Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 58(1) (2026) 89-112
DOI: 10.22060/mej.2026.25931.7982

Bio-inspired Artificial Flapping Wings: Structural Optimization Based on Dragonfly Wing Morphological Patterns

Ebrahim Bahramian[1], Majid Ali Tavoli[1 *], Ali Basti [1], Hamed Rajabi [2]

[1] Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.
[2] School of Engineering, London South Bank University (LSBU), London, UK.

ABSTRACT: Dragonfly wings provide a valuable biological model for studying how passive structural deformations may contribute to flapping-wing performance. This study presents a biomimetic design and optimization framework that integrates geometric morphometrics of natural dragonfly wings with parametric Finite Element Analysis. Using a database of 880 fore- and hindwings from four Odonata families, Elliptic Fourier Descriptors and Principal Component Analysis were utilized to characterize the variation in wing planform. A parametric wing model was developed in the Grasshopper environment, utilizing the Karamba3D solver to evaluate the influence of planform shape, longitudinal vein angles, basal triangular cell geometry, and pterostigma dimensions on structural deformation. Multi-objective optimization conducted via the Octopus evolutionary algorithm revealed a fundamental functional trade-off between bending and torsional compliance. The optimized wing configurations exhibit partial morphological correspondence with the hindwing of Tramea and the forewing of Potamarcha, which serve here as representative examples. While these similarities suggest that the selected geometric and structural variables capture key features of natural wings, they do not imply identical aerodynamic performance or direct evolutionary optimization. Furthermore, dynamic analysis revealed consistent relationships between static deformation trends and the first two vibration modes. This work provides a structurally interpretable basis for the future design and experimental assessment of bioinspired flapping-wing micro air vehicles.

Review History:

Received: May, 28, 2026
Revised: Jul. 10, 2026
Accepted: Aug. 04, 2026
Available Online: Aug. 07, 2026

Keywords:

Parametric Wing Design
Dragonfly Wing Morphology
Flapping Wing Micro Air Vehicles (FWMAVs)
Bio-Inspired Design
Multi-Objective Optimization

1- Introduction

Flapping-wing micro air vehicles (FWMAVs) have attracted considerable attention for their potential to achieve agile flight at small scales. Among flying insects, dragonflies are especially important as biological models because their exceptional maneuverability and hovering ability are closely linked to the structural organization of their wings and the resulting passive deformation during flight [1-3]. Unlike conventional engineered wings, dragonfly wings regulate bending and twisting through their inherent mechanical architecture and stiffness distribution [4].

Most previous studies have examined individual wing features separately, whereas actual dragonfly wings function as integrated structural systems. In response, the present study adopts a holistic approach by extracting dominant morphological patterns from four major dragonfly families, parameterizing them, and evaluating their structural effects using finite element analysis. The aim is to identify interactive geometric patterns that govern the balance between bending and twisting and to support the structural design of bioinspired FWMAV wings [5].

2- Methodology

The methodological contribution of this study lies in linking biological morphology to computational structural design through a hierarchical and data-driven framework. To ensure broad morphological coverage, 880 male forewings and hindwings from four Anisoptera families (*Aeshnidae*, *Corduliidae*, *Gomphidae*, and *Libellulidae*) were examined using high-quality dorsal images selected from museum-based and open-access repositories. Rather than treating the wing as a purely geometric outline, the method focused on the principal structural features expected to influence passive structural deformation under the prescribed loading conditions, namely the wing contour, major longitudinal veins, the triangular cell, and the pterostigma (Figure 1).

A key aspect of the approach was the separation of global and local morphology into parameterized components. Overall wing shape was quantified using Elliptic Fourier Descriptors (EFD) and reduced through Principal Component Analysis (PCA), providing a compact representation of interspecific variation while preserving dominant geometric trends. At the same time, vein orientations and the dimensions

*Corresponding author's email: tavoli@guilan.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

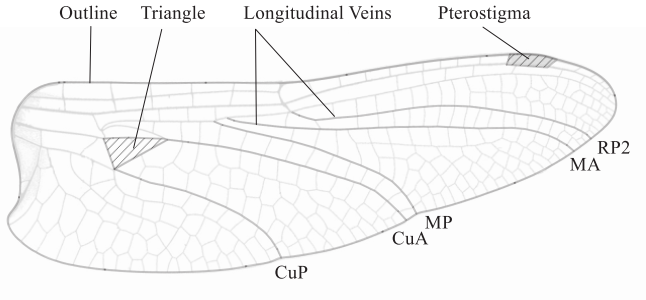


Fig. 1. Selected morphological components of the dragonfly hindwing.

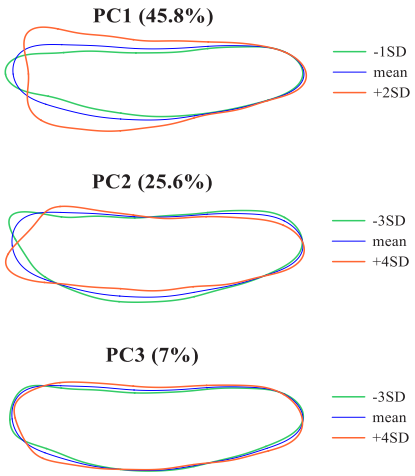


Fig. 2. Shape variation associated with the first three principal components, shown as deviations from the mean wing geometry along each mode. PC1 primarily captures expansion of the posterior wing region; PC2 represents displacement and elongation of the anal lobe accompanied by changes in trailing-edge curvature; and PC3 reflects local redistribution of curvature along the wing margins.

of the triangular element and pterostigma were explicitly parameterized to retain structurally meaningful internal features that are often overlooked in simplified bioinspired models.

These biologically grounded parameters were then embedded into a fully parametric finite element framework in Grasshopper/Karamba3D, enabling direct translation of morphological variation into structural response. The simplified structural model was compared with published reference cases for static deflection and modal response to ensure consistency with previously reported mechanical trends. By coupling this model with a two-stage multi-objective optimization procedure in Octopus, the study moved beyond descriptive morphology and identified design relationships among bending–twisting behavior, vibrational performance, and structural efficiency.

3- Discussion and Results

Principal component analysis demonstrated that the morphological diversity of dragonfly wings can be represented within a compact and structurally meaningful design space. The first three principal components explained 78.4% of the total variation, with the first two modes capturing the dominant planform changes observed across the sampled wings (Figure 2). These variations were mainly associated with posterior expansion of the wing area, displacement of the anal lobe, and changes in trailing-edge curvature and tip geometry. This result indicates that the wide range of biological wing forms can be reduced to a limited set of coordinated geometric transformations, providing a low-dimensional basis for engineering interpretation and bioinspired design.

The distribution of specimens within the reduced space was distinctly non-uniform. Forewings occupied a relatively compact region, suggesting a more conserved morphological organization, whereas hindwings exhibited broader dispersion across families. This contrast suggests that the two wing pairs may be subject to different structural and functional constraints, and that natural dragonfly wings occupy only a restricted portion of the theoretically admissible geometric space. Therefore, the reduced morphological domain should be interpreted not only as a statistical representation of biological variation, but also as a biologically observed design domain that may reflect coupled geometric, structural, and functional constraints.

The results further showed that dragonfly wings preserve stable global proportions while permitting systematic local variation. Overall wing geometry remained comparatively constrained, whereas regional modifications in shape and structural arrangement provided the flexibility necessary to tune mechanical behavior. In the first optimization stage, the primary design variables were varied to identify the dominant global trends in coupled bending and twisting response (Figure 3). The resulting Pareto-optimal solutions revealed a clear trade-off between bending and twisting performance, indicating that no single configuration can simultaneously maximize resistance to both deformation modes. Instead, they defined a continuum between stiffer wings with reduced deformation and more compliant wings with greater passive flexibility. The second-stage analysis then refined these responses using lower-sensitivity local variables, confirming their complementary role in tuning the bending–twisting balance This finding indicates that the structural response of the wing arises from coordinated interactions between global planform geometry and internal structural organization. The consistency observed between the static and modal trends further supports the mechanical relevance of the proposed framework and highlights its potential as a practical basis for the structural design of dragonfly-inspired flapping-wing micro air vehicles.

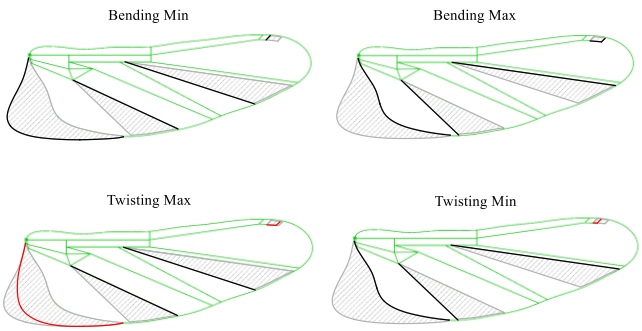


Fig. 3. First-stage optimization of coupled bending and twisting in the primary design space. Shaded areas show allowable parameter ranges, bold curves indicate limiting structural responses, black curves mark boundary extrema, and red curves show interior extrema. Optimized parameter distributions are shown relative to wing bending and twisting.

4- Conclusions

This study reduced dragonfly-wing morphological complexity to a low-dimensional, biologically grounded design space integrating planform variation and vein-network geometry. PCA revealed non-uniform morphological occupancy, with more conserved forewing patterns and more variable hindwing configurations, suggesting underlying geometric and functional constraints. Structural analyses showed that local cell geometry, vein orientation, and pterostigma-related geometric features influence passive stiffness and deformation. Multi-objective optimization identified a clear bending–twisting trade-off, governed by coordinated global and local geometric changes rather than isolated parameters. Static and modal responses exhibited consistent trends, linking deformation resistance to natural-frequency behavior. Despite simplified planar, homogeneous, linear-elastic representation, the framework provides interpretable structural design principles for bioinspired wings and motivates experimental and aeroelastic validation.

References

[1] S. Xiao, K. Hu, B. Huang, H. Deng, X. Ding, A review of research on the mechanical design of hoverable flapping wing micro-air vehicles, Journal of Bionic Engineering, 18(6) (2021) 1235–1254.

[2] R. Wootton, Dragonfly flight: morphology, performance and behaviour, International Journal of Odonatology, 23(1) (2020) 31–39.

[3] H. Rajabi, R.J. Wootton, Chapter 6 - Wings, in: B. Moussian (Ed.) Insect Anatomy, Academic Press, 2026, pp. 197–216.

[4] S.R. Jongerius, D. Lentink, Structural Analysis of a Dragonfly Wing, Experimental Mechanics, 50(9) (2010) 1323–1334.

[5] S.H. Eraghi, A. Toofani, R.J.A. Guilani, S. Ramezanpour, N.N. Bijma, A. Sedaghat, A. Yasamandaryaei, S. Gorb, H. Rajabi, Basal complex: a smart wing component for automatic shape morphing, Communications Biology, 6(1) (2023) 853.

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۸، شماره ۱، سال ۱۴۰۵، صفحات ۸۹ تا ۱۱۲
DOI: 10.22060/mej.2026.25931.7982

بال‌های بال‌زن مصنوعی الهام‌گرفته از طبیعت: بهینه‌سازی سازه‌ای بر اساس الگوهای مورفولوژیک بال سنجاقک

ابراهیم بهرامیان [۱]، مجید علی طاولی *[۱]، علی باستی [۱]، حامد رجبی [۲]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.
۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ساوت‌بنک لندن (UBSL)، لندن، انگلیس.

خلاصه: بال‌های سنجاقک از طریق یک سیستم متکی بر کنترل مکانیکی غیرفعال، به مانورپذیری و عملکرد آیرودینامیکی بالایی دست می‌یابند. این مطالعه با ادغام ریخت‌سنجی هندسی از بال سنجاقک و یک چارچوب بهینه‌سازی پارامتریک، الگوهای سازه‌ای مؤثر بر تغییرشکل بال را بررسی می‌کند. در این راستا، یک مدل پارامتریک از بال در محیط گرس‌هاپر توسعه یافت تا اثر الگوهای پلنفرم، شبکه‌بندی رگ‌بال‌های طولی، هندسه المان‌های مثلثی و تروستیگما بر مدهای تغییرشکل ارزیابی شود. با به‌کارگیری الگوریتم تکاملی چندهدفه اکتاپوس، موازنه‌های میان جرم، انرژی کرنشی و سختی سازه‌ای تحلیل گردید. نتایج نشان داد که پیکربندی‌های بهینه ناگزیر با یک تضاد عملکردی خمش–پیچش مواجه‌اند. تحلیل تطبیقی میان پیکربندی‌های بهینه‌شده و مورفولوژی بال سنجاقک گونه‌های Tramea و Potamarcha از خانواده Libellulidae روندهای عملکردی همسویی را نشان داد که بیانگر نقش کلیدی کارایی مکانیکی در تکامل ساختار داخلی بال است. افزون بر این، تحلیل دینامیکی نشان داد که علی‌رغم پیچیدگی ساختار بال، مدهای فرکانسی تناظر مستقیمی با پاسخ‌های استاتیکی دارند؛ به‌گونه‌ای که رفتار ارتعاشی بال به‌خوبی به تغییرات و اصلاحات اعمال‌شده در حالت استاتیک واکنش نشان می‌دهد. این پژوهش در نهایت یک الگوی طراحی ساده‌سازی‌شده و الهام‌گرفته از طبیعت برای توسعه ریزپرنده‌های بال‌زن ارائه می‌کند؛ دستاوردی که زمینه‌ساز ساخت نمونه‌های فیزیکی و آزمون‌های تجربی پرواز دینامیکی در پژوهش‌های آتی خواهد بود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷
بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۹
پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۱۳
ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۱۶

کلمات کلیدی:
طراحی پارامتریک بال
مورفولوژی بال سنجاقک
ریزپرنده‌های بال‌زن (FWMAVs)
طراحی الهام‌گرفته از طبیعت
بهینه‌سازی چندهدفه

۱- مقدمه

طراحی و توسعه ریزپرنده‌های بال‌زن[۱] با الهام از طبیعت، به عنوان یکی از چالش‌برانگیزترین حوزه‌های مهندسی هوافضا شناخته می‌شود[۱, ۲]. در میان حشرات پرنده، سنجاقک‌ها به دلیل توانایی‌های پروازی استثنایی از جمله مانورپذیری بالا، پرواز درجا و شتاب‌گیری سریع، به عنوان یکی از کامل‌ترین مدل‌های بیولوژیکی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند [۳–۵] مطالعات بنیادین نشان داده‌اند که این عملکرد پروازی بی‌نظیر، مستقیماً به ویژگی‌های ساختاری و تغییر شکل غیرفعال[۲] بال‌ها در طول سیکل آیرودینامیکی وابسته است [۶]. بر خلاف بالگردهای سنتی، بال حشرات دارای مفصل‌های فعال در طول دهانه بال نیست؛ بلکه این ساختار مکانیکی و توزیع سختی بال است که میزان خمش و پیچش را در پاسخ به نیروهای آیرودینامیکی و اینرسی تنظیم می‌کند [۶, ۷].

