

## همه چیز در مورد شکست دیوار صوتی

تهیه و تنظیم: بابک بهرامی - مهندس مکانیک

در مقاله ها و متونی که به موضوع هوانوردی مربوط می شوند، شاید عبارت "شکست دیوار صوتی" را دیده و مایل به دانستن مطالبی در مورد این زمینه نیز باشید. در این مقاله، تمامی مطالب مربوط به دیوار صوتی و چگونگی شکست آن و موارد مرتبط بررسی و مطالعه خواهند شد.

در اعصار آغازین دوران هوانوردی ابتدایی، هواپیما ها بیشتر با سرعت های بسیار پایین نسبت به هواپیما های امروزی پرواز می کردند که حتی به بیشتر از ۳۰۰ کیلومتر در ساعت نمی رسید؛ در حالی که چنین سرعتی، سرعت مطلوب برای تیک آف یا برخاست یک هواپیمای جنگنده امروزی است و رسیدن به چنین سرعتی، ابداً مستلزم تلاش بسیار و فشار آوردن بیش از حد به موتور نمی باشد.

اما رفته رفته، سرعت هواپیما ها حتی با موتورهای پیستونی به گاه بالای ۶۵۰ کیلومتر بر ساعت رسیده و از آن زمان بود که دانشمندان علوم **آیرودینامیک** دریافتند که با افزایش سرعت، به تدریج میزان **پسا** افزایش پیدا کرده و در سرعت معینی، دیگر هواپیما قادر به سرعت گرفتن نبوده، گاه نیز **استال** می شوند.

در آن زمان، علت این موضوع بدین گونه بیان شد که با افزایش سرعت، به تدریج سرعت گردش انتها یا نوک پره های پروانه ی موتور، به سرعت صوت نزدیک شده و سرانجام در حداکثر سرعت یک هواپیمای پیستونی که حدود ۹۵۰ کیلومتر می باشد، سرعت انتهای پره ها از سرعت صوت گذشته و **پسا** یا **درگ** بسیاری ایجاد می شود که خود مانع سرعت گرفتن بیشتر هواپیماست.

در چنین سرعت هایی، پروانه موتور هواپیماهای پیستونی، نه تنها **تراست** یا **نیروی** کشش تولید نمی کند، بلکه در اثر سرعت بسیار زیاد، تبدیل به یک دیسک یا دایره توپر چرخنده می شود که جز ایجاد درگ و پسا، کار دیگری انجام نمی دهد.

آیرودینامیست های آن زمان این حد را یک محدوده سرعت یا همان دیوار صوتی در نظر گرفته و بسیاری از آنان نیز بر این عقیده بودند که گذشتن از دیوار صوتی و پشت سر گذاشتن آن، کاریست غیر ممکن؛ اما با ورود به عصر جت و پیشرفت علم آیرودینامیک، همه ما شاهد هستیم که این کار برای جنگنده های امروزی کاری بس سهل و آسان است.

حال، پس بررسی تاریخچه آن، بهتر است به اصل موضوع بپردازیم و نخست، ببینیم که خصوصیات صوت و دیوار صوتی چیست و چرا گذر از آن نیازمند قدرت و کشش و توانایی زیادی است.

**صوت**، در شرایط عادی (دما، فشار و ... معمولی) در سطح دریا دارای سرعتی معادل ۳۳۲ متر بر ثانیه یا ۱،۱۹۵ کیلومتر بر ساعت می باشد که این سرعت، با افزایش ارتفاع و کاهش فشار و تراکم هوا، کاهش یافته و در ارتفاعات بالاتر، صوت فواصل را با سرعت کمتری می پیماید.

این مسئله بدین صورت است که صوت همانطور که می دانیم، از طریق ضربات ملکول های هوا به یکدیگر و انتقال انرژی آن ها فضا را طی می کند و هرچه تعداد ملکول ها در یک حجم معین بیشتر باشند، انتقال انرژی زودتر صورت پذیرفته و صوت با سرعت بیشتری انتقال می یابد؛ چنانکه سرعت صوت در مایعات بیشتر از هوا و در جامدات بسیار بیشتر از مایعات و هوا و معادل ۶۰۰۰ کیلومتر بر ساعت است. پس در نتیجه افزایش ارتفاع، تعداد ملکول ها در یک حجم معین کاهش یافته و صوت با سرعت کمتری فضا را می پیماید. دیوار صوتی، شیئی فیزیکی و قابل روئیت نیست؛ بلکه، به دلیل اینکه گذشتن از سرعت صوت نیازمند توان بسیار بالای موتور و آیرودینامیک بسیار خوب می باشد، این حد را یک مانع برای رسیدن به سرعت های بالاتر دانسته و از آن به نام دیوار صوتی یاد می کنند.

