

فناوری‌های کاهش میزان سر و صدای هواپیما نمونه با موتور توربوفن

محسن شادروان
کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر،
تهران
mohsen.shadravan@gmail.com

مصطفی محمودی*
دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران
mostafamahmoodi@mut.ac.ir

حسین نورشاد
کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر،
تهران
hnourshad@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۴

چکیده

با گسترش روزافزون صنایع حمل و نقل هوایی (۵/۹٪ در سال) و گسترش جوامع شهری، حاشیه فرودگاه‌ها و سطح بالای آلاینده‌های صوتی هواپیماهای جت، لزوم به‌کارگیری فناوری‌های نوین به منظور کاهش آلاینده‌های صوتی را امری اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. صدای نامطلوب برخاسته از هواپیما را می‌توان به دو منبع اصلی موتور و بدنه هواپیما مرتبط دانست. در این پژوهش ابتدا تاریخچه کوتاهی از موتور جت ارائه شده و سپس به معرفی منابع مختلف تولید کننده آلاینده‌های صوتی در هواپیما، شرایط استاندارد اندازه‌گیری شدت صوت و در نهایت فناوری‌های کاهش‌دهنده آلاینده‌های صوتی در موتور هواپیما به عنوان یکی از منابع مهم تولید آلاینده‌های صوتی پرداخته شده است. از جمله فناوری‌های بررسی شده در این تحقیق می‌توان به افزایش نسبت کنارگذری موتور از ۶ به ۱۴ و کاهش ۸dB از سر و صدا مؤثر دریافتی از موتور در اثر آن، فناوری استفاده از نازل شورن و کاهش حدود ۵dB سر و صدا و تغییر محل فرکانس ماکزیمم سر و صدا اشاره کرد. همچنین استفاده از فناوری آکوستیک لاینر در فرکانس و امپدانس صوتی مشخص به میزان ۴dB سر و صدا ایجاد شده را کاهش می‌دهد.

واژگان کلیدی: موتور توربوفن، کاهش سر و صدا، فن موتور، هسته موتور، بدنه هواپیما

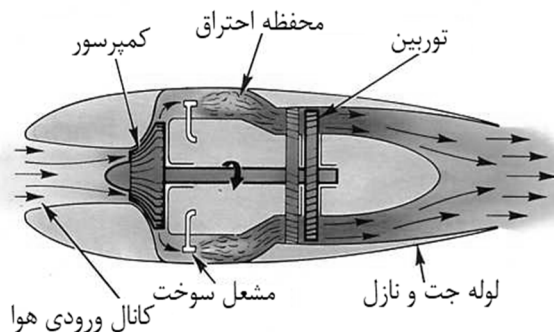
۱. مقدمه

کاهش سر و صدا از جایگاه بسیار بالایی برخوردار است. یکی از منابع مهم تولید آلاینده‌های صوتی با شدت بالا، هواپیماهای تجاری با موتور جت هستند. همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود شدت سر و صدای ایجادی در موتورهای جت در حدود ۱۴۰ دسی‌بل گزارش شده است که برای سلامتی سیستم شنوایی انسان بسیار مخرب است [۱].

صدا به عنوان پدیده‌ای در طول تاریخ، از ابتدای خلقت وسیله ارتباط بشر اولیه و اساس یکی از حواس پنج‌گانه و جزء لاینفک زندگی انسان بوده است. امروزه فناوری‌های بسیاری به منظور بهره‌گیری یا کنترل صوت وجود دارد. با این حال یکی از مشکلات رایج در جوامع صنعتی، آلودگی صوتی است. عوامل بسیاری سبب ایجاد آلودگی صوتی در طبیعت می‌شوند که در این میان بهره‌گیری از راه‌کارهای

جدول ۱. آستانه شنوایی انسان [۱]

تأثیرات	تراز شدت صوت [dB]	نوع صوت
احساس آرامش	۰	آستانه شنوایی (صوت مینا)
	۱۰	صدای نفس کشیدن انسان
	۲۰	حرکت برگ درختان در نسیم
اختلال در ادراک	۴۰	مکالمه افراد در یک دفتر کار
	۶۰	همهمه در یک فروشگاه بزرگ
	۷۰	صدای ترافیک در یک خیابان شلوغ
آسیب به دستگاه شنوایی	۱۲۰	آستانه دردناکی
	۱۳۰	صدای مسلسل
	۱۴۰	غرش هواپیما در حین برخاستن



