دانشکده مهندسی
گروه مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

بررسی تجربی شکل بال بال‌زن‌ها و پارامترهای حرکتی آن بر روی عملکرد پروازی ایستا

نگارنده:

زهراسادات علوی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی هوافضا گرایش آیرودینامیک

استاد راهنما:

دکتر محمدحسن جوارشکیان

استاد مشاور:

دکتر عباس ابراهیمی

دی‌ماه ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی
گروه مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

بررسی تجربی شکل بال بال‌زن‌ها و پارامترهای حرکتی آن بر روی عملکرد پروازی ایستا

نگارنده:

زهراسادات علوی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی هوافضا گرایش آیرودینامیک

استاد راهنما:

دکتر محمدحسن جوارشکیان

استاد مشاور:

دکتر عباس ابراهیمی

دی‌ماه ۱۳۹۲

تائیدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

دانشجو: زهراسادات علوی امضاء تاریخ

استاد راهنما: دکتر محمدحسن جوارشکیان امضاء تاریخ

استاد مشاور: دکتر عباس ابراهیمی امضاء تاریخ

بسمه تعالی

دانشگاه فردوسی مشهد

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

جلسه دفاع از پایان نامه خانم زهراسادات علوی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی هوافضا** گرایش آیرودینامیک در ساعت ۱۰ روز **۱۳۹۲/۱۰/۲** در محل **کلاس ۲۱۶** دانشکده مهندسی با حضور امضا کنندگان ذیل تشکیل گردید. پس از بررسی های لازم، هیأت داوران پایان نامه نامبرده را با نمره به عدد ۲۰ به حروف بیست و با **درجه عالی** مورد تأیید قرار داد.

عنوان رساله

بررسی تجربی شکل بال بالزن ها و پارامترهای حرکتی آن بر روی عملکرد پروازی ایستا

هیئت داوران امضا

- **داور: دکتر محمود پسندیده‌فرد**

  دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **داور و نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر محمدجواد مغربی**

  استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **استاد راهنما: دکتر محمدحسن جوارشکیان**

  دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **استاد مشاور: دکتر عباس ابراهیمی**

  استادیار گروه هوافضا دانشگاه صنعتی شریف

- **مدیر گروه: دکتر مسعود طهانی**

  استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

تقدیر و تشکر

در ابتدا سعی و تلاشم در این مسیر را، توفیقی از جانب خداوند متعال می‌دانم و الطاف بی‌پایانش را شکرگزار خواهم بود. در اینجا لازم است از کلیه‌ی اساتید و دوستانی که به نوعی مشوق و راهنمای اینجانب بوده‌اند، تشکر و قدردانی نمایم. به ویژه از جناب آقای دکتر جوارشکیان که در این مدت، در علم و ادب، بسیار از ایشان آموختم و با حمایت‌های بی‌دریغشان در این مسیر یاری‌ام نمودند و نیز از جناب آقای دکتر عباس ابراهیمی که بنده را در طول این پروژه صمیمانه پشتیبانی کردند، بسیار متشکرم. از جناب آقای حسن‌زاده در بخش شبیه‌سازی نرم‌افزاری و راه‌اندازی سامانه‌ی داده‌برداری، از جناب آقای حسن‌پور در بخش ساخت دستگاه اندازه‌گیری و مکانیزم بال‌زن و نیز از جناب آقای یوسفی به واسطه همراهی و همکاری در بخش ساخت، کمال تشکر را دارم. هم‌چنین از اساتید محترم گروه هوافضا، جناب آقایان دکتر پسندیده فرد و روحی گل‌خطمی که در این دوره، با آموزش و راهنمایی‌های ارزشمندشان، در کنار بنده بودند، بسیار سپاسگزار و ممنونم. به علاوه قدردان محبت‌های همسر عزیزم هستم، که در تمام طول این پروژه بنده را همراهی کردند.

در نهایت این پایان‌نامه را به پدر و مادر عزیزم برای حضور پرمهر و گذشت و فداکاریشان در تمام لحظه-های زندگیم، تقدیم می‌دارم.

