد مهندسی با خواص پیشرفته کمک کند. در این مقاله از روش اجزای محدود برای بررسی عملکرد کیوتیکل موجود در پوسته بال سنجاک استفاده شده‌است. نخست توزیع مواد روی پوسته‌ی بال با استفاده از تصاویر بدست‌آمده توسط میکروسکوپ اسکن لیزری روبشی بررسی می‌شود. سپس برای ارزیابی مقادیر تنش و کرنش تحت جابه‌جایی، روابط مختلف سفتی بر روی یک مدل هندسی از تیر یکسر گیردار که نمایانگر پوسته است، اعمال می‌شود. مقایسه‌ی نتایج بدست‌آمده از تجزیه و تحلیل روابط مختلف سفتی نشان داد رابطه‌ی سهموی درجه دو به عنوان توزیع مناسب‌تر برای سفتی، از لحاظ دارا بودن کمترین تنش و کرنش در این ساختار، نسبت به سایر روابط سفتی معرفی می‌گردد. این پژوهش بستری برای تحقیقات بیشتر میان رشته‌ای در این زمینه است.

Numerical Investigation of the Material Gradient Using Different Stiffness Functions by Consideration of the Graded Stiffness of the Dragonfly Wing Membrane

Afsaneh Vahdani¹, Abolfazl Darvizeh^{1*}, Majid Alitavoli¹, Hamed Rajabi²

1- Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

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

* P.O.B. 4199613776, Rasht, Iran, adarvizeh@guilan.ac.ir

Keywords

Graded materials
Finite element method
Biological structures
Confocal laser scanning microscopy
Biomechanics
Biomimetic

Abstract

Most natural materials are composites that can exhibit a wide range of material properties, such as the elastic modulus. Insect cuticle is one of these natural materials. The material gradient of the cuticle drastically varies in different insect body parts. Considering the small size of cuticular samples, conducting experimental tests is very challenging, expensive, and time-consuming. Understanding how cuticular structures work and their graded properties can help to design and develop engineering materials with enhanced properties. In this paper, the finite element (FE) method was used to investigate the function of the cuticle in the membrane of dragonfly wings. In this regard, first, the distribution of materials on the wing membrane was investigated using images obtained by confocal laser scanning microscope (CLSM). Then, in order to estimate the stress and strain values subjected to displacement, multiple stiffness functions were applied for a geometric model of a cantilever beam, which represents the membrane. The results showed that the presence of a graded stiffness had a significant effect on the mechanical behavior of the cantilever beam. A comparison of the results obtained from the analysis of different stiffness functions showed that the quadratic function was introduced as a more suitable distribution for stiffness, in terms of having the least stress and strain in this structure, compared to other stiffness functions. This study can provide a proper and applied platform for further interdisciplinary research in this area.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Vahdani, A., Darvizeh, A., Alitavoli, M., and Rajabi, H., "Numerical Investigation of the Material Gradient Using Different Stiffness Functions by Consideration of the Graded Stiffness of the Dragonfly Wing Membrane", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1307-1316, 2021.

1- مقدمه

دانشمندان مدت‌هاست برای پیشرفت در فن‌آوری و تکنولوژی روی مواردی از جمله بهبود عملکرد مکانیکی مواد مهندسی و متناسب بودن این مواد با توجه به نیازهای خاص در طراحی‌های مختلف تحقیق می‌کنند. برای دستیابی به این هدف، تلاشی مداوم برای جستجوی مواد جدید با ترکیبات منحصر به فرد و ویژگی‌هایی مانند سفتی، سختی، استحکام و انعطاف‌پذیری و... وجود دارد. بهبود ساختار مواد همیشه یک مورد با اهمیت در استراتژی‌های طراحی و ساخت دستگاه‌های مکانیکی بوده است.

یکی از راه‌حل‌های منطقی برای این مسئله این است که خواص مواد اولیه با توجه به نیازهای خاص طراحی در نواحی مناسب قرار گیرد. عملکرد مکانیکی در ساختار یک ماده می‌تواند طوری طراحی شود که علاوه بر استحکام بالا، انعطاف‌پذیری قابل توجه‌ای در نقاطی که احتمال می‌رود بیشترین تنش رخ دهد را داشته باشد. با توجه به این موضوع برای رسیدن به این هدف می‌توان از طریق گنجاندن مواد با درجه‌های مختلف سفتی و تعریف گرادینتی از ماده در یک ساختار هندسی به این موهم دست یافت.

مهندسان به طور مداوم برای حل مشکلات مهندسی و یافتن پاسخ مناسب به طبیعت روی می‌آورند. مواد درجه‌بندی شده تابعی¹ یکی از این موارد است. مواد درجه‌بندی شده‌ی تابعی در موادی از طبیعت مانند استخوان، دندان، بدن حشرات، چوب و مامبو وجود دارد. طبیعت این مواد را متناسب با شرایطی که در معرض آن قرار دارند، طراحی کرده‌است. برای مثال، در بدن حشرات بال‌ها دارای ساختاری هستند که برای پرواز مناسب می‌باشند. آنها توانایی تحمل بارهای متناوب را دارند و در طول زندگی حشره کارایی خود را حفظ می‌کنند. علاوه بر بارگذاری‌های طبیعی، رخ دادن تغییر شکل‌های غیرمنتظره که ناشی از برخورد بال‌ها با محیط اطراف می‌باشد بسیار محتمل است. از طرفی توانایی ترمیم آسیب‌های جدی ایجاد شده در بال حشرات وجود ندارد و اگر آسیبی در آن رخ دهد، قابل جبران نیست. بنابراین این توانایی جلوگیری از آسیب و یا محدود کردن آن در ساختار بال نهفته است. از جمله حشراتی که رفتار و ساختار بال آن بسیار مورد توجه است سنجاقک‌ها هستند. در بال سنجاقک علاوه بر ساختار پوست‌ها و رگ‌ها، مواد زیستی تشکیل دهنده‌ی این دو المان می‌توانند نقش موثری را در عملکرد بال ایفا کند. مواد زیستی با خواص مکانیکی و ساختار میکروسکوپی منحصر به فرد همواره مورد توجه محققین بوده‌است. این مواد که اغلب مرکب از الیاف و زمینه هستند به واسطه‌ی ساختار پیچیده‌ی سلسله مراتبی، خواصی به مراتب مطلوب‌تر از اجزای سازنده‌ی خود دارند. مواد طبیعی مختلف متشکل از اجزای اصلی تقریباً یکسان به دلیل تفاوت در درصد حجمی ترکیبات، آرایش الیاف و لایه‌بندی‌ها رفتاری کاملاً متفاوت با یکدیگر را از خود نشان می‌دهند [1]. کیوتیکل از جمله‌ی این مواد مرکب زیستی است که مانند سایر مواد طبیعی ویژگی‌های ارزشمندی دارد. کیوتیکل در بخش‌های مختلف بدن حشرات از جمله در ساختارهای بال سنجاقک و سایر بندپایان یافت می‌شود [2,3]. وگست² و همکاران در سال 2004 با بررسی ریز ساختارها و عملکرد مواد طبیعی و بررسی مثال‌های بسیاری در طبیعت از کارآمدی وجود مواد کامپوزیتی در طبیعت صحبت کردند. نتایج ارائه شده بازدهی بالای مواد طبیعی را تایید می‌کند و نشان می‌دهد که تعدادی از آنها برای تحقق نیازهای مکانیکی تکامل یافته‌اند. چراکه آن‌ها با بررسی شاخص‌های مختلف مکانیکی از جمله سفتی، انتشار ترک، استحکام و مقاومت در برابر بارهای خارجی و... به این