شکل ۱. طرح موتور توربین گازی ویتل [۲]

تعداد انسان‌هایی که به‌طور جدی تحت تأثیر صدای ناشی از هواپیما قرار می‌گیرند، از میزان ۲۴ میلیون نفر در سال ۲۰۰۰، به تعداد ۳۱ میلیون نفر در سال ۲۰۲۵ خواهد رسید [۴]. لذا مشاهده می‌شود که به‌کارگیری فناوری‌های نوین در صنعت هوایی به منظور کاهش آلاینده‌های هوا و به خصوص آلاینده‌های صوتی بیش از پیش احساس می‌شود. این نگرانی‌های عمومی منجر به تدوین سیاست‌های سخت‌گیرانه‌ای توسط سازمان‌های بین‌المللی در زمینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان سر و صدای تولیدی شده است.

تکنیک‌ها و فناوری‌های مختلفی برای کاهش شدت آلاینده‌های صوتی هواپیماهای جت ارائه شده است که در ادامه بررسی خواهد شد.

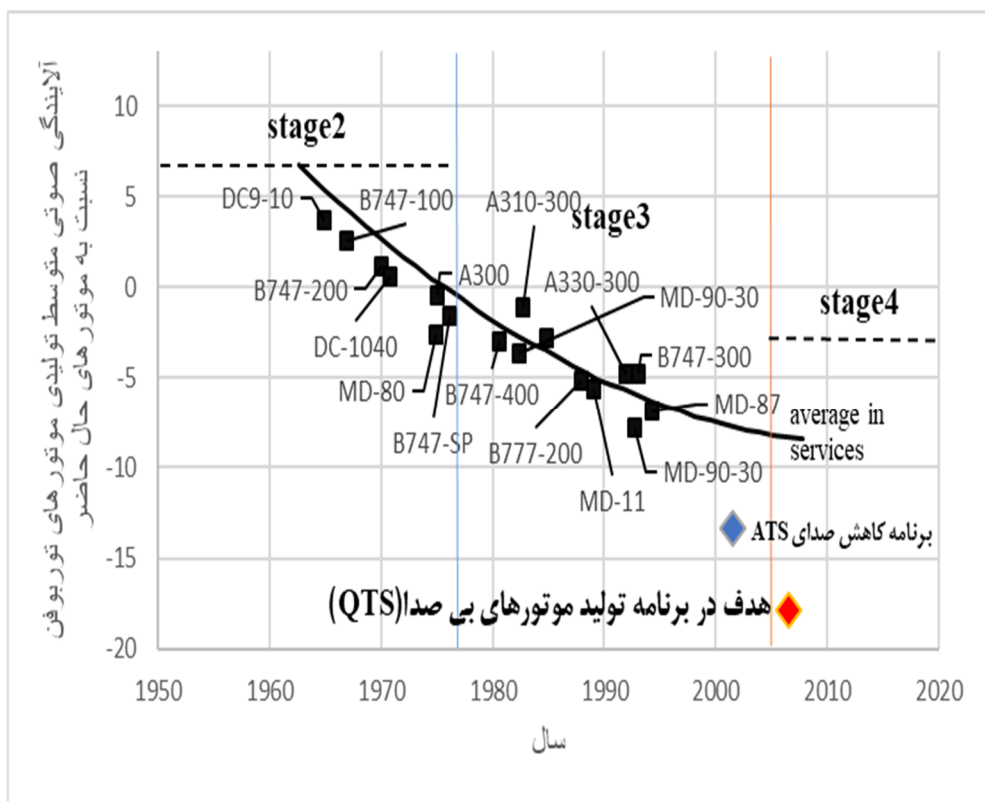
از جمله موتورهای جت می‌توان به موتورهای توربوفن، موتورهای توربوجت و رم جت اشاره نمود.