چکیده فارسی

بسمه تعالی

مشخصات پایان نامه تحصیلی مقطع کارشناسی ارشد

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان پایان نامه: بررسی تجربی شکل بال بال‌زن‌ها و پارامترهای حرکتی آن بر روی عملکرد پروازی ایستا

نام نویسنده: زهراسادات علوی

نام استاد راهنما: دکتر محمدحسن جوارشکیان

نام استاد مشاور: دکتر عباس ابراهیمی

دانشکده: مهندسی	**گروه:** مکانیک	**رشته تحصیلی:** مهندسی هوافضا
تاریخ تصویب:		**تاریخ دفاع:** ۱۳۹۲/۱۱/۰۲
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ● **دکتری** ○		**تعداد صفحات:** ۱۰۴

چکیده پایان نامه:

پرنده‌های بال‌زن مشابه پرنده‌ها و حشرات طبیعی، طراحی و مدل‌سازی می‌شوند. برای ساخت این پرنده‌های بال‌زن، اولین موضوعی که مورد توجه قرار می‌گیرد، آنالیز و بررسی عملکرد پروازی و آیرودینامیکی آن‌هاست. در این تحقیق، هدف مطالعه‌ی تجربی پارامترهای مؤثر در نیروی پیشران ناشی از حرکت بال‌زنی نظیر فرکانس و کورس بال‌زنی، هندسه‌ی بال و انعطاف‌پذیری آن است. به این جهت، یک چیدمان اندازه‌گیری شامل مکانیزم بال‌زن از نوع یک لنگ و یک لینک و نیروسنج یک محوره طراحی و ساخته شد. سپس با طراحی آزمایش‌های متفاوت، به بررسی پارامترهای حرکتی بال بر عملکرد پروازی ایستای آن پرداخته شد. از مهم‌ترین نتایج این تحقیق می‌توان به این موارد زیر اشاره کرد: نیروی پیشران تولیدی و توان مصرفی بال‌زن با توان دوم فرکانس بال‌زنی متناسبند. نیروی پیشران تولیدی با مساحت بال نسبت خطی داشته و مستقل از نسبت منظری سطح بال تغییر می‌کند. بال‌های انعطاف‌پذیر در کورس‌های بال‌زنی پایین تا حدود ۵۰ درجه عملکرد آیرودینامیکی بهتری دارند ولی برای کورس‌های بال‌زنی بالاتر، بال با انعطاف‌پذیری کمتر، مناسب‌تر است و نیز فرکانس بال‌زنی، نرخ زیاد شدن نیروی پیشران را افزایش می‌دهد.

کلید واژه:

۱. عملکرد پروازی
۲. پرواز ایستا
۳. نیروی پیشران
۴. حرکت بال‌زنی
۵. کورس بال‌زنی
۶. عملکرد آیرودینامیکی

امضای استاد راهنما:.....

تاریخ:.....

