





دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

عنوان:

تعیین مشخصه های آیرودینامیکی وسایل پرنده کوچک در رژیم جریان با عدد رینولدز کم

توسط:

میر طهماسب تولیت کاشانی

استاد راهنما:

دکتر فرهاد طالبی

سال ۱۳۹۰

با سپاس بیکران از زحمات اساتید محترم، جناب آقای دکتر طالبی و جناب آقای دکتر هاشمی که بنده را در تمامی مراحل انجام پروژه و نگارش پایان نامه یاری نمودند.

و تقدیم به خانواده عزیزم

## فهرست مطالب

### فصل اول: مقدمه و معرفی

- ۱-۱: مقدمه ..... ۱
- ۲-۱: اورنیتوپتر ..... ۴
- ۳-۱: وسایل پرنده کوچک ..... ۵
- ۴-۱: مکانیزم های افزایش دهنده برا در جریان غیر پایا ..... ۸
- ۵-۱: سینماتیک بدنه و بال ها ..... ۱۱
- ۶-۱: بررسی الگوهای حرکت بال زدن ..... ۱۶
- ۷-۱: برخی پارامترهای بدون بعد مهم در بررسی حرکت بال زدن ..... ۲۵
- ۸-۱: قانون تشابه دینامیکی ..... ۲۹

### فصل دوم: مروری بر کارهای انجام شده در گذشته

- ۱-۲: روشهای بررسی الگوی حرکت بال زدن ..... ۳۱
- ۲-۲: برخی از کارهای انجام شده در گذشته ..... ۳۳

### فصل سوم: تئوری های پایه و آماده سازی مسئله

- ۱-۳: مقدمه ای بر فلوئنت ..... ۴۶
- ۲-۳: قانون پایستاری شبکه ..... ۴۷
- ۳-۳: معادلات پایستاری شبکه متحرک ..... ۴۸
- ۴-۳: روش های تجدید شبکه متحرک ..... ۵۰
- ۵-۳: سینماتیک جسم صلب در فلوئنت ..... ۵۵
- ۶-۳: تولید هندسه و شبکه مسئله ..... ۵۷
- ۷-۳: مراحل پیاده سازی مسئله ..... ۶۲

فصل چهارم: بررسی استقلال جواب از شبکه و صحه گذاری بر روش حل

۴-۱: پارامترهای انتخاب شده برای حل ..... ۶۴

۴-۲: بررسی استقلال جواب از شبکه ..... ۶۵

۴-۳: صحه گذاری بر روش حل ..... ۶۷

فصل پنجم: بحث و بررسی نتایج

۵-۱: مقدمه ..... ۶۹

۵-۲: بررسی تأثیر مکانیزم های ناپایای افزایش دهنده برا ..... ۷۲

۵-۳: مقایسه آیرودینامیکی الگوهای حرکت افقی، بیضوی، هشت-شکل متقارن و نامتقارن ..... ۷۷