در سال ۱۹۳۰ فرانک ویتل^۱ اولین ثبت اختراع برای موتور هواپیما با نیروی محرکه جت را بر پایه توربین گاز به نام خود ثبت کرد. موتور ویتل از اصول موتورهای توربین گازی جدید تشکیل شده بود و از آن موتورهای رولزرویس ولند^۲، درونت^۳، ننه^۴ و دارت^۵ توسعه داده شدند. اگرچه هواپیماهای ساخته شده ممکن است با سایر موتورها مانند دو محوره، سه محوره، کنارگذری، فن مجرادار^۶ و فن غیرمجرایی^۷ و فن ملخ‌دار^۸ مطابقت داشته باشند، اما همگی به صورت اجتناب‌ناپذیر از توسعه موتور اولیه ویتل به وجود آمده‌اند [۱]. شکل ۱ نمونه‌ای از طرح موتور ویتل را نمایش می‌دهد.

افزایش حجم حمل و نقل هوایی (۵/۹٪ رشد در هر سال) و انتشار روزافزون آلاینده‌های زیست محیطی نظیر آلاینده‌های صوتی، در سال‌های اخیر نگرانی‌هایی را به وجود آورده است [۳].

با توجه به این قوانین نیاز به باز طراحی و بهینه‌سازی موتورهای هوایی بر اساس استانداردهای جدید و به روز اجتناب‌ناپذیر است. در شکل ۲ میزان سطح سر و صدای دریافتی از هواپیماهای نسل قبل، هواپیماهای رایج در حال

حاضر و هواپیماهای نسل بعد نسبت به هواپیماهای موجود در حال حاضر و همچنین چشم‌انداز ساخت هواپیما و موتورهای توربوفن با آلاینده‌گی صوتی بسیار کم (موتورهای توربوفن بی‌صدا) نمایش داده شده است [۵].



شکل ۲. پیشرفت فناوری ساخت هواپیما و کاهش سطح سر و صدای تولیدی [۵]

اگرچه پیشرفت‌های قابل توجهی برای کاهش میزان سر و صدا انجام شده است، اما به دلیل افزایش تردهای هوایی و همچنین رشد جوامع شهری هم‌جوار با فرودگاه‌ها مشکلات گسترده‌ای به وجود آورده است. طبق مطالعات انجام شده در ایالات متحده آمریکا ۶۰ درصد از تمام فرودگاه‌های موجود در این کشور با مسئله سر و صدا و شکایت جوامع شهری هم‌جوار با فرودگاه‌ها مواجه‌اند [۶]. بر همین اساس مسئله آلاینده‌گی صوتی محدودیت بزرگی در رشد ترافیک هوایی در برخی فرودگاه‌ها ایجاد نموده است. در پژوهش صورت گرفته از فرودگاه‌های جهان نشان می‌دهد در بازه زمانی سال‌های

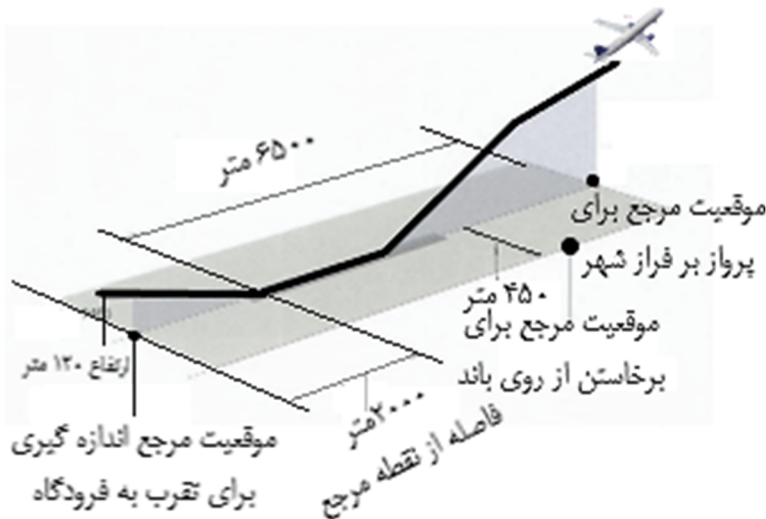
۱۹۹۰ تا ۲۰۰۰ به‌طور متوسط، میزان محدودیت، سهمیه پروازی، جریمه و ممنوعیت‌های اجرایی ناشی از آلاینده‌گی صوتی فرودگاه‌های مورد مطالعه به میزان دو برابر افزایش پیدا کرده است [۷]. برخی فرودگاه‌های بین‌المللی در ایالات متحده آمریکا اقدام به نصب تجهیزات ضبط و اندازه‌گیری آلاینده‌گی صوتی در اطراف فرودگاه نموده‌اند. از جمله این فرودگاه‌ها، فرودگاه بین‌المللی کیولند هاپکینز در ایالت کیولند آمریکا است. در شکل ۳ سطح آلاینده‌گی صوتی ثبت شده در سه ماهه چهارم سال ۲۰۱۷ قابل مشاهده است [۸].