فهرست

عنوان **صفحه**

۱ فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ اصول فیزیکی پرواز ۷

۱-۳ تولید نیروی برآ و پیشران ۹

۱-۴ اهمیت استفاده از بال‌زن‌ها ۱۸

۱-۵ هدف پایان‌نامه ۱۹

۲ فصل دوم: طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری

۲-۱ مقدمه ۲۲

۲-۱-۱ انواع مکانیزم‌های بال‌زنی ۲۳

۲-۱-۲ انواع چیدمان‌های اندازه‌گیری ۲۷

۲-۲ طراحی مکانیزم ساخته شده ۳۰

۲-۲-۱ بدنه ۳۴

۲-۲-۲ موتور ۳۵

۲-۲-۳ مکانیزم بال‌زن ۳۵

۲-۲-۴ بال ۳۹

۲-۲-۵ نیروسنج ۴۰

۲-۲-۶ تقویت‌کننده ۴۲

۲-۲-۷ کارت داده‌برداری ۴۲

۲-۲-۸ نرم‌افزار پردازش داده‌ها ۴۳
۲-۲-۹ پایه ۴۵
۳ فصل سوم: نتایج و بررسی آنها
۳-۱ مقدمه ۴۸
۳-۲ بررسی تجربی تأثیر نسبت‌منظری بال ۴۹
۳-۲-۱ بال‌های مورد بررسی ۴۹
۳-۲-۲ نتایج ۵۰
۳-۳ بررسی تجربی تأثیر انعطاف‌پذیری بال پوسته‌ای ۵۶
۳-۳-۱ بال‌های مورد بررسی ۵۷
۳-۳-۲ نتایج ۵۸
۳-۴ بررسی تجربی تأثیر کورس بال‌زنی ۶۳
۳-۴-۱ بال‌های مورد بررسی ۶۴
۳-۴-۲ نتایج ۶۵
۳-۵ عدم قطعیت [۵۲] ۷۱
۳-۵-۱ مقدمه ۷۱
۳-۵-۲ منابع خطا و عدم قطعیت ۷۲
۳-۵-۳ منابع عدم قطعیت ۷۲
۳-۵-۴ مراحل ارزیابی عدم قطعیت: ۷۳
۳-۵-۵ عدم قطعیت استاندارد ۷۳
۳-۵-۶ عدم قطعیت ترکیبی استاندارد ۷۵
۳-۵-۷ فاکتور همپوشانی K ۷۵
۳-۵-۸ محاسبه عدم قطعیت‌های مربوط به آزمایش ۷۵

۳-۵-۹ نتایج نمودارها با عدم قطعیت ۷۷

۴ فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۴-۱ نتیجه‌گیری ۸۲

۴-۲ ارائه پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده ۸۴

منابع ۸۵

پیوست۱: نقشه‌های اجزای دستگاه اندازه‌گیری ۸۹

پیوست۲: کاتالوگ ابزار اندازه‌گیری ۹۸

نمادها			
نماد	**نام فارسی**	**نام انگلیسی**	**واحد**
T	نیروی پیشران	Thrust	*mN*
P	توان مصرفی	Power	*w*
f	فرکانس	frequency	*Hz*
u	عدم قطعیت	uncertainty	---
علائم یونانی			
نماد	**نام فارسی**	**نام انگلیسی**	**واحد**
زیرنویس ها			
نماد	**نام فارسی**	**نام انگلیسی**	**واحد**
A	نوع A	---	---
B	نوع B	---	---

فصل اول: مقدمه

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه

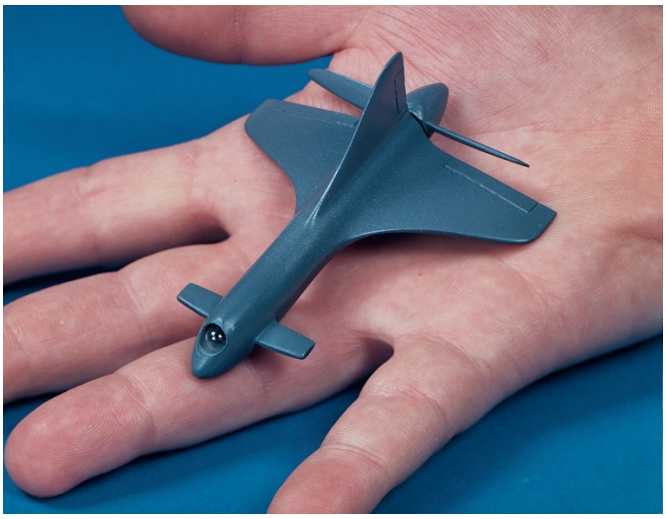
پدیده پرواز پرندگان و حشرات قرن‌های بسیاری است که توجه انسان‌ها را به خود جلب کرده است. طبق مشاهدات دیال[1] [۱] به طور تقریبی یک میلیون گروه از حشرات پرنده و ۱۳۰۰۰ گروه خون‌گرم و مهره‌دار مانند پرندگان و پستانداران، ۹۰۰۰ پرنده و ۱۰۰۰ خفاش همگی پرواز می‌کنند. چرا که برای این حیوانات پرواز کردن مقرون به صرفه‌تر از راه رفتن، تند رفتن یا دویدن روی زمین است [۲]. با در نظر گرفتن مانور بدن به صورت کارآمد درفضا، پرنده‌ها یکی از بهترین روش‌های حرکت در طبیعت را انجام می‌دهند. با این که تکنولوژی هوانوردی در ۱۰۰ سال گذشته به سرعت پیشرفت کرده است، اما سیستم‌های پرواز طبیعی که در مدت ۱۵۰ میلیون سال پرورش یافته هنوز چشم‌گیر و قابل ملاحظه است [۱].

