بسمه تعالی

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد

تحلیل آیروالاستیک بال هواپیما و سطح کنترلی متصل به آن

استاد راهنما

دکتر عباس مزیدی

استاد مشاور

دکتر سید احمد فاضل زاده حقیقی

دانشجو

بهزاد میرجلیلی

زمستان 92

چکیده

امروزه آیروالاستیسیته یکی از مسائل مهم در علوم هوا فضا محسوب می شود. این علم به بررسی عوامل مهم و موثر در پدیده‌هایی همچون گسیختگی بال و شکسته شدن اتصالات موتور که باعث ناکارآمد شدن هواپیما و به مخاطره افتادن جان مسافران می‌شود، می‌پردازد. یکی از علت‌هایی که باعث گسیختگی در بال می‌شود، وجود سطوح کنترلی می‌باشد. بنابراین بررسی اثرات وجود سطح کنترلی بر روی بال می‌تواند باعث شناخت بیشتر مرزهای ناپایداری و همچنین یافتن روش‌هایی برای اجتناب از آن شود.

در این پروژه، معادلات حرکت یک بال به همراه سطح کنترلی متصل به آن با استفاده از اصل هامیلتون و حذف ترم‌های غیرخطی مرتبه بالا بدست آمده است. بال بعنوان یک تیر اویلر-برنولی در نظر گرفته شده است. تیر دارای خاصیت الاستیک و همگن می‌باشد. همچنین تیر با سه سرعت زاویه‌ای متفاوت در سه جهت اصلی در حال دوران است. سطح کنترلی توسط دو فنر پیچشی به بال متصل شده است. جریان سیال نیز به صورت ناپایا فرض‌می‌شود. نیروهای آیروالاستیک شامل نیروی برآ و گشتاور پیچشی، به صورت نیروهای گسترده به سطح بال و سطح کنترلی وارد می‌شوند. سپس برای تبدیل معادلات بدست آمده از معادلات جزئی به معادلات دیفرانسیل معمولی از روش گالرکین استفاده شده است. در نهایت با تحلیل آیروالاستیک، سرعت فلاتر بال و سطح کنترلی به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که پارامترهای فیزیکی سطح کنترلی بر سرعت فلاتر تاثیر محسوسی دارند.

فهرست مطالب

فصل اول ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-1- مقدمه ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-2- آیروالاستیسیته ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-3- آیروترموالاستیسیته ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-4- آیروسروالاستیسیته ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-5- پدیده‌های آیروالاستیک ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-5-1- پدیده‌های آیروالاستیک استاتیکی ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-5-2- پدیده‌های آیروالاستیک دینامیکی ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-6- سطوح کنترلی به کار رفته در بال ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-6-1- فلپ‌ها ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-6-1-1- فلپ ساده ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-6-1-2- فلپ ترک‌دار ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-6-1-3- فلپ شکاف‌دار ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-6-1-4- فلپ گل مانند..... **Error! Bookmark not defined.**

1-6-1-5- فلپ جانکر ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-6-1-6- فلپ منقاری..... **Error! Bookmark not defined.**

1-6-2- ایلرون‌ها..... **Error! Bookmark not defined.**

1-6-2-1- اجزای ایلرون‌ها ..... **Error! Bookmark not defined.**

1-6-2-2- انواع ایلرون..... **Error! Bookmark not defined.**

فصل دوم..... **Error! Bookmark not defined.**

2-1- مروری بر کارهای انجام شده..... **Error! Bookmark not defined.**

فصل سوم ..... **Error! Bookmark not defined.**

3-1- مدل‌سازی ..... **Error! Bookmark not defined.**

3-2- معادلات حرکت ..... **Error! Bookmark not defined.**

3-2-1- سیستم‌های مختصات و تبدیل‌ها..... **Error! Bookmark not defined.**

3-2-2- استخراج معادلات با استفاده از اصل هامیلتون ..... **Error! Bookmark not defined.**