شکل ۳. سطح آلاینده‌گی صوتی ثبت شده در محدوده فرودگاه کلیولند هاپکینز (بر حسب dB) [۸]

همان‌طور که در شکل ۴ شرح داده شده است، آلاینده‌گی صوتی به صورت مستمر در شرایط مذکور ضبط و اندازه‌گیری می‌شود. مدت زمان کل و همچنین میزان سر و صدای مؤثر دریافتی^{۱۴} به عنوان شاخص اندازه‌گیری شناخته می‌شود.

سازمان بین‌المللی هوانوردی غیرنظامی^۹ و اداره هوانوردی فدارال آمریکا^{۱۰}، استانداردها و گواهینامه‌هایی بر مبنای ارزیابی‌های صورت گرفته در شرایط تقرب به فرودگاه^{۱۱}، اندازه‌گیری جانبی بر روی باند^{۱۲} و همچنین شرایط برخاست و پرواز بر فراز شهر^{۱۳} تدوین نموده است.



شکل ۴. موقعیت‌های مرجع سازمان ایکائو برای محاسبه آلاینده‌گی صوتی [۲]

شاخص میزان سر و صدای مؤثر دریافتی دارای محدوده مشخصی برای تمام هواپیماها نبوده و متناسب با بیشینه وزن هنگام برخاست^{۱۵} هواپیما و تعداد موتورهای نصب شده بر روی آن است و برای محاسبه آن از معادله ۱ استفاده می‌شود.

$$EPN_{Tot} = 10 \log \sum_{i=1,m} 10 \frac{EPN_i}{10} \quad (۱)$$

EPN_i : میزان سر و صدای دریافتی از هر جز آلاینده‌گی صوتی حائز اهمیت، سر و صدای جانبی و پرواز بر فراز شهر^{۱۶} است. در شرایط تقرب به فرودگاه نیز در موتورهای توربوفن با نسبت کنارگذری بالا (هواپیماهای تجاری) به واسطه انجام عملیات فرود، نیروی رانش کمی مورد نیاز بوده و لذا سر و صدای ناشی از موتور در مقایسه با سر و صدای ناشی از لایه مرزی بدنه هواپیما قابل نظر کردن است [۹].

از جمله تحقیقات صورت گرفته در خصوص آلاینده‌گی صوتی موتورهای توربوفن می‌توان به پژوهش ونترس و همکاران [۱۰] در مرکز تحقیقاتی لوویس ناسا اشاره کرد. ایشان با استفاده از معادلات دیفرانسیلی برای امواج صوتی و توسعه کد نرم‌افزاری اقدام به محاسبه صدای تولید شده در پره‌های گردان^{۱۷} و ثابت^{۱۸} در برهم‌کنش با جریان متلاطم عبوری در فن و همچنین صدای تولید شده در تیغه‌های راهنمای^{۱۹} فن با برهم‌کنش با جریان هوای اصلی نمودند.

در پژوهشی دیگر از مرکز تحقیقاتی لوویس ناسا، میر و انویا [۱۱] اقدام به بررسی آبروآکوستیکی یک موتور توربوفن و سر و صدای ایجاد شده توسط آن پرداخته‌اند. این پژوهش در حقیقت ارتقای کد نرم‌افزاری قبلی ناسا برای پره‌های ثابت و متحرک موتور ونکل V-072 و برهم‌کنش‌های آن با جریان هوای عبوری از روی پره به طبع آن سر و صدای تولیدی از این برهم‌کنش است. در این ارتقا که برای موتور توربوفن انجام گرفته است، تنها سر و صداهایی که در جریان عبور هوا از روی ردیف‌های پره تحت فرکانس و تناوب ایجاد می‌شود بررسی شده است و شامل پهنای باند سر و صدای

تولیدی برای هر جز موتور نظیر فن، کمپرسور و یا توربین نمی‌شود.

