

# ہوا سا چکونہ پرواز می کند

محقق: سید محمد رضا سید صالحی



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# هواپیما چگونه پرواز می کند

محقق: سید محمد رضاسید صالحی

## فهرست مطالب

۵	..... باور عامیانه ی غلط از پرواز
۷	..... قوانین نیوتن و لیفت
۹	..... انحراف هوا در راستای بال هواپیما
۱۱	..... لیفت به عنوان عملکرد زاویه حمله
۱۳	..... air virtual scoop عنوان بال به
۱۴	..... لیفت به نیرو (توان) نیاز داد
۱۶	..... بازدهی بال ها
۱۷	..... توان و باربری بال
۱۸	..... نتیجه گیری
۱۹	..... توضیح فیزیکال بر وضعیت پرواز

## باور عامیانه ی غلط از پرواز

امروزه اکثر افراد با هواپیما سفر کرده اند. خیلی از افراد سوال ساده ای میپرسند : چه چیزی موجب پرواز هواپیما میشود؟ جواب آن یک باور عامیانه بود که تاکید زیادی بر شکل بال هواپیما داشت و آن هم این بود که جریان هوا در بالای بال مسافت بیشتری نسبت به هوا پایین بال طی میکند و چون باید این جریان در انتها بال همزمان به هم برسند باید هوای بالای بال با سرعت بیشتری حرکت کرده که با توجه به قانون برنولی باعث کاهش فشار در بالای بال میشود . این اختلاف فشار در بالا و پایین بال باعث نیروی لیفت خواهد شد. اما ما میدانیم که هواپیما ها براحتی میتوانند برعکس هم پرواز کنند و این یک پارادوکس برای توضیح عامیانه پرواز میباشد. در واقعیت شکل بال تاثیر بسیار کمی در چگونگی تولید لیفت دارد و بیشتر در رسیدن به سرعت بهینه و مشخصه Stall مورد توجه است. هر توضیحی برای پرواز که بر شکل بال تکیه دارد نادرست میباشد. تکیه بر شکل بال در توضیح چگونگی تولید لیفت بر پایه Principle of Equal Transit Times است. این قاعده اشتباهها اظهار دارد هوا در اطراف بال باید در زمان یکسان به لبه انتها بال برسد. در ادامه هوای بالا باید سریعتر حرکت کند تا مسافت بیشتر را در زمان مشخص طی کند و با قاعده برنولی نیروی لیفت ایجاد میشود. اما باید بدانیم که رسیدن هوا بالا و پایین بال به انتها در زمان مشخص لیفتی ایجاد نمیکند و در واقعیت هوای بالا و پایین همزمان به هم نمیرسند. قاعده برنولی در موضوعات پیرامون انرژی کاربرد دارد. این قاعده کاملا درست است اما به توضیح چگونگی ایجاد لیفت مربوط نمیشود. بال های یک هواپیما ۸۰۰۰۰ پوندی کار فیزیکی زیادی برای نگه داشتن هواپیما در هوا انجام میدهند. آنها در حال دادن انرژی زیادی به هوای اطراف هستند. در حالی که یکی از ملزومات استفاده از قاعده

برنولی این است که هیچ انرژی به سیستم مورد نظر وارد نشود. همچنین سرعت و فشار هوای بالای یک بال واقعی در حال پرواز به قاعده برنولی مرتبط نیست. و همچنین توضیح پرواز که بر قاعده برنولی تکیه دارد بر شکل بال تأکید میکند اما گفته شد که شکل بال در سرعت بهینه و مشخصه Stall مورد توجه است و نه در لیفت. لیفت به درجه حمله بال (Angle of Attack) و سرعت هواپیما مربوط است.

## قوانین نیوتن و لیفت

خوب بال چگونه لیفت تولید میکند؟! برای شروع به درک لیفت باید قانون اول و سوم نیوتن را بازبینی کنیم. (قانون دوم در ادامه معرفی خواهد شد).