مرور ادبیات نشان می‌دهد که پژوهش‌های متعددی برای درک مکانیزم‌های سازه‌ای بال سنجاقک انجام شده است [۸]. کامبز و دانیل [۹] با بررسی سختی خمشی بال حشرات نشان دادند که الگوی رگ‌بال‌ها[۳] نقش حیاتی در ایجاد یک گرادیان سختی از ریشه تا نوک بال ایفا می‌کند. این گرادیان سختی، مبنای تغییر شکل غیرفعال بال در طول پرواز است. در تکمیل این یافته‌ها، مطالعات اخیر اثبات کرده‌اند که طبیعت این تغییر شکلِ کنترل‌شده را از طریق استراتژی‌های تکاملی پیشرفته‌تری نظیر توزیع سختی چندگانه[۴] و تعبیه‌ی ریزساختارهای پیچیده در رگ‌بال‌ها مدیریت می‌کند؛ مکانیسم‌هایی که به طور همزمان تحمل بارهای متغیر آیرودینامیکی، مقاومت در برابر خستگی و دوام ساختاری بال را تضمین می‌کنند[۱۰–۱۲].

1. FlappingWing Micro Air Vehicles (FWMAVs)
2. Passive deformation
3. Venation
4. Triple stiffness

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: tavoli@guilan.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

همچنین، مطالعات کِسِل [۱۳] بر روی ساختار چین‌خورده[1] بال سنجاقک اثبات کرد که این هندسه سه‌بعدی علاوه بر افزایش مقاومت در برابر خمش، عملکرد آیرودینامیکی را در زوایای حمله بالا بهبود می‌بخشد. در کنار این موارد، نقش المان‌های جرمی نظیر تروستیگما[2] نیز در کنترل پدیده فلاتر[3] و تنظیم مرکز جرم بال به صورت گسترده مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۴].

با وجود این پیشرفت‌ها، عمده مطالعات پیشین به بررسی اثرات مجزا و مستقل متغیرهای مورفولوژیکی[4] پرداخته‌اند. به عنوان مثال، چن و همکاران [۱۵] تأثیر پارامترهای مورفولوژیکی و اینرسی بال را به صورت مستقل بر عملکرد پروازی بال‌زن‌ها ارزیابی کردند و ووتون و همکاران [۱۶] مکانیزم‌های مجزای تغییر شکل بال را مدل‌سازی نمودند. با این حال، بال حشرات در واقعیت یک سیستم کاملاً یکپارچه و درهم‌تنیده است که به عنوان ایرفویل‌های هوشمند و پویا عمل می‌کنند که ویژگی‌های ریزساختاری و ماکروساختاری آن‌ها به‌طور هم‌افزا هدایت تغییرشکل‌های کنترل‌شده و پیچش‌های غیرفعال را در حین پرواز بر عهده دارند [۱۷]. شکاف پژوهشی موجود، پایبندی به رویکرد تقلیلی در این مطالعات است. این رویکرد به دلیل بررسی مستقل پارامترها، از درک تعاملات آنها و اثرات متقابل میان اجزای داخلی بال بازمانده و نمی‌تواند تصویر کاملی از طراحی بهینه سازه‌ای ارائه دهد.

از منظر تکاملی نیز طبیعت هرگز المان‌های مجزا را به‌صورت جداگانه بهینه نکرده است، بلکه به تعادلی ساختاری میان الزامات متضاد دست یافته است. برای مثال، افزایش بیش از حد سختی برای تحمل بارهای خمشی می‌تواند مانع از پیچش آیرودینامیکی مناسب شود؛ بنابراین هندسه کلی بال، شبکه رگ‌بال‌ها، غشا، ترکیب لایه‌های مختلف و توزیع جرم باید به صورت یک کل هم‌افزا عمل کنند تا بال در رژیم‌های مختلف پروازی عملکرد مطلوب داشته باشد [۱۸]. مطالعات اخیر نیز این واقعیت را تقویت می‌کنند، تحلیل بیومکانیک پیچیده بال سنجاقک نشان می‌دهد که اجزای مختلف بال مانند رگ‌بندی و غشا نه به‌صورت منفرد، بلکه در قالب یک شبکه‌ی ساختاری چندمقیاسی عمل می‌کنند و خواص برجسته را پدید می‌آورند [۱۹]. همچنین، پژوهش‌های انجام‌شده بر مجتمع پایه‌ای بال در راسته‌ی سنجاقک ها نشان می‌دهد که این ساختار سه‌بعدی، از طریق تعامل هماهنگ رگ‌بال‌ها، مفاصل رزیلینی و الگوهای ضخامت، نقش کلیدی در شکل‌پذیری خودکار و کنترل تغییر شکل بال دارد؛ ویژگی‌ای که برای توسعه بال‌های مصنوعی الهام‌گرفته از حشرات بسیار حیاتی است [۲۰].

بر همین اساس، هدف پژوهش حاضر عبور از مرز مطالعات تک‌متغیره و بررسی یکپارچه الگوهای هندسی بال سنجاقک است. نوآوری اصلی این مدل، توانایی آن در شناسایی الگوهای هندسی تعاملی ناشی از برهم‌کنش چند متغیر طراحی است. این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه المان‌های ساختاری بال، تعادل میان خمش و پیچش را شکل می‌دهند. با استخراج الگوهای مورفولوژیکی غالب از یک پایگاه داده آماری از بال سنجاقک متعلق به چهار خانواده اصلی، پارامترسازی آن‌ها و بررسی اثر پارامترها از طریق تحلیل المان محدود، این پژوهش رویکردی برای بهینه‌سازی ساختاری بال‌های ریزپرنده‌های بال‌زن ارائه می‌دهد که به‌جای تمرکز بر یک ویژگی خاص، بر تعادل عملکردی کل سیستم و تعامل متغیرهای طراحی استوار است.

۲- روش تحقیق

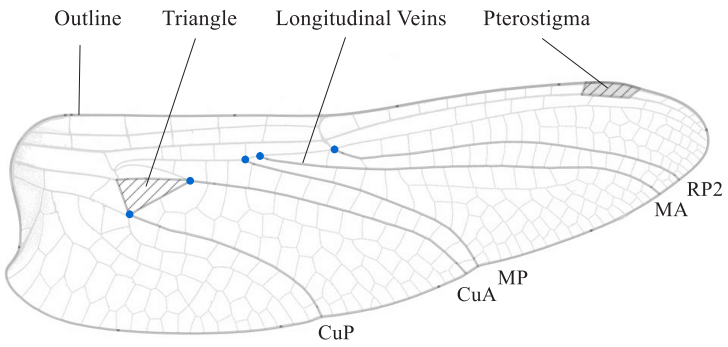
۲- ۱- پارامتره کردن هندسه

در این پژوهش، مجموعاً ۸۸۰ بال جلویی و عقبی سنجاقک‌های نر از زیرراسته Anisoptera متعلق به چهار خانواده *Aeshnidae* (۱۵۴ نمونه)، *Corduliidae* (۷۸ نمونه)، *Gomphidae* (۲۹۴ نمونه) و *Libellulidae* (۳۵۴ نمونه) مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور حذف خطای ناشی از دودیسی جنسی، تنها نمونه‌های نر در تحلیل‌ها لحاظ شدند. تصاویر دیجیتال باکیفیت از پرتال داده‌های موزه تاریخ طبیعی لندن[5] و مخازن دسترسی آزاد نظیر ویکی پدیا[6] گردآوری شد. استفاده از مجموعه‌های دیجیتال موزه‌ای در سال‌های اخیر به‌عنوان رویکردی معتبر در مطالعات مورفولوژیکی و تنوع زیستی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۱, ۲۲]. برای اطمینان از دقت ریخت‌سنجی، تنها تصاویری با وضوح بالا، نمای پشتی با حداقل اعوجاج پرسپکتیو، و دارای رگ‌بندی کامل و فاقد آسیب‌دیدگی انتخاب شدند.

به‌منظور ارزیابی مکانیزم‌های ساختاری مؤثر در تغییرشکل غیرفعال بال حین پرواز، مکانیزم‌های کلیدی به‌صورت دوبعدی استخراج و در قالب پارامترهای ریخت‌سنجیِ کمّی، پارامترسازی شدند. با توجه به پیچیدگی شبکه رگ‌بندی، المان‌هایی برای تحلیل انتخاب شدند که علاوه بر قابلیت استخراج دقیق از تصاویر دوبعدی، دارای اهمیت بالای سازه‌ای و آیرودینامیکی باشند.

1. Corrugated structure
2. Pterostigma
3. Flutter
4. Morphologic

5. Natural History Museum Data Portal ;https//:data.nhm.ac.uk
6. Wikimedia Commons



شکل ۱. نمای شماتیک اجزای مورفولوژیک منتخب در بال عقبی سنجاقک. اجزای مشخص‌شده شامل شکل کلی بال، رگبال‌های طولی اصلی، سلول مثلثی و تروستیگما هستند. این عناصر از مهم‌ترین ساختارهای دوبعدی بال سنجاقک به شمار می‌روند. نقاط آبی مکان آغاز رگبال‌های اصلی مورد نظر را نشان می‌دهند، RP2 (2 Radius posterior branch)، CuA (Cubitus anterior)، MP (Media posterior)، MA (Media anterior)، CuP (Cubitus posterior).

Fig. 1. Schematic representation of selected morphological components in a dragonfly hindwing. The highlighted components include the overall wing shape, the main longitudinal veins, the triangle cell, and the pterostigma. These elements are among the most important two-dimensional structural features of the dragonfly wing. The blue points indicate the origins of the selected main longitudinal veins: RP2 (Radius posterior branch 2), MA (Media anterior), MP (Media posterior), CuA (Cubitus anterior), and CuP (Cubitus posterior).

بر این اساس، مرز خارجی بال[1]، عنصر تروستیگما[2]، رگه‌بال‌های طولی اصلی[3] و المان مثلثی[4] به‌عنوان ویژگی‌های کلیدی انتخاب گردیدند (شکل ۱). در نهایت، توزیع و تغییرات این پارامترها در مقیاس خانواده‌ها و زیرراسته مقایسه شد تا الگوهای ساختاری مشترک و متمایز شناسایی شوند.

۲- ۱- ۱- مرز خارجی بال

برای توصیف کمی شکل مرز خارجی بال‌های سنجاقک از روش توصیفگرهای فوریه بیضوی[5] استفاده شد. این روش یکی از رویکردهای استاندارد در ریخت‌سنجی هندسی برای نمایش ریاضی کانتورهای بسته و مقایسه کمی شکل‌ها است [۲۳-۲۵]. در این چارچوب، مرز خارجی هر بال به‌صورت یک منحنی بسته شامل مجموعه‌ای از نقاط مرزی مرتب در امتداد کانتور در نظر گرفته شد. در این مطالعه، مختصات مرکز پیکسل‌های واقع بر لبه‌ی تصویر استخراج و به صورت دنباله‌ای از نقاط مرزی مرتب در امتداد کانتور ثبت شد. اگر t_p طول تجمعی مسیر کانتور از نقطه آغاز تا نقطه p-ام و T محیط کل کانتور باشد، خواهیم داشت:

$$t_p = \sum_{i=1}^{p} \Delta t_i \quad , \quad T = t_K \qquad (۱)$$

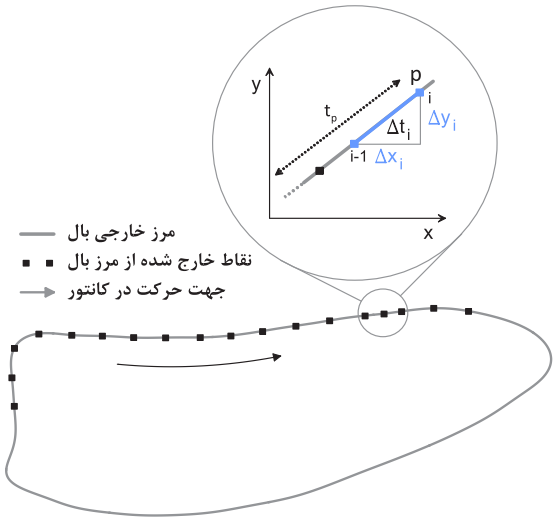
که در آن Δt_i فاصله‌ی اقلیدسی بین نقاط متوالی و K تعداد کل نقاط نمونه‌برداری‌شده از کانتور است. همچنین مختصات نقاط کانتور از روابط زیر به‌دست می‌آید:

$$x_p = \sum_{i=1}^{p} \Delta x_i \quad , \quad y_p = \sum_{i=1}^{p} \Delta y_i \qquad (۲)$$

که در آن Δx_i و Δy_i به‌ترتیب تغییرات مختصاتی بین نقاط $(i-۱)$-ام تا نقطه‌ی i-ام در راستاهای افقی و عمودی هستند، (شکل ۲).

با استخراج این مختصات مرزی و با فرض طول کل کانتور برابر T، هندسه کانتور را می‌توان با بسط فوریه بیضوی تا هارمونیک N به‌صورت روابط (۳) تقریب زد.

1. Outline
2. Pterostigma
3. Longitudinal veins
4. Triangle
5. Elliptic Fourier Descriptors (EFDs)



شکل ۲. استخراج مختصات کانتور برای تحلیل فوریه بیضوی بال سنجاقک. کانتور بسته بال (خط پیوسته) به‌صورت مجموعه‌ای از نقاط مرزی مرتب نمونه‌برداری می‌شود (مربع‌های سیاه) و در یک جهت مشخص پیمایش می‌گردد (فلش). برای هر نقطه متوالی، جابه‌جایی‌های افزایشی Δx_i و Δy_i و طول مسیر تجمعی t_p در امتداد کانتور محاسبه می‌شود. نمای بزرگ‌نمایی‌شده پارامترهای هندسی مرتبط با یک نقطه نمونه‌برداری‌شده p را نشان می‌دهد. این مختصات متوالی به‌عنوان داده ورودی برای محاسبه توصیفگرهای فوریه بیضوی استفاده می‌شوند.

