دوشنبه، ۱۹ آبان ۱۳۹۹، شمارهٔ نهم

«دانشگاه صنعتی امیرکبیر»
«دانشکده مهندسی هوافضا»
«گروه علمی‌فرهنگی آسمان»

منهای جاذبه

هفته نامه

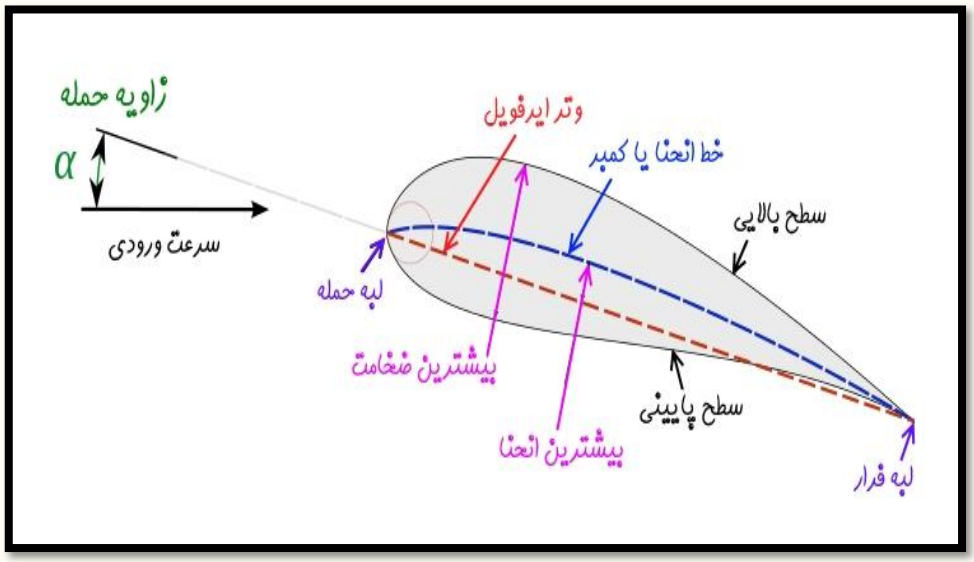
مروری کوتاه بر
ایرفویل و بال

این هفته نامه را میتوانید دوشنبه ها از کانال گروه علمی فرهنگی آسمان به آدرس: @aseman_aut، در تلگرام یا اینستاگرام دریافت نمایید.

بال،اصلی ترین عضو برای پرواز یک هواگرد محسوب می شود.نیروی لیفت برای برخاستن هواگرد از سطح زمین به وسیله شکل بال و شکل مقطع آن یعنی ایرفویل،تعیین می شود.برای بررسی انواع هندسه بال ابتدا به بررسی مقطع دوبعدی بال یعنی ایرفویل می پردازیم.البته که باید گفت این متن،تنها به بررسی کلی ایرفویل و بال می پردازد و بررسی دقیق و بسیار تخصصی،از حوصله این نوشته خارج است.

"ایرفویل"

سطح مقطع بال هواپیما، پره توربین باد و هلیکوپتر را ایرفویل می‌نامند. ایرفویل‌ها می‌توانند هندسه‌های متفاوتی داشته باشند. همچنین برای ساخت یک بال هواپیما از ایرفویل‌های مختلفی استفاده می‌شود. انتخاب مناسب این ایرفویل‌ها برای کاربردهای مختلف به ویژگی‌های آیرودینامیکی ایرفویل بستگی دارد. برای مقایسه بهتر و تمیز دادن ساختار انواع ایرفویل‌ها، نام‌گذاری‌های معینی برای ایرفویل‌های مختلف انجام شده است و این نام‌گذاری‌ها به عنوان یک قرارداد در علم آیرودینامیک مورد استفاده قرار می‌گیرد.شکل روبرو یک ایرفویل نامتقارن را به تصویر کشیده است. اجزای مختلف نشان داده شده در شکل بالا شامل،لبه فرار(Trailing Edge) ،لبه حمله(Leading Edge)،خط انحنا (Camber Line)،وتر (Chord Line)، سطح بالا و پایین، بیشترین انحنا و ضخامت و زاویه حمله (Angle of Attack) ،هستند و در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته می‌شود.



"وتر ایرفویل"

وتر ایرفویل خطی است که لبه حمله و لبه فرار آن را به یکدیگر متصل می‌کند. در واقع این عبارت، فاصله مستقیم بین لبه حمله و لبه فرار ایرفویل‌ها را نشان می‌دهد.

