

طراحی مکانیزم بال‌زن مشابه مرغ مگس‌خوار

محمدحسن جوارشکیان^۱، مهدی بهنام‌وشانی^۲، مرجان لکزیان^۳

۱. دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد javareshkian@ferdowsi.um.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، دانشگاه فردوسی مشهد mehdibehnamv@yahoo.com

۳. کارشناس زیست‌شناسی جانوری، دانشگاه فردوسی مشهد marjanlakzian@yahoo.com

خلاصه

پرنده‌های مرغ مگس‌خوار به علت داشتن مانور پذیری بالا همواره مورد توجه قرار گرفته است. ساخت یک نمونه از این نوع پرنده نیازمند رعایت مسائل آیرودینامیکی و سینماتیکی پرواز این پرنده است. در این مقاله ابتدا مکان هندسی زاویه حمله و ارتفاع بال لحظه‌ای یک مرغ مگس‌خوار را مورد بررسی قرار گرفته است؛ تا مقدمه‌ای برای ساخت یک نمونه پرنده قرار بگیرد. ابتدا از نمودارهای پرواز پرنده ارائه‌شده در مقالات، داده‌برداری صورت گرفت و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB به شکل یک معادله سینوسی برازش شد تا با مکانیزم‌های طراحی‌شده قابل مقایسه باشد. مکانیزم طراحی‌شده دارای سه متغیر است که با استفاده از نرم‌افزار EES معادله حرکتی این مکانیزم بدست آمد. سپس با درون‌یابی لاگرانژ تأثیر هر یک از متغیرها بر معادله حرکتی مکانیزم بدست آمد. در نهایت با استفاده از نرم‌افزار EES این معادلات حل و مقادیر متغیرها محاسبه شد.

کلمات کلیدی: آیرودینامیک، بال‌زن، درونیابی لاگرانژ، مرغ مگس‌خوار، مکانیزم

۴. مقدمه

پس از آنکه انسان پرواز را دریافت، به ساخت وسایل پرنده‌ای روی آورد که بتواند وی را به پرواز درآورد. بعد از سالیان متمادی و با سعی فراوان دانشمندان و مهندسان در سال ۱۹۰۳ اولین پرواز موفق برادران رایت^۱ به وقوع پیوست و انسان مدت کوتاهی می‌توانست طعم پرواز را بچشد. اکنون و با گذشت بیش از ۱۱۰ سال، سهم بالایی از حمل‌ونقل با وسایل پرنده انجام می‌گیرد و هر روز به میزان بار و مسافت پروازی آن‌ها افزوده می‌شود. امروزه از ریزپرنده‌ها برای امداد و نجات، ورود به نقاطی که برای انسان خطر دارد (مانند پرتوهای رادیواکتیو) و موارد امنیتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین دلیل علم مربوط به این ریزپرنده‌های کنترل‌شونده از دور در سال‌های اخیر پیشرفت گسترده‌ای در سطح جهان شاهد بوده است. وسایل ریزپرنده^۲ به وسایل پرنده‌ای گفته می‌شود که ابعادی کوچک‌تر از ۱۵ سانتی‌متر، سرعتی حدود ۱۰ متر بر ثانیه و عدد رینولدز مبنی بر طول کورد اصلی کمتر از ۱۵۰ هزار دارند. [۱] به دلیل وزن بالای باتری و دستگاه‌های کنترلی با فناوری کنونی، پرواز طولانی ممکن نیست. [۲]

¹ The first successful flight on December 17, 1903

² Micro Air Vehicles (MAVs)