دنیس هاف [۱۲] از مرکز تحقیقاتی گلن ناسا، فناوری‌های کاهش میزان سر و صدای تولیدی در موتور توربوفن را مورد بررسی قرار داده است. در بررسی‌های ایشان به فناوری‌های موجود در کاهش آلاینده‌گی صوتی در بخش فن و جت خروجی معطوف شده است و بخشی از فناوری‌های موجود بررسی شده است.

از تحقیقات در زمینه بررسی آلاینده‌گی صوتی برای کل هواپیما، می‌توان به پژوهش فریس و خرمنی [۱۳] اشاره کرد. در این پژوهش ایشان با مدل‌سازی هواپیماهای گلف استریم جی^{۲۰۳} در مقیاس واقعی و بررسی مودهای صوتی و نرخ تولید سر و صدا نصب تجهیزات کاهش آلاینده‌گی صوتی بر روی مدل و سپس حل عددی با استفاده از شبکه بولتزمن توسط نرم‌افزار پاورفلو^{۲۱} پرداخته‌اند.

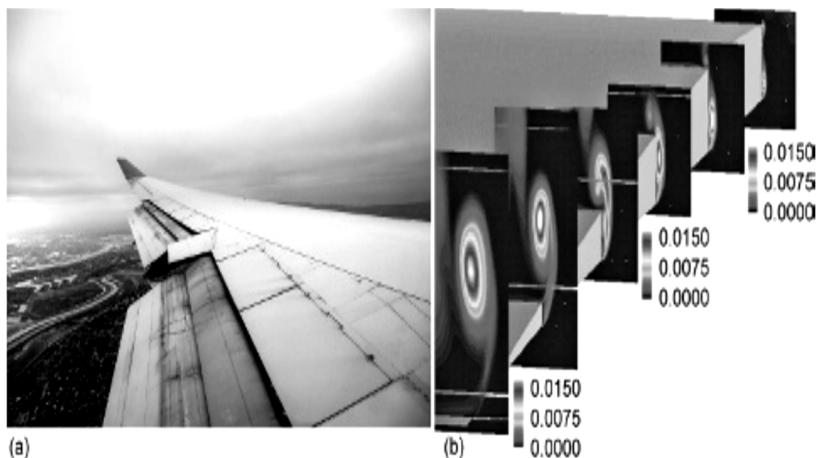
در پژوهش میلیدونیس و همکاران [۱۴] اثرات اعوجاج جریان در ورودی هوا بر سر و صدای تولیدی فن موتور در شرایط صدای تولیدی جانبی اشاره کرد. ایشان با مدل‌سازی یک ورودی هوای موتور توربوفن تجاری و پره فن، میزان صدای وزوز^{۲۲} ایجاد شده را محاسبه کرده‌اند. داروخ و همکاران [۱۵] در پژوهش خود اقدام به بررسی و پیش‌بینی سر و صدای تونال تولید شده توسط یک موتور توربوفن با نسبت کنارگذری بسیار بالا^{۲۳} نموده‌اند. در مطالعات ایشان، شرایط برخاست برای این موتور توربوفن توسط روش ناپای متوسط‌گیری رینولدز در معادلات نویر-استوک^{۲۴} انجام شده است.

۲. آلاینده‌گی صوتی در یک هواپیما

همان‌طور که ذکر شد، منابع آلاینده‌گی صوتی در یک هواپیما بدنه هواپیما و تجهیزات نصب شده بر روی آن و واحد تولید نیروی پیشران (موتور) است. ماهیت سر و صدای تولید شده در یک هواپیما بسته به منبع آن، ممکن است دارای یک

ممکن است گردابه‌ها ناشی از سطوح آیرودینامیکی (نظیر برافزاه‌ها، اسلات‌ها و یا ارابه فرود) باشد، و یا توسط جت جریان گاز خروجی از موتور ایجاد شود.

