



سیزدهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران
تهران، دانشگاه تهران، دانشکده علوم و فنون نوین
۱۳ تا ۱۵ اسفند ۱۳۹۲



Aero2014P331T107

بررسی عددی تاثیر زاویه صفحه بالزدن یک پرنده با افق بر نیروهای آیرودینامیکی و توان مصرفی

امیرحسین زرعی^۱، محمد حسن جوارشکیان^۲
دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مکانیک و هوافضا

بالزدن یکی از مکانیزم های عمده برای گاربری پهباد ها می باشد. با توجه به رشد روزافزون پهبادها و کاربرد های مختلف آنها برای ساخت و بهره برداری به شبیه سازی های آنها برای پیش بینی نیروها و گشتاورهای پروازی نیاز است. اغلب شبیه سازی های پیشین انجام شده برای بالزن ها بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی دو بعدی بوده است چرا که شبیه سازی سه بعدی هزینه محاسباتی را بسیار بالا می برد. در این پژوهش سه زاویه مختلف حرکتی بال سه بعدی یک کبوتر شامل حرکت بالا بردن و پایین آوردن بال (elevation-depression) که از آن به عنوان زاویه بالزدن یاد می شود-، به درون گرداندن و بیرون گرداندن (Pronation-supination) که به عنوان زاویه پیچش بال نیز شناخته می شود- و زاویه صفحه بال زدن با افق (Stroke plane angle) در سرعت صفر جریان آزاد و در فرکانس های بال زدن متفاوت، در نظر گرفته می شوند و اثر تغییرات زاویه صفحه بالزدن پرنده با افق مورد بررسی قرار می گیرد و با استفاده از روش تئوری المان تیغه ای (blade element theory) نیروهای افقی و عمودی وارده بر یک پرنده و توان مصرفی آن محاسبه می شود. مزیت اصلی روش تئوری المان تیغه ای در پایین بودن هزینه محاسباتی و در عین حال شبیه سازی سه بعدی آن است و با اینکه دقت آن از روشهای دینامیک سیالات محاسباتی پایین تر است اما با اضافه کردن بعضی از اثرات ناپایایی مانند اثرات جرم اضافه شده (added mass effect) ناشی از شتاب حرکتی بال، نتایج به نتایج تجربی نزدیک می شود و همچنین با استفاده از ترکیب تئوری المان تیغه ای با تئوری مومنوم اثرات فروووش (downwash) نیز محاسبه شده و حل دقیق تر می گردد.

واژه های کلیدی: مدل المان تیغه ای، تئوری مومنوم، بال کبوتر، زاویه بالزدن، زاویه صفحه بال زدن با افق، زاویه پیچش بال

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبرو، ۰۹۳۶۱۶۹۱۰۴۲، havafazal@gmail.com
۲- دانشیار

بررسی عددی تاثیر زاویه صفحه ی بالزدن یک پرنده با افق بر نیروهای آیرودینامیکی و توان مصرفی

امیرحسین زرعی¹، محمد حسن جوارشکیان²

دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده ی مهندسی، گروه مکانیک و هوافضا

چکیده

بالزدن یکی از مکانیزم های عمده برای کاربری پهنپای ها می باشد. با توجه به رشد روزافزون پهنپای ها و کاربرد های مختلف آنها برای ساخت و بهره برداری به شبیه سازی های آنها برای پیش بینی نیروها و گشتاور های پروازی نیاز است. اغلب شبیه سازی های پیشین انجام شده برای بالزن ها بر مبنای دینامیک سیالات محاسباتی دو بعدی بوده است چراکه شبیه سازی سه بعدی هزینه ی محاسباتی را بسیار بالا می برد. در این پژوهش سه زاویه مختلف حرکتی بال سه بعدی یک کبوتر شامل حرکتبالا بردن و پایین آوردن (elevation-depression) - که از آن به عنوان زاویه ی بالزدن یاد می شود -، به درون گرداندن و بیرون گرداندن (Pronation-supination) - که به عنوان زاویه ی پیشش بال نیز شناخته می شود - و زاویه ی صفحه ی بال زدن با افق (Stroke plane angle) در سرعت صفر جریان آزاد و در فرکانس های بال زدن متفاوت، در نظر گرفته می شوند و اثر تغییرات زاویه ی صفحه بالزدن پرنده با افق مورد بررسی قرار می گیرد و با استفاده از روش تئوری المان تیغه ای (blade element theory) نیروهای افقی و عمودی وارده بر یک پرنده و توان مصرفی آن محاسبه می شود. مزیت اصلی روش تئوری المان تیغه ای در پایین بودن هزینه ی محاسباتی و در عین حال شبیه سازی سه بعدی آن است و با اینکه دقت آن از روش های دینامیک سیالات محاسباتی پایین تر است اما با اضافه کردن بعضی از اثرات ناپایایی مانند اثرات جرم اضافه شده (added mass effect) ناشی از شتاب حرکتی بال، نتایج به نتایج تجربی نزدیک می شود و همچنین با استفاده از ترکیب تئوری المان تیغه ای با تئوری مومنوم اثرات فروزش (downwash) نیز محاسبه شده و حل دقیق تر می گردد.