نتیجه رسیدند که وجود کامپوزیت‌های طبیعی در ساختارهایی در طبیعت، منجر به تحمل بار و در عین حال انعطاف‌پذیری بالا می‌گردد [1]. همچنین می‌توان به مطالعات ساتن³ و همکاران [4]، پانگ و دای⁴ [5]، اسمیت⁵ و کلوک [6]، دیرکس⁶ و تیلور [7]، گورب و همکاران [8]، درویزه و همکاران [9] و رجبی و همکاران [10] که خصوصیات ویژه‌ی ماده‌ی بیولوژیکی موجود در بدن حشرات (کیوتیکل) را بررسی کرده‌اند، اشاره کرد. اما آنچه تا به اینجا از تحقیقات پیشین مشاهده شد اشاره به اهمیت وجود مواد زیستی در ساختارهای طبیعی است و همچنین دریافتیم که ویژگی منحصر به فرد این مواد، گرادینتی بودن آنهاست. اکنون ما نیازمند تحقیقات اصولی برای شناخت صریح چگونگی تغییرات خواص مواد و تاثیر آن بر رفتار مکانیکی هستیم. در این مقاله سعی شده این امر مهم مورد بررسی قرار گیرد.

اصطلاح گرادیان به معنای وسیع آن برای توصیف ماهیت غیر یکنواخت مواد استفاده می‌شود. نشان‌دهنده‌ی تغییرات تدریجی و نه ناگهانی است. شکل 1 نحوه‌ی توزیع ماده را به دو صورت پله‌ای و تغییر خواص تدریجی را نشان می‌دهد. معرفی گرادیان‌های مختلف به طور موثر می‌تواند عملکرد مکانیکی دستگاه‌های مختلف را بهبود ببخشد. تغییر گرادیان ماده در یک ترکیب به طور پیوسته بین دو ماده با سفتی‌های کاملاً متفاوت می‌تواند در توزیع تنش، رشد ترک و... اثرگذار باشد.

مواد درجه بندی شده تابعی می‌تواند در یک محیط کاری سخت، بدون از دست دادن خصوصیات خود و بدون شکست در حین استفاده از آن باقی بماند. مواد درجه‌بندی شده‌ی تابعی، شامل دو یا چند ماده‌ی ناهمگن مختلف هستند که با یک شیب تدریجی مهندسی در خواص مواد از یک جز به جز دیگر تغییر می‌کنند. توزیع و جهت‌گیری و یا اندازه فاز تقویت‌کننده در یک یا چند بعد خواص متفاوتی را در نواحی مختلف از خود بروز می‌دهند. در مقابل کامپوزیت‌های سنتی مخلوط‌هایی یک‌دست هستند که منجر به سازش مطلوب اجزاء مواد می‌گردد. این مواد می‌توانند برای کارکردها و برنامه‌های خاص طراحی شوند [11]. در این پژوهش سعی شده است با بکارگیری مواد درجه بندی شده در قالب روابط ریاضی ساده بر روی یک المان ساختاری علاوه بر شناخت بهتر تاثیر مواد درجه‌بندی شده بر رفتار مکانیکی ساختار موردنظر، با مقایسه‌ی چند رابطه‌ی متفاوت توزیع سفتی، توزیع مناسب برای ماده با یک رابطه‌ی ریاضی معرفی گردد.

خواص مواد تابعی یا هدفمند ناهمگن هستند اما آن‌ها را همسانگرد در نظر می‌گیرند. در مواد درجه‌بندی شده‌ی تابعی دلیل پیوستگی موجود در خواص مکانیکی، حرارتی و مغناطیسی، تنش‌ها و توزیع آنها حالت پیوسته‌ای پیدا می‌کنند که باعث استحکام ماده می‌شوند. تغییرات تدریجی خواص در ساختار این مواد موجب استحکام بین لایه‌های مختلف آن می‌شود. در واقع با توجه به تغییر مدام در خواص مواد از یک ماده‌ی درجه‌بندی شده‌ی تابعی، گسستگی بین دو ماده از بین می‌رود اما خصوصیات دو یا چند ماده مختلف کامپوزیت حفظ می‌شود [12]. در صورتی که در مواد مرکب کامپوزیتی، تداخل بین ساختارهای زمینه‌ی الیاف نوعی ناهم‌انگهی در خواص مکانیکی ایجاد می‌کند. به عنوان مثال هنگامی که مواد کامپوزیت در معرض بارهای حرارتی بالا قرار می‌گیرند [13]، ترک ابتدا در مرز زمینه و الیاف ایجاد و سپس در لایه‌ها و مقاطع ضعیف داخل زمینه و الیاف منتشر می‌شود. چرا که پیوستن دو یا چند

⁴ Dai⁵ Schmitz⁶ Dirks¹ Functionally Graded Material (FGM)² Wegst³ Sutton

گسستگی و عدم عملکرد صحیح سازه می‌گردد، جلوگیری می‌کند. یک تیر یکسر گیردار می‌تواند مکانیزم مشابهی از لحاظ ساختار هندسی با پوسته‌ی موجود در بال داشته باشد. در مدل‌سازی‌های انجام شده فاکتورهای مختلف طراحی از جمله ماکزیم تنش و کرنش^۳ و .. بررسی گردیده‌است تا زمینه‌ی الگوبرداری از آن در ساخت مواد مهندسی فراهم شود.

2- مواد و روش‌ها

1-2- میکروسکوپ اسکن لیزری روبشی

ابتدا به مطالعه و بررسی پژوهش‌های سایرین و مشاهده‌ی توزیع ماده که در طبیعت با استفاده از تصاویر دیجیتال که توسط میکروسکوپ لیزری روبشی تصویربرداری شده، پرداخته می‌شود. میکروسکوپ‌های فلوروسنس به خوبی تفاوت میان لایه‌های گوناگون با درجات مختلف سخت‌شدگی را مشخص می‌کنند [15] و روش‌های اندازه‌گیری خواص در مقیاس نانومتر و میکرومتر امکان بررسی رفتار مکانیکی نمونه‌های میکروسکوپی مواد زیستی را برای محققان فراهم می‌نمایند.

2-2- شبیه‌سازی عددی

1-2-2- مدل‌سازی، ویژگی‌های مواد

در این تحقیق سعی شده با الهام گرفتن از آنچه در طبیعت دیده می‌شود، و با ساده‌سازی دیگر عوامل از جمله شکل هندسی در ساختار مورد نظر که پیش‌بینی شده‌است، در مقادیر تنش و کرنش می‌تواند تاثیرگذار باشد، به بررسی تاثیر گرادیان ماده در مقادیر تنش و کرنش و رفتار مکانیکی یک ساختار در حالت کلی و عمومی پرداخته می‌شود. در این مرحله مجموعه‌ای از مدل‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و براساس اهداف مورد نظر در این تحقیق ارائه می‌شود. اولین گام در شبیه‌سازی عددی ایجاد مدل‌های هندسی مناسب برای تحلیل مورد نظر است. هدف مدل‌سازی یک هندسه‌ی ساده برای بررسی دیگر فاکتورهای تاثیرگذار در روند این پروژه می‌باشد. هندسه‌ی در نظر گرفته شده، یک تیر یکسر گیردار با ابعاد میکرومتری است و در تمامی مراحل یک هندسه‌ی یکسان با ابعاد ثابت مدل‌سازی می‌شود. ابعاد هندسه‌ی دوبعدی مورد نظر به ترتیب برای طول و ضخامت تیر 22 و 3.2 میکرومتر می‌باشد (شکل 2).