قانون اول : یک شیء در حال سکون به سکون و در حال حرکت به حرکت  
یکنواخت مستقیم خود ادامه میدهد تا زمانی که نیروی خارجی بر آن وارد نشود.

قانون سوم : برای هر عملی عکس العملی برابر در خلاف جهت وجود دارد.

برای ایجاد لیفت بال باید عملی بر هوا انجام دهد. کاری که بال بر هوا انجام داده را عمل و لیفت را عکس العمل می نامند. لیفت یک بال برابریست با تغییر تکانه هوایی که توسط بال به سمت پایین رانده شده است. تکانه برابریست با جرم ضربدر سرعت ( $P=MV$ ). قانون دوم نیوتن هم همان فرمول  $F=MA$  میباشد. با توجه به این قانون میتوان لیفت را بدست آورد : لیفت بطور نسبی برابریست با مقدار هوای رانده شده به سمت پایین ضربدر سرعت عمودی هوا.

بسیار ساده به نظر میرسد. برای لیفت بیشتر، بال هم میتواند جرم بیشتری از هوا را براند و یا سرعت عمودی آن را افزایش داده و یا هر دو. این سرعت عمودی پشت بال همان سرعت عمودی downwash میباشد.

برای خلبان هوا در راستا بال با همان زاویه حمله و با همان سرعت هواپیما بال را ترک میکند. اما ناظر زمینی هوا را بصورت عمودی و با سرعت نسبی کم در پشت بال میبیند. زاویه حمله بیشتر منجر به سرعت عمودی بیشتر. برای یک زاویه حمله مشخص سرعت بیشتر بال منجر به سرعت عمودی بیشتر. افزایش در سرعت و

زاویه حمله بال باعث افزایش سرعت عمودی میشود که این سرعت عمودی به بال لیفت می دهد.

حال مثال خواهیم زد تا ببینیم چه مقدار هوا باید بسمت پایین توسط بال رانده شود تا هواپیما بتواند پرواز کند. برای مثال هواپیما Cessna 172 که وزنی معادل ۱۰۴۵ کیلوگرم دارد را مورد بررسی قرار میدهیم. پرواز با سرعتی معادل ۲۲۰ کیلومتر در ساعت و با زاویه بال ۵ درجه ، سرعتی عمودی هوا را به ۱۸ Km/h در پشت بال میرساند. با استفاده از قانون دوم نیوتن مقدار هوی رانده شده در هر ثانیه برابرست با ۵ ton/s. یعنی برای یک پرواز متعادل هواپیمای Cessna 172 باید در هر ثانیه هوایی ۵ برابر وزن خود را به سمت پایین براند تا نیروی لیفت را ایجاد کند. حالا به این فکر کنید که مقدار هوای رانده شده توسط یک بویینگ ۲۵۰ تنی چقدر خواهد بود.



## انحراف هوا در راستای بال هواپیما

اکثر مواقع جمله های ساده منجر به سوالات بیشتری میشود. یکی از آنها این است که چرا هوا در راستا بال چرخش کرده و انحنا آن را طی میکند؟ این سوال احتمالا چالشی ترین سوال در درک پرواز میباشد.

اجازه بدهید با یک مثال این موضوع را مورد بررسی قرار دهیم. طبق شکل ۹ لیوانی را بصورت افقی گرفته و آن را به جریان آب نزدیک کنید. مشاهده خواهید کرد که آب به سطح لیوان چسبیده و انحنا آن را دنبال میکند. از قانون اول نیوتن ما میدانیم که برای اینکه جریان آب منحرف شود باید بر آن نیرو وارد شود. نیرویی در راستا چرخش آب. از قانون سوم نیوتن ما میدانیم که باید نیرویی برابر در خلاف جهت به لیوان وارد شود. آب نیرویی بر لیوان وارد میکند که سعی دارد لیوان را به داخل جریان آب بکشد.