طی ۸ سال اخیر ایده ساخت نوع جدیدی از وسایل نقلیه پرنده، یعنی ساخت پرنده‌ای با ابعاد و اندازه‌های پرندگان و حشرات واقعی و با تقلید از سیستم پرواز آن‌ها، جان گرفته است. این نوع پرنده به جای استفاده از یک ملخ، با بال زدن نیروی پیشرانش و برای خود را تأمین می‌کند. این روش به دلیل صدای بسیار پایین و شباهت زیاد با پرنده طبیعی، قابل تشخیص نیست. همچنین این نوع پرندگان قابلیت پرواز در جا را نیز دارند. لذا استفاده از این نوع پرنده در موارد امنیتی و جاسوسی بسیار کاربرد خواهد داشت. [۳] همه پرندگان، با بال زدن پرواز می‌کنند. با توجه به تحقیقات بیونیک و آیرودینامیک، ثابت شده است که پرواز پرنده‌های بال‌زن مزایای بیشتری نسبت به هر دو نوع پرواز با بال ثابت یا بال دوار دارد. این مزایا شامل راندمان بالاتر آیرودینامیکی [۴]، بار قابل حمل بزرگ‌تر، فرود راحت‌تر، ارتفاع بالاتر و سرعت معتدل است. به طور کلی، این پرنده در زمینه‌ی شناسایی نظامی به عنوان تجهیزات تجسسی و نظارتی، مانند یک سرباز به کار گرفته می‌شود. [۵] ساخت یک نمونه پرنده بال‌زن مشابه پرندگان واقعی و انجام آزمایش‌های تجربی، می‌تواند کمک بزرگی در پیشرفت علم و فناوری در این زمینه باشد. این امر مستلزم انجام تحقیقات بسیار بر مسائل آیرودینامیکی، تحلیل سازه‌ای، سینماتیک پرواز، الکترونیک، کنترل و پایداری است.

۵. از دیدگاه زیست‌شناسی

تأثیر پرندگان^۱ بر زندگی بشر امروز، بیشتر از دیگر جانداران است. حتی می‌توان اثر این جاندار را بر فرهنگ، ادبیات و معماری جوامع مختلف مشاهده کرد. در میان صحبت‌های عامه مردم، پرنده به‌عنوان موجودی دو پا و پردار توصیف می‌شود. این توضیح، مناسب و دقیق است و آن را برای هیچ حیوان دیگری نمی‌توان به کاربرد. پرندگان، مهره‌داران پروازگر و دارای بال هستند که مهم‌ترین صفت آن‌ها دارا بودن پر است. تعریف دیگری از پرندگان که توسط دکتر گادو^۲ ارائه شده، به این صورت است: «پرندگان، مهره‌دارانی تخم‌گذار، خونگرم و آمینوتیک هستند که اندام حرکتی جلویی در آن‌ها به صورت بال تغییر شکل یافته است. متاکارپ و انگشتان، پرها یا خامه پرها را نگاه می‌دارند و همچنین دارای یک مفصل بین مچ‌پایی بوده و تعداد انگشتان پاها در آن‌ها بیشتر از چهار عدد نیست که اولین آن‌ها، انگشت شصت است.» [۶]

پرندگان با بیش از ۹۷۰۰ گونه در سرتاسر کره زمین پراکنده شده‌اند و بعد از ماهی‌ها فراوان‌ترین مهره‌داران هستند. [۷] بزرگ‌ترین پرنده زنده بی‌پرواز، شترمرغ آفریقایی^۳ با ارتفاع ۲/۵ متر و ۱۵۰ کیلوگرم است. در میان پرندگان پروازگر نیز کرکس آمریکایی^۴ با پهنای بال ۳ متر بزرگ‌ترین به شمار می‌رود. البته پرندگان پیل‌سان در ماداگاسکار با ارتفاع ۳/۷۵ با وزن ۲۲۵ کیلوگرم به تازگی منقرض شده‌اند. از طرف دیگر، گونه هلنا مرغ مگس‌خوار بومی کشور کوبا، با طول ۴ سانتی‌متر و وزن ۱/۸ گرم، کوچک‌ترین پرنده است. [۶] پرندگان با وزن بیشتر از ۱۲ تا ۱۵ کیلوگرم نمی‌توانند بال‌های خود را آن‌قدر سریع حرکت بدهند که پرواز افقی داشته باشند. برای پرندگان سبک‌تر از ۱ گرم هم محدودیت دیگری وجود دارد. در حشرات این محدودیت با ماهیچه‌های فیبریلام^۵ حل شده است. [۸] محدودیت در استخوان‌های پرندگان هم در مرجع [۹] بررسی شده است.