[1] Dial

در بیست و پنج سال گذشته، علاقه به وسایل مصنوعی کوچک هوایی[1] (UAVs) به صورت گسترده‌ای افزایش یافته است. آیرودینامیک به کار رفته در این وسایل پرنده با توجه به محیطی که برای کار کردن در آن ساخته می‌شوند متفاوت است؛ لذا در یک شناخت اولیه، می‌توان آن‌ها را به صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- پرنده‌های بال‌ثابت

در این پرنده‌ها، بال‌ها ثابت بوده و هیچ‌گونه حرکتی ندارند. موتور ملخی نصب شده بر روی این پرنده‌ها، نیروی پیشران و در نتیجه برآی مورد نیاز آن‌ها را تولید می‌کند. ظاهر این پرنده‌ها مشابه هواپیماهای سرنشین‌دار است جز آن که اندازه‌ی آن‌ها بسیار کوچک‌تر است. شکل ۱- ۱ و شکل ۱- ۲ دو نمونه از این پرنده‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۱- ۱ نمونه‌ای از یک پرنده بال‌ثابت ساخته شده در آزمایشگاه لینکلن با طول بال ۷/۴ سانتی‌متر [۳]

[1] Small unmanned aerial vehicles

شکل ۱- ۲ یک نمونه پرنده بال‌ثابت با ملخ نصب شده در میانه‌ی بدنه [۴]

۲- پرنده‌های بال متحرک

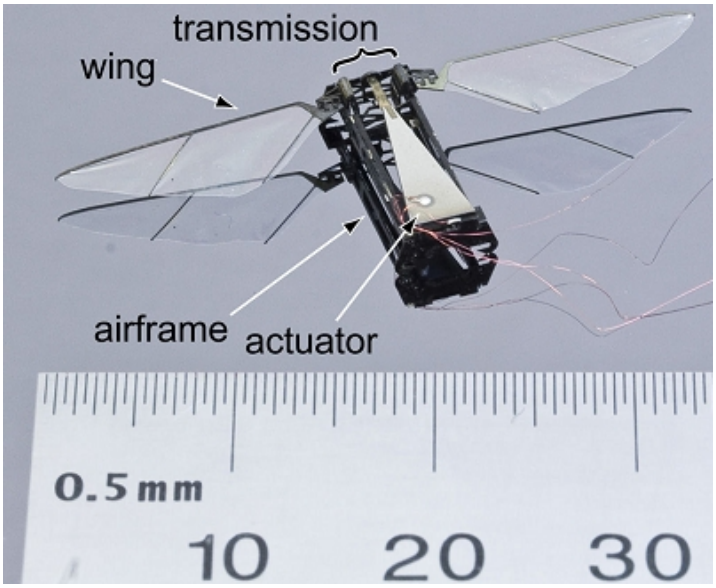
این نوع پرنده‌ها خود به دو نوع پرنده‌های بال‌زن و پرنده‌های بال‌چرخان تقسیم می‌شوند.

پرنده‌های بال‌چرخان، مانند هلی‌کوپترها، نیروی برآ و پیشران خود را با استفاده از موتورهای ملخی به دست می‌آورند. در این میان، مشابهت پرنده‌های بال‌زن با پرنده‌های واقعی بسیار بیشتر است؛ زیرا این نوع مانند پرندگان و حشرات، نیروی برآ و پیشران مورد نیازشان را با استفاده از بال زدن تولید می-کنند.

شکل ۱- ۳ بالزن چهارباله دلفی۲ در حال پرواز [۵]

شکل ۱- ۴ یک نمونه پرنده بالزن دوباله ساخته شده توسط کرونیستر[۱] [۶]

[1] Chronister



شکل ۱- ۵ میکرو بالزن بن فینیو[1] [۷]

شکل ۱- ۶ یک نمونه پرنده بال چرخان با طول ۳۵ سانتیمتر [۸]

برای پرواز در سرعت‌های کم و با ابعاد کوچک، هواپیماهای بال‌ثابت کارایی خود را از دست می-دهند ولی بال‌زن‌ها (همان پرنده‌های بال‌زن) که در محدوده عدد رینولدز خیلی پایین پرواز می‌کنند، توانایی‌های نسبی قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کنند. ابعاد کوچک، قابلیت مانور بالا، سرعت پایین و شباهت بال‌زن‌ها به پرندگان کاربردهای متنوعی را برای آنها متصور کرده است. موضوع ریزپرنده‌ها، به ویژه از نوع بال‌زن، مبحث نسبتاً جدیدی است که مورد توجه مراکز تحقیقاتی و پژوهشی در سرتاسر دنیا قرار

[1] ben finio

گرفته است. بعد از ساخت انواع پرنده‌های بال‌زن، اولین موضوعی که مورد توجه قرار می‌گیرد، تحلیل و بررسی عملکرد پروازی و آیرودینامیکی آنهاست.