۵-۴: تأثیر دامنه حرکت افقی بر نیروهای آیرودینامیکی تولید شده ..... ۸۱

۵-۵: تأثیر ضخامت ایرفویل بر ضرایب برا و پسا ..... ۸۴

۵-۶: جمع بندی نتایج ..... ۸۶

۵-۷: افق های آینده تحقیق ..... ۸۷

منابع ..... ۸۸

## فهرست اشکال

- ۱-۱: یکی از طرح های لئوناردو داوینچی [۳۳] ..... ۲
- ۲-۱: اورنیتوپتر ساخته دانشگاه تورونتو سال ۲۰۰۶، که ۳۰۰ متر پرواز کرد [۳۴] ..... ۳
- ۳-۱: اورنیتوپتر دانشگاه تورونتو که با نیروی ماهیچه سرنشین ۱۹/۳ ثانیه پرواز کرد [۳۴] ..... ۳
- ۴-۱: روبات مرغ مگسخوار آ.کی.آ، یکی از موفق ترین وسایل پرنده کوچک [۳۵] ..... ۷
- ۵-۱: تشکیل گردابه زاویه حمله [۱] ..... ۸
- ۶-۱: شماتیک مکانیزم به دام اندازی گردابه ها ..... ۹
- ۷-۱: مقایسه ایجاد گردابه ها در دو حرکت خطی ایرفویل و حرکت بال زدن ..... ۱۰
- ۸-۱: مکانیزم کلب و فلینگ [۱] ..... ۱۱
- ۹-۱: شماتیک زوایای  $\beta$  و  $\chi$  ..... ۱۳
- ۱۰-۱: تشابه مکانیزم شتاب گیری در حرکت بال زدن و حرکت چرخشی [۱] ..... ۱۳
- ۱۱-۱: شماتیک الگوی افقی ..... ۱۸
- ۱۲-۱: دو الگوی متفاوت افقی بال زدن و پارامترهای آنها [۱] ..... ۱۸
- ۱۳-۱: شماتیک الگوی بیضوی ..... ۲۰
- ۱۴-۱: شماتیک الگوی هشت-شکل نامتقارن ..... ۲۱
- ۱۵-۱: شماتیک الگوی هشت-شکل متقارن ..... ۲۳
- ۱-۲: آشکار سازی جریان حول بال به کمک باریکه لیزر (سینق و رمسامی) [۱۳] ..... ۲۴
- ۲-۲: شماتیک آزمایش ونگ و همکاران [۶] ..... ۲۴
- ۳-۲: دو الگوی افقی متفاوت بررسی شده توسط تنگ و همکاران [۱۴] ..... ۳۶
- ۴-۲: بر خورد ایرفویل با LEV حاصل از نیم سیکل قبلی و تشکیل LEV و TEV جدید در لحظه برگشت بال [۵] ..... ۳۹
- ۱-۳: مش O-type استفاده شده به عنوان دامنه حل ..... ۵۳

- ۲-۳: شبکه ایجاد شده در نزدیکی ایرفویل ..... ۵۵
- ۳-۳: نمای کلی شبکه ایجاد شده در Gambit ..... ۵۶
- ۱-۴: مقایسه نتایج ضریب برا با نتایج ونگ و همکاران [۶] و امیرعلایی و همکاران [۲] ..... ۶۳
- ۱-۵: ضریب برا در هجده سیکل از حرکت بال زدن برای چهار الگو ..... ۶۶
- ۲-۵: بررسی تأثیر مکانیزم به دام اندازی گردابه ها در افزایش ضریب برا الگوی حرکت افقی ..... ۶۸
- ۳-۵: بررسی تأثیر مکانیزم به دام اندازی گردابه ها در افزایش ضریب برا الگوی حرکت بیضوی ..... ۶۹
- ۴-۵: باقی ماندن گردابه لبه حمله در نیم سیکل های رفت و برگشت در بالای ایرفویل نشان دهنده وجود مکانیزم استال تأخیر یافته در الگوی هشت-شکل نامتقارن است ..... ۷۱
- ۵-۵: مقایسه ضریب برا الگوهای افقی و بیضوی در هجدهمین سیکل حرکت ..... ۷۴
- ۶-۵: مقایسه ضریب برا الگوهای هشت-شکل متقارن و نامتقارن در هجدهمین سیکل حرکت ..... ۷۴
- ۷-۵: مقایسه ضریب پسا الگوهای افقی و بیضوی در هجدهمین سیکل حرکت ..... ۷۵
- ۸-۵: مقایسه ضریب پسا الگوهای هشت-شکل متقارن و نامتقارن در هجدهمین سیکل حرکت ..... ۷۵
- ۹-۵: مقایسه ضریب برا الگوی هشت-شکل نامتقارن برای نسبت های دامنه به طول ایرفویل ۲/۸ و ۳/۶ ..... ۷۷
- ۱۰-۵: مقایسه ضریب برا الگوی هشت-شکل نامتقارن برای نسبت های دامنه به طول ایرفویل ۴/۲ و ۴/۸ ..... ۷۷
- ۱۱-۵: مقایسه ضریب پسا الگوی هشت-شکل نامتقارن برای نسبت های دامنه به طول ایرفویل ۲/۸ و ۳/۶ ..... ۷۸
- ۱۲-۵: مقایسه ضریب پسا الگوی هشت-شکل نامتقارن برای نسبت های دامنه به طول ایرفویل ۴/۲ و ۴/۸ ..... ۷۸
- ۱۳-۵: تأثیر ضخامت ایرفویل بر میانگین زمانی ضریب برا ..... ۸۰
- ۱۴-۵: تأثیر ضخامت ایرفویل بر میانگین زمانی ضریب پسا ..... ۸۰