3-2-2-1- انرژی کرنشی بال..... **Error! Bookmark not defined.**

3-2-2-2- انرژی جنبشی بال..... **Error! Bookmark not defined.**

3-2-2-3- محاسبه انرژی کرنشی سطح کنترلی ..... **Error! Bookmark not defined.**

3-2-2-4- محاسبه انرژی جنبشی سطح کنترلی ..... **Error! Bookmark not defined.**

3-2-2-5- معادلات حاکم بر سیستم در ارتعاشات آزاد ..... **Error! Bookmark not defined.**

4-1- حل معادلات حرکت ..... **Error! Bookmark not defined.**

4-2- تئوری ناپایای تئودورسن برای ایرفویل نازک ..... **Error! Bookmark not defined.**

5-1- ارائه نتایج ..... **Error! Bookmark not defined.**

5-2- ارتعاشات آزاد بال ..... **Error! Bookmark not defined.**

5-3-1- تحلیل آیروالاستیک بال و سطح کنترلی در مانور ..... **Error! Bookmark not defined.**

5-3-2- سطح کنترلی ..... **Error! Bookmark not defined.**

5-4- تحلیل پایداری سیستم ..... **Error! Bookmark not defined.**

فصل ششم ..... **Error! Bookmark not defined.**

6-1- نتیجه‌گیری و پیشنهادها ..... **Error! Bookmark not defined.**

فهرست نمادها

نماد	مفهوم
E	مدول یانگ بال
G	مدول برشی بال
$\vec{\imath},\vec{\jmath},\vec{k}$	بردارهای یکه متصل به دستگاه مختصات محور بعد از تغییر شکل
$\vec{I},\vec{J},\vec{K}$	بردارهای یکه ثابت
$I_{y'}$	گشتاور اینرسی سطح مقطع محور نسبت به محور y'
$I_{z'}$	گشتاور اینرسی سطح مقطع محور نسبت به محور z'
J	ثابت صلبیت پیچشی
k_f	سختی فنر پیچشی سطح کنترلی
m_b	جرم بر واحد طول محور بال
m_f	جرم بر واحد طول محورسطح کنترلی
o	نقطه ثابت در چارچوب $\mathfrak{B}$ و $\mathcal{R}$
$S_{x'}$	گشتاور پیچشی در اثر تنش برشی

T	انرژی جنبشی
t	زمان
w	جابجایی الاستیک در جهتz
U	انرژی کرنشی
$V_x , V_{x'}$	نیروی محوری در جهت‌های x و x'
$V_y , V_{y'} , V_z , V_{z'}$	نیروی برشی در جهت‌های y، y'، z و z'
$\vec{V}$	بردار سرعت نقطه P در چارچوب $\mathcal{R}$
x, y, z	دستگاه مختصاتی که محور x آن در امتداد قطعه‌کار قبل از تغییر شکل است.
x', y', z'	دستگاه مختصات مماس بر محور تغییر شکل یافته
x_0, y_0, z_0	مختصات یک نقطه بر روی محور قبل از تغییر شکل
x_1, y_1, z_1	مختصات یک نقطه (که قبلاً نقطه x_0, y_0, z_0 بوده است) بر روی محور تغییر شکل یافته
$\begin{cases} \overline{Y_v}, \overline{Y_w}, \overline{Y_\varphi} \\ Z_v, \overline{Z_v}, Z_{v'}, \overline{Z_{v'}} \\ Z_w, \overline{Z_w}, Z_{w'}, \overline{Z_{w'}} \\ Z_\varphi, \overline{Z_\varphi} \end{cases}$	عبارت‌هایی برای بیان انرژی
$\delta( )$	وریشن ( )
$( )'$	$\partial/\partial x$