این طول کاربرد بسیار زیادی در توربوماشین‌ها و علم هوافضا دارد. برای مثال در این مسائل از طول وتر ایرفویل برای تعریف عدد رینولدز به شکل زیر استفاده می‌شود:

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu}$$

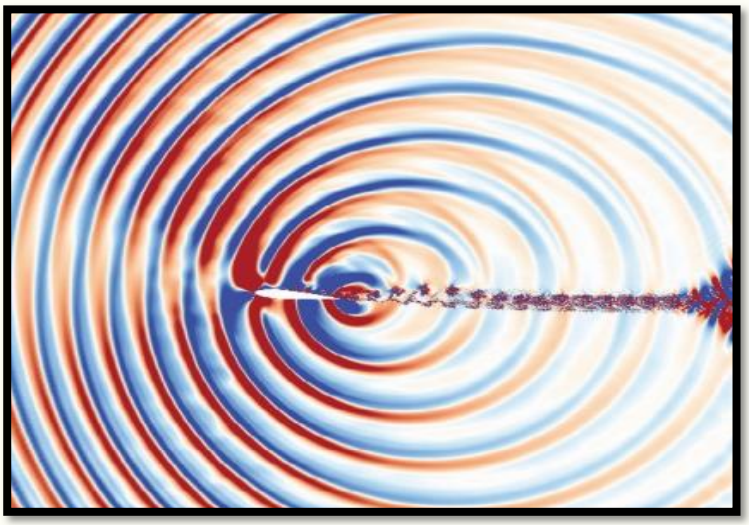
در این رابطه cطول وتر ایرفویل را نشان می‌دهد و ρ،Vوμنیز به ترتیب نمایش دهنده سرعت جریان ورودی، چگالی و ویسکوزیته هستند.

"لبهٔ حمله"

لبه حمله، قسمتی از ایرفویل است که اولین ذرات سیال برای اولین بار با ایرفویل برخورد می‌کنند. لبه حمله یکی از حساس‌ترین نقاط ایرفویل‌ها در تحلیل‌های آیرودینامیکی به کمک معادلات ناویر استوکس در نظر گرفته می‌شود و شبیه‌سازی درست جریان در این نقطه، چالش اساسی در پمپ‌ها و کمپرسورهای گریز از مرکز است. زمانی که ایرفویلی به صورت متقارن داشته باشیم و زاویه حمله در آن برابر صفر درجه باشد، نقطه سکون، دقیقا روی لبه حمله قرار می‌گیرد و سرعت در آن نقطه برابر با صفر است.

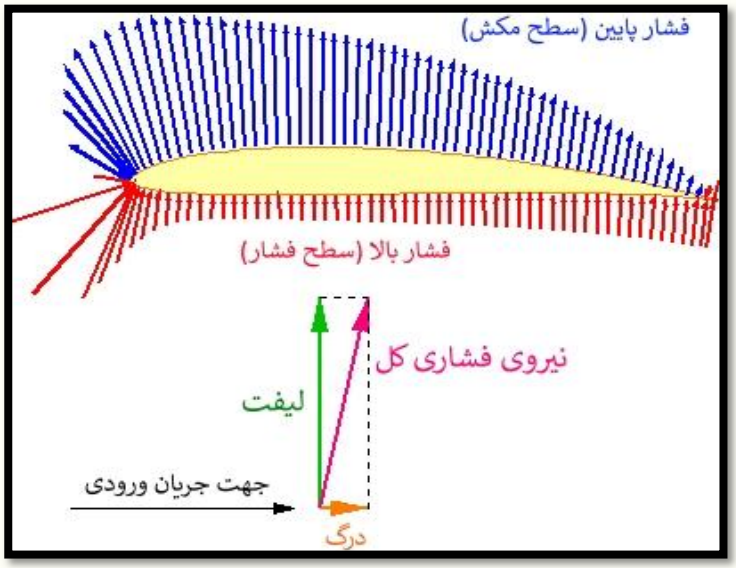
"لبهٔ فرار"

لبه فرار نقطه انتهایی ایرفویل‌ها را نشان می‌دهد. این نقطه آخرین نقطه‌ای از ایرفویل است که ذرات سیال با آن برخورد می‌کنند. لبه فرار نیز مانند لبه حمله، یکی از نقاط حساس در ایرفویل‌ها است که باعث ایجاد یک ناپیوستگی در انتهای ایرفویل می‌شود. این ناپیوستگی به عنوان منبع اصلی نویزهای آیرودینامیکی در توربین‌های باد عمل می‌کند. شکل روبرو نویز منتشر شده از لبه فرار یک ایرفویل را به تصویر کشیده است.نکته دیگر این است که محاسبه صحیح پارامترهای مختلف جریان سیال اطراف ایرفویل‌ها، نیازمند رعایت شرط کوتا (Kutta Condition)در لبه فرار است. در واقع بدون رعایت شرط کوتا، معادلات ناویر استوکس چندین جواب اطراف ایرفویل‌ها را ارائه می‌دهند و این شرط، حل صحیح را از بین تمام حل‌های موجود انتخاب می‌کند.



