

## پرواز با سرعت‌های فراصوت و اثرات آن بر خلبان و ساکنین منطقه پرواز

\*محمد اخلاقی

### چکیده

اولین پرواز با سرعتی بیشتر از سرعت صوت در سال ۱۹۴۷ میلادی انجام شد. اما پرواز با این سرعت باعث ایجاد موج‌های شوکی در هوای اطراف هواپیما می‌شود، که اگر هواپیما به سطح زمین نزدیک باشد می‌تواند اثرات مخربی را بر سلامت بشر و حتی ساختمان‌ها داشته باشد. پژوهش‌هایی که از آن زمان تا به حال در مورد اثرات این امواج بر سلامت انجام شده است را می‌توان به دو دسته‌ی عمومی تقسیم کرد؛ اثرات گذر از دیوار صوتی بر سلامت خلبان یا مسافران هواپیما و تأثیرات آن بر محیط اطراف هواپیما و مخصوصاً سلامت انسان‌های ساکن بر روی زمین. بیشترین اثرات بر سلامت خلبان یا مسافران هواپیما را می‌توان ناشی از نقایص فنی در مقابل تغییرات فشار ناشی از این سرعت‌ها دانست. از آنجایی که این پروازها در ارتفاعات بالا انجام می‌شود، پرتوهای پرنرژری خورشیدی نیز یکی از عوامل تأثیرگذار بر افراد درون هواپیما هستند. ضمناً در مطالعه‌ای درصد شیوع هیپرکلسترولمی و هیپرتری‌گلیسریدمی در خلبانان هواپیماهای فراصوتی بررسی شده است.

اما بیشتر تأثیرات مخرب پرواز با این سرعت بر سلامتی انسان برای ساکنین زمینی است که در معرض این امواج صوتی قرار می‌گیرند. یکی از بیشترین اثراتی که مورد مطالعه قرار گرفته، اثر انفجارهای صوتی روی بیداری از خواب شبانه ساکنین محلی است؛ تحقیقات در این زمینه زیاد بوده و حتی بعضی‌ها بر اساس نمونه‌گیری‌های محلی معادله‌ای برای پیشگویی حداکثر درصد افرادی که ممکن است در اثر شدت‌های مختلف صوتی ناشی از عوامل هوایی از خواب بیدار شوند را به دست آورده است. در تعدادی از مطالعات هم اثر این صدا در کنار سایر صداهای ناشی از هواپیماها بر یادگیری دانش‌آموزان بررسی شده و بر تأثیرات مخرب آن در این زمینه تأکید شده است.

کلمات کلیدی: دیوار صوتی، انفجار صوتی، موج شوک، سرعت فراصوت

مجله علمی ابن سینا / اداره بهداشت و درمان نهجا (سال یازدهم، شماره دوم، زمستان ۱۳۸۷، مسلسل ۳۰)

## فیزیک انفجار صوتی

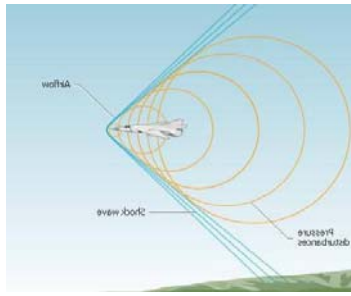
### مقدمه

اولین پرواز فراصوت انسان توسط سروان خلبان چارلز بیگر در یک هواپیمای آزمایشی به نام X-1 که فقط به این هدف ساخته شده بود در سال ۱۹۴۷ انجام شد. شصت سال قبل از او، ارنست ماخ، فیزیک‌دان و فیلسوف توانست در سال ۱۸۸۷ میلادی با روش جالبی از شکستن دیوار صوتی و امواج شوک حاصل از آن توسط یک گلوله عکس‌برداری کرده و وجود خارجی این رویداد، که تا آن موقع کاملاً نظری بود، را نشان دهد و ۲۰۰ سال قبل از آن، اسحاق نیوتون (۱۶۴۲ تا ۱۷۲۷ میلادی) برای اولین بار معادلات حرکت موج صوتی در یک محیط را نوشته بود [۲]. اما اولین سؤالی که شاید به ذهن خطور کند، این است که چرا سرعت صوت مهم است؟ چگونه هواپیما با شکستن سرعت صوت باعث موج انفجاری به این قدرت می‌شود؟