از کابردهای گوناگون پرنده‌های بال‌زن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ کنترل و مدیریت ترافیک شهری
- ✓ کنترل آلودگی
- ✓ به دست آوردن اطلاعات هواشناسی و جوی
- ✓ تجسس برای یافتن باقی‌مانده‌ها زیر آوار
- ✓ نظارت بر خطوط لوله و کشف نقاط آسیب دیده
- ✓ تهیه مدارک از تصادفات جاده‌ای
- ✓ تجسس‌های داخلی پر خطر

۱-۲ اصول فیزیکی پرواز

پرواز بال‌زن پیچیده‌تر از پرواز با بال‌های ثابت است. حرکت رو به جلو نسبت به هوا باعث تولید برآ توسط بال‌ها می‌شود. حال آن که در پرواز بیولوژیکی، بال‌ها نه تنها به جلو بلکه به بالا و پایین نیز حرکت می‌کنند [۹]. برای اینکه پرنده قادر باشد تا بال‌های خود را تغییر شکل دهد و بچرخاند، هماهنگی بسیاری در سیستم اسکلت و ماهیچه مورد نیاز است. به طور متداول وظیفه‌ی اصلی بال‌زن‌ها مراقبت و نظارت است. این کار نیازمند سرعت پیش‌روی آرام و مانور خوب می‌باشد. از مشاهدات صورت گرفته در مورد پرواز پرنده چنین به نظر می‌رسد که بال و ایرفویل‌های انعطاف‌پذیر که اجازه‌ی تغییراتی در فرم و پلان بال و هم‌چنین پارامترهای تعیین کننده‌ی شکل ایرفویل مثل انحنا و ضخامت بال را می‌دهند، برای پرواز مداوم بسیار مناسب هستند. یک بال انعطاف‌پذیر که شکل و حالت خود را در جریان متغیر متناوب تغییر می‌دهد عملکرد بهتری نسبت به یک بال صلب دارد [۱۰]. لذا پیدا کردن

کارآمدترین طراحی بال و تکنولوژی‌های حرکت بال توجه محققان بسیاری را به خود جلب کرده است تا از این راه قادر به فراهم کردن عملکرد آیرودینامیکی مورد نیاز برای پرواز بال‌زن باشند.

هواپیمای بال‌زن چنان‌چه لئوناردوداوینچی آن را نام‌گذاری کرده، هواپیمایی است سنگین‌تر از هوا، که مانند پرنده با حرکت بال زدن حرکت می‌کند. مشخصه‌ی ویژه‌ی این هواپیما در این است که بال‌ها نه تنها نیروی برآ بلکه نیروی پیشران را نیز ایجاد می‌کنند. اولین بار اصول عملکرد بال‌زن توسط لیلنتال[1] در سال ۱۸۸۹ کشف شد و تا به امروز نیز اصول به همان صورت مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما جزئیاتی در مورد پرواز بال‌زن ها وجود دارد که هنوز به درستی درک نشده است [۱۱].

همواره مدل‌های متعددی از تئوری پرواز بال‌زن وجود داشته است. محاسبه‌ی بالانس نیروها حتی برای بال زدن با فرکانس پایین و در مسیر مستقیم تا به امروز امری دشوار بوده و تنها با ساده‌سازی‌های بسیار تحقق این امر امکان‌پذیر می‌باشد. به علاوه مکانیزم‌های پیشرانش شناخته شده و به خصوص طراحی‌های بال تا رسیدن به حالت ایده آل طبیعت فاصله‌ی بسیار دارند.