**عدد ماخ**، در حقیقت همان نسبت سرعت شی پرنده یا همان هواپیما به سرعت صوت محیط است که به احترام دانشمندی آلمانی که برای اولین بار چنین مقیاسی را در نظر گرفت، آن را «ماخ» نام نهادند. پس عدد ماخ، کمیتی متغیر است و بسته به خصوصیات هوا مانند دما و فشار، تغییر کرده و کاهش یا افزایش می یابد .

اما حال که با عدد ماخ آشنا شدیم، به مهمترین و اصلی ترین عامل ایجاد دیوار صوتی یعنی همان "**امواج ضربه ای یا Shockwaves**" پرداخته و دلیل ایجاد درگ و پسای زیاد را در سرعت های نزدیک سرعت صوت، بررسی خواهیم کرد.

**امواج ضربه ای یا شاک و بو ها**، در حقیقت همان عامل اصلی ایجاد دیوار صوتی هستند. امواج ضربه ای، تغییری ناگهانی در فشار و دمای یک لایه از هواست که می تواند به لایه های دیگر منتقل شده و به صورت یک موج فضا را بپیماید .

برای درک بهتر مطلب، وقتی که سنگی در آب انداخته می شود، موج های در آب به وجود می آیند که به سمت خارج در حال حرکتند. این امواج، نتیجه افزایش سرعت یا اعمال نیرو به لایه ای از ملکول های آب است که قادر به انتقال به لایه های دیگر نیز می باشد، و امواج ضربه ای نیز، همان امواج درون آب هستند، با این تفاوت که آن ها در سیالی دیگر به جای آب به نام هوا، تشکیل می شوند.

در سرعت های نزدیک سرعت صوت، فرضیه غیر قابل تراکم بودن هوا رد شده و ضریب تراکم هوا به ۱۶٪ در می رسد، که مقداری غیر قابل چشم پوشی است. در این سرعت ها هوای جلوی بال یا لبه حمله به شدت متراکم گشته و دما و فشار آن به طرز قابل توجهی افزایش می یابد، همین مسئله، یکی از عوامل ایجاد امواج

ضربه ای است. هواپیما با حرکت خود در هوا، نظم فشار هوای محیط را بر هم می زند و همانند قایقی که در آب در حال حرکت است، امواجی از آن ساطع شده و به دلیل اینکه این امواج با سرعت صوت حرکت می کنند و هواپیما زیر سرعت صوت در حال سیر است، از آن دور می شوند. اما کم کم، با نزدیک شدن به سرعت های ترانسونیک و حدود سرعت صوت، این امواج فرصت دور شدن از هواپیما را نداشته و در جلوی بال متراکم می شوند. در مناطقی از بدنه هواپیما که سطوح ناموزونی نسبت به جهت حرکت هواپیما دارد، سرعت گذر هوا افزایش یافته و بر اساس اصل برنولی، با افزایش سرعت سیال، فشار آن کاهش می یابد .

در چنین سرعت هایی، هوای اطراف این سطوح به سرعت صوت می رسد، گرچه هواپیما هنوز به سرعت صوت نرسیده باشد. در نتیجه رسیدن بعضی سطوح به سرعت صوت، امواج ضربه ای تولید شده و درگ یا پسای فراوانی را قبل از رسیدن به سرعت صوت تولید می کنند، که همین مسئله گذر از دیوار صوتی را مشکل می نماید .

به سرعتی که در آن حداقل یکی از سطوح هواپیما به سرعت صوت رسیده باشد،( گرچه این پدیده در مورد خود هواپیما صادق نباشد)، **عدد ماخ بحرانی** یا **Critical Mach Number** می گویند .

عدد ماخ بحرانی را می توان به سرعتی که نمودار پسا در مقابل سرعت سیر صعودی می گیرد، نیز تعریف نمود. در این سرعت، فرامین هواپیما کم کم شروع به درست جواب ندادن کرده و حالتی شبیه به کوبیدن بر روی بال توسط امواج ضربه ای به وجود می آید که با گذر از دیوار صوتی، فرامین هواپیما به حالت طبیعی خود باز می گردند .

بنابراین، در سرعتی که هواپیما به عدد ماخ بحرانی خویش می رسد، پسا به دلیل ایجاد امواج ضربه ای به طور قابل توجهی افزایش می یابد، پس، باید تلاش بر آن باشد تا عدد ماخ بحرانی هر چه بیشتر با بهبود ویژگی های آیرودینامیکی افزایش یابد، چون اگر این اتفاق در سرعت های پایین تر رخ دهد، هواپیما نیز باید از سرعت پایین تری جدال با افزایش پسا را شروع کند.