## فهرست جداول

- ۱-۲: مشخصات باله های مختلف مورد استفاده در آزمایش سینق و رمسامی [۱۳] ..... ۳۲
- ۲-۲: مشخصات سینماتیک های مختلف بررسی شده توسط تنگ و همکاران [۱۴] ..... ۳۶
- ۳-۲: اختلاف ضرایب برا و پسا در نیم سیکل های رفت و برگشت برای رینولدزهای مختلف در شبیه سازی تنگ و همکاران [۱۴] ..... ۳۷
- ۴-۲: مقادیر ضرایب برا و پسا و عملکرد آیرودینامیکی برای ۴ الگوی مختلف پرواز افقی [۵] ..... ۳۹
- ۱-۴: تأثیر اندازه شبکه و تعداد گام های زمانی بر مقادیر ماکسیمم ضرایب برا و پسا ..... ۶۱
- ۲-۴: اختلاف ضریب برا میانگین در کار حاضر با ونگ و همکاران [۶] و امیرعلایی و همکاران [۲] ..... ۶۳
- ۱-۵: مقدار نسبت میانگین زمانی برا به میانگین زمانی پسا برای چهار الگوی مورد بررسی ..... ۷۳
- ۲-۵: مقدار نسبت میانگین زمانی برا به میانگین زمانی پسا برای چهار نسبت دامنه به طول ایرفویل ..... ۷۶
- ۳-۵: مقدار نسبت میانگین زمانی برا به میانگین زمانی پسا برای چهار ضخامت مختلف ایرفویل ..... ۷۹



## چکیده

در تحقیق حاضر تأثیر مکانیزم های ناپایای افزایش دهنده لیفت، پارامترهای سینماتیکی و هندسه ایرفویل بر نیروهای آیرودینامیکی تولید شده توسط یک ایرفویل با مقطع بیضوی در حرکت بال زدن، به کمک گسسته سازی معادلات دو بعدی ناویر-استوکس بر اساس روش حجم محدود، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این شبیه سازی نشان دهنده تأثیر قابل ملاحظه الگوی بال زدن و دامنه حرکت رفت و برگشت بر ماکسیمم و میانگین زمانی ضرایب لیفت و درگ و نیز عملکرد آیرودینامیکی این حرکت است. تغییر ضخامت ایرفویل از ۲٪ تا ۱۲٪ به صورت بسیار جزئی باعث افزایش ضریب لیفت و درگ میانگین می شود، ولی بر عملکرد آیرودینامیکی بی تأثیر است. در این پژوهش چهار الگوی متفاوت بال زدن مورد بررسی قرار گرفته است که با توجه به نتایج بدست آمده، از میان آنها الگوی هشت شکل نامتقارن بهترین عملکرد آیرودینامیکی را دارا می باشد. همچنین، از چهار نسبت دامنه به طول ایرفویل بررسی شده در محدوده ۲/۸ تا ۴/۸، که متناظر با محدوده رینولدز ۷۵ تا ۱۱۵ می باشد، نسبت دامنه ۲/۸ بهترین عملکرد آیرودینامیکی را دارا می باشد. علاوه بر این نشان داده شده است که مکانیزم بدام اندازی گردابه ها مسئول بوجود آمدن دو قله از چهار قله موجود در نمودار ضریب لیفت برای یک سیکل از حرکت بال زدن تمامی الگوهای مورد بررسی بجز الگوی بیضوی می باشد و به کمک رسم کانتورهای ورتیسیتیه نقش کمکی مکانیزم استال تأخیر یافته برای تولید نیروی لیفت در هر چهار الگو نشان داده شده است.