Fig. 2. Extraction of contour coordinates for Elliptic Fourier Analysis of a dragonfly wing. The closed wing contour (solid line) is sampled as an ordered set of boundary points (black squares) traversed in a specified direction (arrow). For each consecutive point, incremental displacements Δx_i and Δy_i , along with the cumulative path length tp along the contour, are computed. The inset provides a magnified view of the geometric parameters associated with a sampled point p. These sequential coordinates serve as the input data for calculating the Elliptic Fourier Descriptors.

$$x_p^N = A_0 + \sum_{n=1}^{N}\left(a_n \cos\frac{2n\pi t_p}{T} + b_n \sin\frac{2n\pi t_p}{T}\right)$$
$$y_p^N = C_0 + \sum_{n=1}^{N}\left(c_n \cos\frac{2n\pi t_p}{T} + d_n \sin\frac{2n\pi t_p}{T}\right) \quad (۳)$$

که در آن a_n, b_n, c_n, d_n ضرایب فوریه متناظر با هارمونیک n هستند. با فرض درون‌یابی خطی بین نقاط متوالی کانتور، این ضرایب از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$a_n = \frac{T}{2n^2\pi^2}\sum_{p=1}^{K}\frac{\Delta x_p}{\Delta t_p}\left(\cos\frac{2n\pi t_p}{T} - \cos\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right)$$
$$b_n = \frac{T}{2n^2\pi^2}\sum_{p=1}^{K}\frac{\Delta x_p}{\Delta t_p}\left(\sin\frac{2n\pi t_p}{T} - \sin\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right) \quad (۴)$$

$$c_n = \frac{T}{2n^2\pi^2}\sum_{p=1}^{K}\frac{\Delta y_p}{\Delta t_p}\left(\cos\frac{2n\pi t_p}{T} - \cos\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right)$$
$$d_n = \frac{T}{2n^2\pi^2}\sum_{p=1}^{K}\frac{\Delta y_p}{\Delta t_p}\left(\sin\frac{2n\pi t_p}{T} - \sin\frac{2n\pi t_{p-1}}{T}\right)$$

این ضرایب نمایش فشرده‌ای از هندسه کانتور فراهم می‌کنند و امکان بازسازی دقیق شکل بال با استفاده از تعداد محدودی هارمونیک را فراهم می‌سازند[۲۳–۲۵].

۲– ۱– ۲– نرمال‌سازی ضرایب فوریه

از آنجا که ضرایب اولیه توصیفگرهای فوریه بیضوی به انتقال مکانی، مقیاس، جهت‌گیری و نقطه شروع پیمایش کانتور وابسته هستند، ضرایب مطابق روش استاندارد تحلیل فوریه بیضوی نرمال‌سازی شدند تا اثر این عوامل حذف شود [۲۳–۲۵]. ابتدا ضرایب ثابت A_0 و C_0 برای حذف اثر

انتقال مکانی کنار گذاشته شدند. سپس مقیاس شکل با استفاده از اندازه بیضی هارمونیک اول نرمال گردید و جهت‌گیری شکل با هم‌راستاسازی محور اصلی این بیضی تصحیح شد. در نهایت، وابستگی به نقطه شروع کانتور با تنظیم فاز حذف شد. پس از این نرمال‌سازی‌ها، سه ضریب مربوط به هارمونیک اول مقدار ثابتی می‌یابند و از تحلیل آماری حذف می‌شوند. بنابراین اگر شکل با N هارمونیک توصیف شود، تعداد متغیرهای مستقل مورد استفاده در تحلیل برابر است با:

$$p = 4N - 3 \qquad (۵)$$

۲- ۱- ۳- تحلیل مؤلفه‌های اصلی

برای استخراج الگوهای غالب تغییرپذیری مورفولوژیک در شکل بال‌ها، تحلیل مؤلفه‌های اصلی[1] بر روی ضرایب نرمال‌شده توصیفگرهای فوریه بیضوی انجام شد [۲۶, ۲۷]. در این تحلیل، ضرایب فوریه‌ی بیضوی نرمال‌شده به‌عنوان نمایش عددی کانتور هر بال به تحلیل مؤلفه‌های اصلی وارد شدند تا ساختار پربعد داده‌های شکلی به چند مؤلفه‌ی اصلی با بیشترین توان تبیین واریانس کاهش یابد. هر مؤلفه‌ی اصلی یک ترکیب خطی از ضرایب اولیه است و نمره‌ی هر نمونه روی این مؤلفه‌ها، مختصات آن نمونه را در فضای کم‌بُعدشده‌ی تحلیل مؤلفه‌های اصلی مشخص می‌کند. بردارهای ویژه محورهای مؤلفه‌ها را تعیین کرده و مقادیر ویژه بیانگر میزان واریانس توضیح‌داده‌شده توسط هر مؤلفه هستند. با نگاشت معکوس این مختصات به فضای اصلی ضرایب توصیفگرهای فوریه بیضوی ، امکان بازسازی کانتور بال فراهم می‌شود. از این‌رو، با اعمال تغییرات ۱± و ۲± برابر انحراف معیار در امتداد هر مؤلفه و ثابت نگه‌داشتن سایر مؤلفه‌ها، می‌توان اثر مستقل هر مؤلفه را بر الگوی تغییرات مورفولوژیک بال مشاهده و تفسیر کرد .ضمنا به‌منظور حفظ مؤلفه‌های معنادار، تعداد مؤلفه‌های نگه‌داشته‌شده بر اساس معیار اسکری[2] و بررسی واریانس تجمعی تعیین شد. تمامی مراحل استخراج کانتور، محاسبه ضرایب فوریه، نرمال‌سازی و تحلیل‌های آماری با استفاده از کدهای توسعه‌یافته در محیط متلب انجام شد. در ادامه، مؤلفه‌های اصلی اول، دوم و سوم به‌ترتیب با PC۱، PC۲ و PC۳ نشان داده شده‌اند.

۲- ۱- ۴- رگ‌بال‌های طولی اصلی- المان مثلثی - تروستیگما

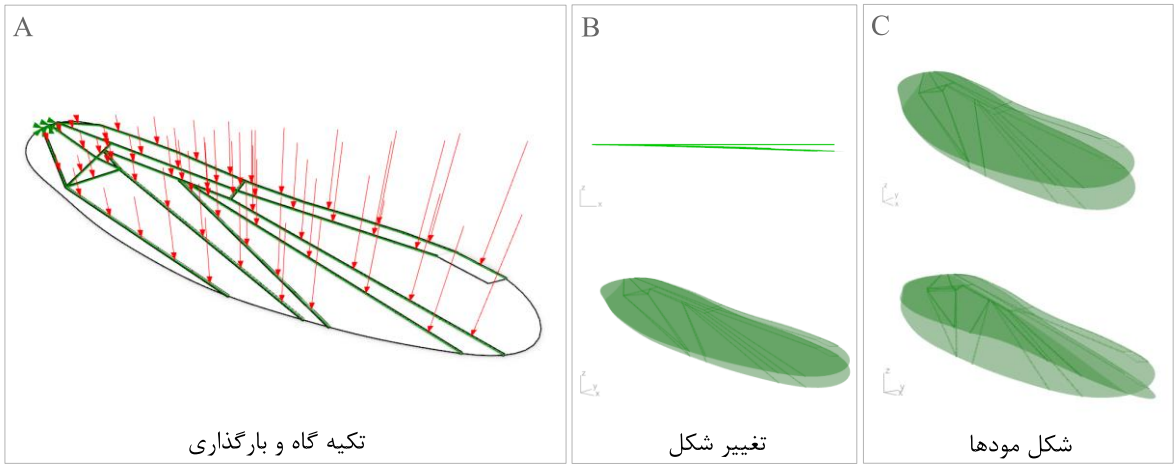
برای استخراج ویژگی‌های ساختاری داخلی بال، سه جزء کلیدی شامل رگ‌بال‌های طولی، المان مثلثی و تروستیگما در تصاویر تراز شده پارامتردهی شدند. ابتدا پنج رگ‌بال طولی اصلی(CuP، CuA، MP، MA و RP۲)- (شکل ۱)، که اسکلت سازه‌ای بال را تشکیل می‌دهند [۲۸]، به ترتیب با نام‌های V۱ تا V۵ مشخص شده (شکل ۷) و جهت‌گیری آن‌ها بر اساس زاویه خط واصل ابتدا و انتهای رگ‌بال نسبت به محور افقی اندازه‌گیری شد. سپس مرز المان مثلثی (رابط انتقال تنش در قاعده بال [۲۹]) استخراج و هندسه آن بر اساس سه رأس اصلی با چهار پارامتر مستقل شامل دو طول ضلع (Tri_L1, Tri_L2) و دو زاویه (Tri_Theta1, Tri_Theta2) توصیف گردید (شکل ۸) تا تأثیر پیکربندی آن بر رفتار مکانیکی بال قابل تحلیل باشد. در نهایت، تروستیگما (جرم موضعی کنترل‌کننده ارتعاش در لبه پیشانی[3]) به‌صورت یک متوازی‌الاضلاع معادل مدل‌سازی شد و چهار پارامتر هندسی آن شامل طول(LS)، عرض یا ضخامت (WS)، فاصله تا رأس بال(BD) و فاصله تا نودس[4] (ND) اندازه‌گیری گردیدند تا نقش این ساختارها در رفتار دینامیکی و مکانیکی بال میان گونه‌های مختلف به‌صورت کمی ارزیابی شود (شکل ۹).

۲- ۲- مدل‌سازی

مدل المان محدود بال در محیط پارامتریک نرم‌افزار گرس‌هاپر[5] و با استفاده از افزونه حلگر کارامبا[6] توسعه یافت. در این مدل، رگ‌بال‌ها به صورت المان‌های تیر سه‌بعدی (با ۶ درجه آزادی در هر گره) و ممبران بال و ناحیه تروستیگما به صورت المان‌های پوسته‌ای مدل‌سازی شدند. المان‌های پوسته به‌گونه‌ای است که هر دو رفتار درون‌صفحه‌ای (غشایی) و خارج‌ازصفحه‌ای (خمشی) را پوشش دهند. برای گسسته‌سازی سطح ممبران از مش مثلثی با اندازه مشخصه ۰/۵ mm، بر اساس آزمون استقلال از مش، استفاده شد. به‌منظور تأمین پیوستگی سازه‌ای و انتقال صحیح نیرو، گره‌های المان‌های تیر و پوسته کاملاً منطبق و مشترک در نظر گرفته شدند.

رفتار ماده به‌صورت الاستیک خطی و همگن فرض شد و خواص مکانیکی شامل مدول یانگ رگ‌بال‌ها ($E = ۶$ GPa)، مدول یانگ ممبران ($E = ۳/۷۵$ GPa)، ضریب پواسون ($\nu = ۰/۴۹$) و چگالی ($\rho = ۱۲۰۰$ kg/m^۳) از مرجع [۶] استخراج گردید. مطابق شکل ۳-A ، ریشه بال کاملاً گیردار (تثبیت تمامی درجات آزادی انتقالی و دورانی) فرض شد و تحلیل از نوع استاتیکی خطی انجام گرفت.

1. Principal Component Analysis (PCA)
2. Scree criterion
3. Leading edge
4. Nodus
5. Grasshopper
6. Karamba3D



شکل ۳. (A) نمایش شماتیک شرایط مرزی و بارگذاری مدل المان محدود. ریشه بال به‌صورت کاملاً مقید مدل شده است (فلش‌های سبز)، و بار اینرسی به‌صورت بارهای متمرکز با توزیع خطی از ریشه تا نوک بال بر روی تمامی رگبال‌های طولی اعمال شده است (فلش‌های قرمز). (B) تغییرشکل بال تحت بارگذاری، در نماهای جانبی و سه‌بعدی. (C) شکل مود های فرکانسی اول (خمشی) و دوم (پیچشی) بال.

Fig. 3. (A) Schematic representation of the boundary conditions and loading configuration of the finite-element model. The wing root was modeled as fully constrained (green arrows), and the inertial load was applied as concentrated forces with a linear distribution from the root to the wing tip along all longitudinal veins (red arrows). (B) Wing deformation under the applied loading, shown in lateral and three-dimensional views. (C) First and second natural mode shapes of the wing, corresponding to bending and torsion, respectively.

۲- ۲- ۱- اعتبارسنجی مدل

دقت مدل عددی حاضر در دو بخش استاتیکی و دینامیکی ارزیابی شد. در تحلیل استاتیکی، نتایج با داده‌های مرجع [۶] که هندسه بال جلویی سنجاقک را با دقت بالا (شامل توزیع متغیر ضخامت و شیارهای عرضی[1]) بر پایه تصویربرداری میکرو سی‌تی[2] بازسازی کرده است، مقایسه شد. بر این اساس ، بار اینرسی در حین بال‌زدن حدود سه برابر بار آیرودینامیکی بوده و عامل اصلی بیشترین تغییرشکل سازه‌ای است. در این راستا، بار اینرسی معادل به‌صورت بارهای متمرکز با توزیع خطی از ریشه تا نوک بال بر تمامی رگ‌بال‌های طولی اصلی اعمال شد؛ به‌طوری‌که بیشینه این بار در نوک بال برابر با $۰/۹۵\times۱۰^{-۶}$ N تنظیم گردید (شکل ۳-A). بیشینه جابجایی نوک بال (شکل ۳-B) در مدل حاضر ۱/۹ mm به‌دست آمد که در مقایسه با مقدار گزارش‌شده در مطالعه مرجع (۱/۵ mm)، حدود ۲۶٪ اختلاف دارد. این اختلاف ناشی از ساده‌سازی‌های هندسی در مدل حاضر از جمله مدل‌سازی مسطح، حذف شیارهای عرضی و فرض ضخامت یکنواخت ۱۹ µm برای رگ‌بال‌های اصلی (در برابر تغییرات ۷۵–۱۵۰ µm در لبه پیشانی مدل مرجع)، فرض ضخامت یکنواخت ۵ µm برای ممبران (در برابر بازه ۲۵– ۳/۶ µm در مرجع)است. از منظر مکانیکی و با توجه به تناسب سختی خمشی با توان سوم ضخامت ($EI \propto t^{۳}$)، این یکنواخت‌سازی و حذف شیارها طبیعتاً به کاهش سختی مؤثر و افزایش تغییرشکل می‌انجامد. در ارزیابی دینامیکی، شکل مودهای ارتعاشی اول (خمشی) و دوم (پیچشی) استخراج شد که تطابق کیفی مناسبی با الگوهای مرجع [۶] نشان می‌دهد (شکل ۳-C). با این حال، ارزیابی کمی فرکانس‌ها با مدل صفحه‌ایِ ساده‌شده در مرجع [۳۰] انجام گرفت که از نظر فرضیات به مدل حاضر نزدیک‌تر است. فرکانس طبیعی اول (۱۱/۲ Hz) تطابق بالایی با مقدار مرجع [۳۰] (۱۰/۹ Hz) دارد که صحت توزیع کلی جرم و سختی را تأیید می‌کند. اختلاف در فرکانس دوم (۲۲/۹ Hz در برابر ۵۹ Hz در مرجع) نیز از ماهیت مودهای مرتبه‌بالاتر نشأت می‌گیرد که حساسیت بسیار بیشتری به ساده‌سازی‌های موضعی هندسه نشان می‌دهند. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که مدل پارامتریک حاضر، علی‌رغم ساده‌سازی‌های هندسی، فیزیک غالب سازه را به‌درستی بازتولید کرده و تعادل مطلوبی میان دقت و هزینه محاسباتی برای

1. Corrugations
2. micro-CT

جدول ۱. تنظیمات افزونه Octopus برای بهینه‌سازی چندهدفه.