حال ببینیم که چرا با تولید امواج ضربه ای، پسا افزایش می یابد. قانونی در مبحث دیوار صوتی بیان می کند که هر جریان هوایی که از یک موج ضربه ای بگذرد، موج ضربه ای انرژی کنتیکی یا جنبشی سرعتی آن را گرفته و در خور تبدیل به گرما و افزایش فشار می کند، در نتیجه سرعت جریان هوای گذرنده از موج ضربه ای به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. با کاهش سرعت جریان هوا در جلوی بال ها در سرعت های نزدیک سرعت صوت، تلاش پیشرانه یا موتورهای هواپیما باید چند برابر شود تا اثر کاهش سرعت در اثر موج ضربه ای را خنثی نماید. در صورتی که عدد ماخ بحرانی هواپیمایی پایین باشد، در سرعت های پایین باید نیروی رانشی هواپیما چند برابر شود که مصرف سوخت فوق العاده ای را برای گذر از دیوار صوتی به دنبال خواهد داشت؛ اما، در صورت بالا

بودن عدد ماخ بحرانی، هواپیما فقط مدت کوتاهی نیازمند قدرت و کشش بسیار زیاد برای شکستن دیوار صوتی می باشد .

با اعمال نیروی فراوان رانشی، سرانجام هواپیما بر مشکل پسای زیاد فائق آمده و از دیوار صوتی می گذرد. در نتیجه این عمل، امواج تولید شده توسط هواپیما از آن جا مانده و پشت سر هواپیما حرکت می کنند. در این حالت، وضعیت به حالت عادی بازگشته و پسای ایجاد شده به وضعیت نرمال باز می گردد. بعضی از هواپیما ها از تمام نیروی پس سوزشان یا ۱۰۰٪ قدرت موتور برای گذر از دیوار صوتی و یا سرعت ۱،۱۹۵ کیلومتر بر ساعت استفاده می کنند، در حالی که در سرعت های بسیار بالاتر، تنها از ۳۰٪ قدرت موتور برای رانش به جلو بهره می جویند. با دقت در این مثال، می توان به خوبی افزایش درگ و پسا و قدرت فروان لازم برای غلبه بر آن در سرعت های نزدیک به سرعت صوت را درک و تجزیه و تحلیل نمود .

امواج ضربه ای توسط هواپیما در سرعت صوت، بسیار قدرتمند می باشند، چنانکه در صورت پرواز هواپیما نزدیک به زمین و گذر آن از دیوار صوتی، امواج ضربه ای با منتهای قدرت به اجسام زمینی مانند شیشه های منازل و ساختمانها برخورد نموده و باعث شکستن آن ها می شود، یا حتی اگر شخصی در معرض امواج ضربه ای به طور مستقیم قرار گیرد، احتمال از دست دادن شنوایی و پاره شدن پرده گوش بسیار است. از امواج ضربه ای، در بمب ها و تسلیحات دیگر نیز استفاده می شود .

بمب ها با یک افزایش دما و فشار ناگهانی در لایه هایی از هوا، امواج ضربه ای به وجود آورده که از طریق هوا انتقال یافته و باعث شکستن شیشه ها و تخریب دیوار ها نیز می شود. اگر شخصی در فاصله ای نسبتاً نزدیک در فضایی تهی از هوا و خلأ، حتی نزدیک یک بمب ده تنی ایستاده باشد، بر فرض منفجر کردن بمب، آسیبی به وی نخواهد رسید، چون هوایی برای انتقال امواج ضربه ای وجود ندارد .

به دلیل تولید امواج ضربه ای در سرعت های حدود سرعت صوت، خلبانان سعی می کنند فقط مدت کوتاهی در چنین سرعت هایی ترانسونیک پرواز کرده و به زودی از دیوار صوتی گذر کنند، چون پرواز در این سرعت ها نیروی بسیار زیاد موتور در نتیجه افزایش فوق العاده میزان مصرف سوخت را در پی دارد .

اما حال ببینیم صدایی انفجار مانند که در هنگام **شکستن دیوار صوتی** تولید می شود نتیجه چیست. امواج حاصله از حرکت هواپیما یا صدای تولید شده در اثر حرکت، هر بار در سرعت های زیر سرعت صوت از هواپیما دور شده و به گوش شنونده می رسد. اما با رسیدن هواپیما به سرعت صوت، این صداها دیگر فرصت دور شدن از هواپیما را نداشته و کلاً در جلوی هواپیما جمع می شوند .