$\dot{( )}$	$\partial/\partial t$
$\overrightarrow{( )}$	علامت بردار

حروف یونانی

$\mathfrak{B}$	چارچوب مرجع که با سرعت Ω نسبت به چارچوب اینرسی ثابت $\mathcal{R}$ دوران می‌کند.
$\mathcal{R}$	چارچوب اینرسی
$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{x\eta}, \varepsilon_{x\xi}$	مؤلفه‌های کرنش مهندسی
ξ	مختصات مقطعی عمود بر محور η در محور الاستیک
η	مختصات مقطعی متناظر با محور اصلی برای یک نقطه روی محور الاستیک
ρ	چگالی
$\sigma_{xx}, \sigma_{x\eta}, \sigma_{x\xi}$	تنش‌های مهندسی
φ	پیچش الاستیک قطعه‌کار حول محور الاستیک
θ	پیچش سطح کنترلی
Ω	سرعت دورانی حول محور Z
α	سرعت دورانی حول محور X
β	سرعت دورانی حول محور Y

δ	تابع دلتای دیراک

فصل اول

مقدمه

1-1- مقدمه

یک قرن از پرواز برادران رایت می‌گذرد و در طی این یک قرن پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه‌های مختلف صنایع هوا و فضا، طراحی بال و بدنه وسائط پرنده، تکنولوژی ساخت و تولید مواد حاصل گردیده است. از پرواز ناموق هواپیمای ساموئل لانگلی[1] 1903، تخریب پل تاکوما[2] 1940، مشکلات موشک آلمان‌ها در جنگ جهانی دوم و . . . تا سانحه فضاپیمای شاتل در سال 2003 هر کدام به نحوی متاثر از ناپایداری‌های آیروالاستیک استاتیکی و دینامیکی و شاخه‌های مرتبط با آن بوده‌اند.

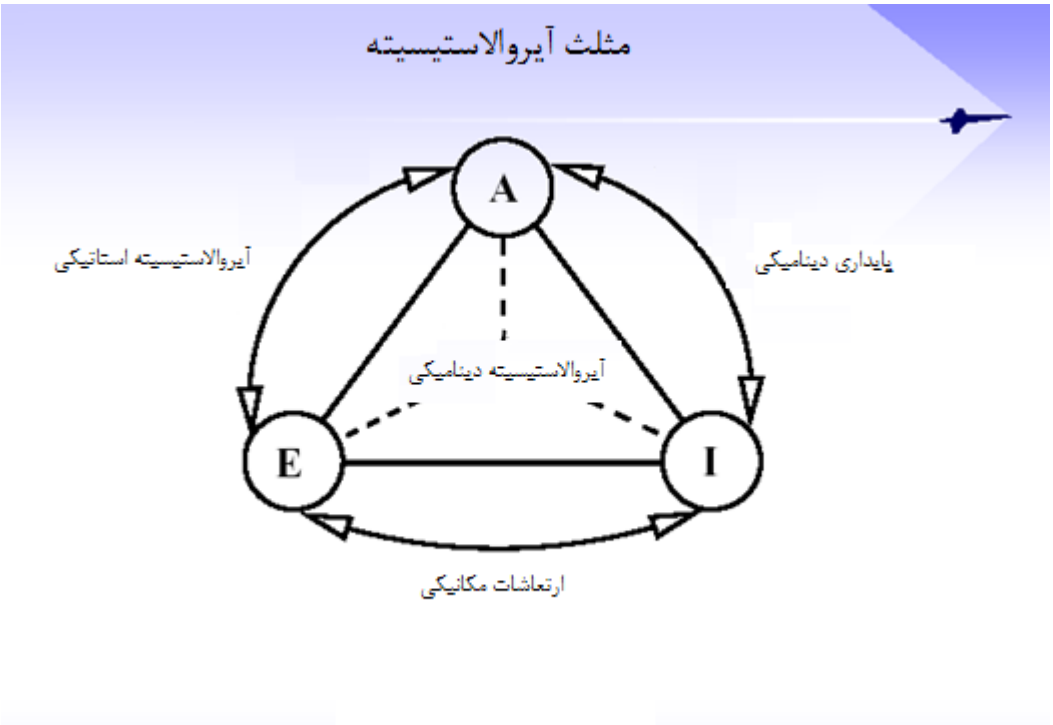
در سال‌های اخیر با توسعه کاربردهای وسایل پرنده گذرصوت، مافوق صوت و ماورا صوت نظیر هواپیماهای تجاری پهن‌پیکر، هواپیماهای نظامی فضاپیماهاو موشک‌های بالستیک با عملکرد بالا که در ارتفاعات و سرعت‌های بالا پرواز می‌کنند، مسائل جدید و متنوعی فراروی محققان و طراحان قرار گرفته است. در این فصل ضمن تعریف علم آیروالاستیسیته و شاخه‌های مرتبط با آن، مسایل کلاسیک در آیروالاستیسیته معرفی شده و سپس سیر تکامل وکارهای تحقیقاتی کلیدی معرفی شده‌اند[1].