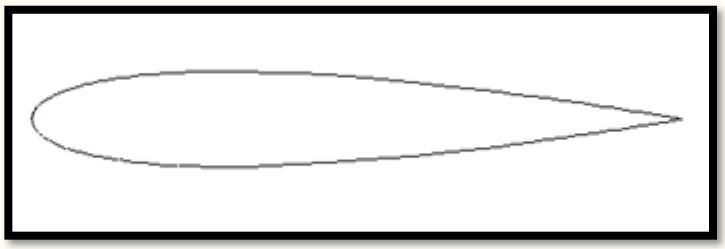
"سطح پایینی و بالایی ایرفویل"

سطح کلی ایرفویل به دو بخش کلی تقسیم می‌شود. سطحی که در قسمت پایین بین لبه حمله و لبه فرار، قرار گرفته را سطح پایینی ایرفویل می‌نامند و سطح بالایی ایرفویل، قسمت بالایی بین لبه حمله و لبه فرار در نظر گرفته می‌شود.زمانی که ایرفویل زاویه حمله مثبت دارد، فشار در سطح پایین ایرفویل زیاد است و این قسمت،سطح فشار (Pressure Surface)نامیده می‌شود. در این شرایط،فشار در سطح بالا، مقدار کمی دارد و این قسمت،سطح مکش (Suction Surface)نامیده می‌شود.در واقع نیروی لیفت، نیرویی است که جهت آن از سمت فشار به سمت مکش ایرفویل در نظر گرفته می‌شود.این دو سطح در شکل سمت راست به تصویر کشیده شده‌اند.



"خط انحنا"

خط انحنا را خط انحنا متوسط (Mean Camber Line) نیز می‌نامند. این خط، لبه حمله و لبه فرار را طوری به یکدیگر وصل می‌کند که تمام نقط آن در میانه سطح بالا و پایین ایرفویل قرار گرفته باشد.در واقع این خط، حاصل اتصال نقاط میانه سطح مکش و فشار ایرفویل به یکدیگر است. نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد این است که در ایرفویل‌های متقارن، خط انحنا میانگین و خط وتر روی یکدیگر قرار می‌گیرند. شکل روبرو یک ایرفویل متقارن ناکا 0012 با به تصویر کشیده است.

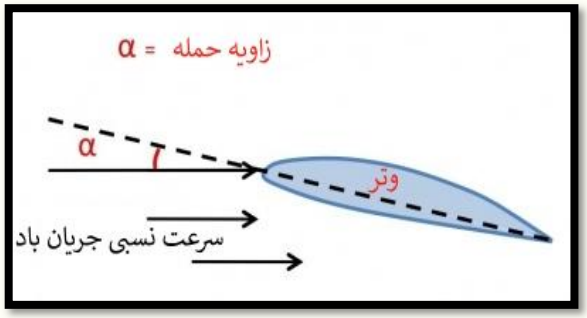


"بیشترین انحنا و بیشترین ضخامت"

نقطه‌ای که در آن، فاصله بین خط وتر و خط انحنا میانگین، بیشترین مقدار ممکن است را مکان بیشترین انحنا می‌نامند و نقطه‌ای که در آن فاصله بین صفحه بالایی و پایینی بیشترین مقدار ممکن است، مکان بیشترین ضخامت نامیده می‌شود.توجه شود زمانی که ایرفویل به صورت متقارن باشد، انحنا در تمامی نقاط برابر با صفر است ولی مکان بیشترین ضخامت نیاز به اندازه‌گیری دارد.

"زاویه حمله"

زاویه حمله در ایرفویل‌ها، نشان دهنده زاویه‌ای است که سرعت نسبی جریان ورودی به ایرفویل برخورد می‌کند. بنابراین زاویه بین خط وتر و سرعت نسبی جریان ورودی را زاویه حمله می‌نامند. این مورد در شکل زیر به تصویر کشیده شده است.(شکل A)



"سرعت نسبی جریان باد"

سرعت نسبی جریان باد، جریان هوا نسبت به ایرفویل را نشان می‌دهد که با حرکت ایرفویل درون هوا ایجاد می‌شود. برای مثال در توربین‌های باد، سرعت نسبی جریان هوا حاصل برآیند سرعت دورانی پره و سرعت جریان ورودی هوا است. حاصل برآیند این سرعت‌ها در رابطه رینولدز وارد می‌شود و زاویه حمله نیز با استفاده از همین سرعت برآیند محاسبه می‌شود.سرعت نسبی کاربرد بسیار زیادی در مسائل مختلف آیرودینامیک و توربوماشین دارد، به عنوان مثال این مفهوم، پارامتر بسیار مهمی در محاسبه مثلث‌های سرعت در علم توربوماشین است.