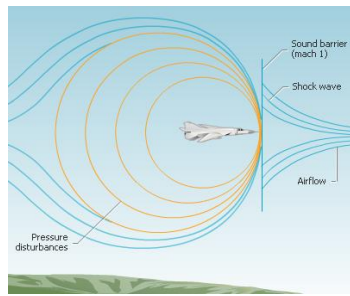
سرعت صوت در یک محیط، یا سرعت انتشار یک موج فشاری در آن محیط، مستقل از خصوصیات منبع و فقط وابسته به دمای محیط و ساختار شیمیایی آن است. انتقال هر نوع تغییرات یا اثری که در محیط یک سیال (گاز یا مایع) لزوماً با موج‌هایی فشاری است که ناچار به حرکت با سرعت صوت در آن محیط است. حضور یک جسم متحرک در یک سیال منجر به تولید امواج اختلالی اطراف آن می‌شود که با دور شدن از شیء بزرگ‌تر و ضعیف‌تر می‌شوند؛ مانند یک قایق که روی آب حرکت می‌کند. در شکل ۱، تصویر ساختگی از یک هواپیما در هوا و موج‌های فشاری که اطراف آن تولید شده، دیده می‌شود. این امواج اختلالی خود با سرعت صوت حرکت می‌کنند [۳ و ۴]، در نتیجه هنگامی که هواپیما به سرعت صوت می‌رسد (شکل ۲)، تمام امواج اختلالی که جلوی هواپیما هستند روی هم فشرده شده و مقاومت بیشتری برای هواپیما ایجاد می‌کنند که باعث متراکم شدن بسیار زیاد هوا مقابل هواپیما می‌شوند. متراکم شدن ناگهانی هوا در این لحظه باعث می‌شود که تمام ملکول‌های آب معلق در هوا متمرکز شوند و توده‌ای ابر مانند را در جبهه‌ی موج درست کند، که یکی از پرترفدارترین جنبه‌های

هدف از پزشکی هوافضا تأمین سلامت، ایمنی، راحتی و کارکرد مؤثر انسان از طریق انتخاب و تربیت مناسب خدمه‌ی پرواز، حفاظت در مقابل محیط‌های منحصر به فرد پروازی و اثرات فیزیولوژیکی و روانی آن و شناخت وسیله‌ی پروازی و ارتباط مناسب انسان با آن است [۱]. اکثر هواپیماهای جنگی امروز می‌توانند به سرعت صوت رسیده و حتی از آن فراتر روند. شرایط پرواز با سرعت‌های فراصوتی تغییرات زیادی را در دما و فشار در کنار شتاب‌های زیاد برای خلبان ایجاد می‌کند که بررسی فرایند این پدیده در حیطه‌ی پزشکی هوافضا قرار می‌گیرد. علاوه بر خود خلبان، پرواز با سرعت‌های بیشتر از سرعت صوت، باعث می‌شود موج‌های شوک (Shock Waves) از جنس هوای متراکم، در فضای اطراف هواپیما منتشر شده و صدایی رعد و برق مانند یا انفجار صوتی (Sonic Boom) تولید شود که می‌تواند اثرات مخربی را روی محیط زیست، سلامت انسان و حتی ساخته‌های دست او داشته باشد.

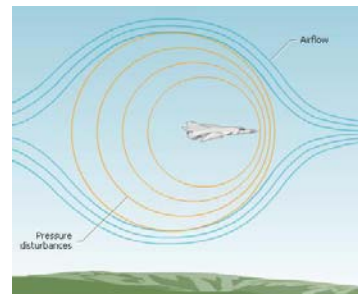
بر این اساس، در این تحقیق مروری، اثرات پرواز با سرعت‌های فرا صوت و در نتیجه شکستن دیوار صوتی بر سلامت انسان از دو وجه بررسی خواهد شد: ۱. تأثیرات آن بر سرنشینان هواپیما و ۲. اثرات موج‌های شوک آن بر سلامتی انسان و محیط زیست وی. همانطور که در ادامه و با مرور پژوهش‌ها می‌بینیم، به دلیل پیشرفت فناوری ساخت هواپیماهای شکاری، گذر از دیوار صوتی اثرات کمی روی محیط داخل کابین خلبان، که محیطی کاملاً ایزوله است، دارد و اکثر حجم مقاله معطوف به بحث بر اثرات این موج شوک بر انسان و محیط زیست او خواهد بود. اما برای درک بهتر این امواج شوک و اثراتی که بر سلامت انسان و محیط زیست او می‌گذارند، لازم است مروری هم بر فیزیک این امواج و معرفی پارامترهایی که در تولید و اندازه‌گیری امواج برای محقق اهمیت دارند، داشته باشیم.