Fig.2 Two-dimensional view of the geometric model

شکل 2 نمای دوبعدی از مدل هندسی

ضریب پواسون برای تمامی مدل‌ها مقدار 0.3 می‌باشد. تمامی مدل‌های هندسی ایجاد شده با استفاده از ابعاد مابقی مشخص شده‌است.

2-2-2- الگوهای سفتی

ماده متفاوت به فرم چند لایه، به دلیل پیوند ضعیف بین مواد و همچنین ویژگی باربری مواد، اغلب به دلیل لایه لایه شدن منجر به عدم موفقیت می‌شود.

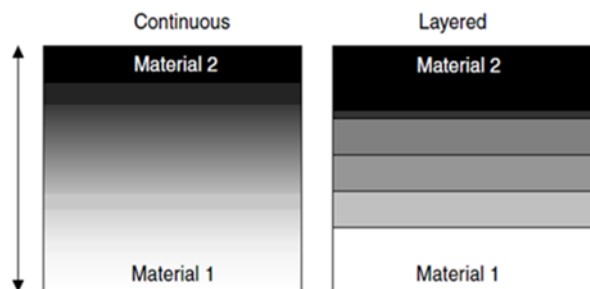


Fig.1 (a) shows stepwise graded structure and (b) shows continuous graded structure.

شکل 1 الف) ماده‌ی درجه‌بندی شده تابعی با تغییر خواص پله‌ای (غیر پیوسته) ب) ماده‌ی درجه‌بندی شده تابعی با تغییر خواص تدریجی (پیوسته)

رجبی و همکاران با مطالعه بر روی ساختارهای بدن حشرات و با استفاده از شبیه‌سازی عددی رفتار مکانیکی ماده‌ی مرکب بندپایان را مورد بررسی قرار داده‌اند [14]. با در نظر گرفتن الگوهای سفتی مختلف در هندسه‌ی مورد نظر که مشابه با نمونه‌های بررسی شده در آزمایش عملی است، به بررسی و تحلیل رفتار ماده‌ی کیوتیکال شبیه‌سازی شده پرداخته‌اند. در نهایت الگوی سفتی نمایی پیوسته که با استفاده از معادلات ریاضی تعریف شده و بیشترین شباهت و نتایج را با نمونه‌های تجربی داشته، معرفی گردیده است. بدون شک نتایج حاصل در این تحقیق یک گام رو به جلو برای شناخت دقیق‌تر چگونگی توزیع ماده در ریزساختارهای زیستی بوده‌است. در حالی که در تحقیق ذکر شده در بالا هدف بدست آوردن الگوی سفتی مربوط به یک ماده‌ی خاص زیستی بوده است اما هدف ما در این پژوهش بدست آوردن توزیع ماده‌ی مناسب به صورت سیستماتیک در مفهوم عمومی‌تر آن و بدون وابستگی به یک ماده‌ی خاص است. علاوه بر این، در مقاله‌ی حاضر سعی شده با در نظر گرفتن ضریب رشد متفاوت برای روابط سفتی، تاثیر آن بر رفتار مکانیکی ساختار مورد نظر بررسی گردد.

اگرچه تمامی اطلاعاتی که تاکنون از مواد درجه‌بندی شده‌ی تابعی، خصوصیات مکانیکی آن و تاثیر وجود آن در عملکرد ساختارهای طبیعی بدست آمده بسیار ناچیز و کلی است اما الگوبرداری و شناخت بیشتر این مواد در طراحی و تولید ساختارهای مهندسی می‌تواند امر مفید و سودمندی باشد. پیش‌بینی ما این است که نحوه‌ی توزیع ماده در پوسته و عملکرد بال تاثیرگذار است. بنابراین کشف چگونگی نحوه‌ی توزیع ماده در هندسه‌ی مشابه با پوسته‌ی بال سنجاقک و تاثیر هر نوع توزیع مختلف از ماده می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. هدف این تحقیق بررسی و تحلیل تاثیر وجود گرادیان ماده و ارائه‌ی الگوی عددی ساده از نحوه‌ی توزیع ماده با توانایی شبیه‌سازی رفتار مکانیکی آن، با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار آباکوس^۱ است. به همین دلیل در این تحقیق با ساده‌سازی مدل هندسی به یک تیر یکسرگیردار و به منظور یافتن الگوی مناسب برای توزیع ماده سعی شده‌است تاثیر گرادیان‌های متفاوت برای مدول یانگ^۲ مواد را مورد بررسی قرار دهیم. چراکه با داشتن و به‌کاربردن الگوی مناسب برای توزیع سفتی در یک جزء ساختاری موجود در یک سیستم که منجر به داشتن تنش مینیمم شود احتمال بروز شکست در ساختار را کاهش می‌دهد، علاوه بر این داشتن کرنش کمتر از تغییر شکل بیش از حد که منجر به

³ Strain

¹ Abaqus

² Young's modulus

2-2-3- تعریف خواص مادهی ناهمگن در نرم افزار آباکوس

با استفاده از یک متغیر میدان موجود در گام⁵ اول⁶ نرم افزار آباکوس (دما) می توان پیش از شروع تحلیل، میدان دمایی برای مدل هندسی تعریف و سپس خواص مکانیکی را با بکارگیری روابط ذکر شده به دما وابسته نمود، به طوریکه این متغیر میدان برابر با ضریب الاستیسیتهی مورد نظر محاسبه می شود. با اعمال خواص مکانیکی پیش از بارگذاری، تغییر شکل ها و جابه جایی نقاط تأثیری در خواص از پیش تعیین شده نخواهد داشت. چراکه برای کاهش زمان محاسبه خواص ماده به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است و جابه جایی اعمال شده آن قدر بزرگ نیست که باعث تغییر خواص مکانیکی اولیهی در نظر گرفته شده، گردد. در نظر گرفتن خواص الاستیک غیر خطی خارج از اهداف پژوهش حاضر است.

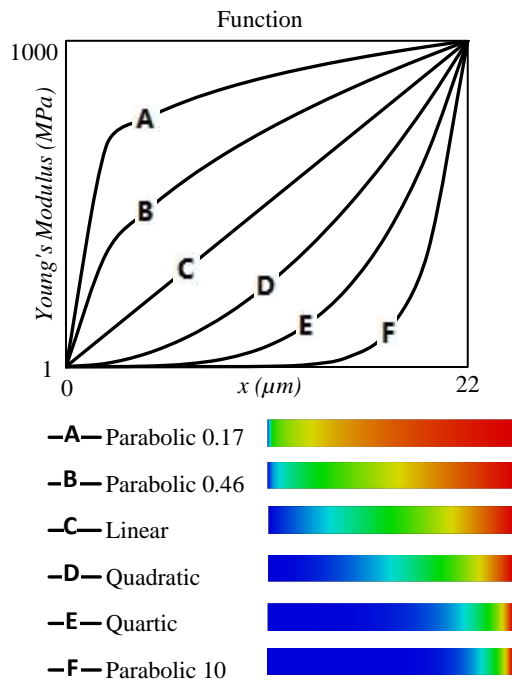


Fig.3 Young modulus distribution diagram and how the growth rate in the graph presented based on different function patterns.