پهنای باند (طیف وسیع فرکانس‌ها) و یا فرکانس محدود باشد. اگر عامل ایجاد نوفه گردابه (گردابه‌های بزرگ^{۲۵} و یا گردابه‌های کوچک^{۲۶}) باشد، فرکانس صدای تولیدی نیز متناسب با گردابه‌ها تغییر خواهد کرد.



شکل ۵. گردابه‌های ایجاد شده بر روی سطوح آیرودینامیکی [۱۶]

۲-۱. آلاینده‌گی صوتی در بدنه هواپیما

آلاینده‌گی‌های صوتی در بدنه هواپیما در شرایط فرود و برخاست، شامل چشمه‌های زیر، که در شکل ۶ قابل مشاهده است:

۱. سر و صدای چرخ جلویی هواپیما^{۲۷}
۲. سر و صدای چرخ‌های اصلی^{۲۸}
۳. سر و صدای ناشی از برافزاه^{۲۹}
۴. سر و صدای ناشی از اسلات‌ها
۵. سر و صدای لبه فرار
۶. سر و صدای ناشی از لایه مرزی بدنه هواپیما (به واسطه سرعت کم قابلیت صرف‌نظر کردن را دارد).

متناسب با مانور پروازی، سرعت پروازی ارتفاع و سایر مشخصات میزان سر و صدای تولیدی از یک هواپیما نیز تغییر می‌کند. بدیهی است که سر و صدای هواپیما در حالت پرواز کروز در ارتفاع ۳۳۰۰۰ پایی برای ساکنین روی زمین قابل شنیدن نیست و با قرار دادن عایق‌های صوتی در بدنه هواپیما می‌توان آستانه آسودگی صوتی را برای مسافری فراهم آورد. اما در مانورهای تقرب فرودگاهی و نزدیک شدن به شهر^{۱۶} و همچنین مانور زمینی در باند فرودگاه مهم‌ترین مانورها در محاسبه سر و صدا است. لذا در پژوهش حاضر بررسی آلاینده‌گی صوتی در مانورهای پروازی فوق انجام شده است.



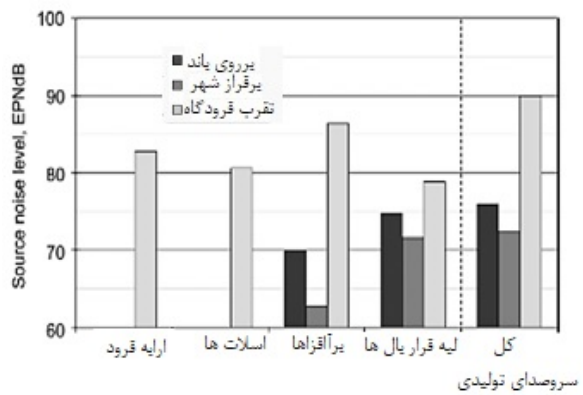
شکل ۶. منابع اصلی ایجاد سر و صدا در هواپیما [۱۶]

از منابع تولیدکننده صدا شامل سر و صدای اجزائی نظیر فن، هسته موتور و جت جریان خروجی از موتور است [۱۶]. ماهیت سر و صدای فن جریان توربولانسی آن بوده که به سطح نزدیک ورودی دهانه موتور برخورد می‌کند. این ناهمگونی‌ها به سه دلیل ایجاد می‌شوند [۱۷]:

۱. اعوجاج جریان درونی^{۳۰} که به وسیله پره فن گردنده بریده می‌شوند،
۲. گردابه‌هایی که از پره به سمت پره‌های ثابت جارو می‌شوند، و
۳. جریان توربولانس گذرنده از نزدیکی پره‌های چرخان یا استاتورها است.

بیشترین صدای ناشی از ورودی موتور توربوفن یا نوفه فن به دلیل اثر متقابل و برهم‌کنش بین پره‌های چرخان و ثابت ایجاد می‌شوند. بخشی از صدای ایجاد شده توسط موتور از جلوی موتور و از داخل کانال ورودی هوای آن خارج می‌شود که منبع تولید این سر و صدا پره‌های فن است. صدای تولید شده توسط فن بسیار به توان موتور و سرعت چرخش فن بستگی دارد [۱۸].

