مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 14، ص‌ص 235-244

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تأثیر اجزای ساختاری بر رفتار بیومکانیکی بال عقب ملخ صحرایی

ابوالفضل درویزه[1]، ندا شفیعی[2]، منصور درویزه[3]، حمیدرضا حبیب الهی[4] و حامد رجبی[5*]

1- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد انزلی، بندر انزلی
2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
4- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
5- مربی، مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی احرار، رشت
* رشت، صندوق پستی 41931-63584 ، harajabi@ahrar.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 13 اردیبهشت 1393
پذیرش: 24 تیر 1393
ارائه در سایت: 23 مهر 1393

کلید واژگان:
روش المان محدود
ساختار میکروسکوپی
توزیع تنش
ملخ صحرایی
جزء ساختاری

چکیده

این مقاله به مطالعه تأثیر اجزای ساختاری بال عقب ملخ صحرایی بر رفتار بیومکانیکی آن می‌پردازد. نخست، بال حشره تحت بررسی میکروسکوپی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی قرار می‌گیرد. نتایج به دست آمده از بررسی‌های میکروسکوپی جهت ارائه مدل‌های المان محدود از بال با در نظر گرفتن اجزای ساختاری متفاوت به کار گرفته می‌شود. مدل‌های ارائه شده تحت اثر نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی وارد بر بال در ضمن پرواز قرار گرفته و تنش‌ها و جابه‌جایی‌های ناشی از آن‌ها ارزیابی می‌گردند. نتایج نشان داده است که حضور رگ‌های طولی، رگ‌های طولی و عرضی، چین‌وچروک‌ها، چین‌وچروک‌ها و رگ‌های طولی و در نهایت چین‌وچروک‌ها و رگ‌های طولی و عرضی به ترتیب باعث میانگین کاهش 4 ، 25/75 ،4/34 ،184/54 و 768/5 برابری تنش اصلی پدید آمده نسبت به بال فاقد اجزای ساختاری شده است. اجزای ساختاری بال ملخ همچنین نقش موثری در یکنواخت شدن شکل توزیع تنش و کاهش دامنه تغییرات آن در یک سیکل پرواز ایفا می‌کنند. همچنین نشان داده می‌شود که تأثیر نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی بر تغییر شکل بال حین پرواز، از تأثیر نیروهای الاستیک کمتر است. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند در ساخت سازه‌های سبک با مقاومت بالا به کار گرفته شود.

Investigation of the effects of constructional elements on the biomechanical behavior of desert locust hind wing

Abolfazl Darvizeh[1], Neda Shafiee[2], Mansoor Darvizeh[3], Hamidreza Habibollahi[4], Hamed Rajabi[5*]

1- Department of Mechanical Engineering, Anzali Branch, Islamic Azad University, Bandar Anzali, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
4- Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran
5- Department of Mechanical Engineering, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran
* P.O. Box 41931-63584, Rasht, Iran, harajabi@ahrar.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 03 May 2014
Accepted 15 July 2014
Available Online 15 October 2014

Keywords:
Finite element method
Microstructure
stress distribution
desert locust
constructional element

ABSTRACT

This paper investigates the effects of constructional elements on the biomechanical behavior of desert locust hind wing. First, the microstructure of the insect wing is investigated using scanning electron microscope. The results of the scanning electron microscopy are used to develop finite element models of the wing with different constructional elements. The presented models are studied under the inertial and aerodynamic loads applied during flight and the obtained stresses and displacements are assessed. The results show that longitudinal veins, longitudinal and cross veins, corrugations, corrugations and longitudinal veins and finally a combination of corrugations and longitudinal and cross veins cause, on average, a 4, 25.75, 4.34, 184.54, 768.5 times decrease of the achieved principal stresses in comparison with a wing without the mentioned constructional elements. Constructional elements of the locust wing play an important role to stablize the pattern of stress distribution in the wing during flight. Further, the existence of the mentioned constructional elements causes a decrease in the variation of the stress within a stroke-cycle. In addition, it is shown that the inertia and aerodynamic forces have less effect on the wing deformation than the elastic ones. The results of this research may be helpful in the development of lightweight structures with high strength.

1- مقدمه

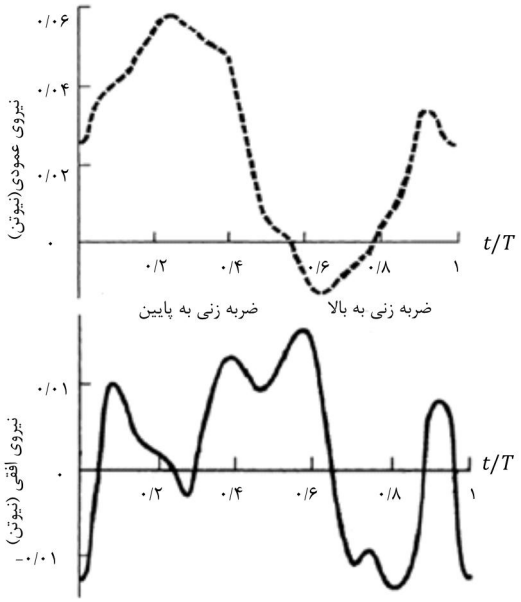
بال‌های حشرات در طول پرواز به طور مداوم تحت اثر نیروهای اینرسی، آیرودینامیکی و الاستیک قرار می‌گیرند. نیروهای اینرسی نیروهایی هستند که از به حرکت درآمدن بال، تغییر در جهت بال زنی و تغییر در شتاب بال ایجاد شده، نیروهای آیرودینامیکی بر اثر پرواز حشره از طریق هوا به بال وارد شده و نیروهای الاستیک نیز به وسیله ماهیچه‌های بدن حشره ایجاد می-

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:
Please cite this article using:
A. Darvizeh, N. Shafiee, M. Darvizeh, H.R. Habibollahi, H. Rajabi, Investigation of the effects of constructional elements on the biomechanical behavior of desert locust hind wing, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 14, pp. 235-244, 2015 (In Persian)

Archive of SID
www.SID.ir

شوند. لازم به ذکر است که بال‌های حشرات فاقد ماهیچه بوده و نیروهای الاستیک تنها از طریق ماهیچه‌های متصل به پایه بال به آن وارد می‌شوند. این نیروها عامل ایجاد تنش و تغییر شکل در بال‌های حشرات هنگام پرواز هستند. اولین مطالعات انجام شده در رابطه با آیرودینامیک پرواز ملخ را می‌توان به ویس فاگ و جنسن نسبت داد [1] و [2]. جنسن [2] نیروهای آیرودینامیکی وارد بر بال ملخ را در پرواز افقی آزاد محاسبه کرد. وی اثرات ناپایداری را در نیروهای آیرودینامیکی در نظر نگرفته بود. کلوپلئو با در نظر گرفتن اثرات غیر پایا در آیرودینامیک پرواز ملخ نیروهای عمودی لحظه‌ای را برای ملخ به دست آورد. منحنی این نیروها مشابه همان‌هایی بود که جنسن به دست آورده اما دامنه نیروهای کلوپلئو دو برابر نیروهای جنسن بود. کلوپئو این اختلاف دامنه را به دلیل پایدار در نظر گرفتن آیرودینامیک و فرضیات شبه‌استاتیکی در مطالعات جنسن دانست. کلوپلئو نیروهای افقی وارد بر بال را محاسبه نکرده بود. ویلکین [3] با غیر پایا در نظر گرفتن آیرودینامیک پرواز ملخ نیروهای افقی و عمودی وارد بر بال ملخ را در یک سیکل در پرواز محدود شده[1] به دست آورده، اما تغییر مقدار این نیروها را در نواحی مختلف بال ارائه نکرده است. لذا ما با یکنواخت در نظر گرفتن توزیع این نیروها در نواحی مختلف بال تنش‌های وارد بر بال عقب ملخ صحرایی را به کمک نتایج ویلکین محاسبه کرده‌ایم. شکل 1 نیروهای افقی و عمودی به دست آمده به کمک آزمایش‌های ویلکن را نشان می‌دهد.

تاکنون مطالعات بسیاری در رابطه با تنش و تغییر شکل‌های ایجاد شده در بال حشرات بر اثر اعمال نیروهای شبه استاتیکی و دینامیکی صورت گرفته است. بسیاری از محققان به کمک روش‌های تجربی و عددی، تنش و جابه‌جایی‌های ایجاد شده در بال حشرات را بر اثر اعمال نیروهای خارجی محاسبه کرده‌اند. روش المان محدود، با تغییر در ساختار رگ‌ها و پوسته بال 5 طرح مختلف برای ناحیه پایینی بال عقب ملخ ارائه کردند و با اعمال نیروی شبه-استاتیکی بر این ناحیه اثر تغییر یافتن ساختار رگ‌ها و پوسته را بر محل ایجاد بیش‌ترین جابه‌جایی بررسی کرده و محل ایجاد این مقدار جابه‌جایی را در مدل‌های ارائه شده با هم مقایسه کردند.