خوب سوال مطرح شده این است که چرا بال سبب انحراف جریان هوا میشود؟! جواب ویسکوزیته (گرانروی) میباشد. مقاومتی در برابر جریان یافتن که به هوا نوعی چسبندگی میدهد. ویسکوزیته هوا بسیار کم است اما به قدری کفایت میکند که باعث شود مولکول های هوا تمایل داشته باشند که به سطح بال بچسبند. کمی بالاتر هوا دارای اندکی سرعت است و دورتر سرعت بیشتر تا جایی که سرعت ذرات به سرعت خارجی هوا میرسد. ( باید خاطرنشان کنم که این تغییرات سرعت در جریان هوا در کمتر از ۲.۴ سانتی متر از سطح جسم است.) این تغییرات سرعت در جریان هوا مجاور بال باعث میشود که ذرات هوا به بال چسبیده و در راستا بال منحرف شوند. همانطور که لیوان جریان آب را منحرف

میکنند. منطقه ای که جریان هوا دارای تغییرات سرعت است را boundary layer مینامند.

## لیفت به عنوان عملکرد زاویه حمله

نوع های مختلفی از بال وجود دارد : conventional , symmetric , conventional in inverted flight , the early biplane wings , barn door. در هر حال بال هوا را بسمت پایین می راند. چیزی که همه این بال ها دارند زاویه حمله است. زاویه حمله اصلی ترین پارامتر در اندازه گیری لیفت میباشد.

برای زاویه صفر درجه لیفت برابر صفر است. با افزایش زاویه به بالا یا پایین خواهید دید که لیفت نسبتا به زاویه حمله وابسته است. رابطه بین زاویه حمله و لیفت در همه بال ها قابل مشاهده است و به شکل و طراحی آنها بستگی ندارد. این برای بال ۷۴۷ یا یک هواپیما معکوس و یا حتی برای دست شما خارج از پنجره ماشین در حال حرکت صادق است. بال معکوس با توجه به زاویه حمله قابل توجهی است در حالی که توضیح عامیانه در این مورد پارادوکس دارد. خلبان برای سرعت مناسب برای پرواز با بارهای مختلف و ایجاد لیفت مورد نظر زاویه حمله را تنظیم میکند. نقش زاویه حمله در درک ایجاد لیفت بسیار از شکل و طراحی بال مهمتر است. بال در مشخصه Stall و درگ در سرعت های بالا مورد توجه است.

لیفت بطور نسبی به زاویه حمله بستگی دارد. به راحتی قابل درک است که چرا لیفت زاویه ۸ درجه از ۵ بیشتر است. همانطور که گفتیم هوا به بال چسبیده و انحنای آن را طی میکند. حال هرچه قدر شیب بال بیشتر باشد هوایی که از پشت بال را ترک میکند شیب بیشتری دارد و این باعث افزایش سرعت عمودی هوا میشود که همانطور که در بالا اشاره شد یکی از پارامترهای افزایش لیفت افزایش سرعت عمودی است. لیفت زمانی مثبت است که لبه بال به سمت بالا رفته است و زمانی منفی است که لبه بال به سمت پایین است. در موقعیت و زاویه مناسب لیفت همه

بال ها و حتی بال های معکوس یکسان است تا زمانی که به Stall نزدیک شود. استال زمانی آغاز میشود که زاویه حمله زیاد شده است و جریان های هوا از بال جدا میشوند. این زاویه حمله critical angle of attack نامیده میشود. جدا شدن جریان های هوا از بال استال است و هوا دیگر مسیر انحنا بال را طی نمیکنند و همین باعث کاهش لیفت میشود.

## بال به عنوان air virtual scoop

اکنون می‌خواهیم به تصور ذهنی از بال را معرفی کنیم. این تصور جدید که می‌خواهیم آن را مورد توجه قرار دهید virtual scoop است. بال به عنوان یک اسکوپ مقدار مشخصی از هوا را از حالت افقی منحرف میکند و به زاویه حمله میراند. طول اسکوپ برابرست با طول بال و ارتفاع آن به طول chord (فاصله لبه بال تا انتها) بستگی دارد. مقدار هوای منحرف شده توسط اسکوپ متناسب است با سرعت هواپیما و غلظت هوا و نه چیز دیگر.