شکل ۳- حرکت با سرعت بیشتر از صوت



شکل ۲- حرکت با سرعت صوت

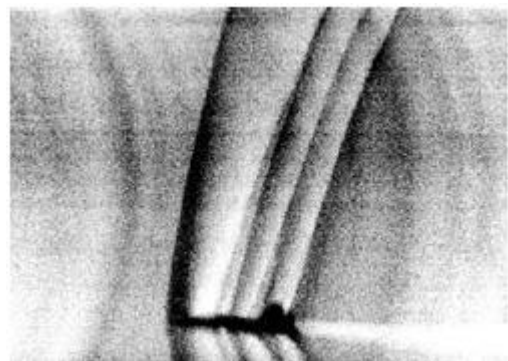


شکل ۱- حرکت با سرعت کمتر از صوت

توپخانه‌ها نیز توپ‌های خود را با سرعتی حدود دو برابر سرعت صوت پرتاب می‌کنند و با وجودی که توپ‌ها خیلی از هواپیما کوچکتر هستند، اما به دلیل نزدیکی با محل پرتاب، شدت آنها ممکن است از شدت انفجار صوتی هواپیماهای فراصوتی بیشتر باشد [۶]. سفینه‌های فضایی نیز هنگام پرتاب و فرود دیوار صوتی را می‌شکنند [۷]. در نهایت می‌توان گفت که فقط بشر نیست که دیوار صوتی را شکسته است، در طبیعت نیز صدایی که ما از رعد و برق می‌شنویم یک موج شوک است که به خاطر انتقال حرارت با سرعتی ورای سرعت صوت ایجاد می‌شود [۸]. یکی از مهمترین عوامل بازدارنده در پرواز با سرعت‌های فراصوت، اصطکاک بسیار زیاد موج شوک با بدنه‌ی هواپیما است که دمای آن را بسیار بالا می‌برد. طبق محاسبات، هواپیماهای عادی (ساخته شده از آلومینیوم و سایر فلزهای سبک) نمی‌توانند بیشتر از ۲/۷ برابر سرعت صوت حرکت کنند [۹]. اخیراً در سال ۲۰۰۴ میلادی سازمان هوا-فضای ایالات متحده (ناسا) با ساخت هواپیمایی خاص که توانایی رسیدن به ۹/۶ برابر سرعت صوت را دارد، رکورد جدیدی در افزایش سرعت بر جای گذاشت. البته لازم به یادآوری است که در ارتفاعات مختلف جوی، دما و ساختار شیمیایی محیط تغییر کرده و در نتیجه سرعت صوت تغییر می‌کند؛ در ارتفاع ۳۵ هزار پا یا حدود ۱۰ کیلومتر، سرعت صوت به ۱۰۶۳ کیلومتر بر ساعت کاهش پیدا می‌کند و از آن ارتفاع بالاتر تا حدود ۶۰ هزار پا یا ۱۸ کیلومتر، تقریباً ثابت می‌ماند.

### تأثیرات پرواز با سرعت‌های فراصوت روی

بصری پرواز فراصوت برای عموم مردم می‌باشد. البته چگالی زیاد هوا مقاومت هوا را مقابل هواپیما بیشتر کرده و پرواز را سخت‌تر می‌کند. در صورتی که هواپیما به شتاب گرفتن ادامه دهد و به سرعت‌های بالاتر از صوت برسد، دیگر جریان روبرویی هوا نمی‌تواند خود را با امواج اختلالی که سریعتر از اینکه حرکت کنند ایجاد می‌شوند هماهنگ کند تا جریانی پیوسته داشته باشد و به همین دلیل اختلالی بسیار قوی به نام موج شوک ایجاد می‌شود (شکل ۳). در شکل ۴ تصویری واقعی از موج‌های شوک ناشی از سرعت فراصوت هواپیمای T-38 دیده می‌شود که با دوربین‌های خاصی گرفته شده است.



شکل ۴- موج‌های شوک حاصل از سرعت فراصوت یک هواپیما

اندازه و شکل هواپیما به دلیل حجم هوایی که جلوی خود متمرکز می‌کند اثر مستقیمی روی شدت موج دارد اما تأثیری روی شکل انتشار موج فشار ندارد [۴]. البته غیر از هواپیماهای جنگی، دیوار صوتی به وسیله‌های دیگر هم شکسته می‌شود؛ در اکثر اسلحه‌ها سرعت خروج گلوله از اسلحه بیشتر از سرعت صوت در سطح دریا است (۱۱۸۸ کیلومتر بر ساعت) [۵].

## سلامت

همانطور که پیشتر گفته شد، می‌توان اثرات ناشی از پرواز با سرعت‌های فراصوتی روی سلامت را به دو بخش تقسیم کرد: ۱. اثراتی که روی خلبان یا مسافران هواپیمای فراصوت گذاشته یا از آن نتیجه می‌شود؛ و ۲. اثراتی که موج شوک‌ها بر محیط زیست انسان و مهمتر از آن روی خود انسان می‌گذارد.

## تأثیرات پرواز فراصوتی بر سلامت خلبان و

## سرنشینان هواپیما

اکثر هواپیماهای جنگی امروزی، با دستگاه‌های تقویت فشاری که در کابین خلبان دارند، بدون هیچ مشکلی می‌توانند سلامت خلبان را تا ارتفاع ۴۰ هزار پا تأمین کنند طوری که خلبان کمتر نیاز به اکسیژن خالص با فشار زیاد داشته باشد [۱، ۱۰]. اما در صورتی که به هر دلیل کابین فشار خود را از دست بدهد ریه‌ها توانایی حفظ فشار را نخواهند داشت و تنها اکسیژن خالص با فشار بالا می‌تواند از هیپوکسی یا کمبود اکسیژن جلوگیری کند. از آنجایی که اکثر پروازهای فراصوت در ارتفاعات بالا انجام می‌شود، موضوع فشار اکسیژن درون کابین در ارتفاعات بالا اهمیت پیدا می‌کند. استفاده از تنفس در فشار بالا (Pressure Breathing)، در مقدار شتاب  $G$  که به خلبان وارد می‌شود نیز مؤثر است، طوری که نشان داده شده است [۱۱] تنفس در فشار بالا خونرسانی مغزی (cerebral perfusion) را در مقابل شتاب‌های بالا حفظ می‌کند و مقاومت بدن را در برابر چنین شتاب‌هایی بالا می‌برد.