## فصل اول: مقدمه و معرفی موضوع

### ۱-۱: مقدمه

ایده ساختن وسیله پرنده ای که نیروی بالا بری خود را از طریق بال زدن<sup>۱</sup> تأمین می کند، ایده ای جدید به شمار نمی رود. در واقع سالها قبل از اینکه بشر به فکر ساختن وسایل پرنده با بالهای ثابت بیافتد، هزاران وسیله پرنده که مکانیزم هایی شبیه بال زدن داشتند را طراحی و آزمایش کرد. دلیل این امر الگو گرفتن از پرواز جانوران در طبیعت بود که همگی از بال زدن برای پرواز کمک می گرفتند. اولین ردپاهای ایده ساخت چنین وسایلی به زمان یونان قدیم و افسانه ی دادلوس<sup>۲</sup> و ایکاروس<sup>۳</sup> بر می گردد. اولین آزمایش وسیله ای که با هدف پرواز از طریق بال زدن ساخته شده است نیز به نوزده سال پس از میلاد مسیح برمی گردد که توسط تنها امپراتور سلسله زین در چین صورت گرفت. در اروپا نیز از قرن یازدهم به بعد افراد زیادی دست به ساخت و آزمایش چنین وسایل پرنده ای زدند که بارزترین آنها لئوناردو داوینچی است. وی اولین فردی بود که در طرحهای خود به کمک پدال ها و پولی

---

<sup>۱</sup> Flapping

<sup>۲</sup> Daedalus

<sup>۳</sup> Icarus

هایی از نیروی پا نیز بهره می جست (شکل ۱-۱). با وجود همه این تلاشها هیچ یک از این طرحها موفق نبودند. بعدها با کشف سوخته‌های فسیلی و اختراع موتورها، نیروی ماهیچه در این طرحها جای خود را به موتورهای مختلف داد. این تلاشها با اختراع هواپیما با بال ثابت توسط برادران رایت کم رنگ شد ولی هیچگاه متوقف نشد. نمونه‌های موفق در روسیه و فرانسه ساخته شد، ولی هیچ کدام بیشتر از چند ده متر قادر به پرواز نبودند. در سالهای اخیر نیز برخی از دانشگاه‌ها دست به ساخت چنین وسایلی زده اند. دانشگاه تورنتو در سال ۲۰۰۶ یک طرح موفق را آزمایش کرد که مسافت ۳۰۰ متر را طی کرد و ۱۴ ثانیه معلق باقی ماند (شکل ۲-۱). در سال ۲۰۱۰ نیز طرح موفق دیگری آزمایش شد که تنها از نیروی ماهیچه‌های سرنشین بهره می گرفت و ۱۹/۳ ثانیه در هوا معلق بود (شکل ۳-۱).



شکل (۱-۱): یکی از طرح‌های لئوناردو داوینچی



شکل (۲-۱): UTIAS Ornithopter No. ۱ ساخته دانشگاه تورونتو  
سال ۲۰۰۶، که ۳۰۰ متر پرواز کرد.



شکل (۳-۱): Ornithopter دانشگاه تورونتو که با نیروی ماهیچه  
سرنشین ۱۹/۳ ثانیه پرواز کرد تا رویای داوینچی به حقیقت پیوندد.

به طور کلی در مهندسی هوا-فضا و در تحلیل وسایل پرنده، رژیم جریان اطراف جسم پرنده بر حسب عدد رینولدز به دو دسته کلی جریان با عدد رینولدز کم (LRN<sup>۱</sup>) و جریان با عدد رینولدز زیاد (HRN<sup>۲</sup>) تقسیم می شود. به طور معمول به جریان با عدد رینولدز کمتر از ۱۰<sup>۵</sup>، جریان LRN و به جریان با عدد رینولدز بیشتر از ۱۰<sup>۵</sup>، جریان HRN گفته می شود. از دیدگاه این دسته بندی معمولاً وسایل پرنده بزرگ در محدوده جریان با رینولدز زیاد و وسایل پرنده کوچک (و تقریباً تمامی پرندگان و حشرات در طبیعت) در محدوده جریان با رینولدز کم قرار می گیرند.