1-2- آیروالاستیسیته[3]

آیروالاستیسیته یکی از مهمترین شاخه‌ها برای مهندسان هوافضا می‌باشد و مبین یک گروه از مسائل کلیدی طراحی می‌باشد. در این علم تداخل بین اثرات نیروهای آیرودینامیکی، اینرسی و الاستیک در سازه‌های هوافضایی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.در شکل 1-1 ارتباط این نیروها نشان داده

[1] Samuel Langley
[2] Tacoma
[3] Aeroelasticity

شده است. در سازه‌های هوافضایی مدرن سازه‌ها دارای انعطاف بالا و وزن پایینی می‌باشند و این مسئله همراه با تداخل اثرات نیروهای آیرودینامیکی می‌تواند اثرات متفاوتی را ایجاد نماید[1].



شکل 1-1: مثلث نیروهای آیروالاستیک[1]

1-3- آیروترموالاستیسیته[1]

چنانچه در مدلسازی اثرات بارگذاری حرارت آیرودینامیکی اعمال شود، عملا با مسئلهآیروترموالاستیسیته مواجه خواهیم بود. در شکل 1-2 اثرات چهارگانه بارهای تشکیل دهنده یک مسئله آیروترموالاستیسیتهنشان داده شده است.همچنین اگر علاوه بر شرایط فوق، خواص ویسکوالاستیک سازه در مدل سازی منظورگردد، مدل آیروترموویسکوالاستیک بدست می‌آید[1].

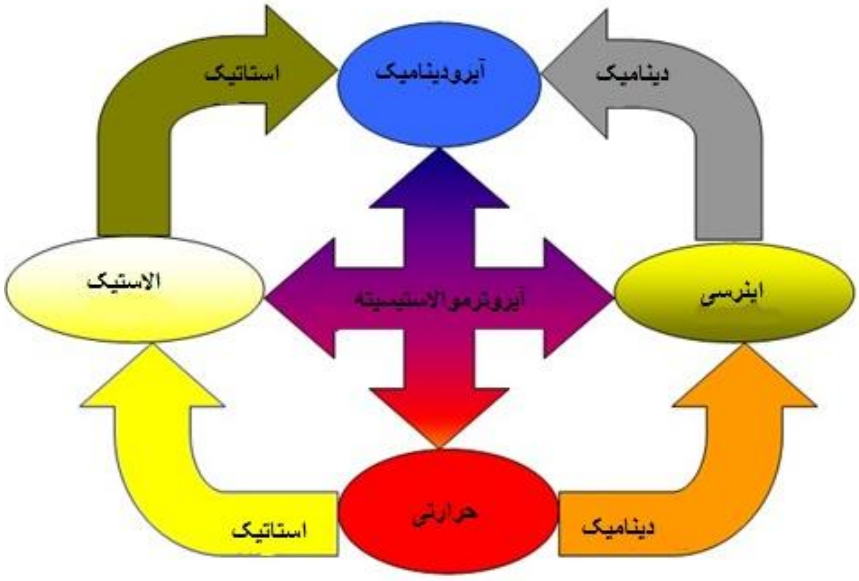
[1]Aerothermoelasticity

1-4-آیروسروالاستیسیته[1]