شکل 1 نیروهای عمودی و افقی به دست آمده توسط ویلکن برای بال عقب ملخ [3]

1- پرواز محدود شده پروازی است که در آن بدن حشره به کمک سیم مقید شده و حشره قادر به حرکت به سمت جلو نمی‌باشد.

هربرت و همکارانش [4] برای بررسی اثر چتری شدن در بال ملخ به کمک نتایج به دست آمده نشان داده که ایجاد هرگونه تغییر شکل در ساختار بال کانتور جابه‌جایی و محل ایجاد بیش‌ترین جابه‌جایی را کاملاً تغییر داده و تنها نتایج مربوط به بالی که مشابه بال واقعی مدل‌سازی شده با نتایج آزمایشگاهی آن‌ها مطابقت داشته است. تیلی و همکارانش [5] مدل المان محدود بال سوسک را ایجاد کردند. آن‌ها با اختصاص ضخامت و مدول یانگ‌های متفاوت به نواحی مختلف بال مقدار نیروی لازم برای ایجاد جابه‌جایی مشخص در نقاط خاصی از بال را محاسبه و کانتور جابه‌جایی را نیز ارائه کردند. نتایج آن-ها نشان داد که برای ایجاد جابه‌جایی 1/1 میلیمتر در نقطه خاصی واقع در میانه مرز بالایی بال به طور میانگین 10/12 میلی نیوتن نیرو لازم است. کمبس و دنیل [6] به کمک روش تجربی سهم هر یک از نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی را بر تغییر شکل بال نوعی پروانه بررسی کردند. آن‌ها بال این حشره را جدا کرده و به کمک موتور در هوا و گاز هلیوم به حرکت در آوردند و خمش ایجاد شده در این دو حالت را با هم مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داده است که کاهش 85 درصدی چگالی هلیوم نسبت به هوا اختلاف بسیار کمی در تغییر شکل بال به وجود آورده است. در نهایت آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نیروهای دینامیکی وارد شده از طرف سیال کمترین تأثیر را در خمش بال داشته است. جنجریوس و لنتینک [7] نیروهای آیرودینامیکی و اینرسی وارد بر بال جلویی سنجاقک را به کمک روش تحلیلی محاسبه کردند. نتایج آن‌ها نشان داده است که نیروهای اینرسی وارد بر بال بیشتر از نیروهای آیرودینامیکی بوده و بیش‌ترین مقدار نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی به ترتیب در هنگام معکوس شدن جهت ضربه‌زنی بال و میانه ضربه‌زنی بال روی می‌دهد. آن‌ها همچنین بر یکسان نبودن مقدار نیروهای آیرودینامیکی و اینرسی در نواحی مختلف بال اشاره کرده و با جمع بستن این نیروها در راستای عرضی بال نمودار تغییر نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی را در راستای طولی برای بال جلویی سنجاقک به دست آورده‌اند. آن‌ها بال سنجاقک را با در نظر گرفتن چین‌وچروک‌ها و یکسان نبودن ضخامت و اندازه رگ‌ها در نواحی مختلف بال مدل‌سازی کرده و با در نظر گرفتن مدول یانگ ثابت برای رگ‌ها و پوسته در تمام نواحی بال کانتور جابه‌جایی را برای بال جلویی سنجاقک به دست آوردند و دریافتند که نیروهای اینرسی نسبت به نیروهای آیرودینامیکی سهم بیشتری را در تغییر شکل بال داشته و بیش‌ترین تغییر شکل در هنگام معکوس شدن ضربه زنی در لبه بال اتفاق می‌افتد. آن‌ها از مقایسه تغییر شکل بال در هنگام ضربه‌زنی به بالا و پایین نتیجه گرفتند که بال در برابر نیروهای وارد شده از سمت مقعر صلبیت بیشتری نسبت به نیروهای وارد شده از سمت محدب دارد.

این مقاله ضمن مطالعه ساختار میکروسکوپی بال‌های عقب ملخ صحرایی، با استفاده از روش المان محدود به بررسی توزیع تنش و جابه-جایی‌های ایجاد شده بر اثر اعمال نیروهای آیرودینامیکی و اینرسی با توزیع یکنواخت در پرواز محدود شده ملخ می‌پردازد و نتایجی را که کمبس و دنیل به کمک روش تجربی [6] و رجبی و همکارانش به کمک روش تحلیلی [8] برای بال حشرات به دست آوردند، با استفاده از روش المان محدود تأیید می-کند. همچنین تأثیر حضور رگ‌های طولی و عرضی و چین‌وچروک‌ها را بر جابه‌جایی‌ها و تنش‌های وارد شده به بال بررسی و با هم مقایسه می‌کند.

2- مواد و روش‌ها

2-1- میکروسکوپ الکترونی

برای بررسی ساختار میکروسکوپی بال عقب ملخ صحرایی یک ملخ صحرایی

www.SID.ir
Archive of SID

بالغ که از گیاهان تازه تغذیه کرده بود انتخاب شد. یک ماه بعد از مرگ ملخ برش‌هایی در نواحی مختلف شامل نواحی نزدیک به لبه بال، نواحی میانی لبه حمله، نواحی میانی لبه فرار و نواحی نزدیک به پایه ایجاد شد. سپس به کمک دستگاه پوشش‌دهنده سطح هر یک از این نواحی توسط لایه‌ای نازک از طلا پوشانده شد و در میکروسکوپ الکترونی فیلیپس XL30 ساختار میکروسکوپی هر یک از این نواحی مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که عکس‌های میکروسکوپی ارائه شده در این مقاله مربوط به بال عقب سمت راست ملخ صحرایی است.

2-2- مدل‌سازی، ویژگی‌های مواد و مش‌بندی

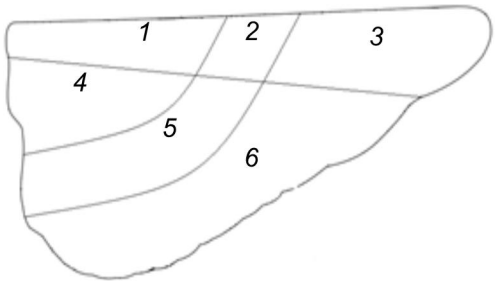
پس از بررسی ساختار میکروسکوپی، به کمک عکس‌های تهیه شده از بال عقب ملخ صحرایی مدل‌هایی از بال حشره به کمک نرم‌افزار کتیا[1] ایجاد شدند، سپس در نرم‌افزار اباکس[2] تنش‌ها و جابه‌جایی‌های ایجاد شده در آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. مدل‌های ارائه شده در این مقاله کامل‌ترین مدل‌هایی هستند که تا کنون جهت بررسی تأثیر اجزای ساختاری بال ملخ بر رفتار بیومکانیکی آن ایجاد شده‌اند. زیرا علاوه بر بررسی تأثیر وجود چین‌وچروک‌ها، تأثیر حضور رگ‌های طولی و عرضی را نیز مورد مطالعه قرار می‌دهند. علاوه بر این در مدل بال کامل حضور چین‌وچروک‌ها و تمامی رگ‌های طولی و عرضی، یکسان نبودن ضخامت پوسته و رگ‌های طولی و همچنین یکسان نبودن خواص مکانیکی در نواحی مختلف بال در نظر گرفته شده است. جزئیات مربوط به هر یک از مدل‌های ساخته شده در ادامه ارائه شده است.

مدل 1- بال بدون حضور چین‌وچروک‌ها و رگ‌های طولی و عرضی

در این مدل سطح پوسته بال صاف بوده، چین‌وچروک و رگ‌های طولی و عرضی وجود ندارند. فرضیات این مدل به شرح زیر است:

1. بال به صورت یک پوسته دوبعدی مدل‌سازی شده است.
2. بال به 6 ناحیه تقسیم شده و به هر ناحیه ضخامت و مدول یانگ جدا-گانه‌ای اختصاص یافته است. تقسیم‌بندی بال در شکل 2 و مقادیر ضخامت و مدول یانگ هر یک از 6 ناحیه در جدول 1 نشان داده شده است.

این تقسیم‌بندی در نواحی بال بر مبنای اطلاعات حاصل از یافته‌های اسمیت و همکارانش [9] و تقسیم‌بندی‌های صورت گرفته توسط هربرت و همکارانش [4] و به دلیل خواص مکانیکی و ضخامت متفاوت این نواحی در نمونه بال واقعی است.