### ۲-۱: اورنیتوپتر<sup>۳</sup>

به هر وسیله ای که از طریق بال زدن پرواز می کند اصطلاحاً اورنیتوپتر گفته می شود، که از دو کلمه یونانی اورنیتوس<sup>۴</sup> به معنای پرنده و پترون<sup>۵</sup> به معنای بال اقتباس شده است. اورنیتوپترها به طور عمده تا به حال در سه اندازه کلی ساخته شده اند. مقیاس هواپیماهای سرنشین دار، مقیاس پرندگان و مقیاس حشرات. همانطور که در مقدمه نیز اشاره شد اورنیتوپترهای سرنشین داری که تا به حال ساخته شده اند، به هیچ وجه عملیاتی نبوده و چه از نظر مصرف انرژی و چه از نظر عملکرد آیرودینامیکی ضعیفتر از هواپیماهای متداول با بال های ثابت می باشند. در مقیاس پرندگان نیز با وجود ساخت موارد موفق تجاری مانند اسباب بازی های رادیویی، باز هم در این مقیاس اورنیتوپترها نسبت به هواپیماهای بدون سرنشین با بال ثابت از عملکرد آیرودینامیکی پایین تری برخوردارند و چون سرعت، یک پارامتر مهم برای هواپیماهای بدون سرنشین می باشد و اورنیتوپترها توانایی رسیدن به سرعتهای خیلی زیاد را ندارند، پس ساخت هواپیماهای بدون سرنشین در مقیاس پرندگان، با بالهای ثابت گزینه مناسب تری است. در مقابل اورنیتوپترهایی که در مقیاس حشرات ساخته می شوند به مراتب گزینه مناسب تری نسبت به وسایل پرنده

<sup>۱</sup> Low Reynolds Number Flow

<sup>۲</sup> High Reynolds Number Flow

<sup>۳</sup> Ornithopter

<sup>۴</sup> Ormithos

<sup>۵</sup> Ptreon

با بال های ثابت در این مقیاس می باشند. دلیل این امر، هم به کاربردهای وسایل پرنده در این مقیاس و هم به عملکرد آیرودینامیکی بالا در میکرو اورنیتوپتراها برمی گردد. برای روشن تر شدن موضوع در ادامه به تعریف وسایل پرنده کوچک<sup>۱</sup> می پردازیم.

### ۱-۳: وسایل پرنده کوچک

به وسایل پرنده با طول کمتر از ۱۵ cm و با ماکسیمم سرعت پرواز ۱۰ متر بر ثانیه اصطلاحاً کوچک (MAV) می گویند. این وسایل پرنده عموماً دارای جرم ۵۰ تا ۱۰۰ گرم، ماکسیمم فرکانس بال زدن ۳۰ تا ۴۰ هرتز، ماکسیمم سرعت ۱۰ (m/s) و ابعاد کمتر از ۱۵ (cm) و با این مشخصات عدد رینولدز<sup>۲</sup> برای این اجسام مقداری کمتر از ۱۰<sup>۵</sup> برای پرواز غیر معلق و مقداری کمتر از ۱۰<sup>۴</sup> برای پرواز معلق خواهد بود. این وسایل پرنده کوچک زیر مجموعه ای از وسایل پرنده بدون سرنشین (UAV<sup>۳</sup>) می باشند و کاربردهای فراوانی دارند. از جمله این کاربردها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- نظارت و ارزیابی در محیطهای خطرناک مثل مکان های مسموم و یا آلوده به مواد رادیواکتیو
- کاوش یا نقشه برداری در مکان هایی که کاوشگرهای زمینی و چرخدار نمی توانند حرکت کنند مثل سطوح مین گذاری شده، سطوح ناهموار و یا یخ زده
- بدلیل سرعت نسبتاً بالا، اندازه کوچک و امکان ثابت ماندن در هوا، مناسب برای عملیات های شناسایی و جاسوسی
- بدلیل اندازه کوچک، امکان نفوذ در مکانهای مسدود شده مثل معدنها و کمک به عملیات نجات