"مرکزفشار و مرکز آیرودینامیکی"

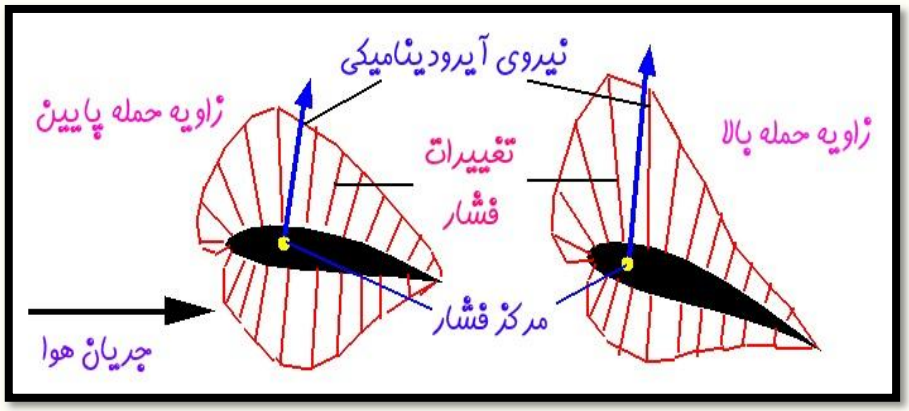
یکی از مباحث بسیار مهم در آیرودینامیک ایرفویل، تعریف مرکز فشار و مرکز آیرودینامیکی و بیان تفاوت میان این دو مفهوم است. در ادامه این دو پارامتر مورد مطالعه قرار گرفته می‌شوند.

"مرکز فشار"

مرکز فشار، نقطه‌ای در طول خط وتر است که فرض می‌شود، برآیند تمام نیروهای آیرودینامیکی در آن نقطه وارد شده‌اند. همانطور که در تصاویر قبل دیدیم،فشار روی سطح ایرفویل متغیر است. بنابراین در مسائل مختلف، نیاز به تعریف نقطه‌ای داریم که حاصل جمع توزیع فشار، در آن نقطه اعمال می‌شود. مکان این نقطه با استفاده از رابطه انتگرالی زیر قابل محاسبه است:

$$CP = \frac{\int xP(x)\,dx}{\int P(x)\,dx}$$

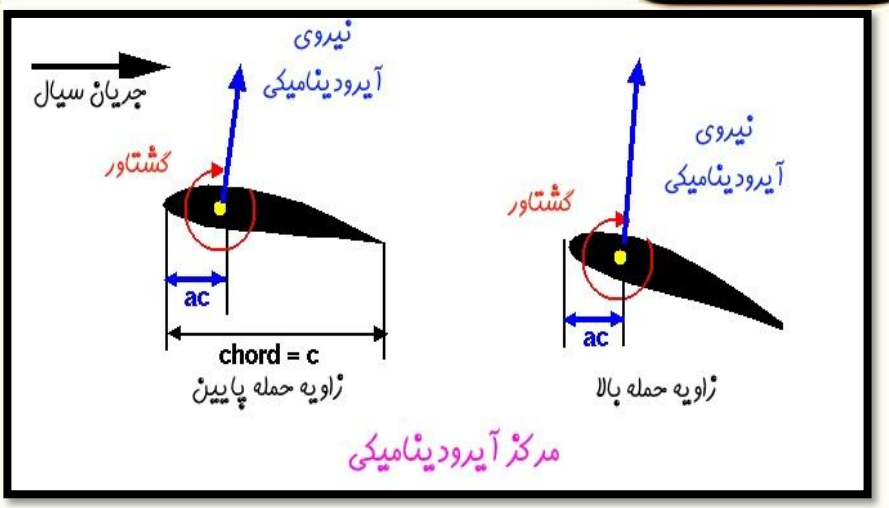
همانطور که نشان داده شد، شیوه محاسبه مرکز فشار بسیار مشابه با روش محاسبه مرکز جرم است. با این تفاوت که مرکز جرم، مکان اعمال میانگین جرم را تعیین می‌کند ولی مرکز فشار، نشان دهنده مکان اعمال میانگین فشار است.زمانی که زاویه حمله در یک ایرفویل تغییر می‌کند، نیروهای فشاری نیز جابه‌جا می‌شوند و اندازه آن‌ها در مکان‌های مختلف تغییر می‌کند، بنابراین مکان مرکز فشار با تغییر زاویه حمله جابه‌جا می‌شود. این مورد در شکل زیر به تصویر کشیده شده است.



همانطور که در شکل بالا نشان داده شده، با افزایش زاویه حمله، مرکز فشار به سمت لبه حمله حرکت می‌کند.