شکل 2 تقسیم‌بندی بال برای اختصاص ضخامت به آن

جدول 1 مقدار ضخامت و مدول یانگ‌های اختصاص یافته به نواحی 1 تا 6 مربوط به شکل 2

شماره ناحیه	1	2	3	4	5	6
ضخامت (میکرومتر)	4/3	3/71	3/12	2/13	1/7	1/3
مدول یانگ(گیگاپاسکال)	11/7	9/9	8/2	5/1	3/7	2/4

1- CATIA V5R16
2- ABAQUS

اسمیت و همکارانش ضخامت و مدول یانگ نواحی مختلف بال عقب ملخ را اندازه‌گیری کردند و مقادیر میانگین آن‌ها را برای نواحی سخت پیشین و بادزن پسین به دست آوردند، همچنین بازه‌ای را برای ضخامت و مدول یانگ این دو ناحیه ارائه کردند. هربرت و همکارانش به کمک این داده‌ها ناحیه بادزن پسین را به 3 قسمت تقسیم کرده و مدول یانگ هر یک از این نواحی را به کمک بازه‌هایی که اسمیت و همکارانش داده بودند محاسبه کردند. در این مقاله با روشی مشابه، هر یک از نواحی سخت پیشین و بادزن پسین به سه قسمت تقسیم شده و ضخامت و مدول یانگ آن‌ها به دست آمده است.

3. هر یک از نواحی 1 تا 6 همگن فرض شده‌اند.
4. ضریب پواسون برابر 0/3 در نظر گرفته شده است.
5. چگالی پوسته برابر 1200 کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.
6. پوسته بال با المان‌های چهارگوش خطی از نوع SR4 مش‌بندی شده است.
7. تعداد المان‌های مربوط به پوسته پس از همگرا سازی نتایج برابر 6686 عدد شده است.

مدل 2- بال بدون حضور چین‌وچروک‌ها، در حضور رگ‌های طولی

این مدل از کنار هم قرار گرفتن پوسته بال و رگ‌های طولی حاصل شده است و خصوصیات آن به شرح زیر است:

1. پوسته بال دقیقاً همان پوسته مدل 1 است.
2. رگ‌های طولی به صورت لوله‌های تو خالی با مقطع دایره‌ای شکل مدل-سازی شده‌اند و قطر داخلی و خارجی آن‌ها مانند شفت پلکانی طی 5 مرحله از پایه به سمت لبه بال کاهش یافته است.
3. قطر داخلی و خارجی رگ‌های طولی در پایه بال به ترتیب 48 میکرومتر و 125 میکرومتر در نظر گرفته شده است.
4. قطر داخلی و خارجی رگ‌های طولی در لبه بال به ترتیب برابر 22 میکرومتر و 27 میکرومتر در نظر گرفته شده است.
5. مدول یانگ رگ‌های طولی در تمام نواحی ثابت و برابر 6 گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است [4].
6. ضریب پواسون پوسته و رگ‌ها برابر 0/3 در نظر گرفته شده است.
7. چگالی پوسته و رگ‌ها برابر 1200 کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.
8. پوسته بال توسط المان‌های چهارگوش خطی[3] از نوع SR4 و رگ‌های طولی توسط المان‌های خطی[4] از نوع B31 مش‌بندی شده‌اند.
9. پس از همگرا سازی نتایج تعداد المان‌های پوسته برابر 113030 و تعداد المان‌های رگ‌های طولی برابر 112430 شده است.

مدل 3- بال بدون حضور چین‌وچروک‌ها، در حضور رگ‌های طولی و عرضی

این مدل از کنار هم قرار گرفتن پوسته بال و رگ‌های طولی و عرضی حاصل شده است و خصوصیات آن در زیر بیان شده است:

1. پوسته بال و رگ‌های طولی آن دقیقاً مانند مدل 2 هستند.
2. رگ‌های عرضی به صورت لوله‌های تو خالی با مقطع دایره‌ای مدل‌سازی شده‌اند.
3. قطر داخلی و خارجی رگ‌های عرضی در تمام نواحی بال ثابت و به ترتیب برابر 27 و 50 میکرومتر است.
4. مدول یانگ رگ‌های عرضی در تمام نواحی برابر 6 گیگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

3- Linear quadrilateral
4- linear line

www.SID.ir
Archive of SID

5. ضریب پواسون در تمام نواحی برابر 0/3در نظر گرفته شده است.
6. چگالی پوسته و رگ‌ها برابر 1200 کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.
7. رگ‌های عرضی با المان‌های خطی از نوع B31 مش‌بندی شده‌اند.
8. پس از همگرا سازی نتایج تعداد المان‌های پوسته برابر 137932 و تعداد المان‌های مربوط به رگ‌های طولی و عرضی برابر 152996 عدد شده است.

مدل 4- بال چروکیده بدون حضور رگ‌های طولی و عرضی

در این مدل چروکیدگی‌های پوسته بال تا حد امکان مدل‌سازی شده است و فرضیات آن به شرح زیر است:

1. بال به صورت یک پوسته سه‌بعدی مدل‌سازی شده است.
2. خصوصیات و نوع مش‌بندی پوسته مانند مدل 1 است و تفاوت این دو مدل در لحاظ شدن چروکیدگی‌های مربوط به پوسته در مدل سه بعدی است.
3. تعداد المان‌ها پس از همگرا سازی به 8629 عدد رسیده است.

مدل 5- بال چروکیده در حضور رگ‌های طولی

این مدل از کنار هم قرار دادن پوسته چروکیده و رگ‌های طولی حاصل شده است و فرضیات آن به شرح زیر است:

1. پوسته بال و رگ‌های آن به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده‌اند.
2. خصوصیات و نوع مش‌بندی پوسته و رگ‌های طولی مانند مدل 2 می‌باشد و تفاوت این دو مدل در لحاظ شدن چروکیدگی‌های مربوط به پوسته و رگ‌های طولی در مدل سه بعدی است.
3. تعداد المان‌های پوسته و رگ‌های طولی پس از همگرا سازی به ترتیب برابر 89689 و 57714 عدد شده است.

مدل 6- بال چروکیده در حضور رگ‌های طولی و عرضی

این مدل از کنار هم قرار گرفتن پوسته چروکیده و رگ‌های طولی و عرضی به دست آمده است و فرضیات آن به شرح زیر است:

1. پوسته بال و رگ‌های آن به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده‌اند.
2. پوسته بال و رگ‌های طولی همان‌هایی هستند که در مدل 5 استفاده شده‌اند.
3. رگ‌های عرضی همان‌هایی هستند که در مدل 3 استفاده شده‌اند، با این تفاوت که در این جا رگ‌ها نیز مانند پوسته بال دارای چروکیدگی می‌باشند.
4. مدول یانگ، ضریب پواسون، چگالی و نوع المان‌ها در مش‌بندی رگ‌های عرضی مانند مدل 3 است و این رگ‌ها مانند سایر نواحی بال همگن در نظر گرفته شده‌اند.
5. تعداد المان‌های پوسته و رگ‌های طولی و عرضی پس از همگرا سازی به ترتیب برابر 89880 و 160973 عدد شده است.

2-3- بارگذاری

حرکت بال‌های حشرات حین پرواز ترکیبی از یک حرکت انتقالی رفت و برگشتی و یک حرکت دورانی است [10]. همان طور که قبلاً توضیح داده شد در طول پرواز سه نیروی الاستیک، اینرسی و آیرودینامیکی بر بال وارد می‌شود. تاکنون مطالعات بسیاری در رابطه با نیروهای وارد بر بال حشرات صورت گرفته است. توزیع نیروی اینرسی و آیرودینامیکی ارائه شده توسط جنجریوس و لنتینک [7] برای بال سنجاقک نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار نیروی اینرسی در لبه بال و بیش‌ترین مقدار نیروهای آیرودینامیکی در قسمت میانی بال واقع در 0/8 طول کلی بال از پایه قرار دارد. همچنین آن‌ها نشان داده‌اند که هنگامی که نیروی اینرسی به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسد نیروهای آیرودینامیکی در کمترین حد خود قرار دارد و بالعکس.

سهم بال‌های جلو و عقب در تولید نیرو در حشرات مختلف با هم متفاوت است. در حشره‌ای مانند سنجاقک که اندازه بال‌های جلو و عقبش تقریباً با هم برابر است سهم این بال‌ها نیز در تولید نیروها تقریباً یکسان است. اما در حشره‌ای مانند ملخ به دلیل وسیع تر بودن بال‌های عقب، سهم این بال‌ها در تولید نیروها بیشتر است و به همین دلیل در این جا مطالعات بر روی بال‌های عقب ملخ متمرکز شده است. لازم به ذکر است که بال‌های عقب ملخ این توانایی را دارند که در طول پرواز مانند یک بادبزن جمع و باز شوند، درحالی‌که بال‌های بسیاری از حشرات مانند سنجاقک این قابلیت را ندارد. در حین ضربه‌زنی بال به سمت پایین که نیروی لیفت در جهت بالا به بال ملخ وارد می‌شود و به صعودش در هوا کمک می‌کند، ملخ تا حد امکان بال‌های عقب خود را باز کرده تا نیروی لیفت بیشتری به آن وارد شود و هنگام ضربه-زنی بال به سمت بالا که نیروی لیفت در جهت پایین به آن وارد می‌شود حدود 30 درصد [11] از مساحت بال خود را جمع می‌کند تا نیروی کمتری به آن وارد شده و از سقوطش در هوا جلوگیری کند.