---

<sup>۱</sup> Micro Aerial Vehicles

<sup>۲</sup> Reynolds Number

<sup>۳</sup> Unmanned Aerial Vehicles

وسایل پرنده کوچک از نظر نوع حرکت بال به سه دسته، بال ثابت<sup>۱</sup>، بال چرخان<sup>۲</sup> و بال زدن تقسیم می شوند. با توجه به کاربردهای این وسایل می توان به صورت زیر مزایای بال زدن نسبت به پرواز با بالهای ثابت را برای آنها بیان کرد:

- امکان پرواز با سرعت کم و پرواز معلق
- قدرت مانور بالا
- امکان پرواز در محیطهای بسته

بال زدن یک حرکت غیر پایا و حرکت چرخشی حرکتی پایا است. وجود مکانیزم های افزایش دهنده برا در جریان غیر پایا باعث بیشتر بودن عملکرد آیرودینامیکی (نسبت ضریب برا به پسا) برای حرکت بال زدن نسبت به حرکت چرخشی می شود. این مسأله به صورت آزمایشگاهی بررسی شده و نتایج نشان می دهند که در شرایط یکسان عملکرد آیرودینامیکی حرکت بال زدن حدوداً ۳۳٪ بیشتر است [۳]. به این ترتیب مزایای حرکت بال زدن نسبت به حرکت چرخشی را می توان به صورت زیر بیان کرد:

- امکان به خدمت گرفتن مکانیزمهای افزایش دهنده برا در جریان ناپایا
- عملکرد آیرودینامیکی بالا

یکی از نمونه های بسیار موفق از وسایل پرنده کوچک که از حرکت بال زدن برای پرواز خود بهره می گیرد، وسیله پرنده ای موسوم به روبات مرغ مگسخور آ.کی.آ<sup>۳</sup> (شکل ۱-۴)، محصول شرکت دارپا<sup>۴</sup> است که در سال ۲۰۱۱ در ایالات متحده رونمایی شده است. این وسیله پرنده علاوه بر منبع انرژی خود، توانایی حمل یک دوربین فیلم برداری و یک کامپیوتر کوچک را نیز دارد و از قدرت مانور بسیار بالایی برخوردار است. برای طراحی این وسیله، که

<sup>۱</sup> Fixed Wing

<sup>۲</sup> Rotary Wing

<sup>۳</sup> A.K.A Robotic Hummingbird

<sup>۴</sup> DARPA

پنج سال به طول انجامیده، حدود ۳۰۰ بال مختلف طراحی و آزمایش شده است. در ادامه به توضیح مکانیزم های افزایش دهنده برا در جریان غیرپایا خواهیم پرداخت.



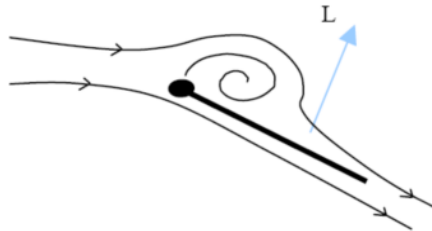
شکل (۴-۱): روبات مرغ مگسخور آ.کی.آ، یکی از موفق ترین وسایل پرنده کوچک (لنز دوربین کار گذاشته شده در این روبات در قسمت جلویی آن قابل مشاهده است).



#### ۴-۱: مکانیزم های افزایش دهنده برا در جریان غیر پایا

##### ۱-۴-۱: مکانیزم گردابه لبه حمله<sup>۱</sup>

تولید گردابه در لبه حمله، در ابتدای هر دو سیکل حرکت روبه جلو و عقب در الگوی بال زدن، باعث تولید یک ناحیه کم فشار در لبه بالایی ایرفویل و در نتیجه باعث افزایش نیروی برا می شود (شکل ۵-۱).



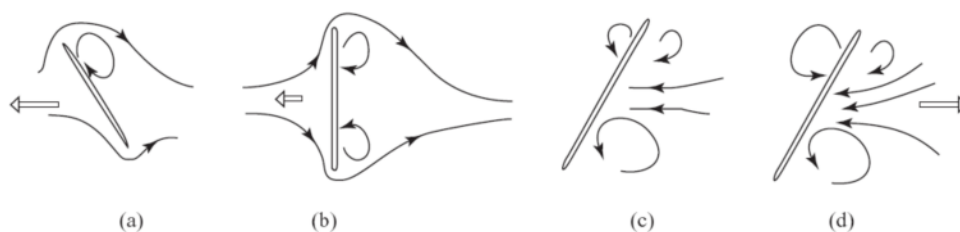
شکل (۵-۱): تشکیل گردابه زاویه حمله<sup>۱</sup>.