شکل 3 دیاگرام توزیع مدول یانگ و چگونگی نرخ رشد در نمودار ارائه شده بر مبنای الگوهای مختلف ریاضی

2-2-4- بارگذاری و شرایط مرزی

پس از تعریف خواص مکانیکی مدل ها به صورت یک تحلیل استاتیکی شبیه سازی می شوند. در این قسمت شرایط مرزی برای هندسه ی مورد نظر و جابه جایی تعریف شده بر روی تیر در همه ی مدل ها بصورت یکسان تعریف می شود، چرا که هدف ما بررسی تأثیر توزیع های مختلف ماده در شرایط یکسان است. مقدار عددی جابه جایی در نظر گرفته شده 5 میکرومتر است (شکل 4).

به منظور بررسی چگونگی توزیع ماده و تأثیر آن بر مقادیر تنش و کرنش چند الگوی مختلف برای تغییرات ضریب الاستیسیته در راستای طول تیر در نظر گرفته می شود. این الگوهای مذکور به صورت معادلات پیوسته ریاضی با استفاده از متغیر x (مختصات هر نقطه در طول تیر) تعریف شده اند. همانطور که در شکل 3 مشاهده می کنید، علاوه بر تصویر کانتور توزیع سفتی، نمودار مقایسه ای از تفاوت رفتار معادلات مختلف ریاضی برای تغییرات مقادیر مدول یانگ در راستای طول به ازای x های یکسان آورده شده است. در واقع معادلات در نظر گرفته شده شامل معادلات پیوسته با شیب های اکیدا نزولی و یا اکیدا صعودی هستند که در طول های (x) یکسان از تیر محاسبه می گردد و دارای مقادیر متفاوتی برای مدول یانگ می باشند.

1- تغییرات پیوسته سهموی¹؛ از حداقل مقدار مدول یانگ در ابتدای طول تیر ($x=0$) تا حداکثر مقدار مدول یانگ در انتهای طول، تغییرات مدول الاستیسیته با استفاده از رابطه ی (1) و با متغیر x صورت می گیرد.

$$E(x) = A + (B - A) \left(\frac{x}{22}\right)^C \quad (1)$$

در این معادله، $E(x)$ مدول الاستیسیته و x طول تیر مورد بررسی است. A و B مجانب های بالا و پایین منحنی هستند. ثابت های A و B با جایگذاری کمترین و بیشترین مقدار مدول یانگ، در ابتدا و انتهای طول می باشند. ثابت C مربوط به نرخ رشد تغییرات مدول الاستیسیته در این معادله است که در اینجا با در نظر گرفتن مقادیر متفاوت برای C ، تأثیر تغییرات نرخ رشد مدول الاستیسیته در نتایج بررسی می گردد. مقادیر در نظر گرفته شده برای C در این تحقیق 0.17، 0.46، 10 می باشند.

2- تغییرات پیوسته ی خطی²؛ سومین حالت در نظر گرفته شده برای تغییرات مدول الاستیسیته به صورت خطی در راستای طول می باشد.

$$E(x) = Fx + G \quad (2)$$

3- تغییرات سهموی درجه دو³؛

$$E(x) = Hx^2 + I \quad (3)$$

4- تغییرات سهموی درجه چهار⁴؛

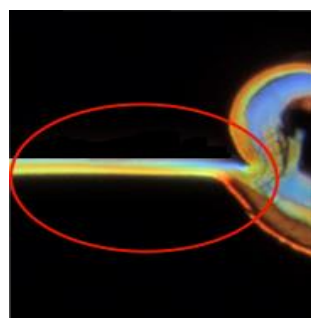
$$E(x) = Jx^4 + K \quad (4)$$

ثابت های F, G, H, I, J, K با استفاده از حداقل و حداکثر مدول یانگ در ابتدا و انتهای طول تیر تعیین می شوند.

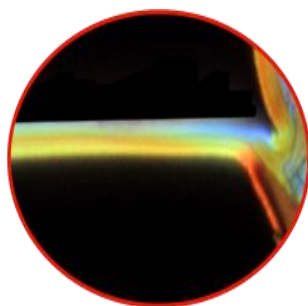
5- تغییرات سفتی بر مبنای میانگین مقادیر مدول یانگ در راستای طول پوسته ی بال سنجاقک که با استفاده از تصاویر دیجیتال بدست آمده است.

⁴ Quartic
⁵ Step
⁶ Initial

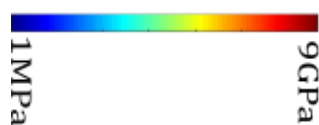
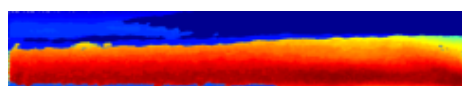
¹ Parabolic
² Linear
³ Quadratic



(الف) (a)



(ب) (b)



(ج) (c)

Fig. 5 a) CLSM image of the membrane and vein in the dragonfly wing [17]. b) Detail of (a). c) The image of the distribution of matter obtained using the GA [16].

شکل 5 الف) تصویر CLSM از پوسته و رگه‌ی موجود در بال سنجاقک [17]. ب) بزرگنمایی تصویر پوسته‌ی بال سنجاقک (ج) تصویر توزیع ماده که با استفاده از کد الگوریتم ژنتیک بدست آمده است [16].

بعد از محاسبه‌ی سفتی و با در نظر گرفتن سایر شرایط، مقادیر تنش و کرنش حاصل از مدل‌سازی‌ها در ادامه بدست آمده است. در شکل 7 تصاویری از توزیع تنش و کرنش آورده شده است. در پایین شکل، یک کانتور مرجع (اصلی) برای بیان تغییرات مقادیر مینیمم تا ماکزیمم تنش و کرنش تحت بارگذاری بیان شده، قرار داده شده است.