به عنوان مثال برای هواپیمای تجاری بوئینگ ۷۳۷ سری ۸۰۰ سهم هر یک از منابع مذکور بر مبنای میزان سر و صدا مؤثر دریافتی در شرایط تقرب فرودگاه، حرکت بر روی باند و حرکت بر روی شهر در شکل ۷ قابل مشاهده است [۱۶].



شکل ۷. نرخ سر و صدای مؤثر دریافتی از بدنه هواپیما [۱۶]

۲-۲. آلاینده‌گی صوتی در موتور هواپیما

سر و صدای تولیدی توسط موتور شامل مجموع سر و صداهای تولید شده توسط منابع صوتی مختلف درونی و بیرونی موتور است. در موتورهای توربوفن جدید بخش اصلی

سر و صدای تولیدی توسط هسته موتور که شامل کمپرسور، محفظه احتراق و توربین می‌باشد، با سر و صدای تولیدی توسط فن مشابه است، اما در گستره فرکانس سر و صدای تولید شده متفاوت است. زیرا در کمپرسور و توربین نیز برهم‌کنش بین پره‌های چرخان و ثابت وجود خواهد داشت. در هر دو مشخصه‌های سر و صدای تکین و باند پهن قابل مشاهده است اما فرکانس‌های باند پهن تولید شده در کمپرسور و توربین از فرکانس‌های تولید شده توسط باند پهن فن بیشتر خواهد بود زیرا تعداد پره‌های موجود در هر طبقه از کمپرسور یا توربین و همچنین سرعت چرخش پرها از پره‌های فن بسیار بیشتر است. در سر و صدای تولید شده توسط پره‌های کمپرسور و توربین در مقایسه با پره‌های فن تفاوت دیگری نیز وجود دارد، برخلاف پره‌های فن، سر و صدای تولیدی فقط به واسطه عبور جریان از روی یک ردیف پره نیست و علاوه بر آن برهم‌کنش آیرودینامیکی و آکوستیکی بین ردیف پره‌های موجود در همسایگی نیز در تولید سر و صدای کمپرسور و توربین نیز مؤثر هستند [۱۶].

سر و صدای تولیدی محفظه احتراق به واسطه انجام احتراق در مخلوط سوخت هوای موجود در محفظه توسط دو مکانیزم متمایز از هم ایجاد می‌شود که به آنها سر و صدای مستقیم^{۳۱} و غیرمستقیم^{۳۲} محفظه احتراق می‌گویند. سر و صدای مستقیم محفظه نوفه ایجاد شده از نوسانات فشار داخل محفظه است که عامل این نوسانات، وجود نرخ آزادسازی حرارت متناوب در ناحیه شعله می‌باشد.

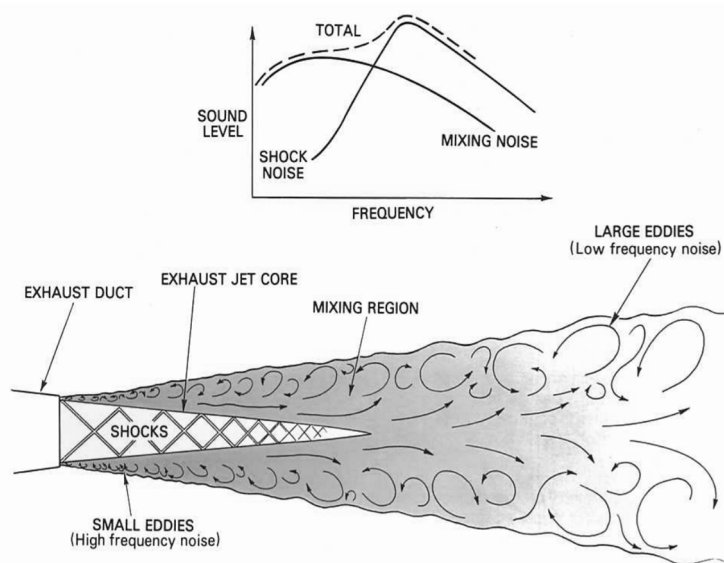
سر و صدای غیرمستقیم ایجاد شده در محفظه احتراق به دلیل عبور جریان گاز داغ در محفظه به وجود می‌آید (به عنوان