در رابطه با بال ملخ همان طور که قبلاً نیز اشاره شد ویلکن [3] برآیند نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی را در دو راستای افقی و عمودی محاسبه کرده، اما نحوه توزیع این نیروها را در بال به دست نیاورده است. در این مقاله برای بررسی تنش‌ها و جابه‌جایی‌های ایجاد شده در هر یک از مدل‌ها نیاز به اعمال نیروهای دینامیکی است لذا این نیروها با شرایط زیر بر هر یک از مدل‌ها وارد شده‌اند:

1. در تمامی مدل‌ها انتهای بال مانند تیر یک‌سردرگیر گیردار شده و درجه آزادی آن صفر در نظر گرفته شده است.
2. به کمک نتایج ویلکین که در شکل 1 نشان داده شده است، برآیند نیروهای آیرودینامیکی و اینرسی در راستای افقی و عمودی به صورت بار گسترده با توزیع یکنواخت در یک سیکل پرواز به بال وارد شده‌اند. به این منظور داده‌های نموداری شکل 1 به کمک نرم‌افزار گت دیتا[1] به داده‌های جدولی تبدیل شده‌اند. سپس این داده‌ها در نرم‌افزار اباکس بر روی هر یک از مدل‌ها به صورت نیروهای عمودی و موازی با بال در هر نقطه از آن، اعمال شده‌اند.

3- نتایج

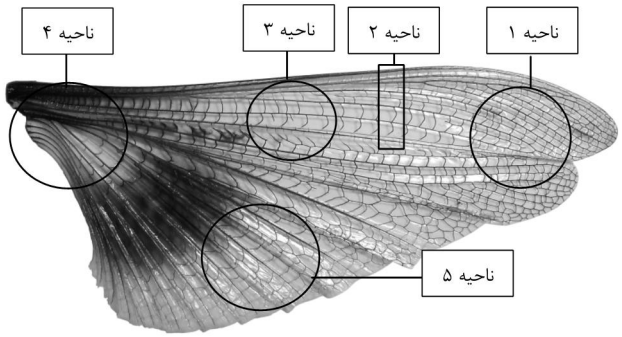
3-1- عکس‌های میکروسکوپی

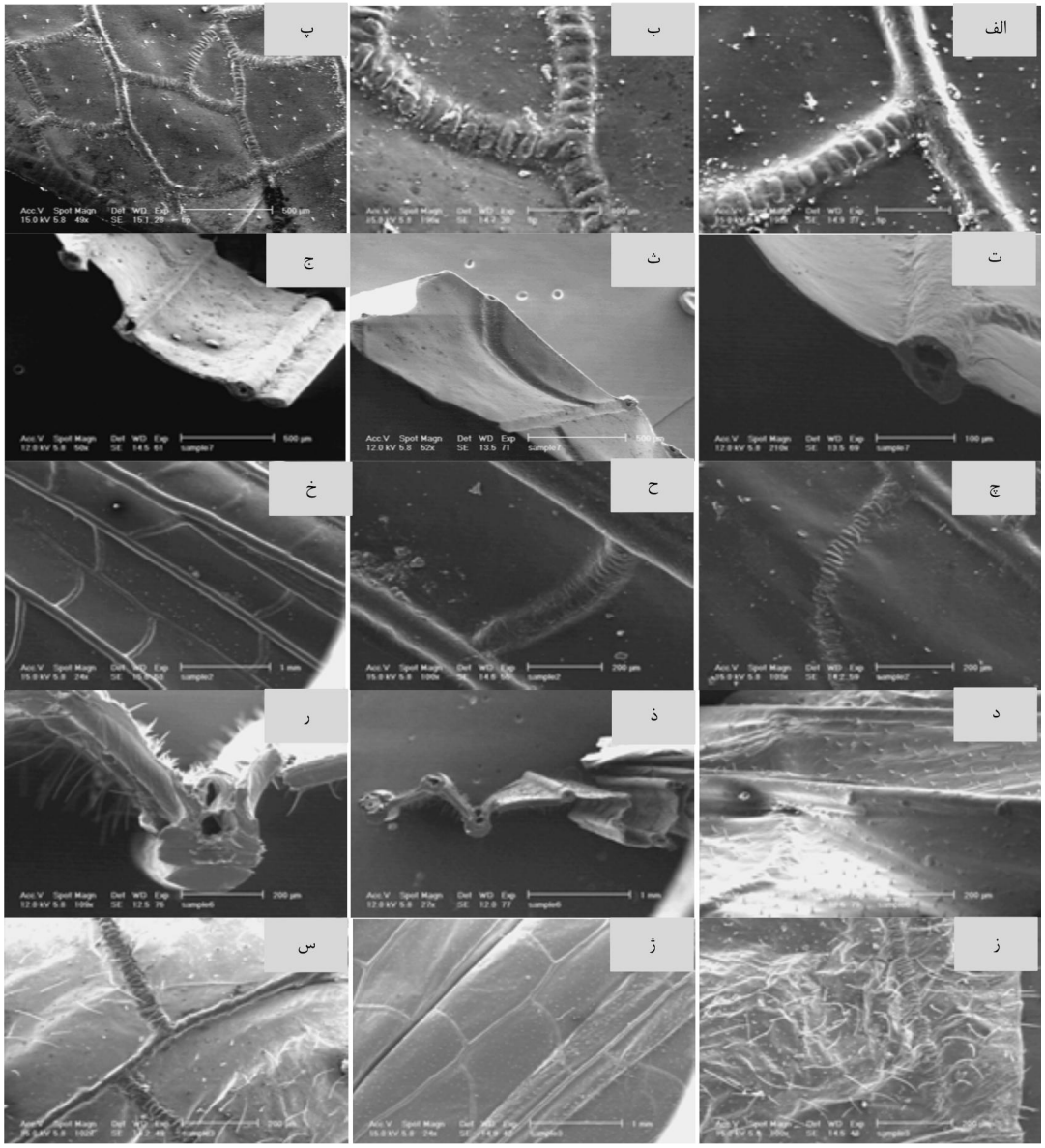
بال عقب سمت راست ملخ صحرایی و نواحی انتخابی برای عکس‌برداری میکروسکوپی در شکل 3 نشان داده شده است. همان طور که در شکل 3 برای بال کامل نشان داده شده است بال‌های ملخ دارای دو نوع رگ، رگ‌های طولی و رگ‌های عرضی، است. این رگ‌ها وظیفه انتقال لنف، اکسیژن و پیام-های حسی را به عهده دارند [12] و مانند اسکلتی هستند که به افزایش استحکام و مقاومت بال کمک می‌کنند.

رگ‌های طولی که سطح بیرونی آن‌ها در نواحی مختلف بال در شکل‌های 3- الف، چ، ح، خ، د و س و سطح مقطعشان در شکل‌های 3- ت، ج، ذ و ر مشاهده می‌شود رگ‌های قطورتر و طویل‌تر بال هستند و اندازه سطح مقطعشان از پایه به سمت لبه بال کاهش می‌یابد. این رگ‌ها در پایه بال که نیروهای خمشی بیشتری به بال وارد می‌شود قطورتر و در لبه‌ها که مقدار این نیروها کاهش می‌یابد ظریف‌تر هستند. این کاهش مقطع از پایه به سمت لبه بال باعث کاهش ممان اینرسی و جرم بال می‌شود [4].

1- Get Data

www.SID.ir
Archive of SID





شکل 3 عکس‌های میکروسکوپی گرفته شده از نواحی مختلف بال عقب سمت راست ملخ صحرایی. شکل‌های الف، ب، پ مربوط به ناحیه 1، شکل‌های ت، ث، ج مربوط به ناحیه 2، شکل‌های چ، ح، خ مربوط به ناحیه 3، شکل‌های د، ذ، ر مربوط به ناحیه 4 و شکل‌های ر، ز، ژ مربوط به ناحیه 5 بال

این ویژگی در حشرات مهاجر که نیاز به ذخیره انرژی دارند امری بسیار مهم تلقی می‌شود.

مطابق شکل 3- الف، چ، ح، خ و س رگ‌های طولی دارای سطح بیرونی صاف‌تری نسبت به رگ‌های عرضی بوده و چین‌وچروک بر روی این رگ‌ها مشاهده نمی‌شود. اما رگ‌های عرضی به جز در لبه حمله چروکیده بوده [4] و همان طور که در شکل 3- الف، ب، پ، چ، ح، ز و س به وضوح دیده می‌شود مانند حباب‌هایی به هم چسبیده‌اند.

مطالعات انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که ساختار رگ‌های عرضی حبابی شکل مشابه لوله‌های خرطومی[1] است. روشن است که خصوصیت بارز این ساختارها قابلیت انعطاف‌پذیری بالای آن‌هاست. چنین ساختاری در بال سنجاقک که رگ‌های عرضی آن نمی‌توانند مانند بال ملخ

1- Corrugated pipes

www.SID.ir

دچار خمش شوند مشاهده نشده است [13].