چنانچه در یک مسئله آیروالاستیک اثرات سیستم کنترلی وارد گردد، مسئله آیروسروالاستیک ایجاد خواهد شد. امروزه با بکارگیری مواد هوشمند، سازه‌های هوایی فعال مورد استفاده قرار می‌گیرند و فرم نهایی معادلات حاکم با سیستم کنترلی کوپل می‌باشند. در شکل 1-3 اثرات چهارگانه بارهای تشکیل دهنده یک مسئله آیروسروالاستیسیتهنشان داده شده است.

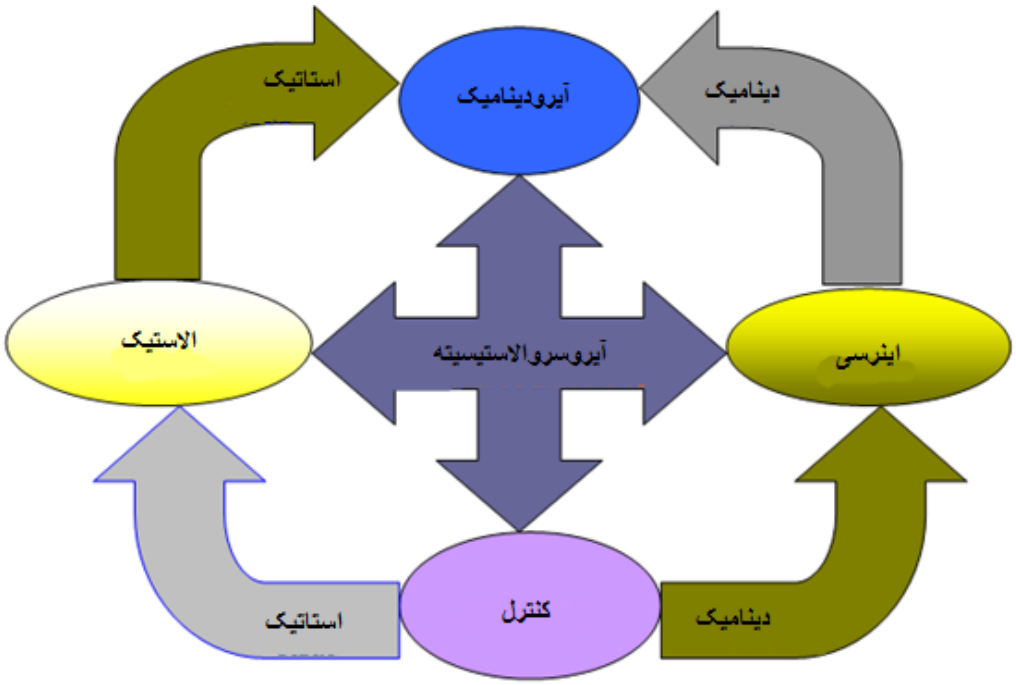
1-5- پدیده‌های آیروالاستیک

پدیده‌ها و موضوعات آیروالاستیک در دو بخش استاتیکی و دینامیکی به شرح ذیل مورد مطالعه قرار می‌گیرند.



شکل1-2: اثرات چهارگانه یک مسئله آیروترمو-الاستیسیته

[1]Aeroservoelasticity



شکل1-3: اثرات چهارگانه یک مسئله آیروسروالاستیسیته

1-5-1- پدیده‌های آیروالاستیک استاتیکی[1]

- **واگرایی[1]**

ناپایداری استاتیکی سطوح برآ و یا پانل‌های سطحی را واگرایی می‌نامند. این پدیده در اثر تداخل نیروهای الاستیک سازه‌ای و آیرودینامیک یکنواخت ایجاد می‌گردد و باعث تغییر فرم استاتیکی سازه می‌شود. این پدیده در صورت رسیدن به حد بحرانی خود باعث تغییر فرم‌های زیاد و نهایتا گسیختگی سازه می‌گردد.