همانطور که قبلاً گفته شد، لیفت بال متناسب است با مقدار هوای رانده شده به سمت پایین ضربدر سرعت عمودی هوا. زمانی که هواپیما سرعت خود را افزایش میدهد virtual scoop هوا بیشتری را منحرف میکند. در نتیجه لیفت بیشتر خواهد شد و هواپیما ارتفاع میگیرد. برای ثابت ماندن ارتفاع زاویه حمله باید کاهش یابد تا سرعت عمودی را کاهش دهد و لیفت ثابت بماند. وقتی هواپیما ارتفاع میگیرد هوا غلظت کمتری دارد در نتیجه virtual scoop هوای کمتری را منحرف میکند بنابراین برای جبران آن زاویه حمله باید افزایش یابد. نظرات موجود در این بخش برای درک لیفت مهم میباشد در حالی که با توضیح عامیانه نمیتوان آنها را توضیح داد.

## لیفت به نیرو (توان) نیاز داد

وقتی هواپیما در هوا پرواز میکند هوا به پایین رانده میشود پس به هوا انرژی داده شده است. توان انرژی یا کار انجام شده در واحد زمان است. بنابراین لیفت توان نیاز دارد. این توان توسط موتور های هواپیما تأمین میگردد.

توان مورد نیاز برای پرواز چقدر است؟ اگر گلوله ای با وزن  $m$  و سرعت  $v$  شکیک شود ، انرژی داده شده به آن براحتی با فرمول  $mv^2/2$  قابل محاسبه است. در این حال انرژی داده شده به هوا از طریق بال متناسب است با مقدار هوا رانده شده ضربدر سرعت عمودی به توان  $2$ . همین طور ذکر شده است که لیفت متناسب است با مقدار هوای رانده شده ضربدر سرعت عمودی. بنابراین توان مورد نیاز برای لیفت متناسب است با وزن هواپیما ضربدر سرعت عمودی هوا. اگر سرعت هواپیما  $2$  برابر شود مقدار هوای رانده شده نیز  $2$  برابر میشود. بنابراین برای ثابت نگه داشتن لیفت ، زاویه حمله باید کم شود تا سرعت عمودی را به نصف کاهش دهد. در این صورت توان مورد نیاز نصف خواهد شد. این نشان میدهد که با افزایش سرعت هواپیما توان مورد نیاز کم میشود. در حقیقت نشان دادیم که توان متناسب است با معکوس سرعت هواپیما.

اما همه ما میدانیم که برای سرعت بیشتر توان یا انرژی بیشتری مورد نیاز است. پس توان بیشتر از آنچه که برای لیفت محاسبه میشود احتیاج است. توان مربوط به لیفت را توان "induced" مینامند. توان همچنین باید بر درگ "parasite" هم غلبه کند، درگی که مربوط به حرکت چرخها و تجهیزات دیگر در هواست.

در سرعت کم توان induced بر توان مورد نیاز پرواز حاکم است در حالی که در سرعت های بالا توان parasite معلوم کننده توان مورد نیاز است.

درگ مقاومتی است که در برابر هواپیما وجود دارد. مانند توان درگ induced و درگ parasite وجود دارند با این تفاوت که درگ induced متناسب است با توان ۲ معکوس سرعت ( $speed^2/1$ ) و درگ parasite متناسب است با سرعت به توان ۲. با نگاهی به این ۲ شکل میتوان چیزهای کمی در مورد نحوه طراحی هواپیماها فهمید. هواپیما های کم سرعت مانند گلایدر طوری طراحی میشوند که توان induced را به حداقل برسانند در حالی که هواپیما های معمولی بیشتر نگران توان parasite هستند و در جت ها هم که توان parasite حاکم بر همه چیز است.