کاهش ناگهانی فشار کابین در یک هواپیمای جنگی ممکن است عواقب بسیار وخیمی داشته باشد، اخیراً در سال ۲۰۰۷ چنین اتفاقی برای یکی از هواپیماهای جنگی نیروی هوایی سلطنتی بریتانیا (IAF) رخ داد. با وجود ناچیز بودن صدمات به خلبانان، موضوع مورد مطالعه‌ی وسیعی قرار گرفت [۱۲]. هنگامی که هواپیما به ارتفاع ۱۱/۴ کیلومتر و سرعت حدود ۱/۱۵ برابر سرعت صوت رسیده بود، صدای انفجار بلندی شنیده شد و بخشی از قسمت جلوی کابین اول به کلی متلاشی شد و

زخم‌هایی را روی بدن خلبان آن ایجاد کرد. سیستم‌های ارتباطی قطع شده بود و خلبانان نمی‌توانستند با هم ارتباط برقرار کنند. هر دو خلبان اکسیژن فشار قوی را روشن کرده و بلافاصله ارتفاع را به ۲ کیلومتر کاهش دادند. سرعت که به ۶۵۰ کیلومتر بر ساعت رسید، خلبانان صدای همدیگر را شنیده و بدون هیچ حادثه‌ای فرود آمدند. هیچ گونه صدمه‌ی وخیم از جمله درد ناگهانی پشت جناقی قفسه سینه، سرفه یا نفس تنگی و هیچ عارضه پوستی یا hyperaesthesia یا بی‌حسی پوستی نیز برای هیچ‌کدام گزارش نشد [۱۲]. هر دو خلبان به علت پرواز در ارتفاع ۱۱/۴ کیلومتری به مدت ۴۸ ساعت قرنطینه شدند و بعد از آن دوباره آماده‌ی پرواز بودند.

مطالعه‌ای دیگر که در لهستان روی ۲۷۲ خلبانان هواپیماهای فراصوتی انجام گرفت؛ هیپرکلسترولمی در ۷۲/۴ درصد و هیپرتری‌گلیسریدمی در ۱۷/۱ درصد از آنان دیده شد، سطوح کلسترول HDL در ۶۹/۹ درصد از آنها کاهش و کلسترول LDL در ۸۶/۹ درصد از خلبانان افزایش پیدا کرده بود و بیشتر از نیمی از آنها (۵۲/۲ درصد) کمی افزایش وزن داشتند و ۶/۶ درصد آنان چاق بودند [۱۴].

اما مشکل دیگر که تنها در ارتفاع بالا اهمیت پیدا می‌کند نازکی لایه‌های جوی در این ارتفاعات و در نتیجه اثرات پرتوهای پرانرژی یونیزه‌کننده کیهانی یا خورشیدی روی خلبان و سرنشینان هواپیماست. البته شدت این تشعشعات متغیر است طوری که برای اطلاع از مقدار تشعشعاتی که در هر ارتفاعی تابیده می‌شود اکثر هواپیماها دوزیمترهای خاص این پرتوها را در اختیار دارند [۱۳].

به طور کلی می‌بینیم در صورت سالم بودن هواپیما و تمام تنظیمات کابین خلبان، مشکل خاصی خلبان را تهدید نمی‌کند. اگر به گذشته برگردیم، می‌بینیم سروان خلبان چارلز بیگر، که اولین پرواز فراصوتی را انجام داد، با وجود دردی که به دلیل شکستگی دنده که چند روز قبل از آن به علت افتادن از پشت اسب روی داده بود، موفق شد این پرواز تاریخی را بدون هیچ مشکلی به پایان برساند، هرچند پزشکان از صدمه‌ی وی مطلع

نتیجه رسید که حتی انفجارهای صوتی با شدت‌های خیلی زیاد، احتمال تأثیرگذاری مستقیم روی سلامتی (شنوایی) فرد ندارند [۱۹]. به همین دلیل تقریباً تمام پژوهش‌ها روی اثرات جانبی این امواج شوک انجام شده است، مانند تأثیرگذاری در خواب شبانه مناطق مسکونی، تأثیر در یادگیری دانش‌آموزان و موارد دیگر که در ادامه به تفصیل معرفی خواهند شد.