- **اثر پذیری کنترل**

[1]Divergence

اثر تغییر فرم‌های الاستیک سازه بر کنترل‌پذیری هواپیما تحت شرایط پرواز یکنواخت را اثر پذیری کنترل می‌گویند.

- **معکوس‌پذیری[1] سیستم کنترل**

تحت یک سرعت پروازی، سطوح کنترلی نظیر فلپ، ایلرون و سکانها به دلیل تغییر فرم‌های الاستیک سازه‌ای، این سطوح معکوس عملکرد تعریف شده مربوط به خود را انجام می‌دهند.

- **توزیع بار**

به اثر تغییر فرم الاستیک سازه بر روی توزیع فشار آیرودینامیکی یکنواخت، توزیع بار می‌گویند.

- **اثرات آیروالاستیک برپایداری استاتیکی**

در این مبحث به بررسی اثر تغییر فرم‌های الاستیک سازه بر روی مشتقات و پایداری استاتیکی هواپیما پرداخته می‌شود.

1-5-2- پدیده‌های آیروالاستیک دینامیکی

- **فلاتر[2]**

ناپایداری دینامیکی سطوح برآ و یا پانل‌های سطحی را فلاتر می‌نامند. این پدیده در اثر تداخل نیروهای الاستیک و اینرسی سازه‌ای با نیروهای آیرودینامیک یکنواخت و یا غیریکنواخت ایجاد می‌گردد و باعث تغییر فرم دینامیکی سازه می‌شود. این پدیده بصورت نوسانی اتفاق می‌افتد و در صورت رسیدن به حد بحرانی خود باعث خستگی و تغییر فرم‌های زیاد می‌شود و نهایتا منجر به گسیختگی خستگی سازه می‌گردد.

[1]Reversal
[2]Flutter

- **بافتینگ**[1]

این پدیده در اثرارتعاشات گذرا اجزا سازه تحت اثر ضربات آیرودینامیکی ایجاد شده بوسیله گردابه‌ها بوجود می‌آید.

- **پاسخ دینامیکی**

ااین پدیده همان پاسخ گذرای سازه هواپیما در اثر نیروهای سریع در اثر تند باد، ضربه در هنگام فرود، اثرات شلیک موشک از هواپیما و دیگر بارهای دینامیکی است.

- **اثرات آیروالاستیک بر پایداری دینامیکی**

این مبحث نیز به مطالعه اثر تغییر فرم‌های الاستیک سازه بر روی مشتقات و پایداری دینامیکی هواپیما می‌پردازد.

1-6- سطوح کنترلی به کار رفته در بال

سطوح کنترلی سطوحی هستند که روی بال و دم هواپیما نصب می‌شوند و برای انجام عملیاتی چون برخاستن هواپیما، اوج گرفتن، ترمزهای هوایی، فرود، مانورهای پیچشی و ... از آن‌ها استفاده می‌شود. این سطوح بسته به شکل و محل نصب، هر کدام عمل خاصی را انجام می‌دهند. سطوح کنترلی انواع خاصی از قبیل فلپ‌ها، ایلرون‌ها و ... دارند.

1-6-1- فلپ‌ها[2]

فلپ‌ها سطوح لولا شده‌ای هستند که بر روی لبه تیز پشتی بال برای کاهش سرعت هوا و افزایش زاویه نزول هنگام فرود نصب می‌شوند.آن‌ها همچنین فاصله برخاستن و فرود را کاهش

[1]Bufting
[2]Flap

می‌دهند.فلپ‌ها این وظایف را به کمک واماندگی سرعت و افزایش نیروی پسا[1] انجام می‌دهند. در شکل 2-1 نمونه‌ای از فلپ نشان داده شده است[2].