Fig. 6 Estimated values of the Young's modulus for the

شکل 6 مقادیر در نظر گرفته شده‌ی مدول یانگ برای ابتدا و انتهای تیر

به منظور بزرگنمایی و نشان دادن دقیق‌تر توزیع این دو المان در هریک از مدل‌ها، در بالای هریک از تصاویر، کانتوری متناسب با نوع توزیع آورده شده است. لازم به ذکر است که هر کدام از این کانتورها برگرفته از بخشی از کانتور



Fig.4 Software model characterization

شکل 4 خصوصیات مدل نرم افزاری

3- نتایج

3-1- عکس‌های میکروسکوپی

عکس‌های میکروسکوپی مورد بررسی از مفاصل موجود در بال سنجاقک انتخاب شده است. همانطور که در تصویر شکل 5 الف مشاهده می‌کنید، تصویر مربوط به پوسته و رگه‌ی موجود در بال نشان داده شده است. آنچه که بسیار مورد توجه قرار دارد نحوه‌ی توزیع ماده در پوسته‌ی متصل شده به رگه موجود در بال است. در ابتدای کار با استفاده از متد ارائه شده توسط عشقی و همکاران [16] به بررسی تصاویر دیجیتال پرداخته می‌شود. عشقی و همکاران با مطالعه بر روی تصاویر فلوروسنس و مطالعه‌ی ساختارهای بیولوژیکی و با استفاده از علم پردازش تصویر¹ و بکارگیری الگوریتم ژنتیکی² توانستند روشی برای تعیین ارتباط میان ترکیب ماده‌ی بیولوژیکی موجود در بدن حشرات و خصوصیات مکانیکی آن معرفی کنند. تصاویر دیجیتال بدست آمده از میکروسکوپ روبشی لیزری هم‌کانون را با استفاده از پردازش تصویر مورد بررسی قرار داده‌اند، سپس به کمک GA رابطه‌ی بین توزیع مواد و مقادیر مدول یانگ را تعیین کرده‌اند. این مطالعه به ما این امکان را می‌دهد تا بین ترکیب مواد زیستی حشرات (بر اساس اتوفلورسانس مواد تشکیل دهنده) و مدول یانگ آن رابطه‌ای برقرار کنیم. همانطور که در شکل 5 ج مشاهده می‌کنید تصویر بدست آمده با استفاده از بکارگیری همین روش است که وجود گرادیان ماده را در پوسته‌ی بال سنجاقک به خوبی نشان می‌دهد. همچنین، در این روش بازه‌ی تغییرات مدول یانگ مشخص می‌گردد که در این تصویر از 1 مگاپاسکال تا 9 گیگاپاسکال می‌باشد.

3-2- بررسی توزیع تنش و کرنش در شبیه‌سازی عددی

به منظور کسب نتایج دقیق، تحلیل اولیه‌ی تاثیر چگونگی توزیع سفتی بر روی پارامترهای ماکزیمم تنش و ماکزیمم کرنش و تفاوت گسترش این دو پارامتر بر روی مدل‌ها، به ازای توزیع‌های متفاوت سفتی که با استفاده از معادلات مختلف ریاضی و مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس محاسبه شد، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با توجه به آنکه نتیجه‌ی حاصل از بررسی تصویر دیجیتال بدست آمده، همانطور که در بالا ذکر شد، نشان می‌دهد بازه‌ی تغییرات مدول یانگ از 1 مگاپاسکال تا 9 گیگاپاسکال است. بنابراین بازه در نظر گرفته شده برای تعریف روابط سفتی در این مدل‌سازی به صورت کلی‌تر، همانطور که در شکل 6 مشاهده می‌کنید، از 1 مگاپاسکال برای ابتدای طول تیر ($X=0$) و مقدار حداکثر مدول یانگ 10 گیگاپاسکال برای انتهای طول تیر ($X=22 \mu m$) است.

² Genetic Algorithm

¹ Image Processing Technology

تیر جابه‌جا شده‌است. در واقع، این نحوه تغییر توزیع کرنش و مقدار عددی ماکزیمم این پارامتر در مدل‌هایی که دارای گرادیان ماده‌ی سخت‌تری به نسبت سایر مدل‌ها هستند نشان‌دهنده‌ی این است، که با گسترش سختی در طول تیر، محل دارای ماکزیمم مقدار عددی علاوه بر تنش، برای کرنش هم در محل اتصال تیر به تکیه‌گاه اتفاق می‌افتد. برای مثال باتوجه به شکل 3 تفاوت مشخصی را در نحوه‌ی توزیع ماده در دو رابطه‌ی سهموی درجه 0.17 و سهموی درجه ده مشاهده می‌کنید. این تفاوت محسوس، حاصل از تفاوت ضریب آهنگ تغییرات این روابط است. در رابطه‌ی سهموی درجه 0.17 مدول یانگ از مقدار مینیمم به مقدار ماکزیمم بسیار سریع، در واقع با ضریب رشد بزرگتر نسبت به سایر رابطه‌ها، تغییر می‌کند و بیشتر طول تیر را مقادیر بزرگی از مدول سفتی در بازه‌ی مربوطه پر می‌کند. این در صورتی است که توزیع ماده مربوط به رابطه‌ی سهموی درجه ده، تغییرات مدول از کمترین مقدار در ابتدای تیر تا بیشترین مقدار آن در انتهای تیر با ضریب تغییرات کوچکتری در حال رشد است. در واقع قسمت بزرگی از طول تیر مقادیر کمتر مدول یانگ قرار دارند. حال با مشاهده‌ی توزیع کرنش در شکل 7 و مقایسه‌ی ناحیه‌ای که ماکزیمم کرنش در آن اتفاق می‌افتد آنچه که در بالا گفته شد مشخص می‌گردد.

مرجع می‌باشند. این نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس می‌باشند. اگرچه در همه‌ی مدل‌ها ناحیه‌ی حساس برای بروز ماکزیمم تنش تقریباً در یک ناحیه اتفاق می‌افتد اما تفاوت نسبتاً چشمگیری در مقادیر عددی ماکزیمم تنش و مقادیر تنشی که در هر مدل در طول تیر توزیع شده‌است، دیده می‌شود و این نکته را بیان می‌کند که در این هندسه و جابه‌جایی یکسانی که برای تیر تعریف شده، محدوده‌ی حساس برای شکست در محل اتصال تیر به تکیه‌گاه است. آنچه که از تصاویر توزیع تنش در مدل‌های مختلف مشاهده می‌شود، این است که توزیع تنش در مدل مربوط به توزیع سفتی با رابطه‌ی سهموی درجه 0.17 دارای مقادیر تنش بزرگتری در طول تیر نسبت به سایر مدل‌ها است. سهموی درجه 0.46، خطی، سهموی درجه دو، سهموی درجه چهار و سهموی درجه ده به ترتیب از مدل دارای بیشترین مقادیر عددی مربوط به توزیع تنش (بعد از سهموی درجه 0.17) تا مدل دارای کمترین مقادیر توزیع تنش در طول تیر هستند. اما برای مقایسه‌ی مقادیر کرنش با توجه به نتایج بدست‌آمده مشاهده می‌شود که علاوه بر گوناگونی مقادیر ماکزیمم کرنش، تفاوت در نحوه‌ی توزیع این پارامتر وجود دارد. نکته‌ی جالب توجه دیگر این است که ماکزیمم کرنش با سخت شدن هرچه بیشتر مدول یانگ در طول تیر، به واسطه‌ی روابط مختلف سفتی محاسبه شده که باعث تفاوت در نحوه‌ی توزیع مدول یانگ می‌گردد، از ابتدای تیر به سمت محل اتصال به تکیه‌گاه، در طول