## بازدهی بال ها

شاید سوالی برایتان پیش آید که چه عواملی بر بازدهی یک نوع بال تأثیر دارد؟ در اینجا یکی را بازگو میکنیم. دیدیم که توان induced متناسب است با سرعت عمودی هوا. اگر سطح بال افزایش یابد (بال پهن تر باشد) اندازه virtual scoop افزایش میابد که باعث انحراف میزان بیشتر هوا میشود. بنابراین برای لیفت ثابت زاویه حمله و در نتیجه سرعت عمودی باید کاهش می یابد. و چون توان induced هم به سرعت عمودی وابسته است کاهش می یابد. پس بازده بال با افزایش سطح آن زیاد میشود. گرچه بال بزرگتر باعث کاهش توان مورد نیاز میشود به هر حال باعث افزایش توان parasite هم میشود. هواپیما های کم سرعت بیشتر تحت تأثیر درگ induced میباشند بنابراین بال های بزرگی دارند. در مقابل هواپیما های پر سرعت مانند جنگنده ها تحت سلطه درگ parasite میباشند بنابراین بال های کوتاه و کوچک دارند تا بتوانند درگ parasite را کاهش دهند.



## توان و باربری بال

آیا برای مسافران و بار بیشتر، توان بیشتری مورد نیاز است؟ و آیا وزن بر stall تأثیر دارد؟ در سرعت ثابت اگر وزن هواپیما زیاد شود برای جبران آن باید سرعت عمودی افزایش یابد. این کار با افزایش زاویه حمله قابل انجام است. اگر وزن هواپیما ۲ برابر شود برای جبران باید سرعت عمودی نیز ۲ برابر شود. توان induced که متناسب است با وزن هواپیما ضربدر سرعت عمودی در هر دو مورد بالا ۲ برابر میشود. پس توان induced 4 برابر میشود. بنابراین توان induced متناسب است با وزن به توان ۲.

یکی از راههای اندازه گیری توان کل بررسی مصرف سوخت است. زمانی که سرعت ثابت است تغییر در مصرف سوخت نتیجه تغییر توان induced میباشد.

افزایش زاویه حمله و وزن علاوه بر افزایش توان تأثیر دیگری هم دارد. stall زمانی رخ میدهد که هوا دیگر سطح بال طی نمیکند این اتفاق در critical angle رخ میدهد. زاویه حمله متناسب با وزن و سرعت stall متناسب با جذر وزن افزایش میابند. در واقع هواپیما در هر سرعتی میتواند دچار stall شود زیرا برای هر سرعتی وزنی وجود دارد که میتواند stall را به وجود آورد. نکته ای که باید متذکر شوم این است که برای وزن بیشتر شیب نمودار بیشتر است.

## نتیجه گیری

- مقدار هوای رانده شده متناسب است با سرعت بال و غلظت هوا .
- سرعت عمودی هوای رانده شده متناسب است با سرعت بال و زاویه حمله .
- لیفت متناسب است با مقدار هوای رانده شده ضربدر سرعت عمودی آن .
- توان مورد نیاز برای لیفت متناسب است با لیفت ضربدر سرعت عمودی هوا .

## توضیح فیزیکال بر وضعیت پرواز

- سرعت هواپیما کم میشود. توضیح فیزیکال میگوید که مقدار هوای رانده شده کاهش یافته بنابراین زاویه حمله برای جبران زیاد میشود. توان مورد نیاز هم افزایش می یابد. توضیح عامیانه نمیتواند این را توضیح دهد.
- وزن هواپیما افزایش می یابد. توضیح فیزیکال می گوید مقدار هوای رانده شده ثابت است اما زاویه حمله باید افزایش یابد تا لیفت بیشتری ایجاد شود. توان مورد نیاز لیفت هم زیاد میشود. دوباره توضیح عامیانه عاجز از توضیح آن است.
- هواپیما معکوس پرواز میکند. توضیح فیزیکال با این مسئله مشکلی ندارد. خلبان زاویه حمله بال معکوس شده را تنظیم میکند تا لیفت مورد نظر ایجاد شود. در حالی که توضیح عامیانه اظهار دارد که پرواز معکوس امکانپذیر نیست.