¹ Birds

² Gado

³ Struthioncamelus

⁴ Gymnohypscalfornianus

⁵ Fibrillam

مرغ مگس‌خوار از خانواده Trochilidae ها از رده پرندگان^۱ از زیرشاخه مهره‌داران^۲ و از شاخه طناب‌داران [۷] است. [۶] نام این رده از کلمه قدیمی لاتین که برای پرندگان به کار می‌رفت، یعنی Avis گرفته شده است. مرغ مگس‌خوار معمولاً به‌عنوان کوچک‌ترین پرنده شناخته می‌شود. از این پرنده تاکنون ۳۲۰ گونه مشاهده شده است که بیش از ۲۰۰ گونه آن در آمریکای شمالی است. به دلیل کوچک بودن اندازه‌شان و نیز به دلیل وسعت این قاره و پراکندگی این پرنده در این قاره، اطلاعات جمعیتی اندکی در دسترس است [۱۰].

گونه رفوس^۳ (به معنی خرمایی‌رنگ) بانام علمی سلافسروس رفوس^۴ بومی غرب آمریکای شمالی است. [۱۰] این پرنده‌ها پره‌های زینتی نارنجی و خرمایی‌رنگ روی سر و بدن و سرخ‌رنگ در ناحیه گلو دارند. [۱۱] انواع نر و ماده آن در رنگ و ظاهر متفاوت هستند. جنس ماده آن سبزرنگ است. [۱۱] دم پهن و کوتاه و بادبزی این پرنده، امکان مانورهای سریع [۱۰] را به آن می‌دهد. [۱۲]

۶. از دیدگاه آیرودینامیک

ویژگی‌های ریزپرندگان به شرح زیر است: الف) عدد رینولدز پایین^۴ (۱۰^۴ تا ۱۰^۵) که دلیل شرایط نامطلوب آیرودینامیکی برای کنترل است. ب) ابعاد فیزیکی کوچک که به خاطر مسائلی همچون استحکام سازه‌ای، سرعت واماندگی کاهش یافته و اینرسی کم، معمولاً در آزمایش‌ها بزرگنمایی می‌شوند. ج) به خاطر اینرسی کم (۲.۷ تا ۱۰.۲ گرم) و سرعت پایین، این پرندگان به اغتشاشات جریان حساس هستند. [۱] در حالت پرواز درجا مرغ مگس‌خوار عدد رینولدز ۳۰۰۰ دارد. [۱۳]

بال زدن پرندگان در طی پرواز، ۴ الگوی کلی دارد: فلتر^۵، ریورس^۶، سوینگ^۷ و فولدینگ^۸. فلتر تغییر زاویه بال حول راستای حرکت پرنده است. ریورس چرخش حول راستای خط مرکزی بال^۹ است. سوینگ تغییر زاویه عمودی بال نسبت به بدنه است. فولدینگ خم شدن و صاف شدن بال در طول آن تعریف می‌شود. در پرندگان بزرگ‌تر، ریورس و سوینگ بسیار کم است. [۵] این اصطلاحات، برای بررسی حرکات ایرفویل ساده (شکل ۱) به صورت زیر هستند: حرکت پلانجینگ، حرکت انتقال بال، عمود بر راستای جریان است. حرکت پیچینگ، حرکت چرخشی بال حول خط راستای بال (این خط می‌تواند مرکز سطح، مرکز جرم یا مرکز آیرودینامیکی ایرفویل باشد) است.