Table 1. Octopus plugin settings for multi-objective optimization.

پارامتر عملیاتی	مقدار تنظیم شده
الگوریتم اصلی	HypE* Reduction / Mutation
اندازه جمعیت	۱۰۰
نرخ ترکیب	۰/۸
نرخ جهش	۰/۹
میزان بقای برترین‌ها	۰/۵

*** Hypervolume Estimation**

اهداف بهینه‌سازی فراهم می‌آورد.

۲- ۳- بهینه‌سازی

۲- ۳- ۱- تحلیل حساسیت و انتخاب متغیرها

به‌منظور شناسایی پارامترهای مؤثر بر رفتار سازه‌ای بال (شامل جابجایی، خمش، پیچش، فرکانس‌های طبیعی و انرژی کرنشی) و کاهش فضای طراحی، یک چارچوب (تحلیل حساسیت-کانفلیکت[1]) توسعه یافت [۳۱]. این چارچوب علاوه بر میزان اثرگذاری پارامترها، میزان کلنفلیکت یا ناسازگاری اثر آن‌ها بر پاسخ‌های مختلف را نیز ارزیابی می‌کند. بر اساس نتایج این تحلیل، متغیرهای طراحی به سه دسته تقسیم شدند:

متغیرهای اصلی: شامل PC2، LS، V1 و V4. (با توجه به هم‌راستایی رفتاری V5 با V4، این پارامتر به‌صورت متغیر وابسته و برابر با V4 لحاظ شد).

متغیرهای ثانویه: شامل WS، Tri_L1، Tri_L2، V2 و V3.

متغیرهای ثابت و مستقل: پارامترهای Tri_Theta1 و Tri_Theta2 بر اساس میانگین داده‌های مورفولوژیک ثابت فرض شدند. همچنین به دلیل حساسیت بالا و رفتار متناقض PC1، این پارامتر از الگوریتم تکاملی خارج شد و به‌عنوان یک متغیر مستقل در چند سطح گسسته مورد ارزیابی پارامتریک قرار گرفت.

۲- ۳- ۲- راه‌اندازی الگوریتم و توابع هدف

فرآیند بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از افزونه اکتاپوس[2] (مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی) در محیط گرس‌هاپر انجام شد. تنظیمات عملیاتی و پارامترهای کنترلی الگوریتم تکاملی به‌منظور تضمین همگرایی و تکرارپذیری فرآیند در جدول ۱. Octopus plugin settings for multi-objective optimization.

جدول ۱ ارائه شده است. بهینه‌سازی چندهدفه در سه سناریوی دوتایی انجام شد که شامل: کنترل سختی خمشی و پیچشی (θ_t ,θ_b) و (θ_t ,-θ_b)، ارزیابی پایداری ارتعاشی (-ω_1, -ω_2) و کارایی سازه‌ای (U, -m) بود. که در آن θ_b زاویه تغییر بردار نرمال سطح نوک بال نسبت به حالت اولیه، θ_t زاویه پیچش بال، ω_1 و ω_2 فرکانس‌های طبیعی اول و دوم، U انرژی کرنشی کل و m جرم سازه هستند. از آنجا که الگوریتم اکتاپوس بر مبنای کمینه‌سازی عمل می‌کند، اهدافی که باید بیشینه می‌شدند به‌صورت منفی وارد فرآیند بهینه‌سازی شدند. این فرآیند به صورتی تعریف شد تا الگوریتم با جستجو در فضای چندبعدی، مجموعه‌ای از پاسخ‌های غیرغالب را در قالب جبهه پارتو[3] ارائه دهد. بهینه‌سازی از طریق یک حلقه‌ی محاسباتی پویا و کاملاً یکپارچه انجام شد؛ به‌گونه‌ای که در هر تکرار، الگوریتم اکتاپوس مجموعه‌ای از متغیرهای هندسی را در محیط گرس‌هاپر تولید کرده و مدل پارامتریک متناظر به طور خودکار در ماژول تحلیل سازه‌ای کارامبا به‌روزرسانی می‌شود. سپس تحلیل اجزای محدود برای همان پیکربندی اجرا شده و مقادیر توابع هدف (مانند تغییرشکل‌ها، فرکانس‌های طبیعی و انرژی کرنشی) مستقیماً به الگوریتم بازگردانده می‌شدند تا در فرآیند انتخاب و تولید نسل‌های بعدی مورد استفاده قرار گیرند. در نتیجه، ارزیابی طرح‌ها به‌صورت برخط و بدون اتکا به مجموعه‌داده‌های از پیش محاسبه‌شده انجام گرفت. به منظور تضمین کارایی سازه‌ای و محاسباتی، قیود بهینه‌سازی و معیارهای همگرایی به‌صورت سیستماتیک تعریف شدند. امکان‌پذیری هندسی و شرایط

1. Conflict
2. Octopus
3. Pareto Front

فیزیکی از طریق اعمال حدود بالا و پایین برای متغیرهای طراحی در محیط پارامتریک(اسلایدر ها در گرس‌هاپر) کنترل گردید؛ به‌گونه‌ای که فضای جست‌وجو به پیکربندی‌های واقع‌بینانه محدود شده و مدل‌های نامعتبر پیش از تحلیل حذف شدند. همچنین، به‌جای استفاده از تعداد نسل ثابت، از راهبرد همگرایی پویا استفاده شد و فرآیند بهینه‌سازی پس از تثبیت جبهه پارتو و عدم مشاهده بهبود معنادار در نسل‌های متوالی متوقف گردید.

۲- ۳- ۳- استراتژی بهینه‌سازی دومرحله‌ای

برای بهبود همگرایی و مدیریت بهینه فضای طراحی، فرآیند در دو مرحله اجرا شد. مرحله نخست، تنها متغیرهای اصلی فعال شدند و متغیرهای ثانویه در مقادیر میانگین مدل پایه ثابت باقی ماندند. هم‌زمان، بهینه‌سازی برای هر یک از سطوح گسسته متغیر PC1 به‌طور مجزا انجام شد تا اثر مستقل آن دقیقاً ارزیابی گردد. مرحله دوم، پس از همگرایی مرحله اول، مقادیر بهینه متغیرهای اصلی ثابت نگه داشته شدند و متغیرهای ثانویه به‌عنوان متغیرهای طراحی وارد فرآیند شدند تا پاسخ‌های سازه‌ای با دقت بیشتری اصلاح شوند.

۳- نتایج

۳- ۱- نتایج پارامتریک

تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی یک پایگاه داده جامع شامل ۸۸۰ نمونه بال انجام شد. سه مؤلفه نخست که در مجموع ۷۸/۴٪ از کل واریانس مورفولوژیکی نمونه‌ها را پوشش می‌دهند، برای تحلیل‌های بعدی انتخاب شدند. شکل ۴ مدهای اصلی تغییرات هندسی بال حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی را نشان می‌دهد. سه مؤلفه نخست، بخش عمده تغییرات مورفولوژیکی نمونه‌ها را پوشش داده و بیانگر مکانیزم‌های غالب تغییر شکل در هندسه پلان‌فرم بال هستند. مؤلفه اول (PC1) با سهم ۴۵/۸٪، مهم‌ترین الگوی تغییر شکل را نشان می‌دهد و عمدتاً مسئول گسترش ناحیه عقبی بال است. با افزایش این مؤلفه، عرض بال در امتداد لبه فرار[1]، به‌ویژه در نیمه انتهایی، افزایش می‌یابد. این تغییر از حدود یک‌سوم طول بال آغاز شده و به‌تدریج به سمت نوک بال تشدید می‌شود. در نتیجه، این مؤلفه توزیع مساحت و پهنای ناحیه انتهایی بال را کنترل می‌کند.

مؤلفه دوم (PC2) با سهم ۲۵/۶٪، عمدتاً موقعیت و میزان کشیدگی ناحیه لوب تحتانی[2] را در راستای طولی (جلو و عقب) تعیین می‌کند. تغییرات این مؤلفه موجب تغییر محسوس در انحنای لبه فرار و هندسه ناحیه نوک بال شده و بر میزان تیزی یا گردی نوک بال اثر می‌گذارد.

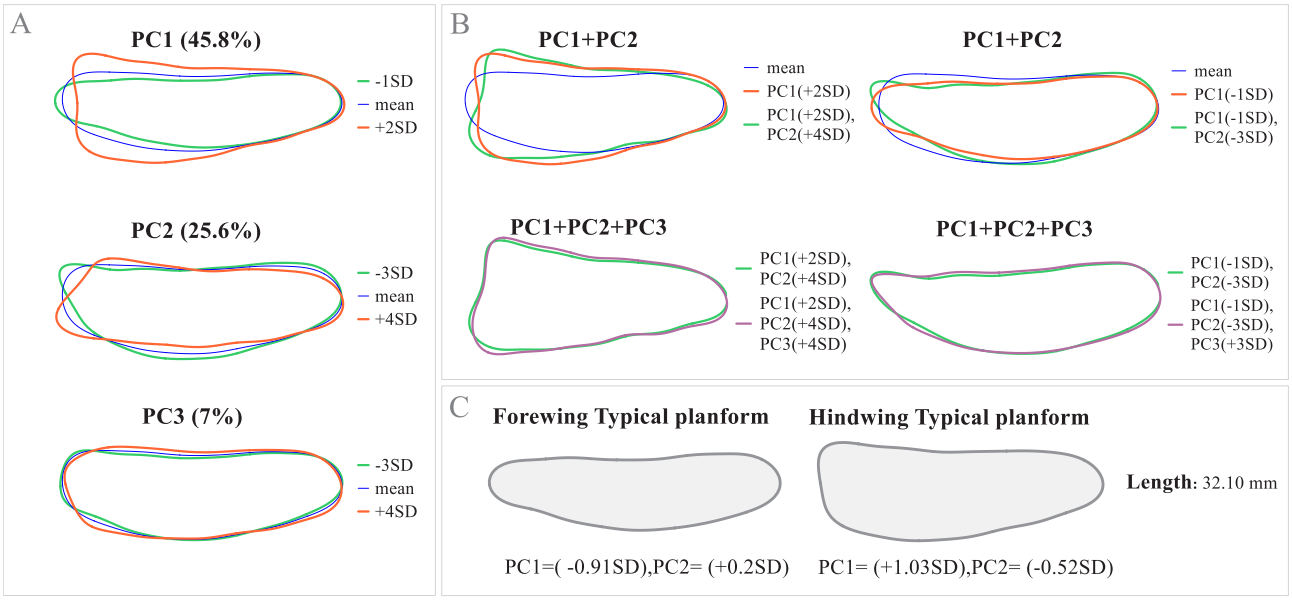
مؤلفه سوم (PC3) با سهم حدود ۷٪، بیانگر تغییرات موضعی‌تر در هندسه بال است. این مؤلفه عمدتاً بازتوزیع انحنا در لبه‌های حمله و فرار را کنترل کرده و موجب ایجاد مرزهای هموارتر یا زاویه‌دارتر در هندسه کلی بال می‌شود.

به‌طور کلی، نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد که بخش عمده تغییرات هندسه پلان‌فرم بال سنجاقک توسط دو مکانیزم هندسی غالب کنترل می‌شود: نخست، گسترش ناحیه خلفی بال که توزیع مساحت در نیمه انتهایی را تغییر می‌دهد؛ و دوم، جابه‌جایی و کشیدگی ناحیه لوب تحتانی که انحنای لبه فرار و هندسه نوک بال را تنظیم می‌کند. بنابراین، تمرکز تحلیل‌ها بر فضای طراحی PC۲-PC۱ قرار گرفت. بر این اساس، مؤلفه‌های اصلی استخراج‌شده نه‌تنها به عنوان ابزاری برای توصیف تغییرات مورفولوژیکی، بلکه به‌عنوان متغیرهای طراحی کم‌بُعد و مستقل در فرآیند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. این رویکرد، ضمن حفظ ویژگی‌های اساسی هندسه پلان‌فرم، موجب کاهش ابعاد فضای طراحی و جلوگیری از افزونگی پارامترها شد.

شکل ۴-C نمایانگر الگوی غالب و پرتکرار هندسی برای بال‌های جلو و عقب در میان نمونه‌های بررسی‌شده در این پژوهش است. این پیکربندی به‌طور مداوم به‌عنوان یک الگوی تکرارشونده در فضای مؤلفه‌های اصلی ظاهر می‌شود. این هندسه می‌تواند به‌عنوان یک الگوی طراحی مهندسی کارآمد مورد استفاده قرار گیرد؛ موضوعی که با این فرضیه سازگار است که فرآیندهای تکاملی می‌توانند به‌منظور دستیابی به توازن میان پاسخ سازه‌ای و عملکرد پروازی، به سمت چنین پیکربندی‌هایی سوق یابند.

شکل ۵ توزیع مورفولوژیکی بال‌ها را در فضای PC2-PC1 برای چهار خانواده از سنجاقک‌ها، به همراه نمونه‌های انتخابی در نواحی هم‌پوشانی و حالت‌های خاص نشان می‌دهد. بال‌های جلو در تمامی خانواده‌ها، در ناحیه‌ای فشرده پیرامون (PC1 ≈ −۱ ، PC2 ≈ ۰) تجمع یافته‌اند که بیانگر ثبات نسبی هندسه پلان‌فرم در آن‌هاست. در مقابل، بال‌های عقب پراکندگی بیشتری از خود نشان می‌دهند که دلالت بر تنوع مورفولوژیکی بالاتر در میان خانواده‌های مختلف دارد. نمودار پراکندگی نمونه‌ها در فضای PC2-PC1حاکی از آن است که توزیع داده‌های واقعی، الگوی مشخصی از همبستگی هندسی را دنبال می‌کند. بخش عمده‌ای از نمونه‌ها از خانواده های مختلف در ناحیه ای از فضای مورفولوژیکی (۲ >PC2> −۲ ، ۱/۵ >PC1> ۰/۵) متمرکز شده‌اند و هم‌پوشانی قابل‌توجهی میان گونه‌های

1. Trailing edge
2. Anal lobe



شکل ۴. مدهای اصلی تغییرات شکل بال سنجاقک حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی(PCA). (A) اثر مستقل سه مؤلفه اصلی بر هندسه بال. مؤلفه اول PC1 ، عمدتاً بیانگر گسترش ناحیه خلفی بال، مؤلفه دوم PC2 ، بیانگر جابه‌جایی و کشیدگی ناحیه لاله‌ی بال و تغییر انحنای لبه فرار، و مؤلفه سوم PC3 ، بیانگر بازتوزیع موضعی انحنا در امتداد مرزهای بال است. (B) اثر ترکیبی دو یا سه مؤلفه اصلی بر بازسازی و تغییرات کلی هندسه بال. (C) نمونه های از پلانفرم بال جلو و عقب که بیشترین فراوانی PCها را در بین کل بالها دارند.PC1 بهعنوان پارامتر مستقل و PC2 به عنوان پارامتر اصلی در فرآیند بهینه‌سازی لحاظ شده اند.