واژه های کلیدی:

مدل المان تیغه ای، تئوری مومنوم، بال کبوتر، زاویه بالزدن، زاویه ی صفحه ی بال زدن با افق، زاویه ی پیشش بال

مقدمه

بال زدن عموماً به عنوان یک حالت بهینه برای ایجاد پیشرانندگی در وسایل پرنده ی کوچک در نظر گرفته می شود و این امر به این دلیل است که بالزن ها برای بیشتری در واحد دهانه ی (span) بال تولید می کنند که در بال های کوچک منجر به توانایی آنها در تولید برآی (lift) کافی برای غلبه بر وزن می گردد. از این رو طراحی وسایل پروازی کوچک می تواند تا حد زیادی از مشاهده ی پرندگان و حشرات کوچک بهرمنند گردد. نوع حرکت بال برای پرنده های بالزن بسیار مهم است و تغییر در نوع حرکت بال زدن بر روی نیروها و گشتاور های تولیدی اثر می گذارد و پرنده را برای انجام مانور های مختلف آماده می گرداند.

در شرایط پروازی مختلف نوع بال زدن متفاوت است؛ برای مثال در شرایط پروازی هاور (hover) که ساده ترین در نوع خود است نیاز به تولید

نیروی جلوبرنده نمی باشد و تولید نیروی برآ برابر وزن پرنده مورد نیاز است که مسلماً نوع بال زدن در این شرایط با پرواز رو به جلو (forward flight) که هم نیاز به نیروی پیشرانندگی دارد و هم نیروی برآ، تفاوت خواهد داشت. یانگ و لای [1] با بررسی دینامیک سیالات محاسباتی نشان دادند که حرکت فراز و فرود می تواند منجر به حداکثر بازده ی پیشرانندگی در یک عدد اشتروهل (strouhal number) مشخص گردد. هم چنین نشان دادند که حرکت پیچ (pitch) نیز بر بازده ی پیشرانندگی تاثیر می گذارد و به این دلیل عدد اشتروهل به تنهایی برای پیش بینی بازده ی ایرفویل هایی با حرکت پیچ و فراز و فرود مناسب نمی باشد. این نتیجه برای بررسی پرواز پرندگان که تمایل به برگرداندن بال های خود به داخل و سپس به بیرون را در شرایط پروازی کروژ دارند، بسیار مهم است [2]. در این پژوهش به بررسی تاثیر زاویه صفحه ی بالزدن پرنده با افق در کورس ضربان بال بر روی نیروهای افقی و عمودی تولیدی و توان مکانیکی لازم می پردازیم

استفاده از مدل المان تیغه

مدل مورد استفاده توسط وانگ [3] شرایط پروازی هاور را توسط مقایسه ای بین بازده های حرکت های مختلف بال زدن مورد بررسی قرار داد که بتواند شرایط حرکتی ای را پیدا نماید که در آن حداقل توان مصرفی منجر به تولید نیروهای آیرودینامیکی مناسب گردد. در مدل وانگ، بال دارای حرکات پیچ و فراز و فرود (plunge) می باشد و حرکات بال در راستای طول آن مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین اثر سرعت القایی (Induce velocity) لحاظ نشده است؛ بنابراین سرعت باد موضعی و توان مصرفی از حد اصلی خود کمتر پیش بینی می شوند. او مشاهده کرد که بهترین حرکت برای این شرایط پروازی همان حالت جابجایی پایای بال با زوایای حمله ی یکسان می باشد که بهترین نسبت برآ بر روی پسا (drag) را در پی دارد. دیگر حرکات نزدیک حالت بهینه ی پیش بینی شده توسط وانگ به صورت ضربان بال نا متقارن با زوایای حمله ی متفاوت در کورس رو به بالا و کورس رو به پایین بال زدن و راستای مختلف نسبت به جاذبه ی زمین می باشد. بنابراین مدل وانگ نشان می دهد که حالت های حرکتی بهینه گوناگونی به طور فیزیکی در پرواز هاور دست یافتنی است. خان و آگراوال [4] نیز با هدف کاربردی برای ریز پهنپای ها نیرو های آیرودینامیکی اعمالی بر روی بالزن ها را بدست آوردند. در پژوهش اشاره شده از تئوری المان تیغه برای بدست آوردن نیرو های آیرودینامیکی استفاده گردید. هم چنین فرض شد که نیرو های آیرودینامیکی ناشی از بال زدن عمود بر سطح بال می باشد و از این رو هیچ سند و نتیجه ی تجربی برای بررسی اعتبار نتایج بدست آمده وجود ندارد.

تئوری المان تیغه به عنوان یکی از روش های ابتدایی برای آنالیز آیرودینامیکی در نظر گرفته می شود. این روش ابزاری برای طراحی اولیه

$$P_{mechanical} = \omega_{x_2}(I_{xx}\dot{\omega}_{x_2} - T_{x_2}^a) \quad (4)$$

که ω_{x_2} سرعت زاویه ای بال حول محور x_2 و I_{xx} ممان اینرسی حول محور x_2 و $T_{x_2}^a$ گشتاور آیرودینامیکی تولیدی توسط بال حول محور x_2 می باشد.