در شکل 3- خ مشاهده می‌شود که در نزدیکی مرز بالایی بال یعنی ناحیه نزدیک به لبه حمله این حباب‌ها کاملاً به هم چسبیده‌اند و در بعضی موارد با فاصله کمی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. لبه حمله از سه رگ طولی تشکیل شده که در ساختاری v شکل در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و به کمک تعداد زیادی از رگ‌های عرضی به هم متصل شده‌اند. در لبه حمله رگ‌های عرضی ساختار حباب‌حباب ندارند و سلول‌های به وجود آمده توسط این رگ‌ها در این لبه چهارگوش است [4]. سلول‌های چهارگوش نسبت به سلول‌هایی با ساختار پنج یا شش ضلعی مقاومت بالاتری دارند [14]. حباب-حباب نبودن ساختار رگ‌های عرضی در لبه حمله و چهارگوش بودن سلول‌ها در این ناحیه نشان دهنده استحکام بیشتر و انعطاف پذیری کمتر این ناحیه نسبت به سایر نواحی است. آن چنانکه ووتن بال حشره را به خاطر استحکام بالاتر این لبه نسبت به نواحی اطرافش به بادبان قایق تشبیه کرده است [15].

لازم به ذکر است که رگ‌های عرضی در سراسر بال مقطع تقریباً ثابتی داشته و سطح مقطعشان تقریباً دایره‌ای شکل است (شکل 3-ث). اما رگ‌های طولی همان طور که در شکل 3- ذ نیز نشان داده شده است، سطح مقطعی با شکل‌های دایروی، بیضوی و زنگوله‌ای یا دمبلی شکل دارند و این شکل مقطع‌ها بر ممان اینرسی آن‌ها حول محورهای خاص اثر می‌گذارد. مطابق شکل 3- پ در ناحیه بالایی بال یک رگ مرزی وجود دارد، درحالی‌که این رگ در مرز پایینی بال در شکل 3- ز مشاهده نمی‌شود. سطح مقطع این رگ مرزی در مرز بالایی بال مطابق شکل 3- ج دوکی شکل است. همچنین در شکل 3- د، ذ، ر، ز و س مشاهده می‌شود که بر روی سطح بال خارهای کوتاه و بلندی وجود دارد. مطابق شکل 3- ز تجمع این خارها در ناحیه نزدیک به مرز پایینی بال که نسبت به سایر نواحی ساختار ظریف‌تری دارد بیشتر است. علاوه بر این خارها در این ناحیه نسبت به ناحیه ضخیم‌تر نزدیک به پایه بال که در شکل 3- د نشان داده شده است طول بیشتری دارند. وظیفه اصلی این خارها پاسخ به محرک‌های مکانیکی و شیمیایی است[16]. این خارها همچنین می‌توانند به عنوان محافظی در برابر عوامل خارجی و سایر حشرات عمل کنند.

3-2- بررسی توزیع تنش در بال‌های عقب ملخ بر اثر اعمال نیروهای گسترده با توزیع یکنواخت

محدوده تنش‌های وارد بر عمده مساحت هر یک از مدل‌ها تحت معیار ماکزیمم تنش اصلی در یک سیکل پرواز در جدول 2 نشان داده شده است. تحقیقات نویسندگان این مقاله نشان می‌دهد که تئوری ماکزیمم تنش اصلی برای پیش-بینی رفتار مکانیکی ساختارهای حیاتی از دقت بالایی برخوردار است [17و 18].

نتایج به دست آمده در جدول 2 نشان می‌دهد که با به میان آوردن رگ‌های طولی، رگ‌های عرضی و چین‌وچروک‌ها میزان تنش‌های وارد به بال و در نتیجه میزان جابه‌جایی‌های ایجاد شده در آن کاهش پیدا کرده است. برای درک بهتر تأثیر عوامل ساختاری بر تنش‌های ایجاد شده، داده‌های جدول 2 در نرم‌افزار اس. پی. اس. اس[1] به کمک آنالیز فریدمن[2] مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به اینکه مقدار معنی‌دار[3] حاصل بر اساس این روش برابر صفر می‌باشد، لذا میانگین تنش‌های به دست آمده برای مدل‌ها دارای تفاوت معنی داری است. شکل 4 مقادیر میانگین تنش‌های هر یک از مدل‌ها و شکل 5 مقادیر انحراف معیار آن‌ها را مطابق تحلیل فریدمن نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود مدل 1 که فاقد عوامل ساختاری بال است بیش‌ترین مقدار میانگین تنش‌ها و مدل 6 که شامل تمامی عوامل ساختاری است کمترین مقدار میانگین تنش‌ها را به خود اختصاص داده است. علاوه بر این اختلاف میانگین تنش‌های به دست آمده برای مدل‌های 5 و 6 برابر 21/3 مگا پاسکال بوده که کمترین مقدار اختلاف موجود میان هر ترکیب دوتایی از مدل‌ها می‌باشد. در این شکل مشاهده می-شود که تأثیر حضور چین و چروک‌ها، در مدل 4، با اختلاف 106 مگاپاسکالی از تأثیر حضور رگ‌های طولی، در مدل 2، بر کاهش میانگین تنش‌ها بیشتر و با اختلاف چشمگیر 1072/2 مگاپاسکالی از تأثیر حضور رگ‌های طولی و عرضی، در مدل 3، بر کاهش میانگین تنش‌ها کمتر است. به کمک این شکل مقایسه دوبه‌دوی تنش‌های هر یک از مدل‌ها به آسانی قابل انجام است.

از مقایسه انحراف معیارهای به دست آمده در شکل 5 نیز می‌توان دریافت که حضور اجزای ساختاری در بال علاوه بر کاهش تنش‌ها، میزان تغییرات تنش‌های وارد بر بال را نیز کنترل می‌کنند. مطابق داده‌های این شکل، تنش‌های وارد بر مدل 1 بیش‌ترین مقدار پراکندگی و تنش‌های وارد بر مدل 6 کمترین مقدار پراکندگی را نسبت به مقدار میانگین خود دارند. این امر در شکل 6 که مقدار تنش‌های جدول 2 را به صورت نموداری نشان می-دهد نیز قابل لمس است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود نمودار مدل‌های 6 و 5 که مطابق شکل 5 کمترین مقدار انحراف معیار را دارند تقریباً افقی بوده و مقادیر تنش‌های آن‌ها در طول یک سیکل پرواز بسیار به یکدیگر نزدیک است. درحالی‌که برای مدل 1 که بیش‌ترین مقدار انحراف معیار را دارد پراکندگی داده‌ها بسیار زیاد است و میزان تنش وارد شده بر بال در زمان‌های مختلف در طول یک سیکل پرواز دارای تغییرات قابل توجهی می‌باشد. بعد از مدل 6 و 5 مدل 3 کمترین انحراف معیار را دارد. بر اساس شکل 6 نیز پس از مدل‌های 6 و 5 نمودار مدل 3 نسبت به سایر مدل‌ها بیش‌ترین نزدیکی را به حالت افقی دارد. پس از مدل 3 نیز مطابق شکل 6 مدل 2 و بعد از آن مدل 4 بیش‌ترین نزدیکی را به حالت افقی دارند. مانند شکل 4، در شکل 5 نیز مقایسه دوبه‌دویی میزان پراکندگی تنش‌های هر یک از مدل‌ها به آسانی قابل انجام است.

همان طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود، نمودار به دست آمده برای انحراف معیارها به جز در یک مورد روند افزایشی یا کاهشی مشابهی با نمودار شکل 4 دارد. در شکل 4 برای مدل 4 مشاهده کردیم که میانگین تنش‌های آن با اختلاف 106 مگاپاسکالی از میانگین تنش‌های مدل 2 کمتر است. درحالی‌که مطابق شکل 5 میزان پراکندگی تنش‌های مدل 4 با اختلاف 125/7 مگاپاسکالی از پراکندگی تنش‌های مدل 2 بیشتر است. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که از میان عوامل ساختاری بررسی شده یعنی رگ‌های طولی، رگ‌های طولی و عرضی و چین و چروک‌ها، رگ‌های طولی و عرضی بیش‌ترین تأثیر را در کاهش تنش‌ها و تغییرات آن‌ها در طول پرواز دارند. با این حال نمی‌توان سهم چین و چروک‌ها را نیز در کاهش عوامل فوق نادیده گرفت. آن چنانکه حضور چین و چروک‌ها و رگ‌های طولی و عرضی در کنار یکدیگر در مدل 6 میانگین تنش‌ها و تغییرات آن‌ها را نسبت به مدل 3 که فاقد چروکیدگی می‌باشد به ترتیب 210/5 مگاپاسکال و 108/33 مگاپاسکال کاهش داده است.