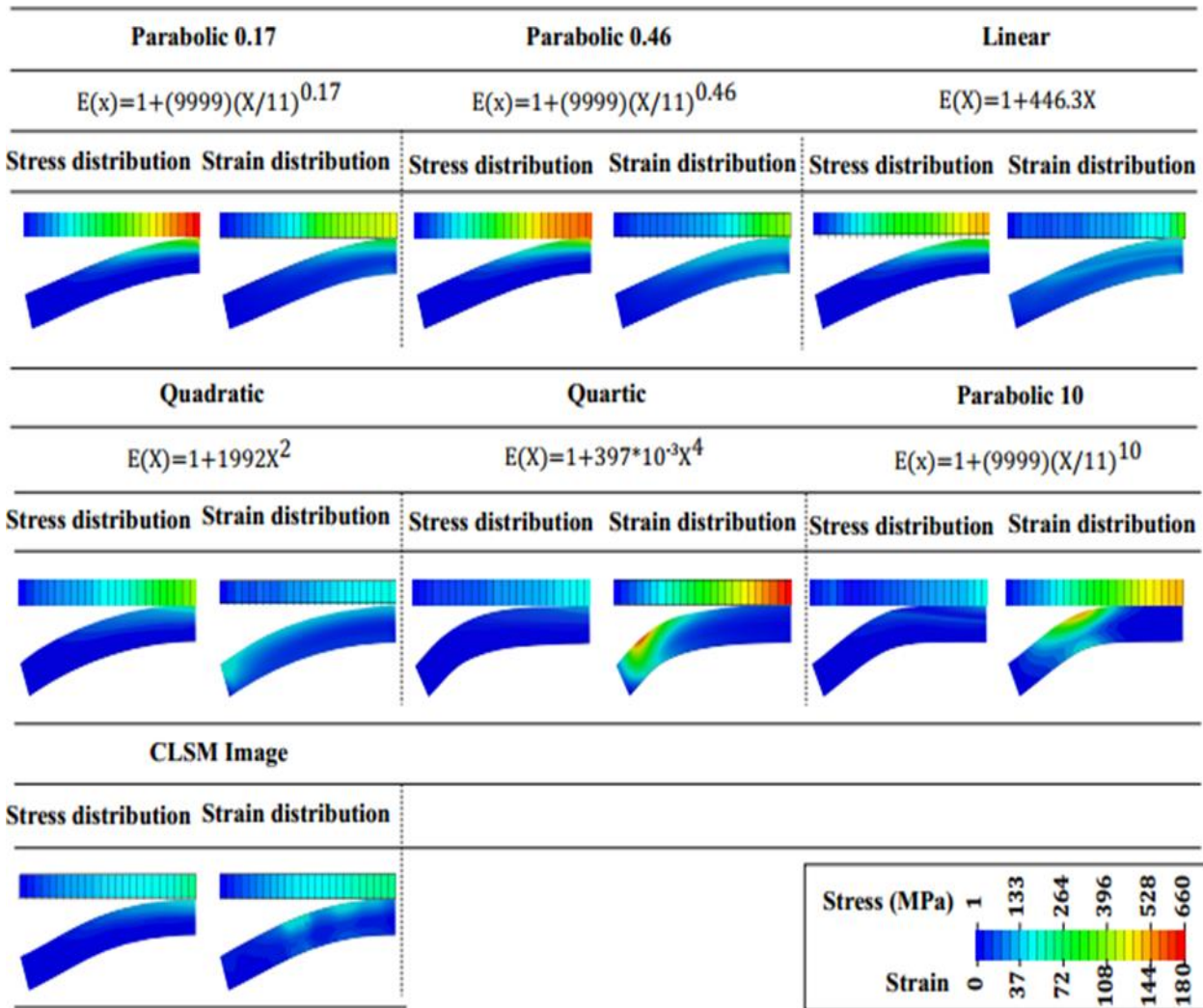


Fig.7 several images of Young's modulus distribution, stress distribution and strain in Abacus's models

شکل 7 چند نمونه‌ی تصویری کانتور توزیع مدول یانگ، توزیع تنش و کرنش از نمونه‌های مدلساز شده در آباکوس

هدف ما که داشتن مدلی با کمترین مقدار ماکزیمم تنش و کرنش بوده است، نمی‌تواند اهداف ما را ارضا نمایند. با حذف این سه مورد، مقایسه را بین مدل‌های مربوط به سهموی درجه ده، سهموی درجه چهار و سهموی درجه دو ادامه می‌دهیم. آنچه که برای ما حائز اهمیت است داشتن ساختاری است که علاوه بر داشتن مقدار تنش مینیمم دارای مقدار کرنش کمتری هم باشد بنابراین از بین سه مدل باقی‌مانده، مدلی مناسب‌تر است، که بتواند به طور همزمان این دو مورد را دارا باشد. در این بین مشخص است که مقادیر ماکزیمم تنش سهموی درجه چهار و سهموی درجه ده نسبت به سهموی درجه دو کمتر

هستند اما ماکزیمم کرنش سهموی درجه دو کمتر است. بنابراین بهتر است رابطه‌ای برای توزیع سفتی انتخاب گردد که در هر دو مقادیر تنش و کرنش به طور همزمان دارای نتایج بهینه‌تری باشد. همانطور که در شکل 8 مشاهده می‌کنید مقادیر تنش و کرنش مدل مربوط به تصویر دیجیتال الکترونی لیزری روشی نیز در این نمودار آورده شده است. آنچه که مشخص است نزدیک بودن مقادیر ماکزیمم تنش و کرنش رابطه‌ی سهموی درجه دو با مدل مربوط به تصویر دیجیتال است.

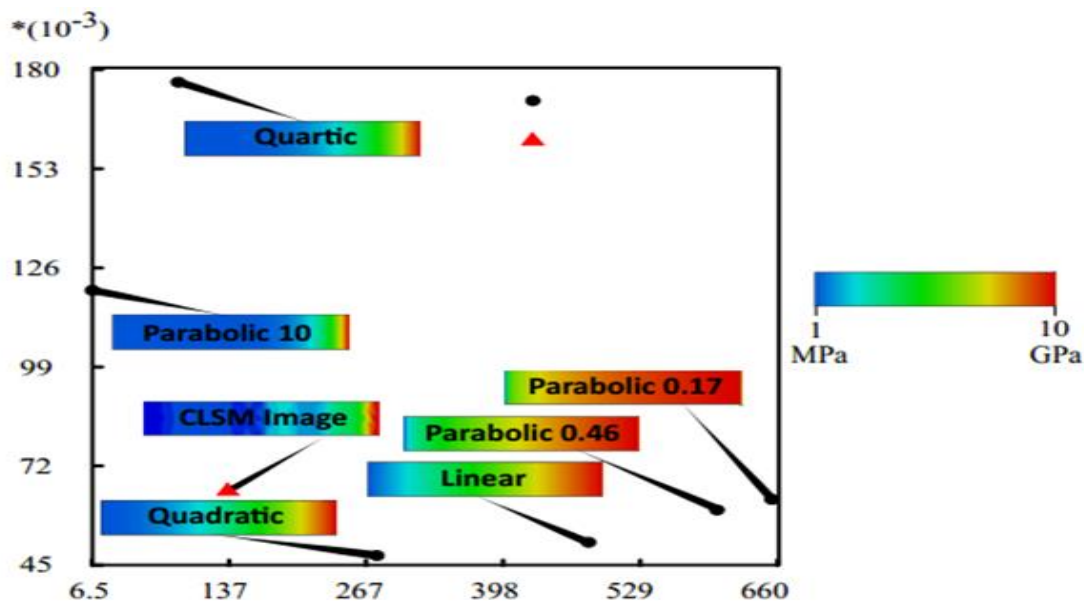


Fig.8 Comparison of maximum stress and strain in models with different stiffness relationships