##### ۲-۴-۱: مکانیزم به دام اندازی گردابه ها<sup>۲</sup>

این مکانیزم شامل انتقال ممنوم بین گردابه ها و ایرفویل می باشد. به این ترتیب که در نیمه ابتدایی سیکل برگشت، ایرفویل نیرویی را که برای تولید گردابه در سیکل رفت مصرف کرده است را به شکل برا از گردابه بازیابی می کند. شکل (۶-۱) نشان دهنده چگونگی عملکرد این مکانیزم است.

<sup>۱</sup> Leading Edge Vortex Mechanism

<sup>۲</sup> Wake Capturing Mechanism



شکل (۱-۶): شماتیک مکانیزم به دام اندازی گردابه ها. ایرفویل پس از چرخش برای شروع حرکت برگشت (d)، بوسیله تماس پیدا کردن با گردابه تولید شده در حرکت رفت (a)، مومنتوم گردابه را بازیابی می کند و آن را به نیروی برا تبدیل می کند [۱].

#### ۱-۴-۳: مکانیزم استال تاخیر یافته<sup>۱</sup>

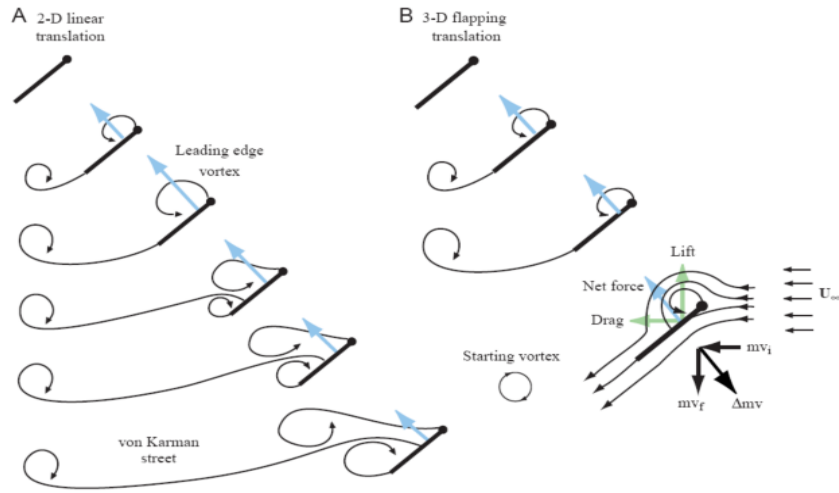
باقی ماندن گردابه تولید شده در لبه حمله و جدا نشدن آن تا انتهای سیکل حرکت، حتی در زاویه های حمله زیاد، اصطلاحاً در حرکت بال زدن تحت عنوان مکانیزم استال تاخیر یافته شناخته می شود. در پرواز با بال ثابت، جدا شدن گردابه تولید شده در لبه حمله و لبه انتهایی به شکل پدیده ون کارمن استریت<sup>۲</sup> (تولید مداوم گردابه و جدایش آن) باعث اتلاف مقدار زیاد انرژی می شود. پس این مکانیزم (شکل ۱-۷) در حرکت بال زدن باعث می شود:

(۱) نیروی برا (به ویژه در زاویه های حمله زیاد) افزایش یابد.

(۲) از اتلاف انرژی جلوگیری شود.