¹ Aves

² Vertebrata

³ Rufous

⁴ Selasphorus rufus

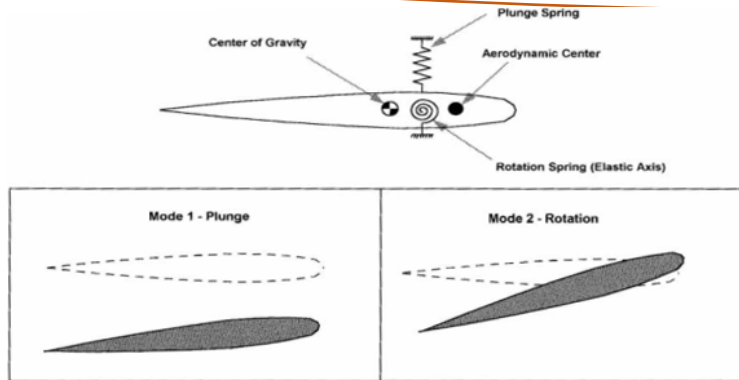
⁵ Flutter

⁶ Reverse

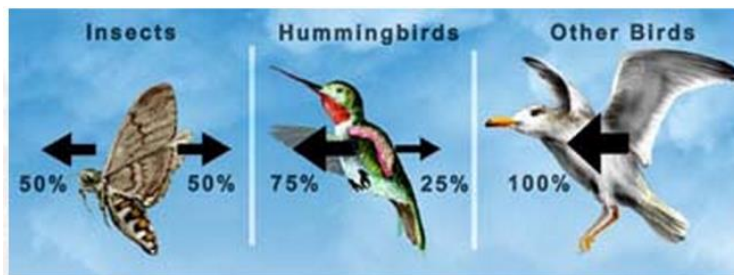
⁷ Swing

⁸ Folding

⁹ Wings Centre Line



شکل ۱: حرکات پیچینگ و پلانجینگ [۱۴]



شکل ۲: تفاوت پرواز حشرات، مرغ مگس‌خوار و پرندگان بزرگ‌تر [۱۵]

حالت‌های پروازی حشرات و پرندگان (شکل ۲)، شامل پرواز درجا^۱، پرواز روبه‌جلو^۲ و گردش^۳ است. آن‌ها در پرواز از یک حالت پروازی به حالت پروازی دیگر، به سرعت ویژگی‌های حرکتی خود، همچون زاویه‌ی^۴ حمله، میزان تغییر جهت از صفحه‌ی بال‌زنی فرکانس بال‌زدن و مسیر حرکتی نوک بال را تغییر می‌دهند. پرندگان، تنها در زمان بال‌زدن، تراست تولید می‌کنند. پرندگان برای افزایش سرعت، هم دامنه نوسانات را افزایش می‌دهند و هم صفحه بال‌زدن را بیشتر عمودی می‌کنند. [۸] علی‌رغم تفاوت‌های بسیار میان سیستم اسکلتی- ماهیچه‌ای حشرات و مرغ مگس‌خوار، این پرنده از سیستم‌های آیرودینامیکی مشابه حشرات استفاده می‌کنند. جریان پشت بال، گردابه‌های لبه حمله تولید شده در حرکت رو به پایین بال را گیر انداخته و مانند حشرات، از این روش کلیدی تولید برآ که مخصوص اعداد رینولد پایین است استفاده می‌کند. [۱۳]

در مرغ مگس‌خوار گونه رفوس ۷۵ درصد از نیروی برآ در Downstroke و ۲۵ درصد در Upstroke تولید می‌شود. [۱۳] سطح مقطع بال پرنده (مثلاً کبوتر) در طول بال، بسیار تغییر می‌کند (هم خط انحنا و هم ضخامت) [۸] اگر بال‌زدن به صورت متقارن^۵ [۱۳] انجام شود، در تمام طول زمان سیکل بال‌زدن به جز نقاط برگشت برآ تولید می‌شود. [۸] این عدم تقارن ممکن است به دلیل تفاوت در خط انحنای بال در این دو حرکت باشد. در روش بال‌زدن نامتقارن، درصد زیادی از نیروی برآ در پایین آمدن بال تولید می‌شود. [۱۳]

¹ Hover
² Forward Flight
³ Turn
⁴ Turn back
⁵ Symmetric

جدول ۱: خصوصیات مرغ مگس خوار [۲]

مشخصات	مرغ مگس خوار
وزن (گرم)	۴-۳
طول بال (mm)	۱۰۹
طول کورد بال (mm)	۱۲
مساحت یک بال (mm ²)	۶۰۰-۵۰۰
تعداد مفاصل بال	۱
فرکانس با زدن (هرتز)	۴۵-۴۰
نوع حرکت بال	سینوسی
ضریب طول بال (درصد)	۹۸
زمان پایین آمدن بال (درصد)	۴۷
دامنه بالا و پایین رفتن (درجه)	۱۱۰
صفحه بال زدن، نسبت به بدن	۶۰
زاویه بین بدنه و دم	۵۰
نسبت نیروی برآ تولیدشده در پایین آمدن بال (درصد)	۷۵
عدد رینولدز	۳۰۰۰