سرعت باد موضعی بر روی ایرفویل از 3 مولفه تشکیل شده است: 1- سرعت جریان آزاد 2- سرعت حرکت بال 3- سرعت القایی. دو مورد اول مشخص اند اما پارسلو برای بدست آوردن سرعت القایی از تئوری مومنوم استفاده نمود [6]. انتخاب توابعی برای تغییرات ضرایب نیرو های برآ و پسا با تغییرات زاویه ی حمله در روند تئوری المان تیغه ضروری است. برمن و وانگ [14] از توابعی مثلثاتی برای مدل سازی تغییرات فوق استفاده نمودند:

$$c_l = A \sin 2(\alpha - \alpha_0) \quad (5)$$

$$c_d = B + C \cos 2(\alpha - \alpha_0) \quad (6)$$

که در معادلات فوق A، B، C پارامتر هایی برای تعریف حداکثر و حداقل ضرایب نیروها در ایرفویل بال پرند هستند که برای بال کبوتر از داده های تجربی به ترتیب برابر 1/6، 1/135 و 2/2 می باشند [6]. α زاویه حمله است - که در ادامه محاسبه می شود - و α_0 زاویه ی حمله ی برآ صفر می باشد. فرمول های فوق برای تمام المان های تیغه در نظر گرفته می شوند. در ادامه پس از بدست آوردن زاویه ی حمله که اثرات سرعت القایی در آن لحاظ شده است و همچنین محاسبه سرعت ها در مختصات هم راستا با باد موضعی هر المان، برآ و پسای مربوطه از فرمول های زیر محاسبه می گردد:

$$l^{(j)} = \frac{1}{2} \rho \|\mathbf{V}_4^{(j)}\|^2 s^{(j)} c_l^{(j)} \quad (7)$$

$$d^{(j)} = \frac{1}{2} \rho \|\mathbf{V}_4^{(j)}\|^2 s^{(j)} c_d^{(j)} \quad (8)$$

که در فرمول فوق $\mathbf{V}_4^{(j)}$ بردار سرعت محاسبه شده برای هر المان در دستگاه مختصات هم راستا با باد موضعی هر المان می باشد و اثرات سرعت القایی را در خود دارد. برآ و پسای فوق در محور مختصات باد محلی المان تیغه وارد می شود (همانطور که در شکل 2 نشان داده شده است). برای اینکه بتوانیم از روابط ارائه شده توسط برمن و وانگ که اثرات اضافه شدن جرمی ناشی از شتاب را در نظر گرفته اند، استفاده کنیم، باید نیرو های فوق را به دستگاه مختصات محلی المان تیغه انتقال دهیم. راستای این دو دستگاههای مختصات به اندازه ی زاویه ی حمله ی $\alpha^{(j)}$ برای هر المان تیغه بال انحراف دارد (مطابق شکل 2). این زاویه ی حمله توسط رابطه (9) محاسبه می شود:

$$\alpha^{(j)} = \tan^{-1} \left(\frac{-V_{z_4}^{(j)}}{V_{x_4}^{(j)}} \right) \quad (9)$$

اگر بردار های نیروی انتقال یافته توسط زاویه $\alpha^{(j)}$ را با $F_{x_4}^{(j)}$ و $F_{z_4}^{(j)}$ نشان دهیم، با استفاده از روابط ارائه شده توسط برمن و وانگ نیروهای تصحیح شده ی $F_{x_4}^{(j)}$ و $F_{z_4}^{(j)}$ به صورت زیر بدست می آیند:

$$F_{x_4}^{(j)} = F_{x_4}^{(j)} - \frac{1}{4} \rho \pi s^{(j)} V_{z_4}^{(j)} \dot{\alpha}^{(j)} \quad (10)$$

$$F_{z_4}^{(j)} = F_{z_4}^{(j)} + \frac{1}{4} \rho \pi s^{(j)} V_{x_4}^{(j)} \dot{\alpha}^{(j)} \quad (11)$$

با پیش بینی قوی نیروها و گشتاور های آیرودینامیکی و با هزینه ی محاسباتی کم می باشد. برمن و وانگ [5] از این روش برای پیش بینی شرایط پروازی هاور حشرات استفاده نمودند که نتایج آنها تطبیق خوبی با داده های تجربی موجود پیدا نمود. بر خلاف تئوری خط برآزا، تئوری المان تیغه سرعت القایی را در نظر نمی گیرد. برای محاسبه ی این سرعت القایی، تئوری المان تیغه غالباً با تئوری مومنوم که سرعت القایی را برای بارهای خاص آیرودینامیکی در دسترس فراهم می کند، ترکیب می گردد. مدل ترکیبی با عنوان تئوری مومنوم-المان تیغه برای شبیه سازی پرواز رو به جلو ی پرند استفاده شده است که تطبیق نتایج با داده های تجربی بسیار خوب است [6]. از این مدل می توان بدون هیچ گونه نیاز به تنظیمی برای شبیه سازی شرایط پروازی مختلف با هزینه ی محاسباتی پایین استفاده نمود. تئوری المان تیغه بال را به یک سری از ایرفویل های شبه دو بعدی تقسیم می نماید؛ بارهای آیرودینامیکی و گشتاور ها در نقاط کنترلی آیرودینامیکی قرار گرفته بر هر المان مستقل بر مبنای خصوصیات هندسی ایرفویل ها و زاویه ی حمله، محاسبه می شوند. نکته ی حائز اهمیت این است که حرکات بال طبق معادلاتی - که در ادامه ذکر می شوند - بر نقاط کنترلی در نظر گرفته شده اعمال می گردد. پس از آن سرعت حرکت بال محاسبه شده و با اضافه شدن سرعت جریان آزاد و سرعت القایی به آن در معادلات آتی استفاده می گردد نمونه ای از المان تیغه ی بال یک پرند در شکل 1 آورده شده است. پارسلو [6] در پژوهش خود ابتدا معادلات حرکت که پرواز مستقیم الخط یک پرند را پوشش می دهد، مطابق شکل 3 به صورت زیر در نظر می گیرد:

$$\bar{F}_{x_0} + mg \sin \beta - D_0 = m \alpha_{x_0} \quad (1)$$

$$\bar{F}_{z_0} - mg \cos \beta = 0 \quad (2)$$

که $\bar{F}_{x_0}$ و $\bar{F}_{z_0}$ در معادلات فوق نیرو های متوسط محوری و عمودی هستند و D_0 نیز نیروی پسای بدن می باشد و β نیز زاویه ی بین دستگاه مختصات زمینی و دستگاه مختصات هم راستا با باد موضعی می باشد. هم چنین m نیز جرم پرند در نظر گرفته می شود.

در معادلات اشاره شده بدست آوردن نیروها از اهمیت بالایی برخوردار است و پس از بررسی حرکات بال و به کار گیری مدل آیرودینامیکی محاسبه می شوند. حرکات بال نیز به سه بخش تقسیم می شود:

- 1- بالا بردن و پایین آوردن بال یا زاویه ی بالزدن - زاویه θ
- 2- تغییر دادن زاویه صفحه ی بال زدن (زاویه بدن پرند با افق) - زاویه γ
- 3- به درون گرداندن و به بیرون گرداندن بال یا همان زاویه پیچش بال - زاویه θ

در شکل های 4 و 5 محور هایی که حرکات فوق را در بر می گیرند مشاهده می شود. (x_1, y_1, z_1) محور های صفحه ی ضربان بال، (x_2, y_2, z_2) محور های در نظر گرفته شده برای حرکت بالا بردن و پایین آوردن بال و (x_3, y_3, z_3) زاویه ی حرکت بال می باشد که برای بررسی زاویه ی به درون گرداندن و به بیرون گرداندن بال استفاده می شود. با در نظر گرفتن محور ها و با فرض ثابت بودن صفحه ی ضربان بال در طول کورس بال زدن توان مصرفی به صورت زیر نوشته می شود:

$$P = P_{mechanical} \quad (3)$$

دو معادله ی اخیر با روش تکرار و حدس اولیه حل می شوند و نتیجه ی آن برای بدست آوردن بارهای آیرودینامیکی به مدل المان تیغه فرستاده می شود. در این پژوهش تعداد تکرار حلقه برای تصحیح سرعت القایی برابر 20 در نظر گرفته شده است چراکه در این تعداد تکرار تغییرات در اصلاح سرعت القایی محسوس نمی باشد.

در این پژوهش به بررسی اثرات تغییر زاویه ی صفحه ی بالزدن پرنده با افق در روند نیروهای عمودی و محوری و توان مصرفی خواهیم پرداخت. توابع حرکتی در نظر گرفته شده به صورت زیر می باشند:

$$\phi = \Phi \cos(\omega t) + \phi_0 \quad (18)$$

$$\theta = \Theta \cos(\omega t + \xi) + \theta_0 \quad (19)$$

که در روابط فوق ϕ زاویه ی بالا بردن و پایین آوردن بال در زمان Φ ، حداکثر زاویه ی بالا بردن و پایین آوردن بال، ω سرعت زاویه ای بال زدن، θ زاویه ی به درون گرداندن و به بیرون گرداندن بال یا همان زاویه ی پیچش بال در زمان Θ ، حداکثر زاویه ی پیچش بالو ξ تاخیر فاز مناسب زاویه پیچش بال می باشد. نشان داده می شود که به ازای $\xi = 0.25$ بیشترین نیرو های آیرودینامیکی تولید می شود [6]. نیز زاویه بدن پرنده نسبت به افق می باشد.

برای اعتبار سنجی روند تئوری توضیح داده شده نتایج این شبیه سازی در پارامتر های حرکتی خاصی برای پرواز هاور با نتایج تجربی و عددی پیشین مقایسه شده است [7], [8]. این نتایج برای پارامترهای حرکتی $\Phi = 75\text{deg}$ ، $\Theta = 55\text{deg}$ ، $\gamma = -90\text{deg}$ و $f=7[\text{Hz}]$ در پرواز هاور در جدول 1 در مقایسه با نتایج شبیه سازی انجام شده، آورده شده است.

جدول 1- مقایسه ی نیروهای عمودی و افقی در کارهای تجربی و عددی

پیشین و کار جاری		
نیروی عمودی (نیوتن)	نیروی افقی (نیوتن)	
برای دو بال	برای دو بال	
2/4024	0/001029	کار جاری
2/6	0	کارهای گذشته
0/1976	0/001029	خطا

همانگونه که مشاهده می شود اختلافات ناچیز است و می تواند به دلیل تولید نیروها توسط اندام پرنده و یا دم آن باشد که در نتایج تجربی دخیل است ولی در نتایج کار جاری لحاظ نشده است.