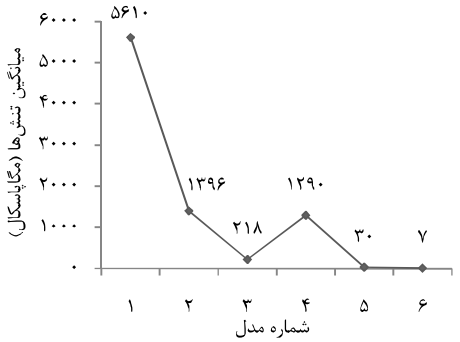
شکل 7 توزیع تنش‌ها و شکل 8 توزیع جابه‌جایی‌های ایجاد شده در هر یک از مدل‌ها را در زمان 0/1 سیکل نشان می‌دهد. به دلیل زیاد بودن تعداد شکل‌های مربوط به نتایج توزیع تنش و جابه‌جایی در سایر زمان‌ها و عدم امکان گنجانده شدن تمامی آن‌ها در این مقاله، تنها نتایج مربوط به زمان 0/1 سیکل در شکل‌های 7 و 8 آورده شده و نتایج مربوط به سایر زمان‌ها در متن توضیح داده می‌شود.

1- Spss
2- Fridman analysis
3- Sig

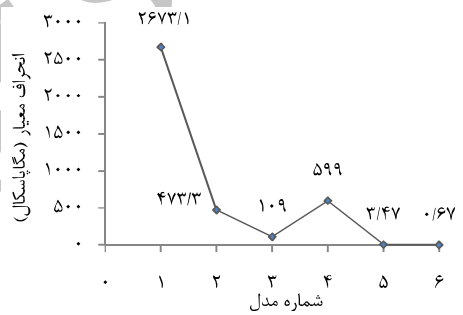
www.SID.ir
Archive of SID

جدول 2 محدوده تنش‌های وارد بر مدل‌های 1 تا 6 بر حسب مگا پاسکال در فواصل زمانی 0/1 سیکل

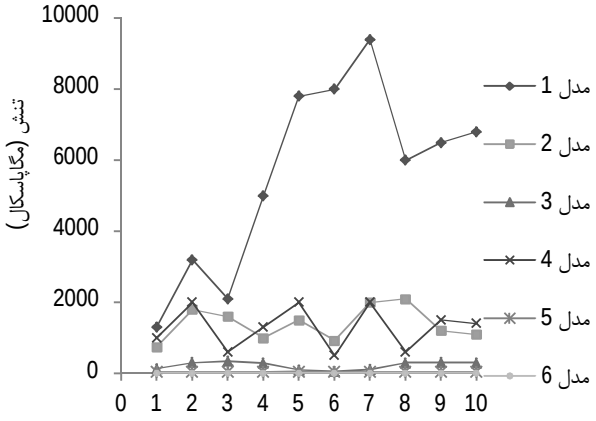
زمان	0/1	0/2	0/3	0/4	0/5	0/6	0/7	0/8	0/9	1
مدل 1	0-1300	0- 3200	0- 2100	0- 5000	0- 7800	0-8000	0-9400	0- 6000	0- 6500	0- 6800
مدل 2	0-740	0-1800	0-1600	0-1000	0-1500	0-920	0-2000	0-2100	0-1200	0- 1100
مدل 3	0-130	0-300	0- 340	0- 280	0-98	0- 50	0- 100	0-290	0- 300	0- 290
مدل 4	0-1000	0- 2000	0-600	0- 1300	0- 2000	0- 500	0- 2000	0-600	0- 1500	0- 1400
مدل 5	0- 33	0- 34	0- 30	0-28	0- 38	0- 29	0- 28	0- 28	0- 28	0- 28
مدل 6	0-7	0-9	0-7	0-8	0-7	0-7	0-7	0-7	0-7	0-7



شکل 4 مقادیر میانگین تنش‌های وارد شده بر هر یک از مدل‌ها در یک سیکل پرواز



شکل 5 مقادیر انحراف معیار هر یک از مدل‌های 1 تا 6



شکل 6 مقادیر تنش‌های مدل‌های 1 تا 6 در 10 زمان مختلف در طول یک سیکل پرواز

شکل 7- الف در زمان 0/1 سیکل برای مدل 1 نشان می‌دهد که بیش‌ترین مقدار تنش در قسمت میانی و قسمت نزدیک به پایه بال در ناحیه سخت پیشین یعنی در ناحیه 2 قرار دارد. در زمان 0/2 سیکل نواحی 1 و 2 و قسمت‌های مرزی نواحی 3 و 6 دارای بیش‌ترین مقدار تنش بوده و برای زمان‌های بعدی نیز می‌توان گفت بیش‌ترین تنش‌ها به نواحی مرزی بال اختصاص دارند.

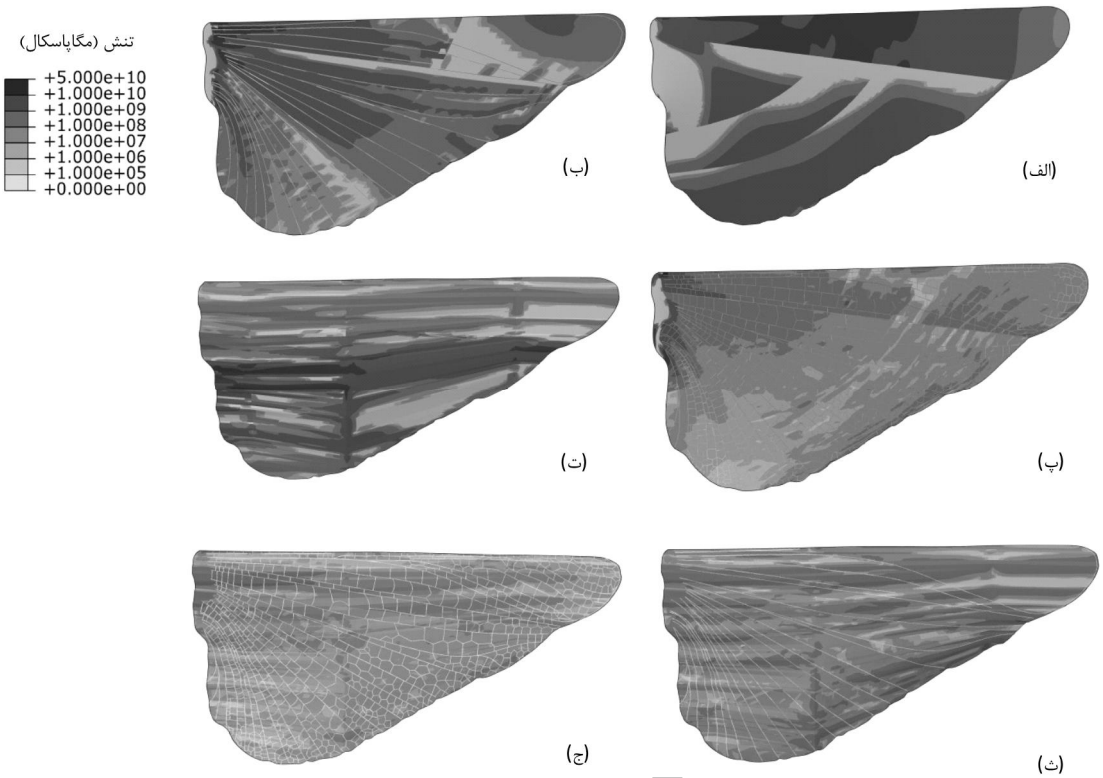
در شکل 7- ب برای مدل 2 توزیع تنش متفاوت با مدل 1 بوده و نسبت به مدل 1 یکنواخت تر است، همچنین بیش‌ترین مقدار تنش‌ها در طول یک سیکل پرواز به نواحی نزدیک به پایه بال تعلق دارد. در شکل 7- پ برای مدل 3 کانتور تنش متفاوت با دو حالت قبل بوده و علاوه بر رویداد بیشینه تنش‌ها در نواحی نزدیک به پایه بال در طول یک سیکل، رگ‌های موجود در بال در هر ناحیه نسبت به پوسته مجاور خود مقدار تنش بیشتری را تحمل می‌کنند. به عنوان مثال در زمان 0/1 سیکل مقدار تنش در مرزی‌ترین قسمت رگ جداکننده ناحیه سخت پیشین و ناحیه بادزن پسین برابر 76 مگاپاسکال بوده درحالی‌که مقدار تنش در پوسته بال در نزدیکی همین ناحیه 2/4 مگاپاسکال است. همچنین مقادیر تنش مدل 3 از مدل‌های 1 و 2 کمتر است. از مقایسه توزیع تنش‌ها در مدل 2 و 3 می‌توان دریافت که حضور رگ-های عرضی در لبه پایینی ناحیه بادزن پسین تنش‌های این ناحیه را نسبت به سایر نواحی بیشتر کاهش داده است. برای مدل 4 نیز در شکل 7- ت مشاهده می‌شود که بیش‌ترین مقدار تنش‌ها در طول یک سیکل، در ناحیه میانی بال یعنی در نزدیکی مرز ناحیه سخت پیشین و بادزن پسین و کمی پایین‌تر از آن قرار دارد. حضور چین‌وچروک‌ها در بال باعث افزایش سطح و افزایش ممان اینرسی و در نتیجه کاهش تنش‌های وارد بر بال می‌شوند. به همین دلیل تنش‌های وارد بر پوسته چروکیده در مدل 4 از تنش‌های وارد بر پوسته صاف در مدل 1 کمتر است. حضور رگ‌های طولی در بال چروکیده نیز علاوه بر کاهش تنش‌های وارد بر بال، باعث یکنواخت‌تر شدن این تنش‌ها شده است. این امر را می‌توان در توزیع تنش به دست آمده برای مدل 5 در شکل 7- ث مشاهده کرد.