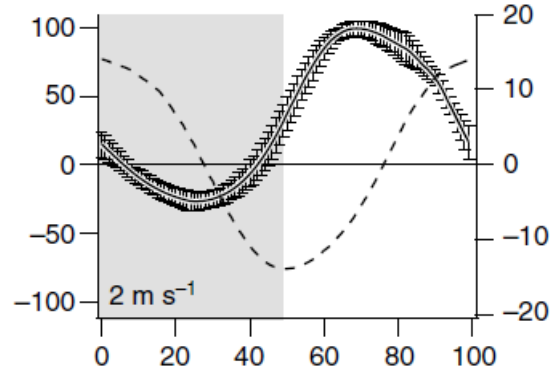
۷. از دیدگاه مکانیک

معادله بال زدن مرغ مگس خوار را در حالت کلی می‌توان به صورت زیر نشان داد:

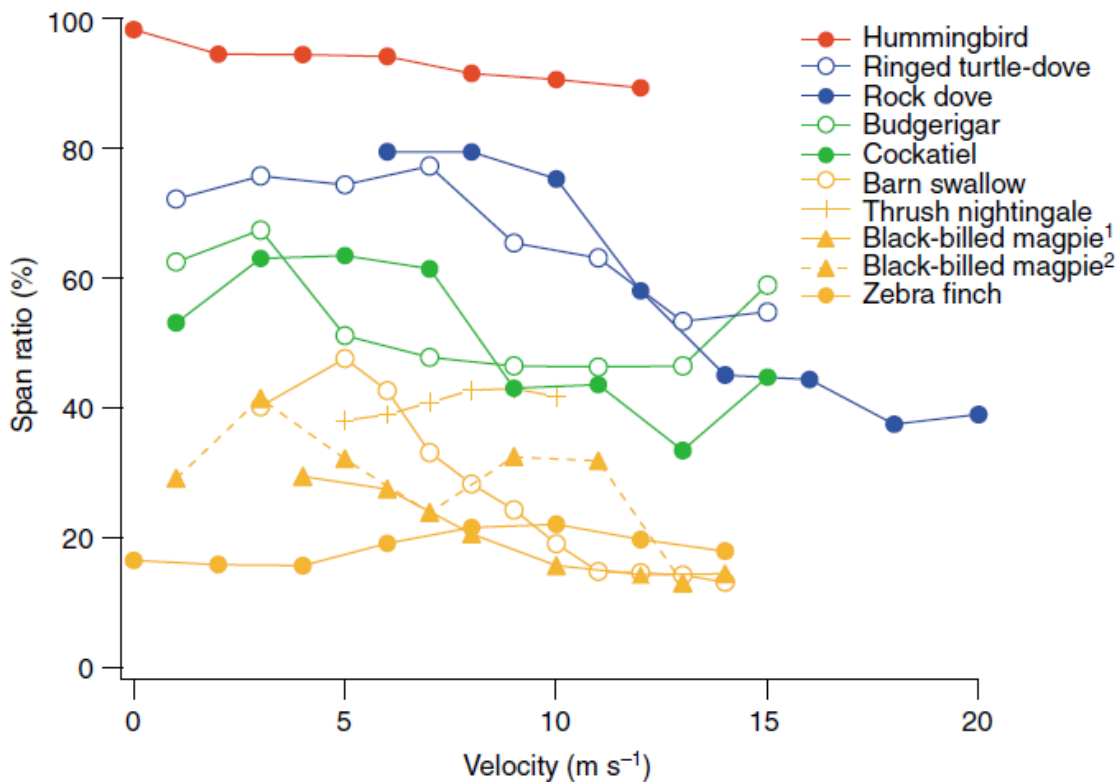
$$h(t) = h_{\alpha} \sin(2\pi ft + \varphi)$$

$$\alpha_c(t) = \alpha_0 + \alpha_a \sin(2\pi ft)$$

در این معادلات h_α دامنه ارتفاع بال، f فرکانس بال زدن، φ اختلاف فاز ارتفاع و زاویه، α_0 زاویه نصب اولیه و α_a دامنه زاویه کورد بال است. برای گونه رفوس این پرنده، مکان هندسی مچ و زاویه کورد، در سرعت‌های مختلف به دست آمد.