در حالی که هواپیماهای بزرگ رینولدز بزرگ‌تر از 10^6 را تجربه می‌کنند، اعداد رینولدز بال‌زن‌ها کمتر از 10^5 است. در اعداد رینولدز پایین، محیط جریان آرام و بسیار لزج است. به این معنی که گردابه‌ها به سختی پایدار بوده و گرادیان‌های سرعت بسیار آرام‌اند مگر این که تحت تأثیر نیروهای بزرگ قرار گیرند. به علت وجود محیط جریان لزج، شکل خطوط جریان مانند خطوط جریان اطراف ایرفویل به شدت در یک لایه مرزی ضخیم احاطه شده که این از توانایی آن‌ها برای ایجاد برآ جلوگیری می‌نماید. به علاوه در اثر اصطکاک غشایی بزرگ‌تر، پسای بدنه افزایش می‌یابد. در نتیجه نسبت برآ به پسای ایرفویل در اعداد رینولدز پایین به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

در سال ۱۹۶۰، شمیز[2] به طراحی ایرفویل‌های هواپیمای مدل پرداخت و دریافت که یک صفحه‌ی صاف با انحنای متوسط با نسبت ضخامت به وتر ۵٪ در عدد رینولدز ۴۲۰۰۰ عملکرد بهتری از ایرفویل

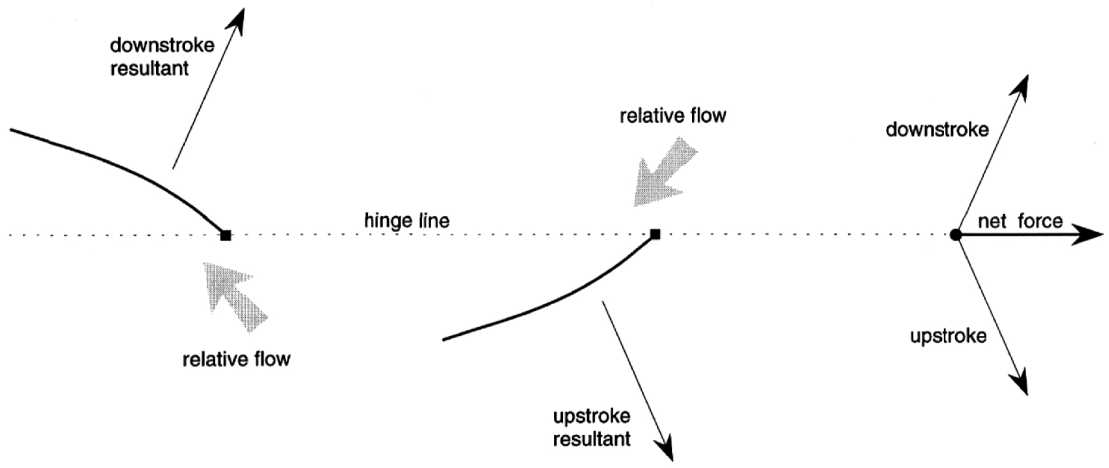
[1] Lilienthal
[2] Schmiz

متداول دارد هر چند در عدد رینولدز ۱۶۸۰۰۰ ایرفویل متداول از هر نظر بهتر عمل می‌نمود. لذا اکثراً در پرنده‌های ساخته شده تا کنون از ایرفویل‌ها و بال‌های متداول استفاده نشده است [۱۲].

۱-۳ تولید نیروی برآ و پیشران

هواپیماهای متداول دارای بال‌ها و موتورهایی هستند که به طور جداگانه نیروی برآ و پیشران آن‌ها را ایجاد می‌کنند. در حالی که در پرنده‌های بال‌زن هر دو نیروی برآ و پیشران تنها به وسیله ی بال‌ها ایجاد می‌شود. بال‌های بال‌زن پوشیده شده از پوسته‌ی قابل انعطاف است. حرکت بالا و پایین هر بال موجب می‌شود که پیچش و انحنای پوسته به طور خودکار با جریان نسبی هوا تغییر کند [۱۳].

میزان انعطاف‌پذیری پوسته، مشخص‌کننده‌ی میزان تغییر انحنای بال خواهد بود. تغییرات غیر فعال[1] پوسته نیروهایی را ایجاد می‌کند که طی سیکل بال زدن تغییر می‌کنند. نیروی برآی مثبت در حرکت به سمت پایین[2] و نیروی برآی منفی در حرکت به سمت بالا[3] ایجاد می‌شود. چنان‌چه حرکت به سمت بالا و پایین برابر باشد، خالص نیروی برآی ایجاد شده صفر است. این فرآیند در شکل ۱- ۷ نشان داده شده است [۱۳].



شکل ۱- ۷ نیروهای ایجاد شده توسط بال پوسته‌ای بال‌زن [۱۳]

[1] Passive
[2] Down stroke
[3] Up stroke