از آنجایی که شکستن دیوار صوتی و ایجاد موج‌های شوک ناشی از سرعت‌های فراصوت بر فراز خاک خیلی از کشورهای دنیا منع قانونی دارد [۲۰]، بیشتر محققان برای تحقیق روی اثر انفجارهای صوتی مجبور به استفاده از بلندگو برای شبیه‌سازی آن صداها شدند. به عنوان مثال در یکی از مطالعات [۲۱]، بلندگوها صدایی با مشخصات ۸۰ تا ۸۵ دسی‌بل برای مدت ۳۰۰ میلی‌ثانیه را به عنوان انفجار صوتی تولید کرده‌اند، شدت ۱۳۰ دسی‌بل که قبلاً گفته شد، شدت متوسط انفجار صوتی بیرون از ساختمان بود، درون ساختمان (محل خواب) شدت کمتر می‌شود. در میان اثراتی که انفجار صوتی روی انسان دارد، بیشترین موضوعی که مورد مطالعه قرار گرفته است، تأثیر این انفجارها روی خواب افراد است. در مطالعه‌ای که ناسا در سال ۱۹۷۱ روی این موضوع انجام داد [۲۲] اثر انفجارهای صوتی مصنوعی روی کودکان (حدود ۷ ساله) را مورد بررسی قرار داده نتایج این مطالعه نشان داد که به نظر نمی‌رسید که انفجار صوتی به عمق خواب آنها وابسته باشد، در حالی که در مردان میانسال (حدود ۵۱) و مسن (حدود ۷۱) بیدار شدن در اثر انفجار صوتی مصنوعی وابسته به عمق خواب بود که به ترتیب ۱۸ درصد و ۳۲ درصد اوقات از خواب بیدار می‌شدند. این آزمایش به مدت ۲۰ شب غیر پیوسته انجام شد و صدای انفجارهای صوتی مصنوعی تقریباً هر یک ساعت یک بار پخش می‌شد. نتیجه‌ی پژوهش گریفان و جنسن [۲۱] که در آن دو نفر را به مدت ۵۷ شب مورد بررسی قرار داده بودند، نشان می‌دهد که اختلال خواب در تمام مراحل کاملاً آشکار بود و در هیچ قسمت از مطالعه افراد به صدای انفجارهای صوتی عادت نکرده بودند. در مطالعه‌ای دیگر توسط ناسا [۲۴]، دیده شد که بلندی صدای انفجار صوتی و در نتیجه

نبودند [۲]. در گزارش منتشر شده توسط ناسا در سال ۱۹۶۴، در مورد ساخت هواپیمایی که دیوار صوتی را می‌شکند آمده است: هیچگونه تنظیمات زیست-مهندسی یا پزشکی که خاص هواپیماهای فراصوتی باشند وجود ندارد [۱۵].

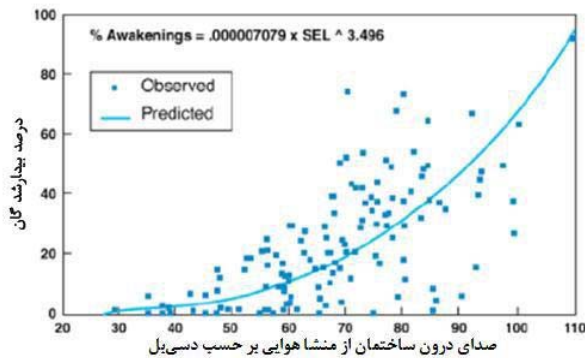
### تأثیرات پرواز فراصوتی روی سلامت افراد و محیط

#### زیست

موج شوکی که توسط یک هواپیمای در حال پرواز با سرعت فراصوت ایجاد می‌شود تغییراتی ناگهانی در فشار هوا ایجاد می‌کند که روی زمین به عنوان انفجار صوتی شناخته می‌شود. البته شدت این موج شوک به فاصله‌ی هواپیما و شرایط جوی بستگی دارد. انفجارهای صوتی روی مناطق مسکونی عموماً به عنوان یک مزاحمت شناخته می‌شود، طوری که اغلب هواپیماهای فراصوتی از پرواز با این سرعت‌ها بر فراز خاک منع شده‌اند. به عنوان مثال، هواپیمای انگلیسی-فرانسوی کونکورد که هواپیمای مسافربری فراصوتی بود فقط می‌توانست روی آب دیوار صوتی را شکسته و به سرعت‌های فراصوتی برسد و به همین دلیل قدرت رقابتی خود را از دست داد و از اکتبر ۲۰۰۳ پروازهای خود را متوقف کرد. مطالعاتی روی کاهش اثرات انفجار صوتی انجام شده است، اما نمی‌توان آن را به کلی از بین برد [۴].

انفجار صوتی صدای خاصی است؛ شدت آن بسیار بلند است (۱۳۰ دسی‌بل) و اکثر انرژی آن در فرکانس‌های بسیار پایینی اتفاق می‌افتد: (۲ یا ۳ هرتز) [۱۶]. اما با توجه به اینکه محدوده‌ی شنوایی گوش انسان از ۱۵ هرتز تا ۱۸۰۰۰ هرتز است [۱۷]، در عمل انسان اصلاً صدایی از انفجار صوتی نمی‌شنود و فقط به علت شدت بسیار بالای آن، صدای بم بلندی به گوش می‌رسد. اما با در نظر گرفتن اینکه صدمه به گوش هنگامی روی می‌دهد که صداهایی با فرکانس حدود ۴ هزار هرتز به آن برخورد کند و تغییرات شنوایی کمتر از ۵ دسی‌بل عموماً به عنوان یک مشکل شنوایی شناخته نمی‌شوند [۱۸]. پس می‌توان قبل از ارائه‌ی هر نوع تحلیلی به راحتی به این

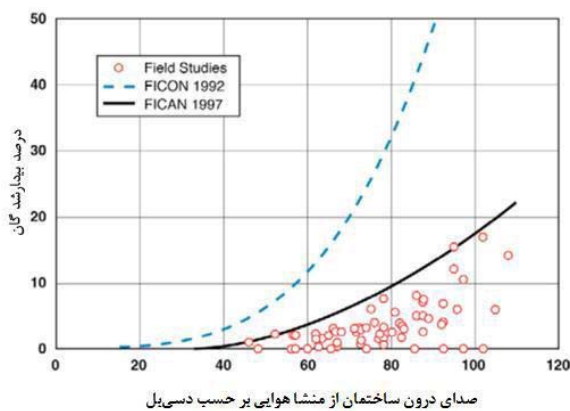
است که این نمودار برای کل صداهایی است که از هواپیماها در حین پرواز ایجاد می‌شود و فقط محدود به انفجارهای صوتی نمی‌باشد. همانطور که گفته شد نوع صدای انفجار صوتی اساساً با صداهای دیگر هواپیما متفاوت است (شدت بیشتر و فرکانس بسیار پایین‌تر).