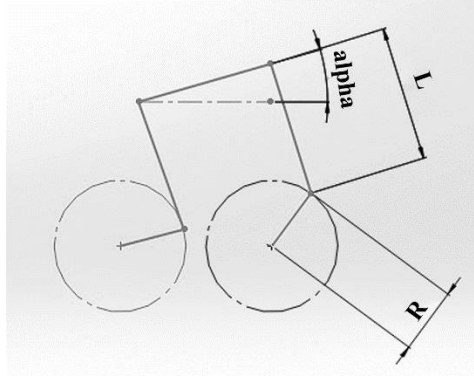


شکل ۳: مکان هندسی مچ و زاویه کورد، در سرعت ۲ متر بر ثانیه



شکل ۴: ضریب تغییر طول بال در یک سیکل بال زدن برای پرنده‌های مختلف

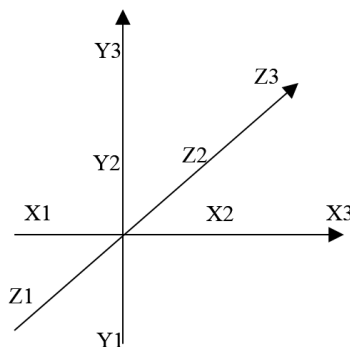
مکانیزم طراحی شده به صورت زیر است:



شکل ۵: مکانیزم بال‌زن طراحی شده مشابه مرغ مگس‌خوار

۸. چندجمله‌ای درونیاب لاگرانژ

نقاط جدولی، گره‌ها یا شناسه‌ها، نقاطی معلوم از تابع F هستند. طبق قضیه تقریب و ایرشتراس با داشتن اطلاعات گره‌ها می‌توان تابع F را با مقدار خطای ϵ توسط چندجمله‌ای درونیاب P تقریب زد. مقدار تابع P در یک یا چند نقطه بر تابع F منطبق است. می‌توان اثبات نمود تابع درونیاب P منحصر به فرد است.



شکل ۶: گره‌های درونیابی لاگرانژ سه‌بعدی

فرض می‌کنیم مشخصات n گره از یک تابع مشخص باشد، آنگاه می‌توان تابع $P(x) = a_1 + a_2x + \dots + a_{n+1}x^n$ نمود که تقریباً از این نقاط عبور نماید. با فرض خطی بودن درونیاب و با داشتن اطلاعات دو گره داریم:

$$\begin{cases} P(x) = A + Bx \\ P(x_1) = A + Bx_1 = f(x_1) \\ P(x_2) = A + Bx_2 = f(x_2) \end{cases}$$

برای حل این دستگاه داریم:

$$\begin{vmatrix} P(x) & 1 & x \\ F(x_1) & 1 & x_1 \\ F(x_2) & 1 & x_2 \end{vmatrix} = 0$$

با ساده کردن این معادله خواهیم داشت:

$$P(x)(x_2 - x_1) - F(x_1)(x_2 - x_1) + f(x_2)(x_1 - x_2)$$

$$P(x) = \left(\frac{x - x_2}{x_1 - x_2}\right)F(x_1) + \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1}\right)F(x_2)$$

جملات اساسی لاگرانژ را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$L_1(x) = \left(\frac{x - x_2}{x_1 - x_2}\right), \quad 2 \left(\frac{x - x_1}{x_2 - x_1}\right)$$

جملات اساسی لاگرانژ دارای خاصیت زیر هستند:

$$L_i(x_j) = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

با تعمیم حالت خطی چند جمله‌ای اساسی لاگرانژ در حالت کلی را این چنین تعریف می‌کنیم:

$$L_i(x) = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0)(x_i - x_1) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)} = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{(x - x_j)}{(x_i - x_j)}$$

و همچنین چند جمله‌ای درونیاب لاگرانژ را در حالت کلی به صورت زیر تعریف می‌کنیم. این چند جمله‌ای، خطی پیشنهاد می‌دهد که شامل نقاط گره باشد. [۱۶-۲۰]

$$P(x) = \sum_{i=0}^n L_i(x)F(x_i)$$

در اواخر قرن ۱۹ میلادی نیاز به درون‌یابی توابع چند بعدی منجر به ارائه مدل چند جمله‌ای چند متغیره لاگرانژ شد. این نوع چند جمله‌ای، یک رویه و یا یک فضا را پیشنهاد می‌دهد که شامل نقاط گره باشد. در این حالت چند جمله‌ای اساسی لاگرانژ به صورت زیر بیان می‌شود.

$$L_{i,j,k}(x, y, z) = L_i \times L_j \times L_k$$

و چند جمله‌ای درونیاب لاگرانژ به صورت زیر خواهد بود.