در این شبیه سازی تعداد المانهای روی بال برابر 40 در نظر گرفته می شود. همچنین تعداد گام زمانی در هر دوره ی کورس بالزدن برابر 100 در نظر گرفته می شود. پرواض است که با زیاد شدن دو عدد مذکور حل دقیق تر می گردد اما هزینه ی محاسباتی افزایش پیدا می نماید اما با این حال با انتخاب عددهایی بیشتر از حدود فوق، تغییر در جوابها محسوس نمی باشد. حال به بررسی تاثیرات تغییر زاویه ی صفحه ی بال زدن پرنده با افقبر نیروهای عمودی، نیروهای افقی و توان مکانیکی مورد نیاز می پردازیم. بدین صورت که زاویه γ را به ازای مقادیر 30، 60 و 90 درجه تغییر می دهیم و تغییرات را در فرکانس های بالزدن 4، 7، و 12 هرتز بررسی می نماییم. زوایای Φ و Θ ثابت و به ترتیب برابر 75 و 55 درجه در نظر گرفته می شوند. نتایج در شکل های 5 تا 13 آورده شده است. برای

هم چنین می توان با بدست آوردن بردار جابجایی هر المان و ضرب آن در بردار نیرو F_{y2}^a (که از تصویر کردن نیروها در راستای y_2 بدست می آید)، گشتاور تولیدی T_{x2}^a به وسیله آن نیرو را محاسبه نمود و با ضرب بردار گشتاور در بردار سرعت زاویه ای، توان مصرفی بدست خواهد آمد.

به کار گیری تئوری مومنوم

تئوری مومنوم می تواند روتور یک بالگرد و بال یک بالزن را به عنوان دیسک محرکی با ضخامت بسیار کم و با اختلاف فشار بین دو طرف دیسک مدل نماید. بدین صورت که نیروی آیرودینامیکی اعمال شده توسط دیسک محرک بر سیال پیرامون برابر با نیروی تولید شده توسط بالها و یا روتور بعلاوه ی افزایش انرژی در هوای ساکن می باشد. برای بالزن ها این دیسک محرک بر روی صفحه ی کورس بال زدن قرار دارد. با توجه به شکل 6 دبی جرمی عبوری از دیسک به صورت زیر نوشته می شود:

$$\dot{m} = \rho A_d U \quad (12)$$

که در فرمول فوق A_d سطح مرجع دیسک و U سرعت خالص طی عبور از دیسک می باشد. سطح مرجع دیسک برای سیستم بالزن سطح جاروب شده توسط بال طی بالزدن می باشد. این مساحت با استفاده از شعاع جاروب کردن بال برابر 96/9 میلی متر محاسبه می شود [3]. با توجه به شکل 6 سرعت خالص طی عبور از دیسک به صورت زیر محاسبه می شود:

$$U = \sqrt{(\|\mathbf{V}_\infty\| \cos \psi + V_{x1})^2 + (-\|\mathbf{V}_\infty\| \sin \psi + V_{z1})^2} \quad (13)$$

که ψ زاویه ی بین بردار سرعت جریان آزاد و محور عمود بر دیسک می باشد که V_{x1} و V_{z1} به ترتیب سرعت های القایی عمود بر صفحه ی دیسکو موازی با آن می باشند. با نوشتن بقای مومنوم در جهت عمود بر دیسک نیروی عمودی به شکل زیر محاسبه می شود:

$$\bar{F}_{x1} = \dot{m}(W_{x1} + \|\mathbf{V}_\infty\| \cos \psi) - \dot{m}\|\mathbf{V}_\infty\| \cos \psi = \dot{m}W_{x1} \quad (14)$$

که W_{x1} سرعت عمودی بلافاصله در پایین دست دیسک می باشد. حال با در نظر گرفتن بقای انرژی عمود بر دیسک، توان آیرودینامیکی در این جهت به صورت زیر بدست می آید:

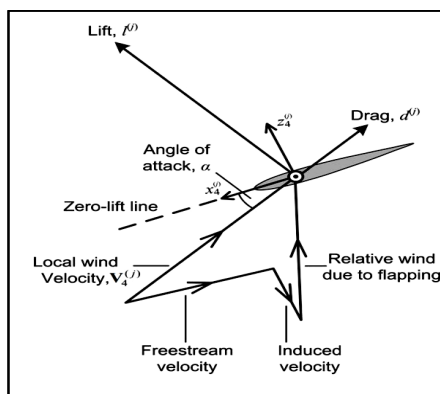
$$P_{x1} = \bar{F}_{x1} (V_{x1} + \|\mathbf{V}_\infty\| \cos \psi) = \frac{1}{2} (W_{x1} + \|\mathbf{V}_\infty\| \cos \psi)^2 - \frac{1}{2} \dot{m} \|\mathbf{V}_\infty\| \cos \psi^2 = \frac{1}{2} \dot{m} (W_{x1}^2 + 2W_{x1} \|\mathbf{V}_\infty\| \cos \psi) \quad (15)$$

نهایتا با ساده سازی بین دو معادله ی اخیر به رابطه ای برای سرعت القایی عمود بر دیسک بدست می آید:

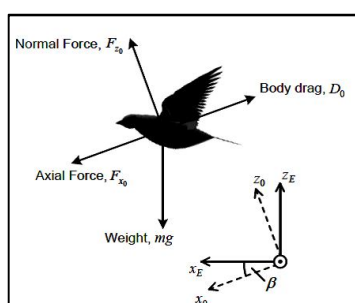
$$V_{x1} = \frac{\bar{F}_{x1}}{2\rho A \sqrt{(\|\mathbf{V}_\infty\| \cos \psi + V_{x1})^2 + (-\|\mathbf{V}_\infty\| \sin \psi + V_{z1})^2}} \quad (16)$$

به طور مشابه با نوشتن بقای مومنوم و انرژی در جهت موازی با دیسک به فرمولی برای سرعت القایی ایجاد در این جهت می رسم:

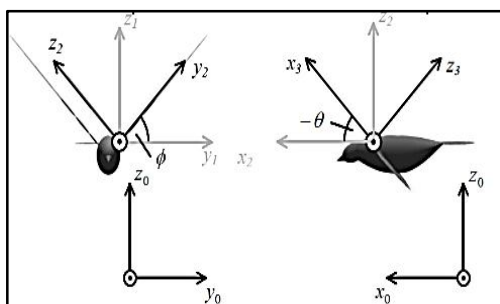
$$V_{z1} = \frac{\bar{F}_{z2}}{2\rho A \sqrt{(\|\mathbf{V}_\infty\| \cos \psi + V_{x1})^2 + (-\|\mathbf{V}_\infty\| \sin \psi + V_{z1})^2}} \quad (17)$$



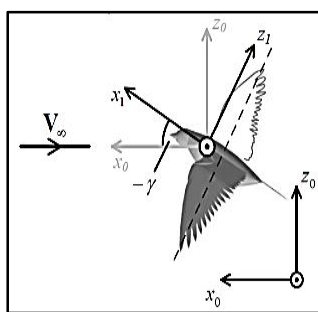
شکل 2: مقطعی از یک المان تیغه ی بال و نشان دادن راستای نیروی برآ و پسای محلی بر روی المان تیغه



شکل 3: نمودار نیروهای وارده بر پرنده



شکل 4: محورها تعریف شده ی هم راستا با حرکات مختلف در کورس بال زدن: سمت راست محور به درون گرداندن و به بیرون گرداندن بال را نشان می دهد- شکل وسط محور بالا رفتن و پایین آمدن بال را نشان می دهد



شکل 5: محور صفحه ی بال زدن و زاویه ی آن با افق را نشان می دهد.

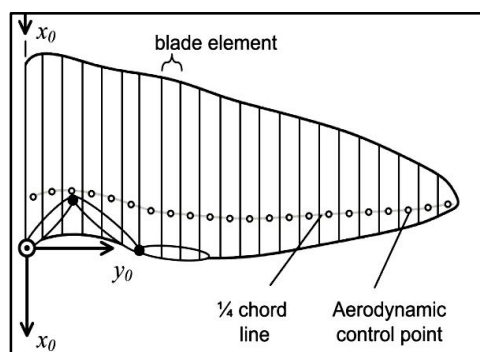
بررسی بهتر، اثر تغییر زاویه ی صفحه ی بال زدن پرنده با افق بر روی نیروی افقی و نیروی عمودی در شکل 14 آورده شده است.

نتیجه گیری

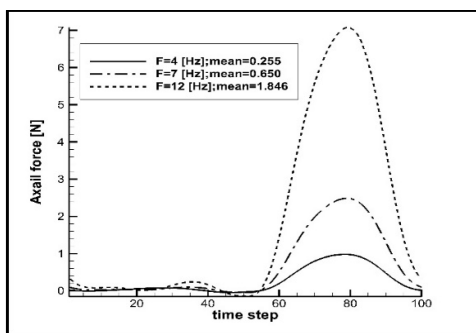
همانگونه در اشکال 5 تا 13 مشاهده می شود در یک زاویه ی صفحه ی بال زدن پرنده با افق مشخص با افزایش فرکانس ضربان بال متوسط نیروهای آیرودینامیکی و متوسط توان مکانیکی افزایش می یابند، البته باید توجه داشت که با افزایش فرکانس در حالت مذکور رشد نیروی متوسط آیرودینامیکی نسبت به رشد حداکثر نیروی آیرودینامیکی لحظه ای بسیار کمتر است و این امر در طراحی یک ریزپهپاد الهام گرفته شده از پرنده باید در نظر گرفته شود؛ زیرا باعث ایجاد شتاب های لحظه ای بالا و محدودیت های سازه ای می گردد. برای مثال در شکل 5 با افزایش فرکانس از 7 به 12 متوسط نیروی افقی تولیدی 2/193 نیوتن افزایش دارد و این در حالی است که حداکثر نیروی آیرودینامیکی لحظه ای دارای رشدی نزدیک 6 نیوتن می باشد.