بیشینه تنش‌ها در این مدل در تمام طول سیکل در بخش میانی نواحی 1 و 3 اتفاق می‌افتد. در کانتور تنش مدل 6 نیز در شکل 7- ج مشاهده شده است که بیش‌ترین مقدار تنش‌ها به نواحی نزدیک به پایه بال وارد شده و با پیشروی به سمت لبه‌های بال رفته‌رفته مقدار این تنش‌ها کاهش می‌یابد. حضور اجزای ساختاری در مدل 6 که نزدیک‌ترین مدل به بال واقعی است باعث کاهش چشمگیر تنش‌های وارد بر بال شده است. چین‌وچروک‌ها و رگ‌های طولی و عرضی باعث شده‌اند که میزان تنش‌های وارده به مدل 6 در نواحی نزدیک به لبه پایینی بال که ساختار ظریف‌تری نسبت به سایر نواحی دارد کاهش یابد، درحالی‌که در مدل 1 که این اجزای ساختاری در بال در نظر گرفته نشده مقادیر تنش در این ناحیه نه تنها کمینه نبوده بلکه در اکثر زمان‌ها نیز بیشینه است. لازم به ذکر است با توجه به شکل 8- الف، محل ایجاد بیش‌ترین جابه‌جایی برای مدل 1 در میانه لبه بادزن پسین قرار دارد. در زمان 0/3 سیکل بیشینه جابه‌جایی‌ها به لبه ناحیه سخت پیشین انتقال می‌یابد و تا آخر سیکل در این ناحیه باقی می‌ماند.

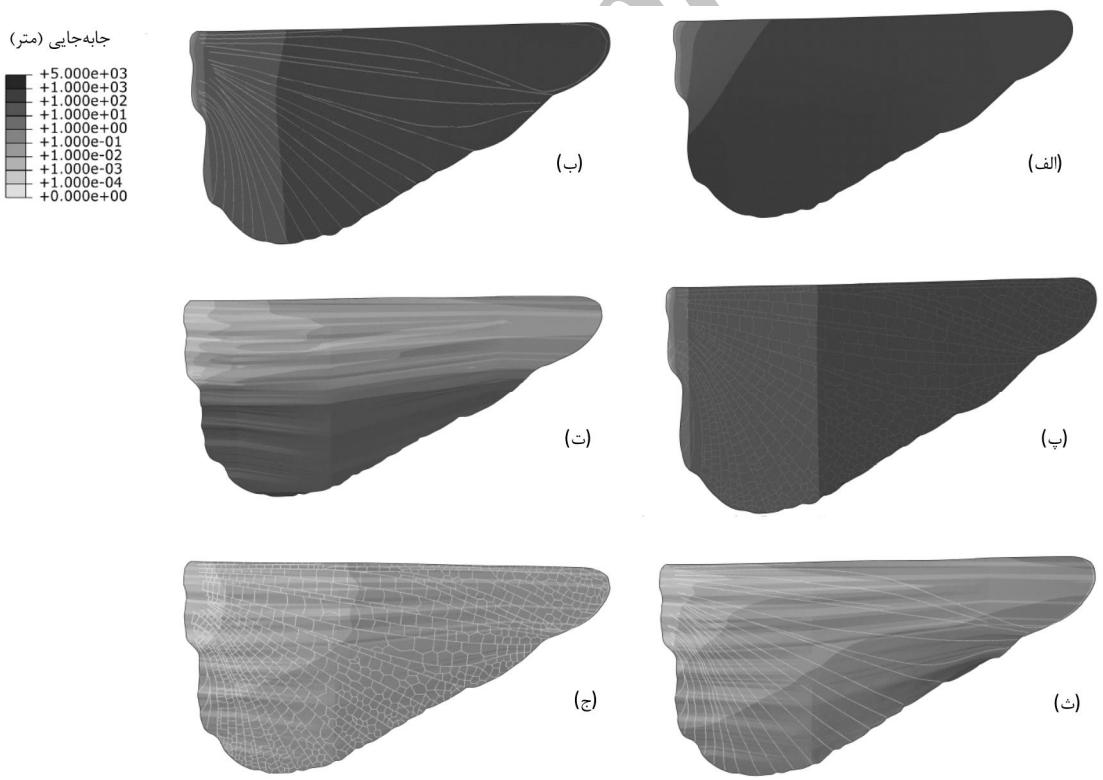
با توجه به شکل‌های 8- ب و پ برای مدل‌های 2 و 3 نیز بیش‌ترین جابه-جایی در لبه سمت راست ناحیه سخت پیشین قرار دارد. محل ایجاد بیشینه جابه‌جایی‌ها برای این دو مدل در طول یک سیکل در همین ناحیه باقی می‌ماند.

Archive of SID

www.SID.ir



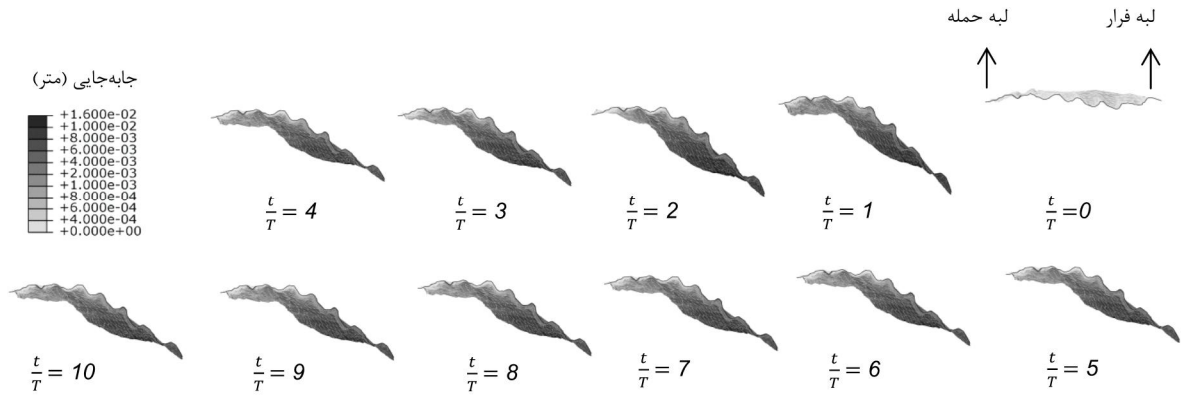
شکل 7 نمایش توزیع تنش ایجاد شده در مدل 1 تا 6 در زمان 0/1 سیکل، الف- مدل 1، ب- مدل 2، پ- مدل 3، ت- مدل 4، ث- مدل 5، ج- مدل 6.



شکل 8 نمایش جابه‌جایی‌های ایجاد شده در بال عقب ملخ بر اثر اعمال نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی با توزیع یکنواخت، الف- مدل 1، ب- مدل 2، پ- مدل 3، ت- مدل 4، ث- مدل 5، ج- مدل 6.

برای مدل 4 نمایش توزیع جابه‌جایی در بال در طول یک سیکل ثابت بوده و بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی آن همواره در لبه فرار و در دورترین فاصله عمودی از لبه حمله بال قرار دارد. توزیع جابه‌جایی مربوط به این مدل در زمان 0/1 سیکل در شکل 8- ت نشان داده شده است. در مدل 5 بیش‌ترین مقدار جابه‌جایی آن چنانکه در شکل 8-ث نشان داده شده است در لبه بال و در زیر مرز ناحیه سخت پیشین و بادزن پسین قرار دارد. در زمان 0/2 سیکل نیز علاوه بر جابه‌جایی یاد شده، لبه بالایی و سمت راست بال نسبت به نواحی مجاور در موقعیت پایین‌تری قرار می‌گیرد.

www.SID.ir



شکل 9 نمای جانبی مدل 6 در طول یک سیکل پرواز

برای مدل 6 در تمامی زمان‌ها در یک سیکل پرواز بیشینه جابه‌جایی در لبه ناحیه بادزن پسین قرار دارد و مقدار آن از 6/3 میلیمتر تا 9 میلیمتر متغیر است. توزیع جابه‌جایی مربوط به این مدل در زمان 0/1 سیکل در شکل 8- ج نشان داده شده است. شکل 9 نمای جانبی مدل 6 را در طول یک سیکل پرواز در 10 زمان مختلف نشان می‌دهد. ملخ در طول پرواز بال‌های خود را تا مرز برخورد به یکدیگر نزدیک کرده و سپس از هم دور می‌کند [19]. لذا دامنه بال‌زنی ملخ حین پرواز تقریباً از 90^0- تا 90^0+ است. مطابق شکل 9 تغییر شکل ایجاد شده در بال بر اثر اعمال نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی نمی‌تواند سبب ایجاد چنین جابه‌جایی‌هایی در بال شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت سهم نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی در تغییر شکل بال نسبت به نیروهای الاستیک ناچیز است. این نتیجه که به کمک روش المان محدود در این مقاله به دست آمده است نتایجی را که کمبس و دنیل [6] به کمک روش تجربی و رجبی و همکارانش [8] به کمک روش تحلیلی برای بال حشرات به دست آورده‌اند، تأیید می‌کند.

4- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا ساختار میکروسکوپی بال عقب ملخ صحرایی به کمک میکروسکوپ الکترونی مورد مطالعه قرار گرفت. سپس اندازه‌گیری‌های ابعادی جهت ایجاد مدل‌هایی از بال حشره انجام شد و تاثیر حضور رگ‌های طولی، رگ‌های طولی و عرضی و چین‌وچروک‌ها بر تنش‌های ایجاد شده در بال بر اثر اعمال نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی با توزیع یکنواخت به کمک روش المان محدود بررسی شد. عکس‌های میکروسکوپی گرفته شده سطح مقطعی غیر ثابت را برای رگ‌های طولی و سطح مقطعی ثابت را برای رگ‌های عرضی نشان داده‌اند. این تغییر و ثابت بودن مقطع‌ها در مدل‌سازی‌ها لحاظ شده‌اند. همان طور که قبلاً هم گفته شد سطح بیرونی رگ‌های طولی صاف و سطح بیرونی رگ‌های عرضی مانند لوله‌های خرطومی حباب‌حباب مانند هستند. حالت حبابی رگ‌های عرضی باعث افزایش انعطاف‌پذیری بال‌ها می‌شود. هنگامی‌که ملخ اقدام به جمع کردن ناحیه بادبزنی شکل بال می‌کند این ناحیه در امتداد رگ‌های عرضی دچار خمش می‌شود و ساختار رگ‌های عرضی حبابی شکل به این خم شوندگی کمک می‌کند.

نتایج حاصل از تحلیل‌های المان‌محدود نیز نشان داده است که حضور رگ‌های طولی، رگ‌های طولی و عرضی، چین‌وچروک‌ها، رگ‌های طولی و چین و چروک‌ها و در نهایت رگ‌های طولی و عرضی و چین‌وچروک‌ها به ترتیب تنش‌های میانگین وارد بر بال را در طول یک سیکل پرواز 4 ، 25/75، 4/34، 184/54 و 768/5 برابر کاهش می‌دهند. همچنین این نتیجه حاصل شده است که تأثیر حضور چین و چروک‌ها بر کاهش تنش‌ها از تأثیر رگ‌های طولی بیشتر و از تأثیر حضور رگ‌های طولی و عرضی کمتر است. حضور رگ‌ها و چین و چروک‌ها در بال هر دو عاملی برای افزایش سطح و ممان اینرسی بال هستند و به کاهش تنش‌های وارد شده به بال کمک می‌کنند.

از مقادیر انحراف معیار به دست آمده برای هر یک از مدل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که حضور اجزای ساختاری در بال علاوه بر کاهش مقدار تنش-ها، توزیع تنش‌های وارد شده به بال را نیز کنترل می‌کنند، به طوری که میزان پراکندگی تنش‌های مدل 1 که فاقد عوامل ساختاری بال است نسبت به مقدار میانگین از سایر مدل‌ها بیشتر و میزان پراکندگی تنش‌های مدل 6 که شامل تمام عوامل ساختاری می‌باشد از سایر مدل‌ها کمتر است. همچنین این نتیجه حاصل شده است که حضور رگ‌های طولی و عرضی باعث یکنواخت‌تر شدن تنش‌های ایجاد شده در بال می‌شوند.

جابه‌جایی‌های ایجاد شده در مدل‌ها نیز نشان دادند که حضور هر یک از عوامل ساختاری در بال باعث تغییر محل ایجاد بیشینه جابه‌جایی‌ها می‌شود. علاوه بر این با مطالعه جابه‌جایی‌های به دست آمده برای مدل 6 نتیجه گرفته شد که تأثیر نیروهای اینرسی و آیرودینامیکی در تغییر شکل بال نسبت به نیروهای الاستیک که از طریق ماهیچه‌های متصل به پایه بال به آن وارد می-شوند ناچیز است. این نتیجه نتایجی را که کمبس و دنیل و رجبی و همکارانش در رابطه با سهم نیروهای آیرودینامیکی و اینرسی در تغییر شکل بال به دست آورده‌اند تأیید می‌کند.

5- مراجع

[1] W. Fogh, Biology and physics on locust flight II, *Royal society,* PP. 459-510, 1956.

[2] M. Jensen, Biology and physics of locust flight III, Royal society, PP. 511-552, 1956.

[3] P. J. Wilkin, The instantaneus force on a desert locust. Schistocreca gregaria(Orthopetra: acrididae)Flying in a wind tunnel, *Journal Of The Kansas Entomological Society,* 1989.

[4] R. C. Herbert , P. G. Young, C. W. Smith, R. J. Wootton, K. E. Evans, The hind wing of the desert locust (schistocerca gregaria forskal)III, *The Journal of Experimental Biology,* Vol. 203, *PP. 2945-2955,* 2000.

[5] P. Tailie jin , N. S. Goo, H. CH., Finite element modeling of a beetle wing,. *jornal of bionic engineering* 7 suppl, S145-S149, 2010.

[6] S. A. Combes, T. L. Daniel, Into thin air: contributions of aerodynamic and inertial-elastic forces to wing bending in the hawkmoth Manduca sexta, *The Journal of Experimental Biology*. Vol. 206, PP. 2999-3006, 2003.

[7] D. Lentink, S. R. Jongerius, Structural Analysis of a Dragonfly Wing, *Experimental Mechanics,* pp. 1323–1334, 2010.

[8] H. rajabi, A. Rezaei, M. Darvizeh, A. Darvizeh, Free vibration analysis of Dragonfly wings with Finite Element Method, *International Journal of Multiphysics,* pp. 101–111, 2009.

[9] R. Herbert, R. J. Wootton, K.E. Evans, C.W. Smith, The hind wing of the desert locust (schistocerca gregariaforskal)II, *The Journal of Experimental Biology,* Vol. 203, pp. 2933–2943, 2000.

Archive of SID

www.SID.ir

[10] S. P. Sane, M. H. Dickinson, The aerodynamic effects of wing rotation and revised quasi-steady model of flapping flight, *The journal of experimental biology,* Vol. 205, pp. 1087-1096, 2002.

[11] M. Simon, Walker, L.R. Adrian, Thomas and Graham, K. Taylor, Deformable wing kinematics in the desert locust: How and why do camber, twist and topography vary through the stroke?, *journal of royal society,* pp. 735-747, 2008.

[12] A. Stacey, Combes, Materials, Structure, and Dynamics of Insect Wing as Bioonspiration for MAVs, *Department of Organismic and Evolutionary Biology,* 2010.

[13] H. Rajabi, M. Moghadami, A. Darvizeh, Investigation of Microstructure, Natural Frequencies and Vibration Modes of Dragonfly Wing, *, Journal of Bionic Engineering,* pp. 165–173, 2011.

[14] Y. Shibutani, H. Tanaka, Large deformability of 2D framed structures connected by flexible joints, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, pp. 1037–1048, 2008.

[15] R.C. Herbert, P.G.Young, K.E. Evans, R.J. Wootton, Approaches to structural modeling of insect wings*, Royal Society,* pp. 1577-1587, 2003.

[16] K. L. Page, T. Matheson, wing hair sensilla anderlying aimed hindleg scratching of the locust, *The Journal of Experimental Biology,* pp. 2691-2703, 2004.

[17] A. Darvizeh, S. Anami Rad, M. Darvizeh, R. Ansari, H. Rajabi, Investigation of microstructure and mechanical behavior of Woodlouse shells using experimental methods and numerical modeling, *Modares Mechanical Engineering*, 2014.

[18] H. Rajabi, & A. Darvizeh, Experimental investigations of the functional morphology of dragonfly wings. *Chinese Physics,* 2013.

[19] R. J. Wootton, K. E. Evans, R. Herbert and C. W. Smith, The hind wing of the desert locust (schistocerca gregariaforskal)I. Functional morphology and mode of operation, *The Journal of Experimental Biology,* PP. 2921–2931, 2000.

Archive of SID

www.SID.ir