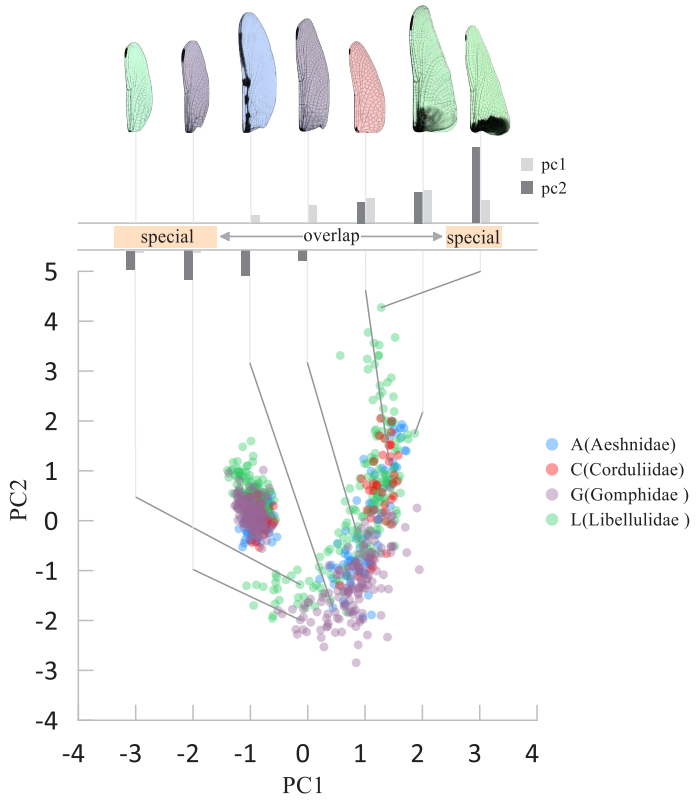
Fig. 4. Primary modes of dragonfly wing shape variation derived from Principal Component Analysis (PCA). (A) Independent effects of the first three principal components on wing geometry. The first component PC1, primarily captures the expansion of the posterior wing region; PC2 represents the displacement and elongation of the anal lobe accompanied by changes in trailing-edge curvature; and PC3 reflects the local redistribution of curvature along the wing margins. (B) Combined effects of two or three principal components on reconstruction and overall geometric variations of the wing. (C) Representative forewing and hindwing planforms showing the highest frequency of PCs across the entire dataset. PC1 was incorporated as an independent parameter, while PC2 was utilized as the primary parameter in the optimization process.

مختلف مشاهده می‌شود. این هم‌پوشانی نشان می‌دهد که بخش اعظم تغییرات هندسی بال‌های عقب در میان گونه‌ها، در یک بازه مشترک از پارامترهای شکلی رخ می‌دهد.

در مقابل، تعدادی از داده‌ها در مقادیر PC2 <۲ و همچنین مقادیر PC2 > -۲ (در محدوده PC۱ >۰/۵)، از این ناحیه مرکزی فاصله گرفته و نواحی نسبتاً مجزایی از فضای شکل[1] را اشغال کرده‌اند. این نقاط بیانگر پیکربندی‌هایی هستند که در آن‌ها، تغییرات مرتبط با موقعیت و میزان گسترش ناحیه لوب تحتانی و همچنین هندسه لبه فرار نسبت به حالت‌های غالب تفاوت چشمگیری دارد. چنین پراکندگی‌هایی معمولاً نشان‌دهنده پیکربندی‌های هندسی خاص در برخی گونه‌هاست که می‌توانند بازتابی از تفاوت در الگوی رگ‌بال‌ها، الزامات مکانیکی بال و در برخی موارد، ویژگی‌های آیرودینامیکی مرتبط با شیوه پرواز باشند.

همچنین، توزیع داده‌ها در نمودار نشان می‌دهد که نمونه‌ها تنها بخش محدودی از فضای ترکیب‌های ممکن PC1 و PC2 را اشغال می‌کنند. این موضوع در مطالعات مورفومتری و طراحی زیست‌الهام، معمولاً به‌عنوان نشانه‌ای از وجود محدودیت‌های هندسی و عملکردی در سیستم تفسیر می‌شود. به‌ویژه، ناحیه اطراف مبدأ مختصات (PC1 ≈۰ ، PC2 ≈ ۰) فاقد تراکم داده است (شکل ۴، پلان‌فرم میانگین با رنگ آبی). این امر می‌تواند نشان‌دهنده آن باشد که پیکربندی‌های هندسی متناظر با این محدوده، یا در

1. Morphospace



شکل ۵. توزیع مورفولوژیکی نمونه‌ها در فضای PC1–PC2 برای چهار خانواده Gomphidae، Corduliidae، Aeshnidae و Libellulidae. رنگ‌های آبی، قرمز، بنفش و سبز به‌ترتیب به این خانواده‌ها اختصاص داده شده‌اند. نمودار میله‌ای همراه، مقادیر PC1 و PC2 را برای نمونه‌های منتخب نماینده از نواحی متمایز و هم‌پوشان در فضای مورفولوژیکی بین خانواده‌ها نشان می‌دهد.

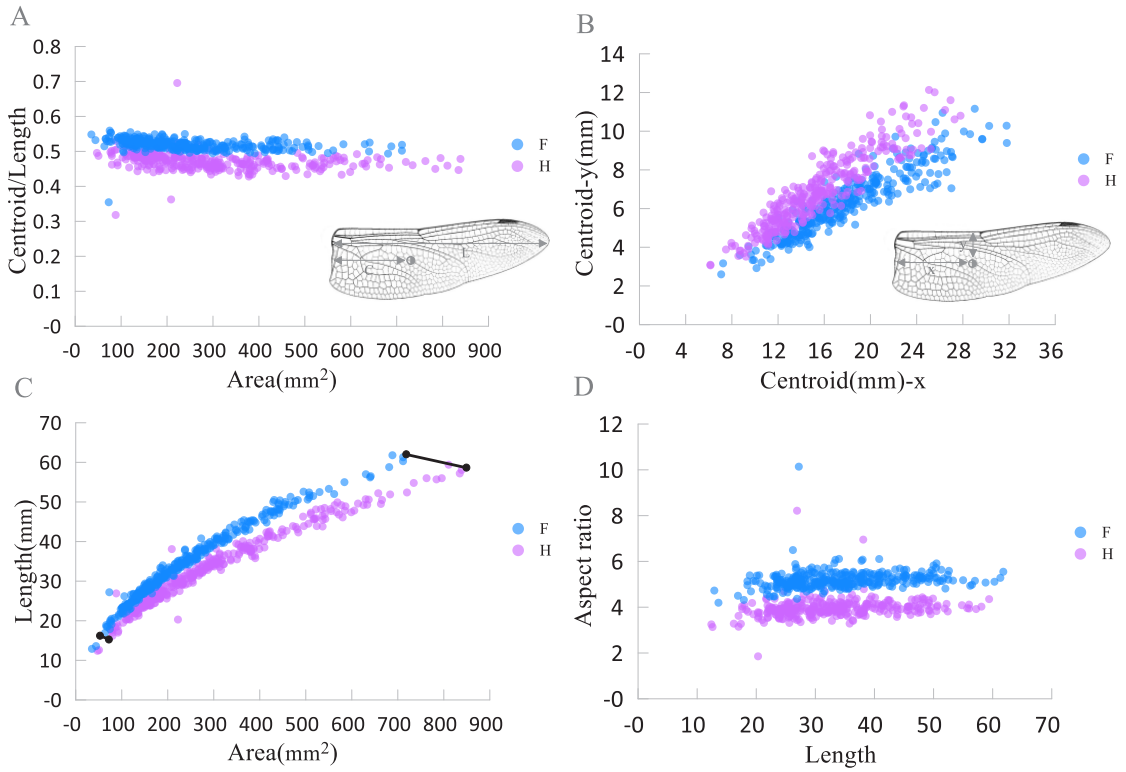
Fig. 5. Morphological distribution of specimens in the PC1–PC2 space across four families: Aeshnidae, Corduliidae, Gomphidae, and Libellulidae. Blue, red, purple, and green colors are assigned to these families, respectively. The accompanying bar chart illustrates the PC1 and PC2 values for representative specimens selected from distinct and overlapping regions within the morphological space between the families.

طبیعت کمتر رخ می‌دهند و یا از دیدگاه عملکردی و مکانیکی، در مقایسه با سایر پیکربندی‌ها از پایداری و کارایی کمتری برخوردارند.

شکل ۶ شاخص‌های اصلی هندسی بال‌ها را به تفکیک بال جلو و عقب نشان می‌دهد. مطابق بخش A، نسبت موقعیت مرکز سطح به طول بال برای بال‌های جلو و عقب تقریباً مقدار ثابتی دارد؛ به‌طوری که مقدار آن در بال جلو اندکی جلوتر و در بال عقب اندکی عقبتر از نیمه بال است. این رفتار یکنواخت، بیانگر یک ویژگی پایدار و مستقل هندسی در پلان‌فرم بال است. بخش B نشان می‌دهد که مؤلفه‌های طولی و عرضی مرکز سطح رابطه‌ای تقریباً خطی و پایدار دارند و افزایش مؤلفه عرضی در بال عقب (به دلیل پهنای بیشتر) شیب بزرگ‌تری ایجاد می‌کند. در بخش C، وابستگی مساحت به طول بال، رفتاری غیرخطی دارد و پاره‌خط‌های اتصال‌دهنده بال جلو و عقب نمایش داده شده در نمودار نشان می‌دهند که در ابعاد کوچک، اختلاف سطحی بین دو بال حداقلی است، اما در ابعاد بزرگ‌تر اختلاف مساحت بیشتری آشکار می‌شود. نهایتاً بخش D نشان می‌دهد که نسبت منظر[1] با وجود تغییرات قابل توجه در طول و مساحت، مقدار تقریباً ثابتی برای هر دو بال حفظ می‌کند (حدود ۵ برای بال جلو و ۴ برای بال عقب)، که این موضوع بر پایایی و رفتار مستقل نسبت منظر تأکید می‌کند.

شکل ۷ تحلیل هندسی راستای رگ‌بال‌های طولی (V5–V1) در بال‌های جلو و عقب چهار خانواده سنجاقک مورد مطالعه، تفاوت‌های

1. Aspect Ratio (AR)

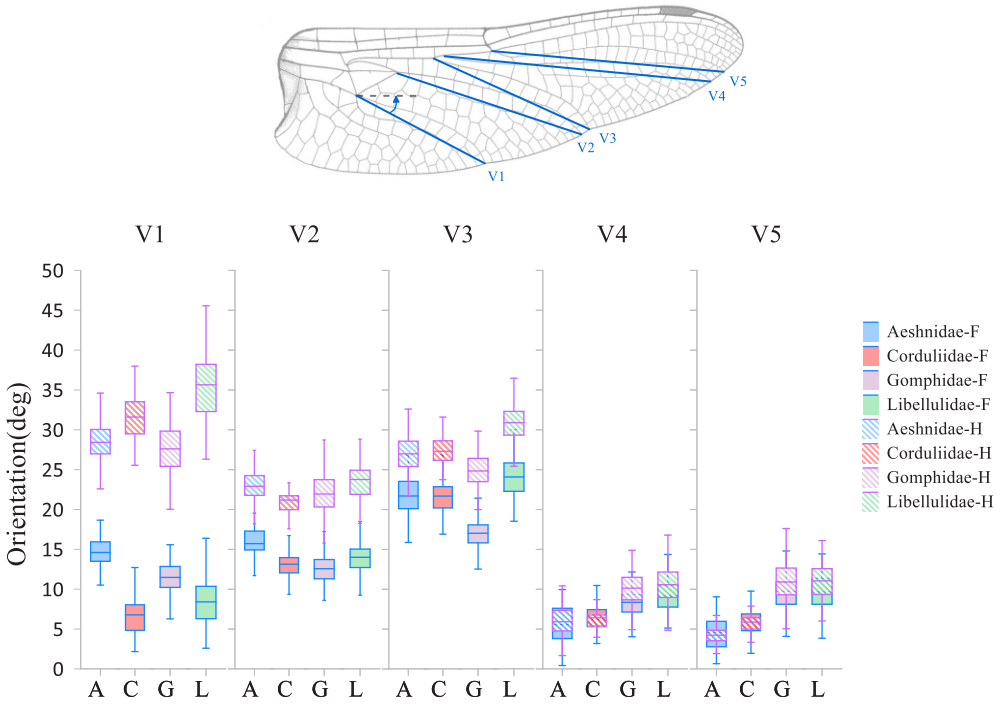


شکل ۶. شاخص‌های هندسی پلنفرم بال در نمونه‌های مورد مطالعه (A) نسبت موقعیت طولی مرکز سطح به طول بال؛ (B) مختصات مرکز سطح، به‌صورت مؤلفه عرضی بر حسب مؤلفه طولی؛ (C) مساحت بال بر حسب طول بال، که در آن پاره‌خط‌ها بال جلو و عقب مربوط به هر گونه را به یکدیگر متصل می‌کنند؛ (D) نسبت ابعادی بر حسب طول بال. بال‌های جلو با رنگ آبی و بال‌های عقب با رنگ بنفش نمایش داده شده‌اند. Forewing(F) برای بال جلو و Hindwing(H) برای بال عقب استفاده شده است.

Fig. 6. Planform geometric indices of the studied wing specimens: (A) ratio of the centroid's longitudinal position to the total wing length; (B) centroid coordinates, plotted as the transverse component versus the longitudinal component; (C) wing area versus wing length, where the line segments connect the forewing and hindwing of the same species; and (D) aspect ratio versus wing length. Forewings and hindwings are represented in blue and purple, respectively. The abbreviations F and H denote forewing and hindwing.

سیستیماتیک را نشان داد. به‌طور کلی، بال‌های عقب دارای زوایای رگ‌بال بزرگتری نسبت به بال‌های جلو بودند. این تفاوت در رگ‌بال V1 بیشترین مقدار خود را نشان داد (۱۰ deg برای بال جلو در مقابل ۳۳ deg برای بال عقب)، که با پهن‌شدگی بافت خلفی بال عقب هم‌خوانی دارد. رگه‌های V4و V5 کمترین میانگین زاویه (حدود ۸ deg) و کمترین اختلاف بین دو بال را داشتند که نشان‌دهنده یک الگوی پایدار در ناحیه دورتر بال است. خانواده *Libellulidae* (L) بالاترین میانگین زاویه را در تمام رگ‌بال‌ها، به‌خصوص در بال عقب، نشان داد.