شکل 8 مقایسه‌ی ماکزیمم تنش و کرنش در مدل‌ها با رابطه‌های سفتی متفاوت

محاسبه می‌گردد، نیز می‌تواند در چگونگی رفتار مکانیکی یک ساختار هندسی نقش اساسی داشته باشند. در واقع با توجه به شکل 3 همانطور که مشاهده می‌شود، روابط ریاضی استفاده شده دارای دو نوع شیب اکیدا صعودی و شیب اکیدا نزولی هستند. براساس نمودار شکل 3، مقادیر در رابطه‌های سهموی درجه ده، سهموی درجه چهار و سهموی درجه دو، با شیب اکیدا صعودی افزایش می‌یابند. اما مقادیر در راستای طول تیر با استفاده از روابط ریاضی خطی با شیب ثابت، سهموی درجه 0.17 و 0.46 با شیب اکیدا نزولی، افزایش می‌یابند. همین تفاوت در ضریب تغییرات در نحوه‌ی توزیع ماده در طول تیر تأثیر گذار بوده است و به همین دلیل، موجب تفاوت رفتار مکانیکی در ساختار مورد نظر شد. از میان مدل‌هایی که در این تحقیق تولید شده‌اند، توزیع سفتی سهموی درجه دو که در راستای طول تیر محاسبه شد، رفتار مکانیکی مناسب‌تری نسبت به سایر مدل‌ها دارد و می‌توان در بین نتایج این شش مدل ارائه شده در این پژوهش به عنوان ساختار مناسب‌تر برای طراحی با هدف داشتن تنش و کرنش کمتر معرفی گردد. علاوه بر اینکه رابطه‌ی سهموی درجه دو در بین شش رابطه‌ی سفتی نتایج بهتری دارد، به خاطر نزدیکی مقادیر ماکزیمم تنش و ماکزیمم کرنش آن به نتیجه‌ی مدل شبیه‌سازی شد از تصویر دیجیتال الکترونی

4- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا ساختار میکروسکوپی پوسته‌ی موجود در بال سنجاقک با استفاده از میکروسکوپ لیزری روبشی و سپس با استفاده از متد ارائه شده توسط عشقی و همکاران [16] مورد مطالعه قرار گرفت. آنچه که از تصاویر دیجیتال مشاهده شد، وجود گرادایانی از ماده در طول پوسته است که براساس پژوهش‌های پیشین پیش‌بینی می‌شود که می‌تواند نقش موثری در عملکرد بال حشره داشته باشد [14]. به منظور بررسی بیشتر و دقیق‌تر نقش وجود ماده‌ی درجه‌بندی شده‌ی تابعی و تأثیر نحوه‌ی توزیع آن در یک ساختار هندسی یکسان، به کمک نرم‌افزار آباکوس، ساختار مورد نظر شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از تحلیل‌های المان محدود نشان داد که وجود گرادایان ماده با توزیع‌های متفاوت که توسط روابط ریاضی ذکر شده محاسبه گردید، در عملکرد ساختار مورد نظر تأثیرگذار است. بدین صورت که در نتایج حاصل در مقادیر تنش و کرنش و نحوه‌ی توزیع این دو المان در طول تیر در هر مدل با سایر مدل‌ها تفاوت وجود داشت. آنچه که از این تحلیل نتیجه گرفته شد این است که شیب (آهنگ تغییرات) معادلات ریاضی که توسط آن‌ها توزیع سفتی

لیزری روبشی نیز پیشبینی می‌شود، توزیع مناسبی برای استفاده در چنین ساختار هندسی باشد.

به منظور مقایسه‌ی میزان تطبیق توزیع ماده در پوسته‌ی بال سنجاقک با رابطه‌ی سفتی سهموی درجه دو (که در بین شش رابطه‌ی بررسی شده در این تحقیق به عنوان رابطه‌ی مناسب، با هدف داشتن مقادیر تنش و کرنش کمتر نسبت به سایرین معرفی شد) نمودار شکل 9 تهیه گردید. در این بررسی مقادیر مدول یانگ پوسته‌ی بال سنجاقک از تصاویر دیجیتال، با استفاده از روش پردازش تصویر که توسط عشقی و همکاران [16] معرفی گردید، به دست آمد. مقایسه‌ی مقادیر میانگین در هر گروه (در هر جعبه¹ از نمودار شکل 9) و مقدار مدول یانگ محاسبه شده از رابطه‌ی سهموی درجه دو، نشان می‌دهد که اگرچه در بین رابطه‌هایی که برای ساختار مورد نظر محاسبه شدند، رابطه‌ی سهموی درجه دو نتایج مطلوبی را دربر داشت، اما در مقایسه با آنچه که در طبیعت وجود دارد نمی‌توان گفت بیشترین شباهت را از لحاظ توزیع سفتی با گرادیان ماده‌ی موجود در بال سنجاقک داراست. اگرچه نتایج به دست آمده بسیار امیدوار کننده هستند اما نباید از میزان خطا در تهیه‌ی تصاویر دیجیتالی که با استفاده از میکروسکوب‌های الکترونی در شرایط آزمایشگاهی به راحتی صرف نظر کرد. چراکه یک محدودیت عمده از پیچیدگی‌های کامپوزیت بیولوژیکی ناشی می‌شود. در چنین ماده‌ی پیچیده‌ای خصوصیات مکانیکی ممکن است تحت تأثیر عوامل دیگری غیر از ترکیب ماده باشند به همین دلیل شناخت کامل این مواد زیستی را بسیار دشوار می‌کند. علاوه بر این شناخت چگونگی دقیق توزیع ماده در این ساختارها نیازمند تحلیل‌های پیچیده‌ای است. اما دلیل مهم‌تر دیگر می‌تواند این باشد که آنچه که از تصاویر دیجیتال پوسته پیش‌بینی می‌شود، وجود گرادینانی از ماده در دو راستای طول و عرض پوسته است. بررسی رابطه‌ی سفتی برای سفتی که بتواند به طور همزمان در دو راستای طول و عرض

متناسب با ساختار طراحی شده تغییر کند، بسیار پیچیده و نیازمند بکارگیری چند متد مختلف برای تعریف سفتی می‌باشد. بنابراین آنچه که در انتهای این تحقیق برای کارهای آینده پیشنهاد می‌شود، علاوه بر بررسی الگوهای سفتی با استفاده از سایر روابط ریاضی، مانند الگوهای نمایی و...، و مقایسه‌ی نتایج حاصل، بررسی تغییرات مدول یانگ در دو راستای طول و عرض و با هدف بدست آوردن توزیع ماده‌ای نزدیک‌تر به آنچه که در پوسته‌ی بال در طبیعت مشاهده می‌گردد، است. چراکه نتایج حاصل از مدل تهیه شده از تصویر دیجیتال CLSM در مقایسه با روابط مختلف سفتی دارای مقادیر ماکزیمم تنش و کرنش مطلوبی برای ساختار مورد بررسی بود. نتایج بدست آمده در این پژوهش و همچنین مطالعات انجام شده تا به امروز نشان می‌دهند که وجود گرادیان ماده در ساختارهای طبیعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. بنابراین شناخت هرچه بیشتر این ساختارها و نحوه‌ی توزیع مواد آنها و الگوبرداری از آنها کمک شایانی در امر طراحی و ساخت مواد مهندسی خواهند کرد. بررسی‌های عددی و نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌تواند بستری مناسب برای مطالعه‌ی بیشتر در این حوزه فراهم آورد.

5- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از آقایان شهاب عشقی (دانشجوی دکتری بیومکانیک، دانشگاه کیل، کیل، آلمان) و محسن جعفرپور (دانشجوی دکتری بیومکانیک، دانشگاه کیل، کیل، آلمان) به منظور نظرات ارزشمندشان در این تحقیق و همچنین ویرایش مقاله نهایت تشکر را دارند.

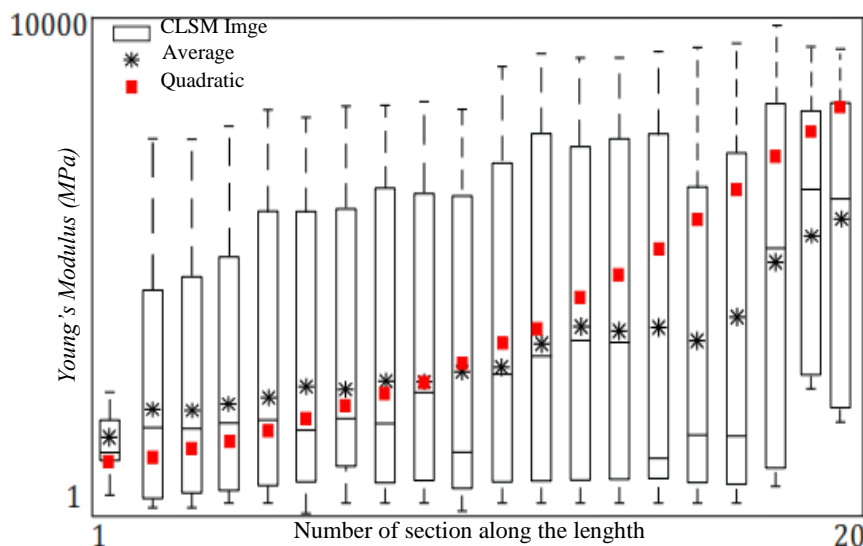


Fig.9 Comparison amount of Young's modulus in the membrane on dragonfly wing using CLSM image [16, 17] with stiffness distribution using a Quadratic function.

شکل 9 مقایسه مقادیر مدول یانگ در طول پوسته در بال سنجاقک با استفاده از تصویر CLSM [16,17] با توزیع سفتی با استفاده از رابطه‌ی سهموی درجه دو

¹ Box Plot

6- مراجع

- [1] Wegst, U. G. Ashby, M. F., "The Mechanical Efficiency of Natural Materials," *Philosophical Magazine*. Vol. 84, No. 21, pp. 2167-86, 2004.
- [2] Vincent, J. F. Wegst, U. G., "Design and Mechanical Properties of Insect Cuticle," *Arthropod structure & development*. Vol. 33, No. 3, pp. 187-99, 2004.
- [3] Barbakadze, N. Enders, S. Gorb, S. Arzt, E., "Local Mechanical Properties of the Head Articulation Cuticle in the Beetle *Pachnoda Marginata* (Coleoptera, Scarabaeidae)," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 209, No. 4, pp. 722-30, 2006.
- [4] Burrows, M. Shaw, S. R. Sutton, G. P., "Resilin and Chitinous Cuticle form a Composite Structure for Energy Storage in Jumping by Froghopper Insects," *BMC biology*, Vol. 6, No. 1, pp. 41, 2008.
- [5] Dai, Z. Yang, Z., "Macro-/Micro-Structures of Elytra, Mechanical Properties of the Biomaterial and the Coupling Strength Between Elytra in Beetles," *Journal of Bionic Engineering*. Vol. 7, No. 1, pp. 6-12, 2010.
- [6] Clark, A. J. Triplehorn, J. D., "Mechanical Properties of the Cuticles of Three Cockroach Species that Differ in Their Wind-Evoked Escape Behavior," *PeerJ*, Vol. 2, pp. e501, 2014.
- [7] Dirks, J. H. Taylor, D., "Fracture Toughness of Locust Cuticle," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 215, No. 9, pp. 1502-8, 2012.
- [8] Appel, E. Heepe, L. Lin, C. P. Gorb, S. N., "Ultrastructure of Dragonfly Wing Veins: Composite Structure of Fibrous Material Supplemented by Resilin," *Journal of Anatomy*, Vol. 227, No. 4, pp. 561-82, 2015.
- [9] Darvizeh, A. Rajabi, H. Nejad, S. F. Khareshi, A. Haghdoust, P., "Biomechanical Properties of Hen's Eggshell: Experimental Study and Numerical Modeling," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 7, pp. 456-9, 2013.
- [10] Rajabi, H. Ghoroubi, N. Darvizeh, A. Appel, E. Gorb, S. N., "Effects of Multiple Vein Microjoints on the Mechanical Behaviour of Dragonfly Wings: Numerical Modelling," *Royal Society open science*, Vol. 3, No. 3, pp. 150610, 2016.
- [11] Miyamoto, Y., "The Applications of Functionally Graded Materials in Japan," *Materials Technology*, Vol. 11, No. 6, pp. 230-6, 1996.
- [12] Muslim, N. B. Hamzah, A. F. Al-kawaz, A. E., "Study of Mechanical Properties of Wollastonite Filled Epoxy Functionally Graded Composite," *Int. J. Mech. Eng. Technol*, Vol. 9, pp. 669-77, 2018.
- [13] Rezvaniavakol, M., "A Review of the Theory and Approximation of Mechanical Properties of FGM Functional Materials by Introducing These Materials in Nature and its Applications in Industry" In Persian, *Journal of Science and Engineering Elites*, Vol 2, No. 1, 2538-58.
- [14] Rajabi, H. Jafarpour, M. Darvizeh, A. Dirks, J. H. Gorb, S. N., "Stiffness Distribution in Insect Cuticle: a Continuous or a Discontinuous Profile?," *Journal of The Royal Society Interface*. Vol. 14, No. 132, pp. 20170310, 2017.
- [15] Schmitt, M. Büscher, T. H. Gorb, S. N. Rajabi, H., "How Does a Slender Tibia Resist Buckling? Effect of Material, Structural and Geometric Characteristics on Buckling Behaviour of the Hindleg Tibia in Stick Insect Postembryonic Development," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 221, No. 4, 2018.
- [16] Eshghi, S. H. Jafarpour, M. Darvizeh, A. Gorb, S.N. Rajabi, H., "A Simple, High-Resolution, Non-Destructive Method for Determining the Spatial Gradient of the Elastic Modulus of Insect Cuticle," *Journal of The Royal Society Interface*, Vol. 15, No. 145, pp. 20180312, 2018.
- [17] Rajabi, H. Dirks, J. H. Gorb, S. N., "Insect Wing Damage: Causes, Consequences and Compensatory Mechanisms," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 223, No. 9, 2020.