با افزایش زاویه ی صفحه ی بال زدن پرنده با افق، متوسط نیروی افقی آیرودینامیکی کاهش و نیروی عمودی افزایش می یابد و همانطور که در شکل 14 نشان داده می شود در زوایای صفحه ی بال زدن پرنده با افق زیاد نیروی عمودی زیاد است و نیروی افقی به سمت صفر میل می نماید. لذا در زوایای بالا استعداد پرنده برای پرواز هاور ملموس است. در شکل 15 نیز نشان داده می شود که توان مکانیکی مصرفی با تغییر زاویه ی صفحه ی بال زدن پرنده با افق، تغییر زیادی ندارد و این امر به این دلیل است که در شبیه سازی انجام شده بال مجزا بررسی شده و حرکت بال تأثیری در تغییر زاویه ی مذکور ندارد، البته در واقعیت نیز اثرات دم پرنده در تغییر زاویه ی اشاره شده نقش اصلی را ایفا می نماید.

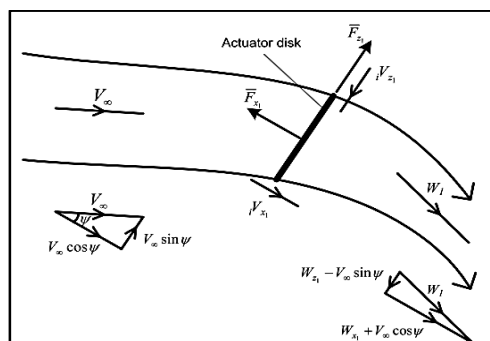
به طور کلی در این پژوهش دریافته ایم که می توان با استفاده از روش هایی با هزینه ی محاسباتی پایین تر مانند روش المان تیغه ای به همراه تصحیحات مناسبی از جمله اضافه کردن تئوری مومنوم برای بدست آوردن سرعت القایی و اثرات فروزش و همچنین با اضافه کردن اثرات جرم اضافه شده، به شبیه سازی اولیه مناسبی برای بال های سه بعدی دست پیدا نماییم.



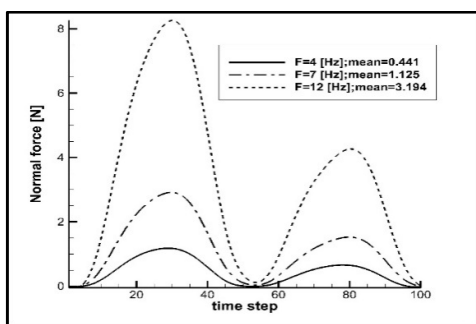
شکل 1: نمونه ای از مدل سازی بال یک پرنده با مدل المان تیغه



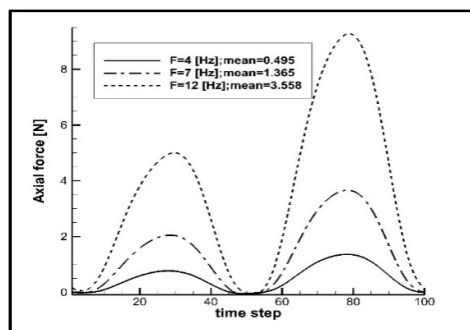
شکل 8: نمودار نیروی افقی تولیدی بر حسب گام های زمانی در فرکانس های متفاوت برای $\gamma = 60 \text{ deg}$



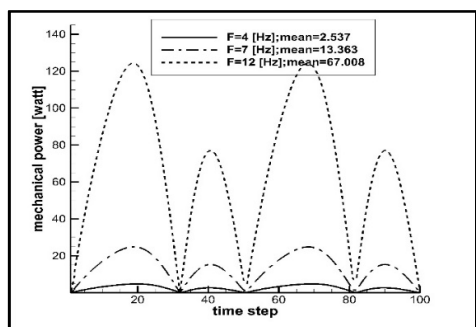
شکل 6: مدل تئوری مومنوم



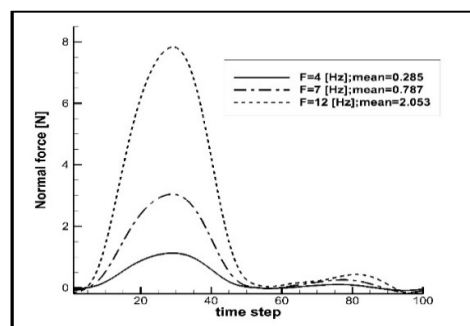
شکل 9: نمودار نیروی عمودی تولیدی بر حسب گام های زمانی در فرکانس های متفاوت برای $\gamma = 60 \text{ deg}$



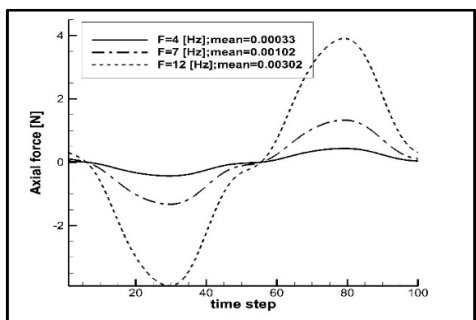
شکل 5: نمودار نیروی افقی تولیدی بر حسب گام های زمانی در فرکانس های متفاوت برای $\gamma = 30 \text{ deg}$



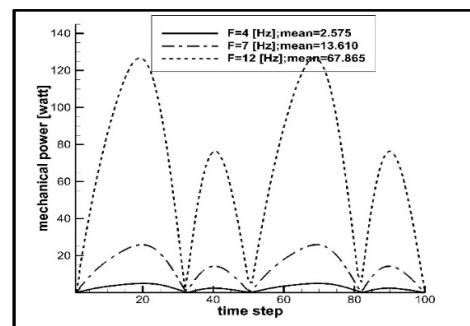
شکل 10: نمودار توان مکانیکی لازم بر حسب گام های زمانی در فرکانس های متفاوت برای $\gamma = 60 \text{ deg}$