<sup>۱</sup> Delayed Stall Mechanism

<sup>۲</sup> Von Karman Street



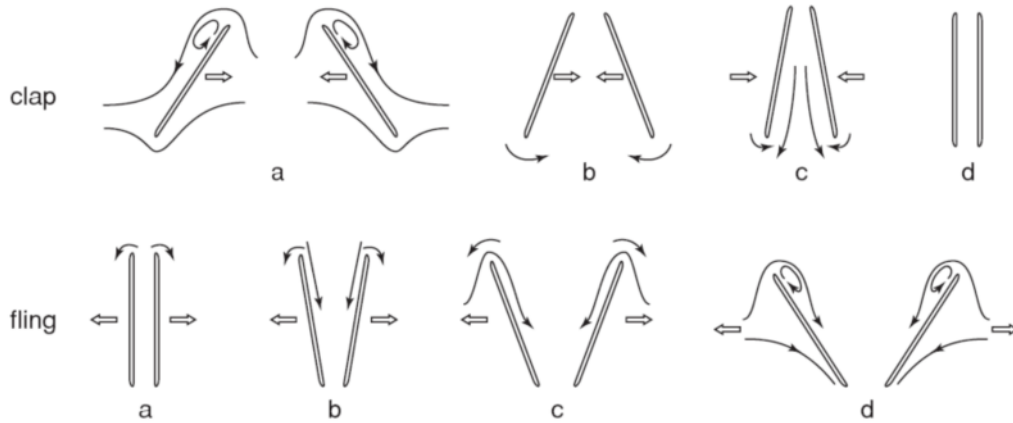
شکل (۷-۱): مقایسه ایجاد گردابه ها در دو حرکت خطی ایرفویل (A) و حرکت بال زدن (B). تولید متناوب گردابه ها در LE و TE و جدا شدن آنها با مکانیزم Von Karman Street باعث تلفات زیاد در انرژی می شود. در حالی که در حرکت بال زدن، تنها یک گردابه در LE تولید شده و تا انتهای سیکل در بالای ایرفویل باقی مانده و از آن جدا نمی شود [۱].

#### ۴-۴-۱: مکانیزم کلپ و فلینگ<sup>۱</sup>

این مکانیزم اولین بار توسط ویس-فو<sup>۲</sup> (۱۹۷۳) مشاهده شد و در اثر تقابل دو بال با یکدیگر در زمان بال زدن بوجود می آید. در هنگام نزدیک شدن دو بال به یکدیگر (Clap) ابتدا قسمت های بالایی آنها به هم میرسند که این باعث تولید گردابه هایی در ناحیه بالای بالها می شود، این گردابه ها به همراه با فشار خارج کردن هوای بین دو بال، باعث افزایش نیروی بالا بری می شوند. هنگام باز شدن (Fling) نیز ابتدا قسمتهای بالایی از هم جدا می شوند، که این امر نیز باعث مکش هوا به سمت ناحیه بین دو بال و ایجاد گردابه در بالای آنها می شود. شماتیک این مکانیزم در شکل (۸-۱) نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Clap and Fling Mechanism

<sup>۲</sup> Weis-Fogh



شکل (۸-۱): مکانیزم Clap and Fling وجود گردابه ها در ناحیه بالایی در ابتدای پروسه بسته شدن بالها (Clap) و در انتهای پروسه باز شدن بالها (Fling) از جمله مزایای این مکانیزم است [۱].

### ۵-۱: سینماتیک بدنه و بال ها

در این بخش به بررسی معادلات حاکم بر سینماتیک پرنده هایی که با بال زدن پرواز می کنند خواهیم پرداخت. بدیهی است که این معادلات کلی بوده و هم شامل پرندگان طبیعی و هم شامل پرندگان ساخته دست بشر می شود. ابتدا به بیان چند تعریف می پردازیم. صفحه حرکت بال<sup>۱</sup> صفحه ای است که از سه نقطه شامل مبدأ بال و نقاط ماکسیمم و مینیمم حرکت نوک بال، می گذرد. در حرکت چرخشی (هلیکوپتر) این صفحه، همان صفحه ای است که از چرخش باله های هلیکوپتر ایجاد می شود. زاویه ای که این صفحه با افق می سازد را با  $\beta$  (زاویه صفحه حرکت<sup>۲</sup>) نشان می دهند. زاویه ای نیز که راستای بدنه جسم پرنده با افق می سازد را با  $\chi$  (زاویه بدنه<sup>۳</sup>) نشان می

<sup>۱</sup> Stroke-Plane

<sup>۲</sup> Stroke-Plane Angle

<sup>۳</sup> Body Angle