تحلیل پارامترهای هندسی المان مثلثی (شکل ۸) الگوهای متمایزی را در چهار خانواده و میان بال‌های جلو و عقب نشان می‌دهد. بررسی متغیرهای طولی حاکی از آن است که متغیر Tri_L1 پراکندگی کمی بین (۱ mm تا ۳ mm) داشته و مقادیر آن در بال عقب تمامی خانواده‌ها، به‌جز خانواده A، عموماً کمتر از بال جلو است. از سوی دیگر، متغیر Tri_L2 در هر دو بال همپوشانی دارد، اما خانواده A با گستره بسیار بزرگ‌تر(۳ mm تا mm ۷) از سایر گروه‌ها متمایز می‌شود. در خصوص متغیرهای زاویه‌ای، Tri_ Theta1 در بازه فشرده (حدود ۱۰- deg تا ۴۰ deg) قرار دارد، درحالی‌که Tri_Theta۲ مقادیر بالاتری به خود اختصاص داده و در خانواده‌های C، G و به‌ویژه L اختلاف قابل‌توجهی میان بال جلو و عقب نشان می‌دهد؛ هرچند این زاویه در خانواده A برای هر دو بال تقریباً یکسان است. بر اساس هندسه میانگین، می‌توان نتیجه گرفت که خانواده A دارای المان مثلثی

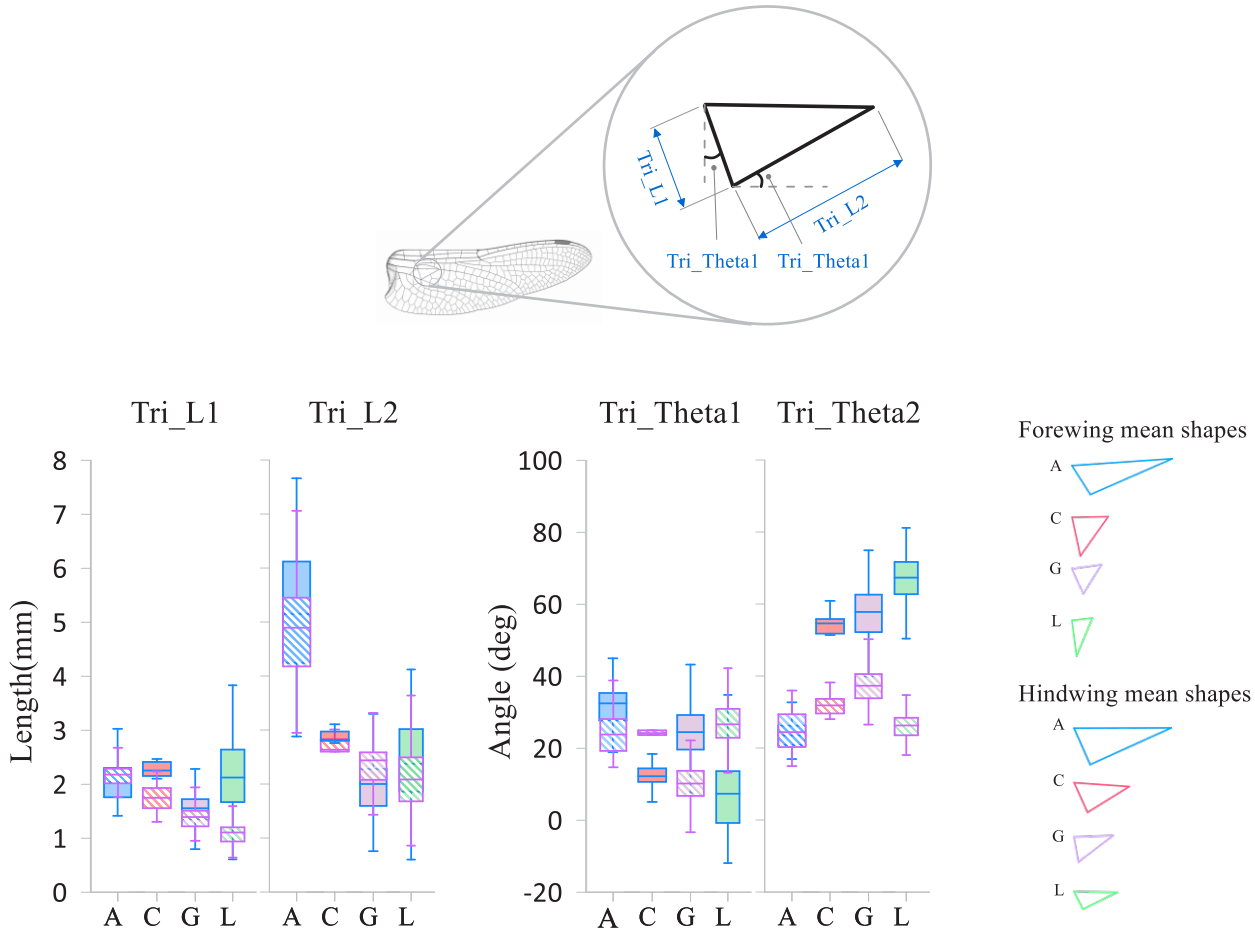


شکل ۷. مقایسه آماری راستای رگبال‌های طولی (V1–V5) در بال‌های جلو Forewing(F) و عقب Hindwing(H) برای چهار خانواده (Aeshnidae(A)، Corduliidae(C)، Gomphidae(G و Libellulidae(L). راستای هر رگ‌بال به‌عنوان زاویه پاره‌خط واصل نقاط ابتدا و انتهای آن نسبت به محور طولی بال (خط افقی در شماتیک بالا) تعریف شده است. نمودارهای جعبه‌ای توزیع مقادیر را نشان می‌دهند که در آن سطوح رنگی توپر مربوط به بال‌های جلو و سطوح هاشورخورده مربوط به بال‌های عقب هستند. V1، V4 و V4 پارامترهای اصلی و V2، V3 پارامترهای ثانویه فرآیند بهینه سازی می‌باشند.

Fig. 7. Statistical comparison of longitudinal vein orientations (V1–V5) in forewings (F) and hindwings (H) across four families: Aeshnidae (A), Corduliidae (C), Gomphidae (G), and Libellulidae (L). The orientation of each vein is defined as the angle of the line segment connecting its start and end points relative to the wing's longitudinal axis (horizontal line in the upper schematic). The box plots illustrate the distribution of values, where solid colored areas represent forewings and hatched areas represent hindwings. V1, V4, and V5 serve as primary parameters, while V2 and V3 are incorporated as secondary parameters in the optimization process.

بزرگ‌تر، کشیده‌تر و مشابه‌تر میان دو بال است، درحالی‌که در خانواده L بیشترین تفاوت هندسی بین بال جلو و عقب مشاهده می‌شود.

بر اساس نمودارهای جعبه‌ای شکل ۹. مقایسه پارامترهای هندسی تروستیگما در چهار خانواده سنجاقک. پارامترهای در نظر گرفته‌شده شامل BD (فاصله از بیس بال)، ND (فاصله از نودس)، WS (عرض تروستیگما)، LS (طول تروستیگما) و مساحت تروستیگما (حاصل‌ضرب WS و LS)هستند. مقادیر به‌صورت بی‌بعد نسبت به طول بال ارائه شده‌اند و مساحت تروستیگما نیز به‌صورت نسبت بی‌بعدی از مساحت بال نشان داده شده است. مقایسه برای بال جلو و بال عقب در خانواده‌های مختلف انجام شده است. LS پارامتر اصلی، WS پارامتر ثانویه فرآیند بهینه سازی می‌باشد.، پارامترهای هندسی تروستیگما در چهار خانواده الگوهای مشخصی از تغییرات را نشان می‌دهند. در پارامترهای عرض (WS) و طول (LS) تروستیگما، خانواده G بیشترین مقادیر را در میان خانواده‌ها دارد. پارامتر ND (فاصله تروستیگما تا نودس) پس از نرمال‌سازی نشان می‌دهد که نودس در بال عقب نسبت به بال جلو به بیس بال نزدیک‌تر است. به طور میانگین، موقعیت تروستیگما تا نودس حدود ۰/۳۵ طول بال در بال جلو و حدود ۰/۴ طول بال در بال عقب است. پارامتر BD (فاصله تروستیگما تا بیس بال) در تمامی خانواده‌ها و در هر دو نوع بال مقدار تقریباً ثابتی برابر با ۰/۸ طول بال دارد. از آنجا که این مقدار ثابت است، موقعیت تروستیگما نسبت به نوک بال برای همه خانواده‌ها نیز تقریبا مقدار ثابتی برابر ۰/۲ طول بال دارد. در بررسی



شکل ۸. پارامترهای طولی و زاویه‌ای المان مثلثی Tri_L1 , Tri_L2 ،Tri_Theta1 ،Tri_Theta2 را با استفاده از نمودارهای جعبه‌ای برای بال جلو و بال عقب در خانواده‌های مختلف نشان می‌دهد. همچنین هندسه متوسط المان مثلثی برای هر خانواده در هر دو نوع بال ارائه شده است تا الگوی تغییرات هندسی بین خانواده‌ها و بین جفت‌بال‌ها قابل مشاهده باشد. مقادیر نشان داده‌شده بیانگر میانه و بازه بین چارکی (IQR) اندازه‌گیری‌ها هستند. Tri_L1وTri_L2 پارامترهای اصلی و Tri_Theta1 و Tri_Theta2 پارامترهای ثابت در فرآیند بهینه سازی می‌باشند.

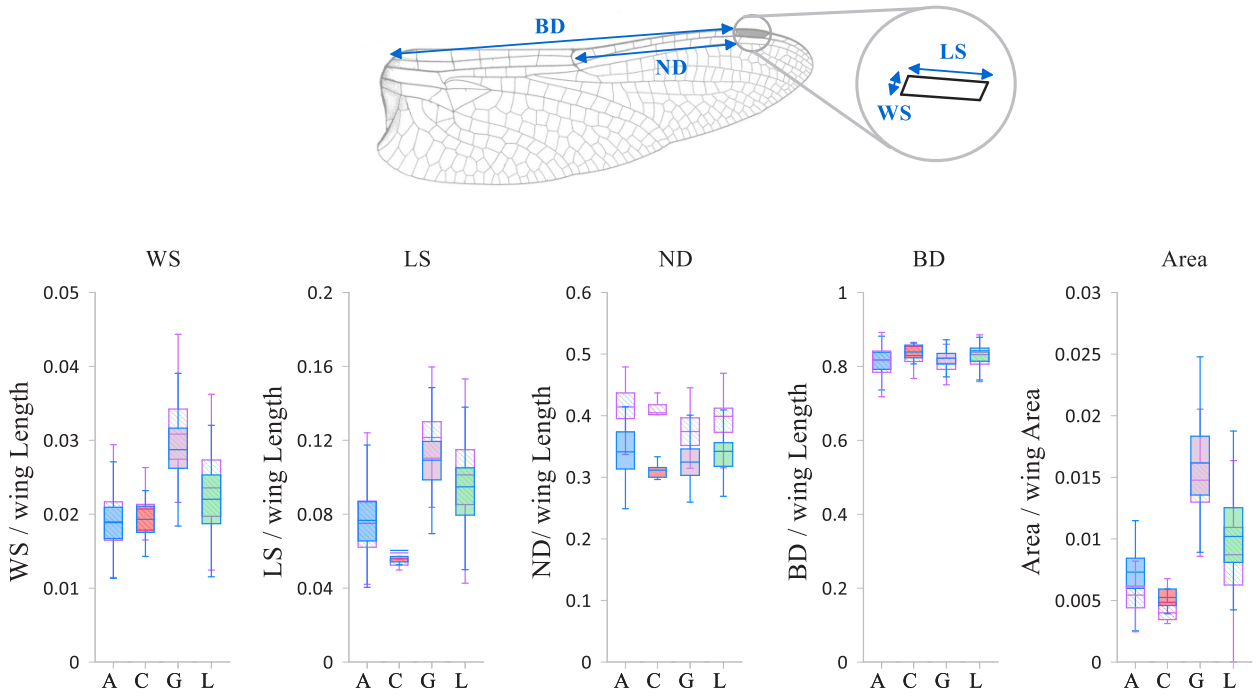
Fig. 8. Box plots of the longitudinal and angular parameters of the triangle cell, including Tri_L1, Tri_L2, Tri_Theta1, and Tri_Theta2, for forewings and hindwings across the different dragonfly families. The mean geometry of the triangle cell is also presented for each family in both wing types to illustrate geometric variation among families and between forewings and hindwings. The box plots display the median and interquartile range (IQR) of the measurements. Tri_L1 and Tri_L2 were treated as primary design parameters, whereas Tri_Theta1 and Tri_Theta2 were kept fixed during the optimization process.

مساحت تروستیگما، خانواده G بیشترین مقدار را دارد.

۳- ۲- نتایج بهینه‌سازی

شکل ۱۰ نتایج بهینه‌سازی چندهدفه مرحله اول برای مقادیر اکسترمم خمش و پیچش بال را نشان می‌دهد. تحلیل‌ها حاکی از یک تضاد عملکردی[1] معنادار است؛ به‌گونه‌ای که افزایش خمش عموماً با کاهش پیچش همراه است. بررسی اثر پارامترها نشان می‌دهد که PC۲ و V۴ همبستگی مثبت با پیچش و معکوس با خمش دارند، درحالی‌که V۱رفتاری برعکس (همبستگی مثبت با خمش و معکوس با پیچش) نشان می‌دهد. همچنین، LS با افزایش دامنه مطلق هر دو پاسخ، به‌عنوان کنترل‌گر کلی سختی عمل می‌کند. تحلیل حساسیت حول نقاط بهینه مشخص کرد که V4 پارامتر غالب در کنترل خمش است، درحالی‌که رفتار پیچشی عمدتاً توسط V1 و سپس PC2 کنترل می‌شود؛ امری که نشان‌دهنده نقش متمایز متغیرها در تنظیم

1. Trade-off



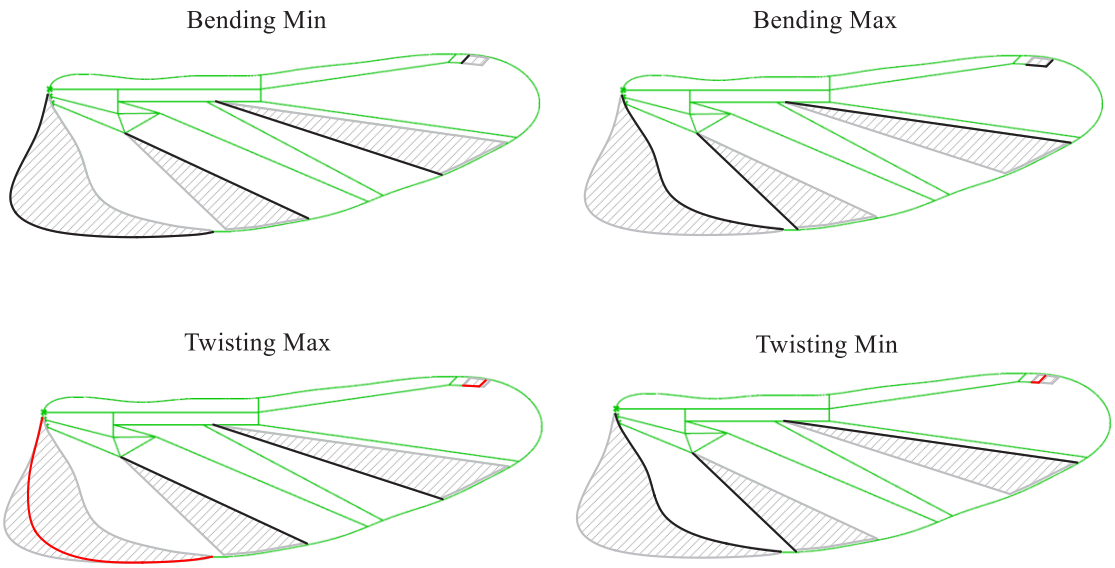
شکل ۹. مقایسه پارامترهای هندسی تروستیگما در چهار خانواده سنجاقک. پارامترهای در نظر گرفته‌شده شامل BD (فاصله از بیس بال)، ND (فاصله از نودس)، WS (عرض تروستیگما)، LS (طول تروستیگما) و مساحت تروستیگما (حاصلضرب WS و LS)هستند. مقادیر به‌صورت بی‌بعد نسبت به طول بال ارائه شده‌اند و مساحت تروستیگما نیز به‌صورت نسبت بی‌بعدی از مساحت بال نشان داده شده است. مقایسه برای بال جلو و بال عقب در خانواده‌های مختلف انجام شده است. LS پارامتر اصلی، WS پارامتر ثانویه فرآیند بهینه سازی می‌باشد.