نمودار ۱- ارتباط میان مجموع صدای خارجی، شنیده شده از درون ساختمان، برحسب دسی‌بل و درصد بیدارشدگان (۱۹۹۲)

در سال ۱۹۹۷ کمیته‌ی بالا با دستیابی به داده‌هایی بیشتر و روش‌های تحلیلی بهتر توانست نمودار ۲ را برای درصد بیدارشدگان ارائه دهد. این منحنی جدید (نمودار ۲) که با خط پیوسته نمایش داده شده است، حداکثر درصد افرادی را که در اثر صدای هواپیما بیدار می‌شوند نمایش می‌دهد. در این نمودار جدید منحنی خط چین منحنی قبلی است. معادله‌ی این منحنی را می‌توان به صورت زیر نوشت [۲۶]:

$$\text{درصد بیدارشدگان} = 0.00087 \times (SEL - 30)^{1/79}$$



نمودار ۲- ارتباط میان مجموع صدای خارجی، شنیده شده از درون ساختمان، برحسب دسی‌بل و درصد بیدارشدگان (۱۹۹۷)

اخیراً نیز سازمان ملی استانداردهای ایالات متحده در سال

اثر آن روی انسان بستگی به شکل جبهه‌ی موجی دارد که انفجار صوتی با آن به فرد برخورد می‌کند. بلندی انفجارهایی که نامتقارن بودند کمتر از آنهایی بود که به طور متقارن حرکت می‌کردند. از آنجایی که شکل جبهه‌ی صدای درون ساختمان از منشأ هوایی بر حسب دسی‌بل موج به محیطی که از آن عبور می‌کند بستگی دارد، به نظر می‌آید که اگر جریانات هوایی میان راه فعال باشند، به علت نامتقارن شدن جبهه‌ی موج، صدای انفجار صوتی با شدت کمتری به افراد روی زمین می‌رسد [۴]. در مطالعه‌ای که توسط نیروی هوایی ایالات متحده [۲۳] برای بررسی اثر صدای بلند هواپیماها در اطراف خانه‌ها انجام گرفت، دیده شد که در خانه‌هایی که نزدیک پایگاه‌های هوایی این نیرو قرار داشتند، کمتر از ۱۰ درصد افراد به علت صدای هواپیما از خواب بیدار شدند. طبق این گزارش، این نتیجه خیلی کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده در مناطق دیگر است. آنها نتیجه گرفتند که نقش عادت به صدا را نباید در انجام این گونه مطالعات نادیده گرفت. در تحقیقی دیگر که اطراف چند فرودگاه در بریتانیا [۲۶] انجام شد، بیان گردید که به علت تفاوت زیاد در حساسیت شخصی افراد به صدا، انحراف از مقدار متوسط می‌تواند زیاد باشد.

در سال ۱۹۹۲، کمیته‌ی میان‌سازمانی ایالتی برای صدای هواپیمایی (FICAN) برای یافتن ارتباطی میان صدای هواپیما و افرادی که در اثر این صدا از خواب بیدار می‌شوند تحقیقات فراوانی کرد که نتیجه در نمودار ۱ نشان داده شده است [۲۶]. در محور افقی این نمودار سطح قرار گرفتن در برابر صدا یا (Sound Exposure Level: SEL)، درون ساختمان آمده است که به زبان ریاضی، مجموع انرژی صوتی است که از آغاز تا پایان واقعه‌ی صوتی دریافت می‌شود [۳]. در محور عمودی درصد بیدارشدگان آمده است. با جایگذاری داده‌ها، معادله‌ی زیر برای این منحنی به دست آمد:

$$\text{درصد بیدارشدگان} = 0.00007079 \times SEL^{3/496}$$

در این معادله SEL باید بر اساس صدای درون ساختمان از منشأ هوایی بر حسب دسی‌بل باشد. در ضمن لازم به یادآوری

هدفون یا دو بلندگو نمی‌توانند دقیق باشند. در پژوهشی که اپان و همکاران [۱۶] انجام دادند، پیشنهاد شده است که صدای انفجار صوتی باید با تعداد بلندگوهای زیاد در یک اطاق کوچک انجام شود و صدایی که از هر بلندگو پخش می‌شود باید دقیقاً کنترل شده باشد. این پیشنهاد آنان بر این اساس بود که وقتی یک موج صدایی مانند انفجار صوتی به یک فرد برخورد می‌کند، توسط بدن او شکسته و منحرف می‌شود که این انکسار به جهت تولید موج و ساختار بدن فرد بستگی دارد. به عنوان مثال بسته به ساختار سر و گوش خارجی خصوصیات صدایی که توسط پرده صماخ شنیده می‌شود متفاوت می‌باشد و در نتیجه هر شنونده صدایی متفاوت می‌شوند. پس در یک سیستم مناسب برای تولید مصنوعی انفجار صوتی حضور فرد مورد آزمایشی در هنگام ضبط و پخش صدا لازم می‌باشد [۱۶].