"مرکز آیرودینامیکی"

همانطور که اشاره شد، زمانی که ایرفویل از درون سیال عبور می‌کند، سرعت سیال اطراف این ایرفویل، در طول سطح متغیر خواهد بود. این توزیع متغیر سرعت، در نهایت باعث ایجاد توزیع متغیر فشار در سطح ایرفویل می‌شود. مکان میانگین تغییرات فشار، در قسمت قبل محاسبه و با نام مرکز فشار نمایش داده شد.نکته مهم این است که این توزیع فشار اطراف ایرفویل، باعث اعمال گشتاور به جسم نیز می‌شود. در واقع اگر کنترلی روی ایرفویل وجود نداشته باشد، زمانی که این ایرفویل در جریان هوا عبور می‌کند شروع به چرخش و رقصیدن می‌کند.همانطور که در قسمت قبل نشان داده شد، با افزایش زاویه حمله، توزیع سرعت و فشار و در نتیجه مرکز فشار تغییر می‌کند. بنابراین با توجه به تغییر مکان مرکز فشار، استفاده از آن برای تحلیل آیرودینامیکی ویژگی‌های مختلف ایرفویل، کار تحلیل را بسیار پیچیده می‌کند.گشتاور وارد بر ایرفویل در هر نقطه دلخواهی قابل محاسبه است. نکته مهمی که باید به آن اشاره کرد این است که برآیند نیروها در یک زوایه حمله خاص ایرفویل همواره یکسان است ولی گشتاور به مکانی که نیرو بر آن وارد می‌شود بستگی دارد. بنابراین ما به دنبال تعریف نقطه‌ای برای تحلیل آیرودینامیکی نیروهای وارد بر ایرفویل هستیم که مکان آن با تغییر زاویه حمله تغییر نداشته باشد.به صورت تئوری و آزمایشگاهی قابل اثبات است که اگر در ایرفویل‌هایی با عدد رینولدز پایین، نیروی آیرودینامیکی در نقطه‌ای به فاصله 1/4C از لبه حمله ایرفویل وارد شود (Cطول وتر ایرفویل است)، اندازه گشتاور آیرودینامیکی تقریبا با تغییر زاویه حمله تغییر نمی‌کند. مهندسان مکانیک، مکانی که گشتاور آیرودینامیکی وارد بر ایرفویل ثابت باقی می‌ماند را مرکز آیرودینامیکی می‌نامند. این موضوع در شکل سمت چپ بالا به تصویر کشیده شده است.



"انواع ایرفویل"

نکته دیگر این است که ایرفویل‌ها انواع مختلفی دارند، دسته‌ای از آن‌ها برای اعداد رینولدز پایین طراحی شده‌اند. دسته‌ای دیگر از ایرفویل‌ها در هواپیماهای با سرعت بالاتر از سرعت صوت مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوع دیگری از ایرفویل‌ها نیز وجود دارند که برای استفاده در توربین‌های باد طراحی شده‌اند. در واقع همانطور که مشاهده می‌شود، استفاده از ایرفویل در صنایع و کاربردهای مختلف، نیاز به طراحی‌های گوناگونی نیز دارد.نکته دیگر این است که در یک پره توربین باد ممکن است یک و یا چند ایرفویل در مقاطع و فواصل مختلف مورد استفاده قرار بگیرد. به همین دلیل طراحی ایرفویل امری بسیار پیچیده در آیرودینامیک است. شکل زیر انواع ایرفویل برای کاربردهای مختلف را به تصویر کشیده است.

همانطور که مشاهده شد، ضخامت ایرفویل و انحنای آن در کاربردهای مختلف، کاملا متفاوت است. برای مثال قایق بادبانی و توربوفن از ایرفویل‌های نازکی استفاده می‌کنند در حالی که پره ملخ، ایرفویل نسبتا ضخیمی را مورد استفاده قرار می‌دهد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت هواپیماها ضخامت ایرفویل آن‌ها نیز کاهش پیدا می‌کند.همانطور که بیان شد تعریف دقیق مفاهیم و پارامترهای مختلف ایرفویل‌ها یکی از مباحث‌بسیارمهم‌در آیرودینامیک و توربوماشین است.ایرفویل سطح مقطع یک پره سه‌بعدی توربین باد و یا بال هواپیما را نشان می‌دهد و طراحی این ایرفویل‌ها با توجه به کاربردهای مختلفی که دارند، متفاوت است. یکی از انواع طراحی‌های ایرفویل، توسط شرکت ناسا انجام شده است. این ایرفویل‌ها تحت عنوان ایرفویل ناکا شناخته می‌شوند.توضیح درمورد ایرفویل های ناکا و معادلات و ضرایب این ایرفویل ها،از حوصله متن خارج است.

"هندسه بال"