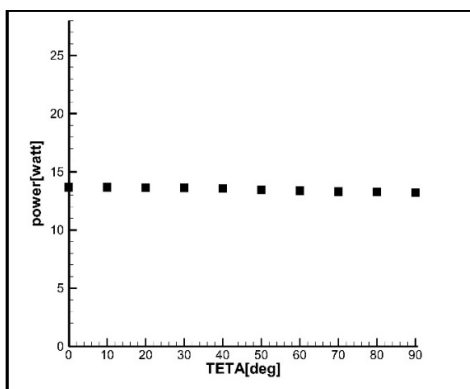
شکل 6: نمودار نیروی عمودی تولیدی بر حسب گام های زمانی در فرکانس های متفاوت برای $\gamma = 30 \text{ deg}$



شکل 11: نمودار نیروی افقی تولیدی بر حسب گام های زمانی در فرکانس های متفاوت برای $\gamma = 90 \text{ deg}$



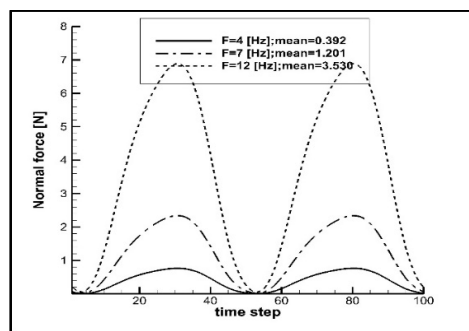
شکل 7: نمودار توان مکانیکی لازم بر حسب گام های زمانی در فرکانس های متفاوت برای $\gamma = 30 \text{ deg}$



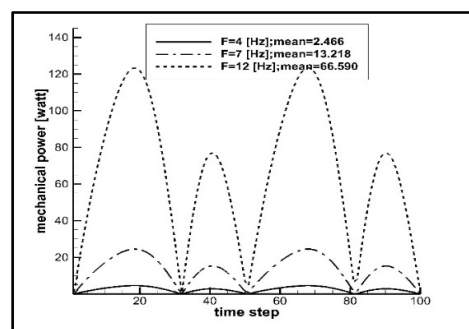
شکل 15: نمودار متوسط توان مکانیکی لازم بر حسب زاویه ی صفحه بالزدن با افق در فرکانس 7 هرتز

مراجع

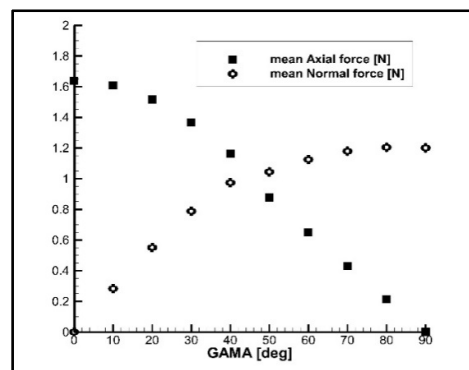
1. J. Young , J. C. S. Lai, Mechanisms Influencing the Efficiency of Oscillating Airfoil Propulsion, *AIAA Journal*, vol. 45, no. 7, 2007, pp. 1695–1702.
2. D. B. Baier, F. A. Jenkins, K. P. Dial, Scientific Rotoscoping: A Morphology-Based Method of 3-D Motion Analysis and Visualization, *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology*, vol. 313, 2010, pp. 244–261.
3. Z. J. Wang, Aerodynamic efficiency of flapping flight: analysis of a two-stroke model, *The Journal of experimental biology*, v. 211, 2008, pp. 234–238
4. Z. A. Khan, S. K. Agrawal, Optimal Hovering Kinematics of Flapping Wings for Micro Air Vehicles, *AIAA*, vol. 49, no. 2, 2011, pp. 257–268.
5. G. J. Berman, Z. J. Wang, Energy-minimizing kinematics in hovering insect flight, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 582, 2007, pp. 153–168.
6. B. Parslew, W. J. Crowther, Simulating avian wingbeat kinematics, *Journal of Biomechanics*, vol. 43, n. 16, 2010, pp. 3191–3198
7. B. W. Tobalske, K. Dial, Flight kinematics of black-billed magpies and pigeons over a wide range of speeds, *The Journal of Experimental Biology*, vol. 199, pp. 263–280, 1996, pp. 263–280.
8. C. J. Pennycuik, Power requirements for horizontal flight in the pigeon *Columba livia*, *The Journal of Experimental Biology*, vol. 49, 1968, pp. 527–555.



شکل 12: نمودار نیروی عمودی تولیدی بر حسب گام های زمانی در فرکانس های متفاوت برای $\gamma = 90 \text{ deg}$



شکل 13: نمودار توان مکانیکی لازم بر حسب گام های زمانی در فرکانس های متفاوت برای $\gamma = 90 \text{ deg}$



شکل 14: نمودار متوسط نیروهای افقی و عمودی بر حسب زاویه ی صفحه بالزدن با افق در فرکانس 7 هرتز