با گذر از سرعت صوت، صدایی چند ده برابر شده از حرکت هواپیما با هم به گوش شنونده می رسد که مانند یک انفجار شدید یا صدای رعد و برقی بسیار قدرتمند می باشد. شاید در تصاویر هواپیماهای در حال گذر از

دیوار صوتی، هاله ای سفید رنگ را در اطراف هواپیما مشاهده کرده باشید. در هنگام گذر از دیوار صوتی، اگر هواپیما نزدیک به زمین و در محیطی مرطوب با درصد بخار آب زیاد باشد، بخار آب هوا در اثر امواج ضربه ای فشرده شده و ابر سفیدی را برای چند ثانیه پدید می آورند که همان هاله سفید رنگ قابل رویت در تصاویر است. اما از امواج ضربه ای در موتورهای جت نیز استفاده می شود. بدین گونه که، هوا ورودی در موتورهای جت، حتی اگر هواپیما با سرعت های بالای صوت پروزا نماید، باید زیر سرعت صوت باشد تا قابلیت احتراق را در موتور داشته باشد .

بنابراین، اکثراً در ورودی موتورهای هواپیماهای جنگنده مخروطی را به شکل کامل یا نصف مانند هواپیماهای میگ ۲۱ یا اف ۱۰۴ ستارفایتر می بینیم، که فلسفه ایجاد این مخروط تولید عمده امواج ضربه ای است.

در صورت تولید امواج ضربه ای، هوای عبوری از میان آن با سرعت کاهش یافته یا زیر صوت وارد موتور می شود و فرآیند احتراق به طور کامل انجام می پذیرد. برای انجام پرواز های مافوق صوت، اغلب هواپیماهای جنگنده از مقطع بال های ویژه ای که عدد ماخ بحرانی را به حداکثر می رسانند، استفاده می نمایند و مقطع بال ها معمولاً بسیار نازک و متقارن می باشد. به عقب برگشتگی بال های هواپیماهای مدرن نیز در نتیجه تلاش برای افزایش عدد ماخ بحرانی بوده چرا که آزمایش های تونل باد نشان داده که با به عقب برگشتگی بال ها به میزان چند درجه عدد ماخ بحرانی به میزان قابل توجهی افزایش می یابد، تا جایی که هواپیماهای مسافری سریع السیر مانند بوئینگ ۷۴۷ که در حدود سرعت صوت یا حدود ۹۸۰ کیلومتر بر ساعت پرواز می کنند، نیز به بال هایی به عقب برگشته مجهزند. در برخی از هواپیماها، مانند هواپیمای اف ۱۴ تامکت، از سیستم بال های متغیر استفاده شده که در این سیستم، در سرعت های پایین که از عدد ماخ بحرانی خبری نیست بال ها گسترده می شوند و برای فراوانی تولید می کنند، ولی رفته رفته با نزدیک شدن به سرعت صوت، کامپیوتر موجود در این سیستم خود زاویه لازم برای افزایش عدد ماخ بحرانی را محاسبه کرده و بال را متناسب با زاویه آن تغییر داده و به عقب بر می گرداند. این سیستم به دلیل هزینه های بالا و سنگینی بیش از حد آن، دارای استفاده محدودی می باشد. هواپیماها کلاً از نظر سرعت نسبت به سرعت صوت به چند دسته زیر تقسیم می شوند:

- هواپیماهای زیر سرعت صوت یا مادون صوت با محدوده سرعت ۳۵۰ تا ۹۵۰ کیلومتر بر ساعت، Subsonic
  - هواپیماهای حدود سرعت صوت با محدوده سرعت ۹۵۰ تا ۱۲۰۰ کیلومتر بر ساعت، Transonic
  - هواپیماهای سرعت صوت با محدوده سرعت دقیقاً سرعت صوت نسبت به محیط، Sonic
  - هواپیماهای بالای سرعت صوت یا مافوق سرعت صوت با محدوده سرعت ۱ ماخ تا ۵ ماخ، Supersonic
  - هواپیماهای با سرعت بسیار بیشتر از سرعت صوت با محدوده سرعت ۵ ماخ و بالاتر، Hypersonic
- لازم به ذکر است، اولین بار، خلبانی آزمایشی آمریکایی به نام چاک ییگر، با انجام اصلاحاتی بر روی یک بمب افکن قدیمی آن را به چهار موتور موشکی مجهز کرده و بر فراز بیابانی در آمریکا، پس از جدا شدن از هواپیمای

مادر، به پرواز در آورد. پس چند ثانیه پرواز هواپیمای پرتغالی رنگ ملقب به-X ۱ به صورت گلاید، خلبان چهار موتور موشکی خود را روشن کرده و پس از چند لحظه صدایی رعد آسا در آسمان شنیده شد که همان نتیجه شکستن دیوار صوتی برای اولین بار در جهان بود. در این آزمایش، این هواپیما به سرعت ۱۶/۱ ماخ دست یافت، و با ورود به عصر جت، رویای شکستن دیوار صوتی و پا گذاشتن به سرعت صوت نیز به واقعیتی بسیار قابل لمس مبدل گشت.