$$P(x) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n L_{i,j,k}(x, y, z) F(x_i, y_j, z_k)$$

تابع درونیاب لاگرانژ برای تقریب معادلات غیر پیچیده و یکنوا دارای دقت خوبی هستند. به همین منظور ابتدا برای بیش از ۱۸۰۰ گره، یکنوا بودن معادلات بررسی شد. تابع درونیاب لاگرانژ به صورت یک کد در نرم‌افزار MATLAB نوشته شد. در این کد سه متغیر شعاع لنگ، طول بازو و اختلاف فاز لبه حمله و لبه فرار برای ۲۷ نقطه در فضای سه بعدی درون‌یابی شد.

۹. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی آیرودینامیک، مکانیزم و سینماتیک پرواز پرندگان و حشرات در فاز بال زدن پرداخته شد و همچنین فعالیت‌های انجام‌شده در این زمینه مورد بحث قرار گرفت. از تحقیقات انجام‌شده این نتیجه حاصل شد که معادلات حاکم بر آیرودینامیک پایا برای محاسبه نیروهای برآ و پیشران پرنده‌های بال‌زن پرواز بال زدن کافی نیست. در زمینه کنترل و پایداری پرندگان، فعالیت چندان صورت نگرفته و بسیار نیازمند تحقیق و پژوهش است.

۱۰. مراجع

- [1] L. Y. Shyy W, Computational Investigation of Unsteady Low-Reynolds Number Aerodynamics for Micro Air Vehicles, Michigan Univ., Ann Arbor. Dept. of Aerospace Engineering, pp. 2007.
- [2] O. Breitenstein, Development of a Flapping Wing Mechanism, Thesis, Autonomous Systems Lab, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Autonomous Systems Lab, 2009.
- [3] W. Shyy, M. Berg, D. Ljungqvist, Flapping and flexible wings for biological and micro air vehicles, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 35, No. 5, pp. 455-505, 7//, 1999.
- [4] Walking, Swimming, and Flying, Popular Science Monthly, Vol. 4, 1874.
- [5] C. J. Liang B, Zhang L, Research on Birds Flapping-Wing Bionic Mechanism, Mechanical Engineering Research, Vol. 1, No. 1, 2011.
- [6] کوبال, پرندگان: سخن گستر, ۱۳۸۴.
- [7] م. هدایتی, آناتومی و فیزیولوژی کاربردی پرندگان: انتشارات ترقی, ۱۳۸۸.
- [8] L. Y. shyy W, Tang J, Liu H, Viieru D, Liu H, Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers, 2008.
- [9] S. J. Kirkpatrick, Scale effects on the stresses and safety factors in the wing bones of birds and bats, The Journal of Experimental Biology, Vol. 190, No. 1, pp. 195-215, May 1, 1994, 1994.
- [10] J. Alderfer, Complete Birds of North America: national geographic, 2006.
- [11] G. A. Harrison C, Birds of The World: Dorling Kindersley, 2000.
- [12] P. Christiansen, Birds: Amber books, 2009.
- [13] T. W. Warrick D R, Powers D R, Aerodynamics of the hovering hummingbird, Nature, Vol. 435, pp. 1094-1097, 23 June 2005, 2005.
- [14] I. A. Ramdenee D, Minea I S, Aeroelasticity of Wind Turbines Blades Using Numerical Simulation: InTech, 2012
- [15] <http://people.eku.edu/>, Accessed.
- [16] http://www.iust.ac.ir/files/math/numerical_analysis_1.pdf
- [17] W. C. Won Young Yang, Tae-Sang Chung, John Morris, APPLIED NUMERICAL METHODS USING MATLAB, Canada: A JOHN WILEY & SONS, INC, 2005.
- [18] D. Levy, Introduction to Numerical Analysis, Thesis, Department of Mathematics and Center for Scientific Computation and Mathematical Modeling (CSCAMM) University of Maryland, 2010.
- [19] R. J. T D Patzek, An introduction to computer programing for engineering and scientists, Third ed.: University of California, 2006.
- [20] G. Muntingh, Topics in Polynomial Interpolation Theory, Philosophie Doctor Thesis, Centre of Mathematics for Applications, Oslo, 2010.