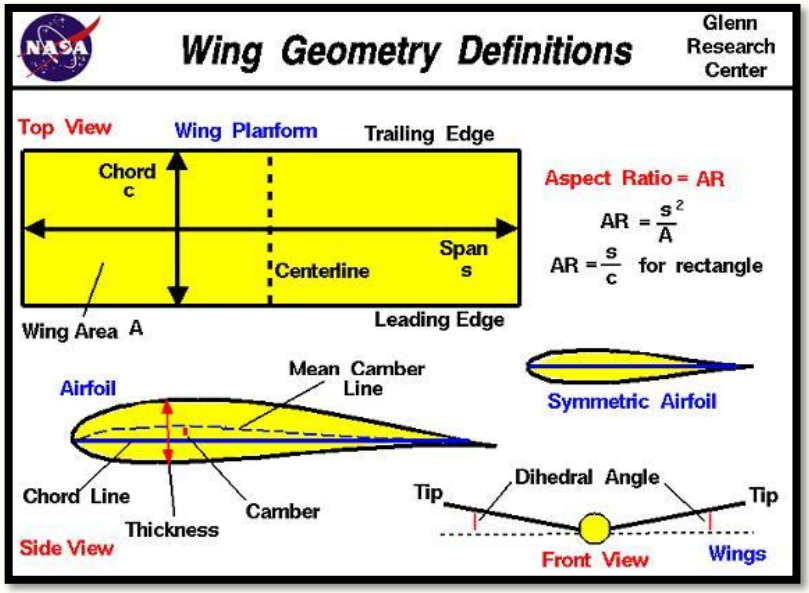
یکی از عوامل اصلی تعیین کننده نیروی بالابرنده و پسا در هواپیما، هندسه بال می باشد. در تمامی صنایع هواپیمایی از واژگان فنی یکسانی برای توصیف هندسه بال استفاده می شود. بال واقعی یک شی پیچیده سه بعدی است اما با در نظر گرفتن شکل ساده مقطع دو بعدی می توان به اطلاعات مفیدی رسید.

در تصویر روبرو،علاوه بر اصطلاحات پیشین،چند اصطلاح مهم دیگر مشاهده می شود که توضیح آنها ضروری است.

فاصله بین دو نوک بال به دهانه یا spanموسوم بوده و با sنشان داده می شود. اگر در هواپیماهاي مختلف دقت کرده باشید،هر چقدر که هواپیما سریعتر حرکت کند، دهانه بالش کوچکتر است و این به کارايي بال در سرعت هاي مختلف مربوط مي شود.

شکل بال وقتی از نمای فوقانی دیده می شود به planformموسوم است. در این شکل پلانفورم یک مستطیل است و طول کورد در هر موقعیت در طول دهانه بال ثابت است. در مورد سایر انواع پلانفورمها طول کورد در سراسر spanمتغیر است. مساحت بال یا Aمساحت تصویر بال بین لبه های حمله و فرار و نوکهای بال است.

نسبت Aspect ratioنشان دهنده میزان طویل بودن و باریکی یک بال است. این نسبت عبارت است از مربع دهانه بال تقسیم بر مساحت بال و با نماد ARنمایش داده می شود. برای یک بال مستطیل شکل به صورت نسبت دهانه به طول کورد تعریف می شود.



نسبت ARبزرگ به معنی بزرگ بودن دهانه است (مانند گلایدرهای با عملکرد بالا) در حالی که بالهایی با نسبت ARکوچک دهانه کوچکتر دارند (مانند جنگنده F-16) یا کوردهای ضخیم دارند (مانند شاتل). یکی از مولفه های نیروی پسای بال به معنی پسای القایی induced dragبطور معکوس با ARمتناسب است. بال با ARبزرگ دارای پسای کمتر و نیروی بالابر بیشتری نسبت به بالی با ARکوچک است. از آنجایی که زاویه سریدن گلایدر به نسبت نیروی بالابر به نیروی پسا بستگی دارد، یک گلایدر معمولا با نسبت AR بزرگی طراحی می شود. شاتل فضایی دارای ARکوچکی است زیرا تحت اثر سرعتهای بسیار بالا قرار دارد بنابراین گلایدر بسیار ضعیفی است (قابلیت سریدن در هوا و باقی ماندن در حالت پرواز بدون موتور را ندارد). هواپیمای F-14و F-111هر دو خاصیت حرکت با سرعتهای بالا و پایین را به خوبی دارند. آنها با تغییر هندسه بال و نسبت ARاز طریق تغییر زاویه برگشت بال می توانند خود را برای حرکت در سرعتهای مختلف مطابقت دهند.

نمای جلویی بال زاویه ای که بالها با خط افق می سازند را نشان می دهد. این زاویه به dihedral angleموسوم است. بالی که دارای زاویه مزبور است در برابر مقادیر کم غلطش به پهلو پایدار است و به موقعیت تعادل باز می گردد. هواپیماهای مسافربری از این زاویه بیشترین استفاده را می برند. زاویه dihedralمنفی که به anhedralموسوم است باعث ناپایداری جانبی شده و قدرت مانور را افزایش می دهد. هواپیماهای جنگی اغلب با زاویه منفی dihedralطراحی می شوند.

Anhedral angle

Dihedral angle

"انواع بال‌ها"

بسته به نوع هواپیما و کاربرد آن، بال‌ها دارای طراحی بسیار متفاوتی هستند.اینکه چه مقدار نیروی لیفت باید توسط بال تولید شود یا اینکه پایداری هواپیما چطور و سرعت آن چقدر باشد، کاملا به طراحی بال بستگی دارد.ممکن است هر دو سمت بال یک هواپیما منحنی باشد (هم در جلو و هم در عقب) و ممکن است در هواپیمای دیگری فقط یک سمت بال منحنی و سمت دیگر آن صاف باشد.همچنین در برخی هواپیماها نوک بال‌ها دارای زاویه و عرض کم‌تری از ریشه بال‌ها است.بال‌های هواپیماها معمولا در وسط سازه هواپیما به بدنه متصل می‌شوند.زمانی که هواپیما در حال پرواز است وزن آن را بال‌ها تحمل می‌کنند.