### بحث و نتیجه‌گیری

همانطور که در مقدمه ذکر شد، با مرور منابع می‌بینیم که به علت ایزوله بودن کابین خلبان از لحاظ تغییرات فشاری، تنها در صورتی که نقصی فنی در سیستم‌های محافظتی کابین وجود داشته باشد، احتمال صدمه جدی به خلبان در اثر گذشتن از دیوار صوت دیده شده است [۱۲]. به نظر می‌آید یکی از اصلی‌ترین انگیزه‌های تحقیق روی اثرات انفجار صوتی بر ساکنین محلی که به دلیل پروازهای فراصوتی هواپیمای کونکورد میان سال‌های ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۳ میلادی باشد، بیشتر منابع در این بازه‌ی زمانی به مطالعه روی اثرات انفجار صوتی پرداخته‌اند. با این وجود تلاش‌هایی برای بازگشایی پروازهای مسافرتی با سرعت‌های فراصوتی دیده می‌شود [۳۱].

۲۰۰۸ استاندارد را برای درصد بیدارشدگان ارائه داده است که به زبان ساده می‌توان گفت برای هر SEL درصد بیدارشدگان کمی پایین‌تر از نمودار بالا است [۲۷].

صدای هواپیماها (از جمله انفجارهای صوتی) می‌تواند تأثیرات منفی بر آموزش کودکان داشته باشد که خواندن، انگیزه، توانایی استفاده از زبان و حافظه از این جمله‌اند. مطالعات در این زمینه از دهه‌ی ۱۹۷۰ میلادی شروع شده و بر اساس مقاله‌ی زوسمن [۲۸]، این اثرات مخرب با صداهای بالای ۶۵ دسی‌بل خود را نشان می‌دهند. نتایج تحقیقات همان محقق، از طرف نیروی دریایی ایالات متحده، در سال ۲۰۰۷ ارتباطی بسیار قوی میان کاهش صدا و کاهش تعداد دانش‌آموزان دبیرستانی تجدید شده و ارتباط بسیار قوی میان کاهش صدا و افزایش متوسط نمرات دانش‌آموزان در گروه‌های مورد بررسی نشان داد [۲۹].

در گزارش سال ۱۹۹۷ میلادی مطالعات کمیته‌ی میان‌سازمانی برای صدای هواپیمایی ذکر شده است که انفجارهای صوتی علاوه بر صدمه بر سلامت انسان می‌توانند به ساختمان‌ها نیز صدمه وارد کنند؛ از جمله شکستن شیشه‌ها و ترک در دیوارهای گچی [۲۳]. اما این موضوع در مقالات دیگر مورد تردید واقع شده است [۳۰ و ۶] به عنوان مثال طبق گزارش اخیر، اثرات احتمالی انفجارهای صوتی هواپیمای کونکورد (که با ۲ برابر سرعت صوت مسافری می‌کرد) روی انسان و ساختمان‌ها قابل صرف‌نظر کردن است. مطالعات میدانی نشان داد که لرزش‌هایی که در اثر صدا در ساختمان‌ها ایجاد می‌شود قابلیت صدمه زدن به ساختمان‌ها را ندارد. در ضمن، شدت انفجارهای صوتی کونکورد در فرکانس‌های پایین، خیلی از حدود EPA برای صدمه زدن به انسان پایین‌تر هستند پس صدای فرکانس پایین انفجارهای صوتی ریسکی بر سلامتی یا ساختمان‌ها ندارد [۳۰].

همانطور که گفته شد، در اکثر تحقیقات بالا برای ایجاد انفجارهای صوتی از مولدهای مصنوعی استفاده شده بود. اما به این دلیل که صدای انفجار صوتی حالت‌های نوسانی زیادی در فرکانس‌های پایین دارد، آزمون‌های روانی-آکوستیکی رایج با