Fig. 9. Comparison of pterostigma geometric parameters across four dragonfly families. The considered parameters include BD (distance from the wing base), ND (distance from the nodus), WS (pterostigma width), LS (pterostigma length), and pterostigma area (WS × LS). All quantities are reported in non-dimensional form normalized by wing length, and the pterostigma area is additionally presented as a non-dimensional ratio relative to total wing area. Comparisons are provided for both forewings and hindwings across the families. LS was treated as a primary design parameter, whereas WS was included as a secondary parameter in the optimization process.

تعادل سازه‌ای است. علاوه بر این، بررسی مستقل پارامتر PC1 نشان داد که افزایش آن موجب کاهش دامنه‌های خمش و پیچش (گرایش به رفتار سفت‌تر و پایدارتر) می‌شود، درحالی‌که مقادیر منفی PC1 انعطاف‌پذیری سازه را افزایش می‌دهند. از این‌رو، PC1 نقشی کلیدی در تنظیم و تعادل میان سختی و انعطاف‌پذیری بال ایفا می‌کند.

در مرحله دوم بهینه‌سازی، ارزیابی رفتار پارامترهای گروه ثانویه که در تحلیل حساسیت اولویت کمتری نشان داده بودند، انجام گرفت (شکل ۱۱). تحلیل پاسخ‌های سازه‌ای حاکی از آن است که تغییرات متغیر هندسی Tri_L1 رابطه‌ای مستقیم با تغییرشکل‌های خمشی و پیچشی بال دارد و افزایش آن منجر به تشدید هم‌زمان هر دو پاسخ می‌گردد. در مقابل، افزایش پارامتر Tri_L2 با کاهش رفتار خمشی همراه بوده و در حالات بهینه پیچشی، این متغیر عمدتاً در محدوده‌ی بیشینه‌ی مقادیر طراحی خود پایدار می‌شود. از سوی دیگر، پاسخ‌های سازه‌ای وابستگی متمایزی به توزیع رگ‌بال‌ها نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که افزایش متغیر V2 منجر به افزایش رفتار خمشی و کاهش پاسخ پیچشی بال می‌شود، در حالی که متغیر V3 نقشی کاهنده در هر دو مؤلفه ایفا می‌کند. همچنین پارامتر WS تأثیر متفاوتی برجا گذاشته و رابطه‌ای معکوس با خمش و مستقیم با پیچش سازه دارد. به طور کلی، اگرچه میزان حساسیت پاسخ‌های سازه‌ای نسبت به پارامترهای ثانویه در مقایسه با متغیرهای اصلی کمتر است، اما این گروه از پارامترها به عنوان متغیرهای تنظیم دقیق تر، نقش مؤثری در بهبود نهایی پیکربندی‌های بهینه و تعدیل پاسخ‌های سازه‌ای ایفا می‌کنند.

در بخش بهینه‌سازی همزمان با هدف کاهش جرم کل و انرژی کرنشی

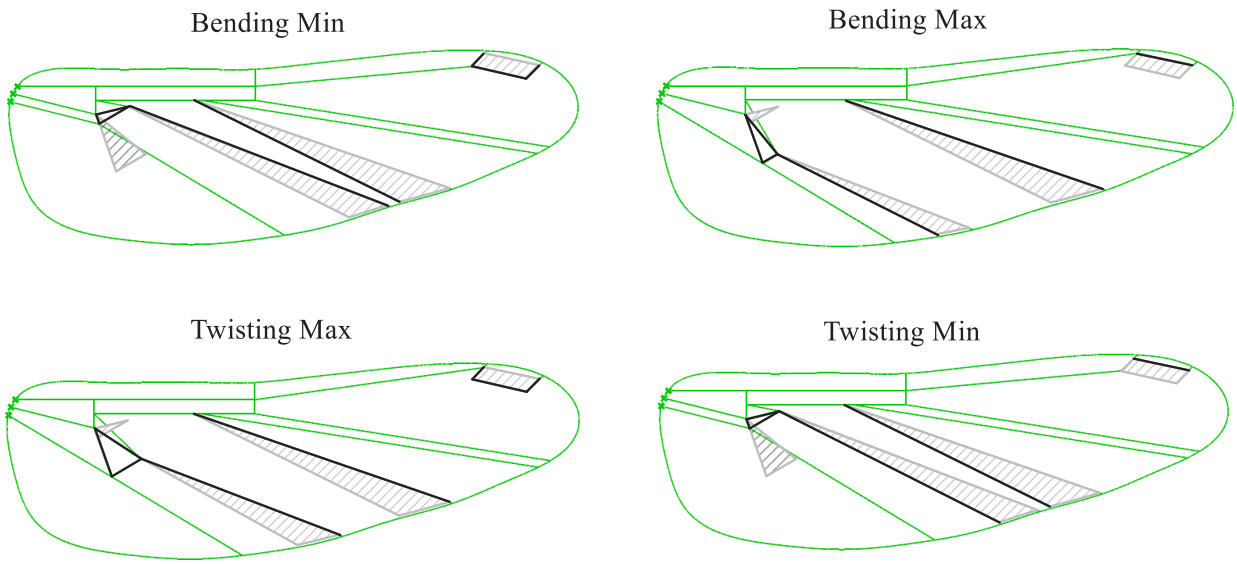


شکل ۱۰. نتایج مرحله نخست بهینه‌سازی همزمان خمش و پیچش در فضای طراحی پارامترهای گروه اصلی. ناحیه حاشورخورده بیانگر دامنه مجاز تغییرات هر پارامتر است. خطوط پررنگ مقادیر متناظر با حالات حدی پاسخ‌های سازه‌ای را نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که خطوط مشکی نمایانگر اکسترمم‌های واقع‌شده در مرز دامنه و خطوط قرمز نشان‌دهنده اکسترمم‌های داخلی درون فضای طراحی هستند. این شکل نحوه توزیع مقادیر بهینه پارامترهای PC2، V1، V4 وLS را در ارتباط با پاسخ‌های خمشی و پیچشی بال نمایش می‌دهد.

Fig. 10. Results of the first-stage optimization for simultaneous bending and torsion within the design space of primary parameters. The hatched area represents the allowable range of variation for each parameter. Solid lines indicate values corresponding to extreme states of structural response, where black lines represent boundary extrema located at the limits of the design space, and red lines denote internal extrema within the design space. This Fig. illustrates the optimal distribution of parameters PC2, V1, V4, and LS in relation to the bending and torsional responses of the wing.

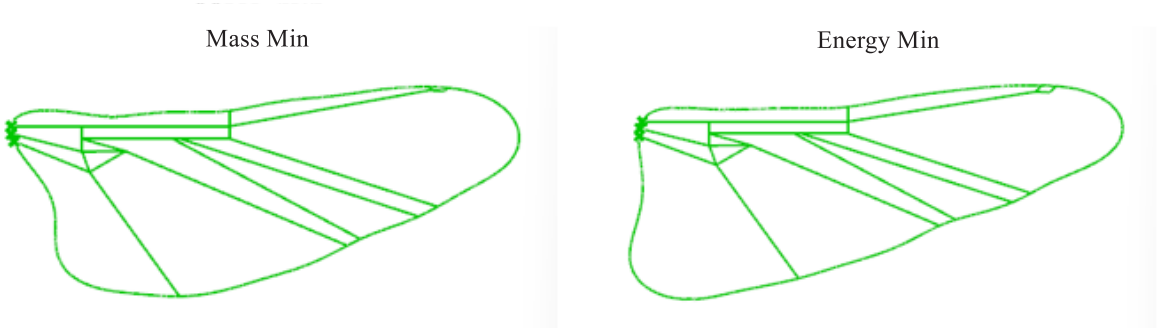
(شکل ۱۲)، نتایج نشان می‌دهد که ترکیب بهینه پارامترهای طراحی با الگوی کلی حالت کمینه خمش و پیچش سازگاری دارد؛ با این تفاوت که انتخاب نهایی مقادیر بر اساس میزان اثرگذاری آن‌ها بر این دو تابع هدف تعیین می‌گردد. بر این اساس، پارامتر V1 که بیشترین نقش را در کنترل پیچش ایفا می‌کند، در مقدار بیشینه خود قرار گرفته و متغیر V4 نیز جهت دستیابی به حداقل خمش، روی مقدار بیشینه تنظیم شده است. همچنین، برای دستیابی به کمینه جرم در کنار حفظ حداقل انرژی کرنشی، کاهش مقادیر PC2 و WS مؤثر بوده است؛ چراکه این تغییرات هندسی موجب کاهش سختی موضعی و در نتیجه توزیع گسترده‌تر و یکنواخت‌تر کرنش در سطح بال می‌شوند.

در گام بعدی، فرکانس‌های طبیعی اول و دوم بال با هدف ارتقای پایداری دینامیکی بیشینه‌سازی شدند. افزایش این فرکانس‌ها به‌عنوان شاخصی از ارتقای سختی سازه، می‌تواند احتمال بروز رزونانس تحت تحریکات دینامیکی را کاهش دهد و به بهبود رفتار دینامیکی سازه کمک کند. یافته‌ها حاکی از همبستگی مؤثر میان رفتار استاتیکی و ویژگی‌های دینامیکی بال است؛ به‌گونه‌ای که بیشینه‌سازی فرکانس طبیعی اول، هندسه‌ای مشابه با حالت (خمش کمینه) ایجاد می‌کند که این امر تأییدکننده ماهیت خمشی مود نخست ارتعاشی است. به‌طور مشابه، بیشینه‌سازی فرکانس طبیعی دوم به الگویی هم‌راستا با حالت (پیچش کمینه) می‌انجامد که نشان‌دهنده ماهیت پیچشی مود دوم است. در مجموع، این نتایج نشان می‌دهند که مدل‌های بهینه‌شده نه‌تنها عملکرد مطلوبی در معیارهای استاتیکی (شامل خمش، پیچش، جرم و انرژی کرنشی) دارند، بلکه از منظر ارتعاشات و پایداری دینامیکی نیز در وضعیت بهینه‌ای قرار دارند. شایان ذکر است که پیکربندی‌های مرزی تحلیل‌شده در این مطالعه، بیانگر طرح‌های تقابلی کلیدی از جبهه پارتوی بهینه‌سازی هستند و انتخاب نهایی میان آن‌ها به کاربرد موردنظر بستگی دارد.



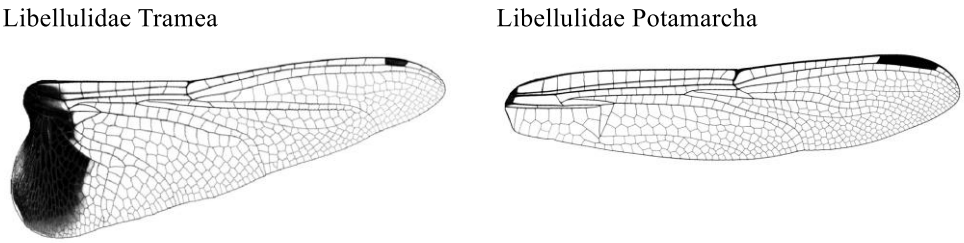
شکل ۱۱. نتایج مرحله دوم بهینه‌سازی همزمان خمش و پیچش در فضای طراحی پارامترهای گروه ثانویه. ناحیه حاشورخورده بیانگر دامنه مجاز تغییرات هر پارامتر است. خطوط پررنگ مقادیر متناظر با حالات حدی پاسخ‌های سازه‌ای را نشان می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که خطوط مشکی نمایانگر اکسترمم‌های واقع‌شده در مرز دامنه هستند. این شکل نحوه توزیع مقادیر بهینه پارامترهای Tri_L1، Tri_L2 ، V2، V3 و WS را در ارتباط با پاسخ‌های خمشی و پیچشی بال نمایش می‌دهد.

Fig. 11. Results of the second-stage optimization for simultaneous bending and torsion within the design space of secondary parameters. The hatched area represents the allowable range of variation for each parameter. Solid lines indicate values corresponding to extreme states of structural response, where black lines represent boundary extrema located at the limits of the design space. This Fig. illustrates the optimal distribution of parameters Tri_L1, Tri_L2, V2, V3, and WS in relation to the bending and torsional responses of the wing.



شکل ۱۲. نتایج بهینه‌سازی همزمان انرژی کرنشی و جرم بال در فضای طراحی پارامترهای گروه اصلی و گروه ثانویه.

Fig. 12. Optimization results for simultaneous minimization of strain energy and wing mass within the design spaces of both primary and secondary parameters.



شکل ۱۳. تصویری از بال عقبی گونه‌ی Tramea (چپ) و بال جلویی Potamarcha (راست). ویژگی‌های ساختاری کلیدی، شامل پلنفرم کلی، شبکه رگ‌بندی، و تروستیگما و ناحیه المان مثلثی برای مقایسه مورفولوژیک نشان داده شده‌اند.

Fig. 13. Images of the hindwing of the Tramea species (left) and the forewing of the Potamarcha species (right). Key structural features, including the overall planform, venation network, pterostigma, and the triangle cell region, are presented for morphological comparison.