طراحی بال‌ها بستگی به فاکتورهای متعددی دارد که شامل سرعت هواپیما، سرعت فرود و تیک آف، سرعت صعود، کاربری هواپیما، سایز هواپیما و وزن آن دارد.معمولا در هواپیماهای مدرن بال‌ها طوری طراحی می‌شوند که به سازه خارجی برای استحکام نیازی نداشته باشند.

تمام استحکام بال‌ها از طریق سازه داخلی آنها تامین می‌شود.در برخی هواپیماهای قدیمی دیده می‌شود که از کابل‌های خارجی (اکسترنال) برای مهار کردن بال‌ها و تحمل وزن آن استفاده می‌شود.معمولا در هواپیماهایی نیاز به استفاده از کابل یا قطعات مهار کننده وجود دارد که فاصله بال‌های آن تا بدنه خیلی زیاد باشد.در ساخت بال هواپیما معمولا از آلومینیوم استفاده می‌شود.ولی بال‌هایی هم وجود دارند که در سازه آنها از چوب یا حتی پارچه استفاده شده باشد.در برخی از هواپیماها نیز از منیزیم و آلومینیوم برای ساخت بال استفاده می‌شود.در هواپیماهای مدرن سازندگان سعی می‌کنند از مواد سبک و مقاوم در ساخت بال ها استفاده کنند.این مواد پیشرفته در ساخت سازه اصلی و بدنه هواپیما نیز کاربرد دارند.بال‌های ساخته شده از فیبر کربن نیز در هواپیماهای جدید دیده می‌شوند.حتی برخی از هواپیماها از بال‌های کامپوزیتی که از ترکیب چندین مواد ساخته شده‌اند، استفاده می‌کنند.سازه داخلی بال‌ها نیز به گونه‌ای ساخته می‌شود که فشار را پخش و جذب کنند.بال‌ها نیز مانند ارابه‌های فرود و سازه اصلی هواپیما وزن زیادی را تحمل می‌کنند.

۱. بال‌های مستطیلی:

بال‌های مستطیلی ساده‌ترین نوع بال هواپیما هستند.این بال‌ها هیچ زاویه‌ای ندارند و بیشتر در هواپیماهای کوچک استفاده می‌شوند.یکی از مثال‌های خوب برای هواپیماهایی که از این نوع بال استفاده می‌کنند، هواپیمای پایپر PA 38 است.یکی از اصلی‌ترین ایرادات بال‌های مستطیلی این است که خیلی آیرودینامیک نیستند.

۲. بال‌های بیضی شکل:

بال‌های بیضی شکل که به الپتیکال معروف هستند، از نظر آیرودینامیکی بهترین نوع بال حساب می‌شوند.این بال‌ها توانایی بالایی در تقسیم نیروی لیفت دارند و مقاومت آنها در برابر هوا نیز بسیار پایین است.با این وجود این بال‌ها در صنعت هواپیماسازی امروز چندان کاربرد ندارند.معروف‌ترین هواپیمایی که از بال بیضی استفاده کرد، اسپیت فایر وایپر مارین است که نقش مهمی در نبرد بریتانیا در جنگ دوم جهانی داشت.جالب است بدانید که بال بیضی شکل در ابتدا با هدف آیرودینامیک بالا طراحی نشده است، بلکه هدف اصلی از طراحی این نوع بال‌ها جای دادن چرخ‌ها، مسلسل و مهمات درون بال بود.با چنین شرایطی، طرح بیضی شکل بهترین طرح از نظر کاهش ضخامت بال است و در عین نازک بودن، می‌تواند مقادیر زیادی از بار را درون خود جای دهد.یکی از معروف‌ترین هواپیماهای مجهز به بال بیضی شکل 38-Seversky P است.

۳. بال مخروطی:

بال مخروطی یا Tapered گونه‌ای اصلاح شده از بال مثلثی است.این بال‌ها نیز تا حدودی مانند بال بیضی شکل نیرو را پخش می‌کنند.با اینکه بال مخروطی به اندازه بال بیضی شکل آیرودینامیک نیست، ولی تعادل بهتری بین راندمان و قابلیت تولید نیروی لیفت بیشتر ایجاد می‌کند.هواپیمای P-51 موستانگ آمریکا که در جنگ جهانی از آن استفاده می‌شد، یک نمونه بسیار بارز از بال مخروطی است.