شکل 1-1:نمونه‌ای از فلپ متصل به بال[2]

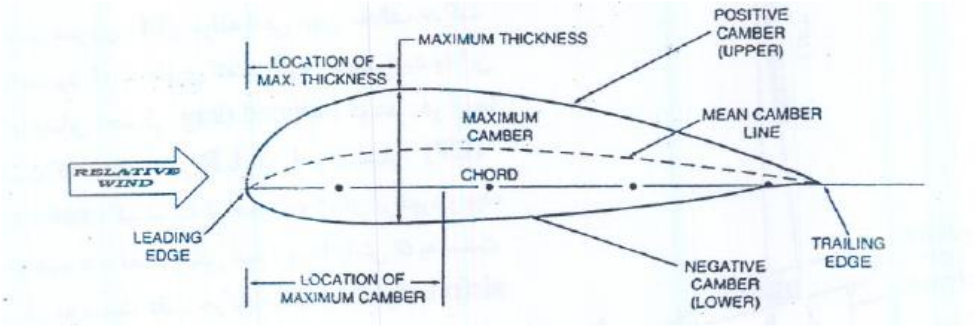
فلپ‌ها انحنای بال و ضریب برآ را افزایش می‌دهند که این اجازه می‌دهد هواپیما نیروی برآی بیشتری ایجاد کند و در سرعت کم، حداقل سرعتی که هواپیما قبل از فرود دارد را کاهش دهد.

شکل 1-2:تاثیر فلپ بر زاویه اوج هواپیما[2]

[1]Drag

باز کردن فلپ (استفاده از فلپ) موقع فرود و هنگامی که قبل ازفرود در آسمان در حال پرواز است،نیروی پسا را زیاد می‌کند که مفید است زیرا باعث کند شدن هواپیما می‌شود. فلپ‌ها همچنین باعث می‌شوند که زاویه اوج هواپیما کاهش پیدا کند که در نتیجه باعث دید بهتر خلبان نسبت به باند می‌شود. این موضوع در شکل 1-2 به خوبی مشخص می‌باشد[2].

سطوح لیفت بزرگتر، باری که روی بال است را کاهش می‌دهد و اجازه می‌دهد که هواپیما نیروی برآی مورد نیاز در سرعت‌های پایین‌تر را تولید کند و سرعت استال[1] را کاهش دهد. اگرچه تاثیرش شبیه افزایش ضریب برآ می‌باشد،افزایش ناحیه پلان بال تغییری در ضریب برآ نمی‌دهد چرا که ضریب برآ بستگی به انحنا دارد و نه وتر. در شکل 1-3 سطح مقطع یک فلپ و پارامترهای آن نشان داده شده است.



شکل 1-3:سطح مقطع فلپ[2]

بسته به نوع هواپیما فلپ‌ها شاید موقع برخاستن ناقص باز شوند. وقتی که فلپ باز می‌شود باعث می‌شود که فاصله اوج هواپیما از نظر افقی کم شود.مقدار استفاده فلپ هنگام برخاستن مخصوص به نوع هواپیما و محدودیت‌های پیشنهادی موقع ساخت می‌باشد. در بعضی از کتب پرواز توصیه شده است که از هیچ فلپی هنگام برخاستن استفاده نشود، مگر اینکه زمین نرم باشد. فلپ‌ها

[1]Stall

برای فرود باید به طور کامل باز شوند تا هواپیما بتواند در سرعت کمتر فرود داشته باشدو همچنین باعث می‌شود که هواپیما در فاصله‌ی افقی کمتری فرود داشته باشد. نیروهای برآ و پسای بالاتر همراه با باز شدن کامل فلپ اجازه می‌دهد فرودی با سرعت کمتر داشته باشیم. ولی درهواپیماهایی با بار بال کمتر (نسبت بین مساحت بال و وزن هواپیما) هندلینگ[1] سخت‌تری ایجاد می‌کند.هنگامی که هواپیما بر روی زمین است، فلپ به خاطر نیروی برآی تولیدی و جلوگیری از وارد شدن تمام نیروی وزن هواپیما به چرخ‌ها، میزان تاثیر ترمز چرخ‌ها را کاهش می‌دهد[2].