## References

1. DeHart RL. Fundamentals of Aerospace Medicine. 2nd edition. Vol 1. Williams & Wilkins publishing, USA. 1996.
2. Anderson JD. Research in supersonic flight and breaking the sound barrier. In: From engineering science to big science, the NACA and NASA collier trophy research project winners. University press of the pacific. 2006.
3. Eagan ME. How do we describe aircraft noise? FICAN report. 2006.
4. Darden C M. Sonic Boom minimization with nose-bluntness relaxation, NASA technical paper 1348. 1979.
5. Bellamy R F, Zajtchuk R. The physics and biophysics of wound ballistics, in: conventional warfare; Ballistics, Blast and Burn Injuries. Walter Reed Army medical center publishings. 1991.
6. Larkin RP. Effects of military noise on wildlife: A literature review. 1969.
7. Young RW. Sonic Booms of space shuttles approaching Edwards Air Force Base, 1988-1993. J Acoustic Soc Am. 2002; 111 (1pt 2): 569-75.
8. Vavrek RJ, Kithil R, Holle RL, Allsopp J, Cooper MA. The science of Thunder. National lightning safety institute. Vol 6. 2006.
9. Airplane. Microsoft® Student 2009 [DVD]. Redmond, WA: Microsoft Corporation. 2008.
10. Mohler SR. Physiologically tolerable decompression profiles for supersonic transport type certification. Report to the Federal Aviation Administration. 1970.
11. Lauritzen LP, Pfitzner J. Pressure breathing in fighter aircraft for G accelerations and loss of cabin pressurization at altitude-a brief review. Canadian Journal of Anesthesia. 2003. 2003. 50:415-419.
12. Dikshit M B. Rapid decompression in a supersonic trainer aircraft (A case report). Ind J Aerospace Med: Special commemorative volume, 2007.
13. Mohler SR. Flight crews and cabin crews encouraged to increase awareness of in flight Ionization radiation. Flight safety foundation, Human factors and aviation medicine. 1996.
14. Mazurek K, Wielgosz A, Efenberg B, Orzel A. Cardiovascular risk factors in supersonic pilots in Poland. Aviation, space and environmental medicine. 2000. vol. ۷۱, no۱۲, pp. ۱۲۰۲-۱۲۰۵.
15. Thomson MO. Aerospace medical and bioengineering considerations in lifting-body and research-aircraft operations, 35th annual meeting of aerospace medical association. 1964.
16. Epain N, Friot E, Rabau G. Indoor sonic boom reproduction using ANC. Active 04. 2004.
17. Lederer FL. Ear. Microsoft® Student ۲۰۰۹ [DVD]. Redmond, WA: Microsoft Corporation. 2008.
18. U.S. Environmental protection agency report. Information on levels of environmental noise requisite to protect public health and welfare with an adequate margin of safety. U.S. Environmental protection agency. 1974.
19. Von Gierke HE, Nixon CW. Human response to Sonic Booms in the laboratory and the community. The Journal of the Acoustical Society of America. 1972. Vol 51, 2C, 766-782. doi:10.1121/1.1912909.
20. U.S. Congress. National environmental policy act of 1969.
21. Griefahn B, Jansen G. Disturbance of sleep by sonic booms. Sci Total Environ 1975. 4 (1): 107-12.
22. Lukas J, Dobbs ME, Kryter CE. Disturbance of Human sleep by subsonic jet aircraft noise and simulated sonic booms. National Aeronautics and Space Administration report, NASA CR-1780. 1971.



23. Miller R L, Eagan M E. Federal interagency committee on aviation noise: Report on aviation noise research conducted by U.S. Federal agencies. United States Air Force Armstrong Laboratory Report. 1997.
24. Leatherwood JD, Sullivan BM, Shepherd KP, McCurdy DA, Brown SA. Summary of recent NASA studies of human response to sonic booms. *J Acoust Soc Am*. 2002. 111 (1 pt 2): 586-98.
25. Piacsek AA. Atmospheric turbulence conditions leading to focused and folded sonic boom wavefronts. *J Acoust Soc Am*. Jan 2002; 111 (1 pt 2): 520-9.
26. FICAN. Effects of Aviation noise on awakenings from sleep. FICAN report. 1997.
27. Shepherd KP. FICAN recommendation for use of ANSI standard to predict awakenings from aircraft noise. FICAN report. 2008.
28. Zusman AF. FICAN position on research into effects of aircraft noise on classroom learning. FICAN report. 2000.
29. Zusman AF. Findings of the FICAN pilot study on the relationship between aircraft noise reduction and changes in standardized test scores. FICAN report. 2007.
30. FICAN. FICAN on the Findings of the Minneapolis-St. Paul International Airport (MSP) Low Frequency Noise (LFN) Expert Panel. Federal Interagency Committee on Aviation Noise Report. 2002.
31. Wiley J. The superslow emergence of Supersonic. Aviation week webpage. 2007.

## Supersonic flight and its effects on the pilot and residential areas

\*Akhlaghi M

### **Abstract**

The first supersonic flight was performed in 1947, but flight with such speeds creates strong shock waves in the air surrounding the airplane that rises air resistance and temperature in the plane and can harm people and even constructions if the plane is close enough to the surface. The literature on the medical effects of supersonic flight can be classified in two domains: 1. medical effects on the pilot and possible crew; 2. medical effects on people and their environment on the surface of the Earth. The major source of any medical harm to the pilot or the crew can be summarized in any kind of mechanical malfunction in the cockpit instruments and air-tight seals. There are some minor affects due to high-altitude flight while flying supersonic speeds and in one case, the prevalence of hypercholesterolemia and hypertriglyceridemia were studied for supersonic pilots.

The main concern on supersonic flight is the effects of its shockwaves on the people living on the surface of the Earth. One of the chief areas of study is the effect of the shockwaves on the sleep of residents, in some cases the studies have resulted in equations to predict the percent of people awakened by such noise. Sonic booms and aerial noise also have damaging effects on the potential of high school student's learning.

**Keywords: Sonic Boom, Shock wave, Sound barrier**