۴. بال‌های دلتا:

بال‌های دلتا در هواپیماهای مافوق صوت کاربرد دارند.اصلی‌ترین مزیت این بال راندمان بالای آن در تمام سرعت‌ها است.یعنی هم در سرعت پایین، هم در سرعت صوت و هم در سرعت بالای صوت، راندمان بال دلتا بالا است.شکل بال دلتا و سطح زیاد آن همچنین باعث می‌شود تا این نوع بال نیروی وارد شده را به خوبی تقسیم کند.بال دلتا نه تنها راندمان هواپیما را بهتر می‌کند، بلکه از نظر استحکام نیز بالا است و می‌توان مقادیر زیادی سوخت را درون آنها جای داد.ساخت و نگهداری از بال دلتا نیز ساده و کم هزینه است.با این وجود مانند هر بال دیگر، بال دلتا نیز دارای معایبی است.این بال‌ها مقاومت نسبتا بالایی در برابر هوا دارند و ضریب درگ آنها بالا است.این بال‌ها همچنین در سرعت پایین و به خصوص در هنگام فرود یا تیک آف دارای زاویه حمله زیادی هستند.هواپیمای داسو میراژ ۲۰۰۰ معروف‌ترین هواپیمای بال دلتا است.از دیگر هواپیماهای بال دلتا می‌توان به یوروفایتر تایفون، رافال و 10-لچینی اشاره کرد.در هواپیماهای بال دلتا معمولا بال‌های دم حذف می‌شوند، ولی مواردی مانند میگ ۲۱ هم هستند که در عین بال دلتا بودن دارای بال‌های دم نیز هستند.از دیگر هواپیماهای بال دلتا می‌توان به جت چند منظوره تک موتوره Tejas ساخت هند اشاره کرد.

۵. بال ذوزنقه‌ای:

بال ذوزنقه‌ای قابلیت بسیار بالایی به هواپیما می‌دهد.این بال‌ها هم در جلو و هم در عقب زاویه دارند.این طرح بیشتر در هواپیماهای جنگی ساخت آمریکا دیده می‌شود.طرح ذوزنقه‌ای قابلیت بالایی در پرواز مافوق صوت دارد و سطح مقطع راداری آن نیز پایین است.ایراد این نوع بال نیز فشار زیاد روی بال است که قابلیت مانور هواپیما را کاهش می‌دهد.معروف‌ترین هواپیمای بال ذوزنقه‌ای F-22 رپتور است.

۶. بال قوسی:

بال قوسی برای پرواز با سرعت بسیار بالا مناسب است و هواپیماهای فوق سریع از این نوع طرح بال استفاده می‌کنند.شکل هندسی پیچیده این بال‌ها ضریب درگ آنها را کاهش می‌دهد.همین مورد برای پرواز با سرعت بسیار بالا با این بالاها مناسب است.اصلی‌ترین ایراد بال قوسی پیچیدگی بالا و سخت بودن تولید آن است.همچنین در پرواز با سرعت زیر سرعت صوت، قابلیت‌های این بال چندان رضایت بخش نیست.هواپیمای کنکورد معروف‌ترین هواپیمای مجهز به بال قوسی است.

۷. بال‌های انحنا دار به عقب:

این بال‌ها در هنگام پرواز در سرعت پایین دارای راندمان بالایی هستند.بال‌های انحنا دار به سمت عقب بیشتر در هواپیماهای تجاری کاربرد دارد.معروف‌ترین آنها بوئینگ ۷۸۷ دریم لاینر است.

۸.بال‌های رو به جلو:

هواپیماهایی که بال آنها رو به جلو انحنا داشته باشد از این نوع بال استفاده می‌کنند.این بال‌ها دارای ایراداتی هستند که کنترل و مانور هواپیما را سخت می‌کنند و همین سبب شده است که این طرح طرفدار چندانی نداشته باشد.از هواپیماهایی که از این طرح استفاده می‌کنند می‌توان به گرومن X-29 سوییچ بلید و سوخو ۴۷ برکوت اشاره کرد.

۹. بال متغیر:

بال‌های خم شده به سمت عقب برای پرواز با سرعت بالا مناسب هستند.ولی برای پرواز با سرعت پایین بال‌هایی با زاویه کم بهتر هستند.در هواپیماهایی که از بال متغیر استفاده می‌کنند، این مزایا هر دو با هم وجود دارند.در بال‌های متغیر، در سرعت پایین بال‌ها باز می‌شوند تا نیروی لیفت در سرعت کم افزایش پیدا کند.در سرعت بالا نیز بال‌ها بسته می‌شوند تا نیروی درگ کاهش پیدا کند.البته بال‌های متغیر نیز دارای معایبی هستند که می‌توان به پیچیدگی فنی زیاد، قیمت بالا و وزن بیشتر آنها اشاره کرد.از مشهورترین هواپیماهای بال متغیر می‌توان به F-14 تامکت، F-111 و تورنادو اشاره کرد.بمب افکن‌های مافوق صوت B-1 لنسر، توپولوف ۲۲ ام و توپولوف ۱۶۰ نیز از بال‌های متغیر استفاده می‌کنند.