ارزیابی هندسه‌های مستخرج از جبهه پارتو، تطابق بالایی میان مدل‌های بهینه تئوری و مورفولوژی بال‌های واقعی را نشان می‌دهد. برای مثال، ساختاری که انرژی کرنشی را کمینه می‌کند، با مورفولوژی بال سنجاقک‌های مهاجر، نظیر *Tramea* از خانواده *Libellulidae*، هم‌خوانی نسبی دارد (شکل ۱۳). از سوی دیگر، پیکربندی بهینه برای بیشینه‌سازی پیچش، که از طریق کاهش سختی پایه بال و افزایش ابعاد المان مثلثی حاصل می‌شود، با بال جلویی گونه‌هایی نظیر *Potamarcha* تطابق نسبی نشان می‌دهد. این هم‌خوانی می‌تواند بازتابی از تفاوت‌های مورفولوژیکی و ظرفیت تغییرشکل سازه‌ای باشد و، با توجه به گزارش‌های پیشین درباره تفاوت‌های شکل بال در گونه‌های مهاجر در مقایسه با گونه‌های غیرمهاجر، ممکن است با سازوکارهایی مرتبط باشد که به بهبود کارایی پروازی در بستر مهاجرت کمک می‌کنند [۳۲]. شایان ذکر است که تفاوت‌های جزئی ظاهری در شبکه مثلثی مدل و نمونه واقعی، صرفاً ناشی از قیود مدل‌سازی برای جلوگیری از تداخل رگ‌بال‌ها است؛ با این حال، روند کلی تغییرات پارامتریک و نتایج عملکردی، سازوکارهای طبیعی را به خوبی تأیید می‌کند.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

۴- ۱- محدودیت‌های هندسی و سازگاری مورفولوژیکی

نتایج تحلیل مورفومتریک پلان‌فرم بال نشان می‌دهد که نمونه‌های بال سنجاقک در فضای مؤلفه‌های اصلی توزیعی غیریکنواخت دارند و عمدتاً در نواحی مشخصی از این فضا متمرکز شده‌اند. تجمع بال‌های جلو در یک ناحیه فشرده از فضای طراحی PC2-PC1 گویای حفظ یک طرحواره پایدار است که می تواند برای تولید نیروی برآ و یا پایداری پروازی باشد. در مقابل، پراکندگی بال‌های عقب در فضای مورفولوژیک، نقش آن‌ها را در مانورپذیری نشان می‌دهد [۳۳]. فقدان داده در مرکز فضای شکل نشان می‌دهد که فرم میانگین لزوماً از منظر مکانیکی یا آیرودینامیکی بهینه نیست. همچنین، حفظ نسبت منظر متمایز و پایدار برای بال جلو و عقب نشان می‌دهد مکانیزم‌های طبیعی به جای تغییر در نسبت‌های کلان هندسی، از توزیع موضعی مساحت (مانند لاله بال) برای تنظیم عملکرد بهره می‌برند [۳۴, ۳۵].

۴- ۲- کنترل غیرفعال توسط المان‌های محلی

این مطالعه نشان داد که سنجاقک‌ها سفتی موضعی بال را از طریق هندسه سلول مثلثی و زوایای رگ‌بال‌ها تنظیم می‌کنند [۳۶]. تغییر زاویه رگ‌بال‌های انتهایی در بال عقب با گسترش لاله بال مرتبط است، در حالی که ثبات زوایای رگ‌بال‌های اصلی در ناحیه جلویی، شبکه‌ای صلب برای جلوگیری از تغییرشکل‌های نامطلوب حین تشکیل گردابه‌های لبه حمله[1] فراهم می‌کند [۳۳]. علاوه بر این، قرارگیری تروستیگما در یک نسبت بهینه از طول بال در تمامی خانواده‌ها، نقش آن را به عنوان یک میراگر اینرسی تأیید می‌کند. این ثبات بی‌بعد، یک معیار کلیدی برای جانمایی جرم متمرکز جهت سرکوب فلاتر در طراحی ریزپرنده‌ها ارائه می‌دهد [۱۴].

۴- ۳- تضاد عملکردی و بهینه‌سازی سازه‌ای

تحلیل‌های چندهدفه یک تضاد عملکردی آشکار میان خمش و پیچش

1. Leading-Edge Vortex (LEV)

بال را نشان داد [۹]. رگ‌بال‌های جلویی به عنوان کنترل‌کننده غالب رفتار خمشی عمل می‌کنند، در حالی که جهت‌گیری رگ‌بال‌های عقبی و تغییرات کلی پلان‌فرم (کشیدگی به سمت عقب یا جلوی لاله بال)، پاسخ پیچشی را تنظیم می‌نمایند. همچنین، پهنشدگی عقب پلان‌فرم بال به‌عنوان متغیر تنظیم‌کننده تعادل میان سختی و انعطاف‌پذیری عمل می‌کند؛ مقادیر مثبت آن سفتی سازه را افزایش داده و مقادیر منفی انعطاف‌پذیری لازم برای مانورهای سریع را فراهم می‌کنند. بررسی انرژی کرنشی کل نشان می‌دهد که پیکربندی‌های مختلف المان‌های هندسی بال را می‌توان در چارچوب یک مسئله چندهدفه تحلیل کرد. نتایج همچنین بیانگر آن است که، فراتر از پیکربندی‌های اکسترمم مانند کمینه مطلق خمش یا پیچش، پیکربندی‌های ترکیبی نیز در فضای پاسخ حضور دارند؛ پیکربندی‌هایی که می‌توانند توازنی میان الزامات سازه‌ای و آیرودینامیکی برقرار کنند. با این حال، در این پژوهش تأکید اصلی بر نقش این المان‌ها در عملکرد سازه‌ای بال بوده است.

۴- ۴- هم‌گرایی پایداری استاتیکی و دینامیکی و چشم‌انداز آینده

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رفتارهای استاتیکی بهینه‌شده، مستقیماً با ویژگی‌های دینامیکی بال هم‌گرا هستند. انطباق (کمینه خمش) با (بیشینه فرکانس طبیعی اول) و (کمینه پیچش) با (بیشینه فرکانس طبیعی دوم)، نشان‌دهنده یکپارچگی طراحی در طبیعت برای تحمل بارهای آیرودینامیکی و هم‌زمان جلوگیری از پدیده رزونانس است. در نهایت، تقلیل پیچیدگی‌های مورفولوژیک به یک فضای طراحی کم‌بُعد (متشکل از مؤلفه‌های شکل PC و زوایای رگ‌بال‌ها)، چارچوبی کارآمد برای توسعه بال‌های تطبیق‌پذیر[1] ارائه می‌دهد. لازم به ذکر است که در این مطالعه، بال به‌صورت یک مدل مسطح ساده‌شده با خواص همگن، خطی-الاستیک و ضخامت یکنواخت در نظر گرفته شد تا امکان‌پذیری محاسباتی در فرایند بهینه‌سازی حفظ شود؛ ازاین‌رو، رفتار سازه‌ای بال، از جمله خمش، پیچش و فرکانس‌های طبیعی، در چارچوب این فرض‌ها تفسیر شده است. با این وجود، گذار از پارامترهای تئوریک به کاربردهای مهندسی نیازمند اعتبارسنجی تجربی است. پژوهش‌های آتی باید بر ساخت نمونه‌های اولیه بال با هندسه بهینه، انجام تست‌های استاتیکی و آزمون‌های مودال تجربی، آزمایش‌های بال‌زدن در شرایط کنترل‌شده و تحلیل‌های آیروالاستیک متمرکز شوند تا عملکرد این پیکربندی‌های بهینه در شرایط دینامیکی پرواز با بال‌زدن واقعی ارزیابی گردد.

1. Adaptive

منابع

[1] S. Xiao, K. Hu, B. Huang, H. Deng, X. Ding, A review of research on the mechanical design of hoverable flapping wing micro-air vehicles, Journal of Bionic Engineering, 18(6) (2021) 1235–1254.

[2] R. Yousaf, A. Shahzad, M.M. Qadri, A. Javed, Recent advancements in flapping mechanism and wing design of micro aerial vehicles, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 235(19) (2021) 4425–4446.

[3] R. Wootton, Dragonfly flight: morphology, performance and behaviour, International Journal of Odonatology, 23(1) (2020) 31–39.

[4] R.J. Bomphrey, T. Nakata, P. Henningsson, H.T. Lin, Flight of the dragonflies and damselflies, Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 371(1704) (2016).

[5] C.P. Ellington, The aerodynamics of hovering insect flight. I. The quasi-steady analysis, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, 305(1122) (1984) 1–15.

[6] S.R. Jongerius, D. Lentink, Structural Analysis of a Dragonfly Wing, Experimental Mechanics, 50(9) (2010) 1323–1334.

[7] R. Wootton, The functional morphology of the wings of Odonata, Advances in odonatology, 5(1) (1991) 153–169.

[8] H. Rajabi, S. Gorb, How do dragonfly wings work? A brief guide to functional roles of wing structural components, International journal of odonatology, 23(1) (2020) 23–30.

[9] S.A. Combes, T.L. Daniel, Flexural stiffness in insect wings I. Scaling and the influence of wing venation, Journal of experimental biology, 206(17) (2003) 2979–2987.

[10] A. Khaheshi, S. Gorb, H. Rajabi, Triple Stiffness: A Bioinspired Strategy to Combine Load-Bearing, Durability, and Impact-Resistance, Advanced Science, 8(11) (2021) 2004338.

[11] A. Khaheshi, H.T. Tramsen, S.N. Gorb, H. Rajabi, Against the wind: a load-bearing, yet durable, kite inspired by insect wings, Materials & Design, 198 (2021)

production line: an industrial approach to the digitization of scientific collections, Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH), 8(1) (2015) 1–11.

[22] L.M. Page, B.J. MacFadden, J.A. Fortes, P.S. Soltis, G. Riccardi, Digitization of biodiversity collections reveals biggest data on biodiversity, BioScience, 65(9) (2015) 841–842.

[23] F.P. Kuhl, C.R. Giardina, Elliptic Fourier features of a closed contour, Computer graphics and image processing, 18(3) (1982) 236–258.

[24] N. Furuta, S. Ninomiya, N. Takahashi, H. Ohmori, U. Yasuo, Quantitative evaluation of soybean (Glycine max L. Merr.) leaflet shape by principal component scores based on elliptic Fourier descriptor, Japanese Journal of Breeding, 45(3) (1995) 315–320.

[25] F.J. Rohlf, J.W. Archie, A comparison of Fourier methods for the description of wing shape in mosquitoes (Diptera: Culicidae), Systematic Zoology, 33(3) (1984) 302–317.

[26] I.T. Jolliffe, J. Cadima, Principal component analysis: a review and recent developments, Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, 374(2065) (2016) 20150202.

[27] H. Abdi, L.J. Williams, Principal component analysis, Wiley interdisciplinary reviews: computational statistics, 2(4) (2010) 433–459.

[28] G.K. Taylor, Wings and flight, in: R.F. Chapman, S.J. Simpson, A.E. Douglas (Eds.) The Insects: Structure and Function, Cambridge University Press, Cambridge, 2012, pp. 193–232.

[29] H. Rajabi, N. Ghoroubi, M. Malaki, A. Darvizeh, S.N. Gorb, Basal Complex and Basal Venation of Odonata Wings: Structural Diversity and Potential Role in the Wing Deformation, PLoS One, 11(8) (2016) e0160610.

[30] H.-H. Ren, X.-S. Wang, Y.-L. Chen, X.-D. Li, Biomechanical behaviors of dragonfly wing: relationship between configuration and deformation, Chinese Physics B, 21(3) (2012) 034501.

[31] A. Saltelli, K. Chan, E.M. Scott, Sensitivity analysis: gauging the worth of scientific models, John Wiley & 109354.

[12] H. Rajabi, A. Shafiei, A. Darvizeh, J.-H. Dirks, E. Appel, S.N. Gorb, Effect of microstructure on the mechanical and damping behaviour of dragonfly wing veins, Royal Society open science, 3(2) (2016) 160006.

[13] A.B. Kesel, Aerodynamic characteristics of dragonfly wing sections compared with technical aerofoils, J Exp Biol, 203(Pt 20) (2000) 3125–3135.

[14] R. Åke Norberg, The pterostigma of insect wings an inertial regulator of wing pitch, Journal of comparative physiology, 81(1) (1972) 9–22.

[15] Y. Chen, K. Ma, R.J. Wood, Influence of wing morphological and inertial parameters on flapping flight performance, in: 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE, 2016, pp. 2329–2336.

[16] R.J. Wootton, R.C. Herbert, P.G. Young, K.E. Evans, Approaches to the structural modelling of insect wings, Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 358(1437) (2003) 1577–1587.

[17] H. Rajabi, R.J. Wootton, Chapter 6 - Wings, in: B. Moussian (Ed.) Insect Anatomy, Academic Press, 2026, pp. 197–216.

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

[19] A. Toofani, S. H. Eraghi, A. Basti, H. Rajabi, Complexity biomechanics: a case study of dragonfly wing design from constituting composite material to higher structural levels, Interface Focus, 14 (2024).

[20] S.H. Eraghi, A. Toofani, R.J.A. Guilani, S. Ramezanpour, N.N. Bijma, A. Sedaghat, A. Yasamandaryaei, S. Gorb, H. Rajabi, Basal complex: a smart wing component for automatic shape morphing, Communications Biology, 6(1) (2023) 853.

[21] M. Heerlien, J. Van Leusen, S. Schnörr, S. De Jong-Kole, N. Raes, K. Van Hulsen, The natural history

Sons, 2000.

[32] F. Johansson, T.K. Hedström, R.C. Anderson, P.K. Divakaran, F.K. Kakkassery, Wing shape differences along a migration route of the long-distance migrant Globe Skimmer Dragonfly Pantala flavescens, Journal of Tropical Ecology, 38(1) (2022) 17–24.

[33] R.J. Bomphrey, N.J. Lawson, N.J. Harding, G.K. Taylor, A.L. Thomas, The aerodynamics of Manduca sexta: digital particle image velocimetry analysis of the leading-edge vortex, Journal of Experimental Biology, 208(6) (2005) 1079–1094.

[34] C.P. Ellington, The aerodynamics of hovering insect flight. II. Morphological parameters, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, 305(1122) (1984) 17–40.

[35] R. Dudley, The biomechanics of insect flight: form, function, evolution, Princeton university press, 2002.

[36] R.J. Wootton, Functional morphology of insect wings, (1992).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

E. Bahramian, M. A. Tavoli, A. Basti, H. Rajabi, Bio-inspired Artificial Flapping Wings: Structural Optimization Based on Dragonfly Wing Morphological Patterns, Amirkabir J. Mech Eng., 58(1) (2026) 89-112.

DOI: 10.22060/mej.2026.25931.7982

این صفحه عمداً خالی است