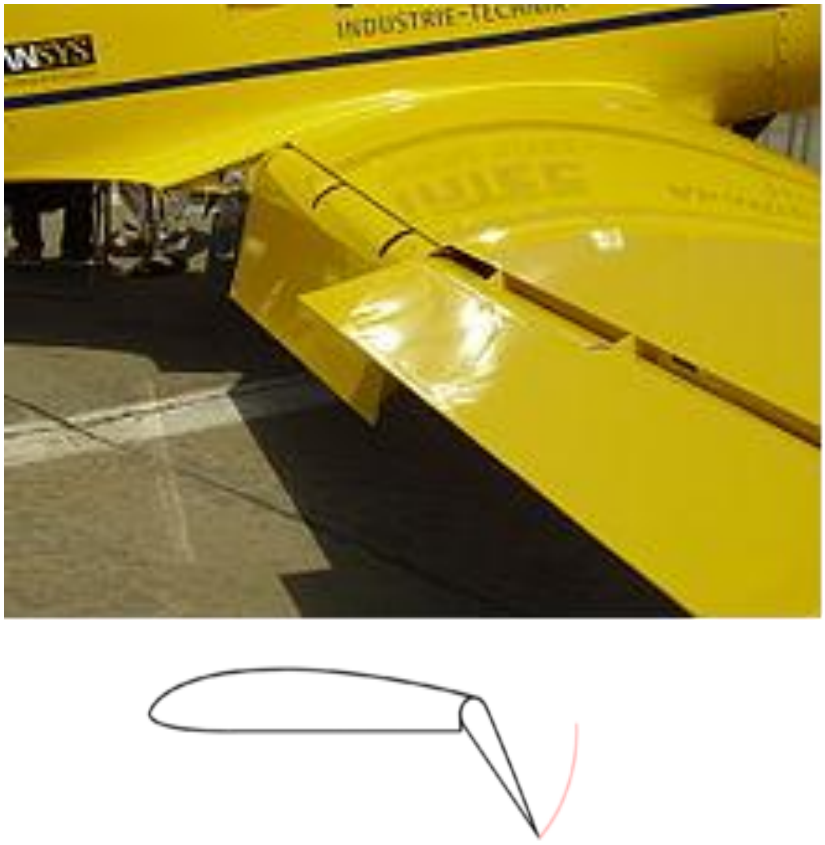
در بعضی از گلایدرها از فلپ برای کاهش سرعت استال و شعاع چرخش استفاده می‌شود. همچنین بعضی از هواپیماهای جنگنده هم از فلپ های مخصوصی برای بهبود قابلیت مانورپذیری هنگام حمله که اجازه می‌دهد جنگنده سریع‌تر فرار کند و چرخش‌های بیشتر و کوچک‌تری داشته باشد، استفاده می‌کنند. شکل 1-4 یک هواپیمای جنگده را نشان می‌دهد که به کمک فلپ‌های متصل به بال خود، یک مانور سریع را انجام می‌دهد.

شکل 1-4:مانور سریع یک هواپیمای جنگده[2]

[1]Handling

1-6-1-1-فلپ ساده[1]

در این نوع از فلپ،بخش پشتی بال رو به پایین و روی یک لولای ساده می‌چرخد. از این فلپ‌ها قبل‌تر از 1917(جنگ جهانی اول) در بسیاری از موارد و پیشتر روی نمونه‌های آزمایشی استفاده می‌شد. به علت راندمان پایین این نوع نسبت به بقیه فلپ‌ها، از این نوع فلپ جایی استفاده می‌شود که سادگی مورد نیاز باشد. در حالی که اکثر فلپ‌ها از یک سیستم پیچیده موتور و سیلندر استفاده می‌کنند، این نوعفلپ بسیار ساده است. در شکل 1-5 نمونه‌ای از یک فلپ ساده را نشان می‌دهد[2].



شکل 1-5:نمونه‌ای از یک فلپ ساده[2]

[1]Plain flap