مثال غیریکنواختی‌های^{۳۳} موجود در دمای و یا فشار گاز داغ داخل محفظه). این غیریکنواختی‌ها سبب ایجاد گرادیان‌های ناخواسته در جریان گاز داغ شده و در زمان برخورد با ردیف اول توربین پر فشار، سبب ایجاد سر و صدا خواهد شد. سر و صدای تولید شده در محفظه احتراق دارای مقدار فرکانس پایه اسمی در حدود ۴۰۰ هرتز، که معمولاً مستقل از ابعاد موتور است [۱۶].

سر و صدای هسته موتور معمولاً برای هر جزء دارای یک پهنای باند است. برای محفظه‌های احتراق با سوزش رقیق^{۳۴} امکان ایجاد ناپایداری احتراق در توان‌های کم وجود دارد که منجر به ایجاد سر و صداهای ناشی از ناپایداری خواهد شد [۱۶].

صدای ناشی از جت به واسطه اختلاط متلاطم^{۳۵} که همان اختلاط هسته جت با سرعت بالا و دمای بالا، با گازهای کم سرعت و کم دمای اتمسفر (یا هوای کنارگذر در موتور توربو فن) و یا در اثر جت‌های به صورت ناقص انبساط یافته^{۳۶} و نیز سر و صدای موج ضربه‌ای^{۳۷} ایجاد می‌شود [۱۹]. منبع اولیه صدای ناشی از جت موتور رژیم برشی جریان هوای خروجی است که به دلیل مخلوط شدن جریان‌ها با سرعت‌های بالا و هوای کم سرعت اطرافش اتفاق می‌افتد. اختلاط هسته جت و هوای اتمسفر (یا هوای کنارگذری) صدا با طیف^{۳۸} فرکانس پهن (پهن باند) تولید می‌کند.

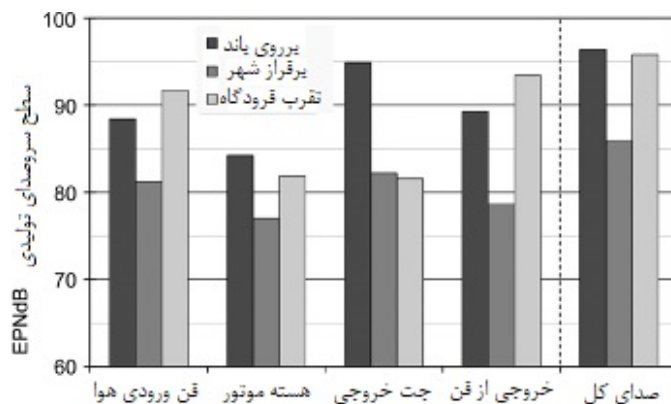
بزرگ‌ترین مشکل، صدای ایجاد شده در اثر اختلاط متلاطم است که کنترل آن نیز دشوار است. ماهیت سر و صدای تولید شده در جت جریان در شکل ۸ قابل مشاهده است.



شکل ۸. ماهیت سر و صدای تولید شده در جت جریان خروجی [۲]

جت است. به همین علت یکی از مهم‌ترین استراتژی‌های کاهش صدا یا آلودگی صدای ناشی از جت، بالا بردن نسبت کنارگذری موتور توربوفن است که موجب کاهش سرعت خروجی جریان از نازل می‌گردد. برای موتور هواپیمای بوئینگ ۷۳۷ سری ۸۰۰ (CFM56) میزان سر و صدای دریافتی از اجزاء مختلف موتور در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

با استفاده از نتایج آزمایشگاهی بسیاری به این نتیجه رسیدند که بخش عمده‌ای از صدای اختلاط متلاطم در نواحی حدود انتهای هسته پتانسیل^{۳۹} ایجاد می‌گردد [۲۰]. این نکته باعث می‌شود که در جهت کاهش صدا هدف به سمت کاهش عدد ماخ جابه‌جایی در انتهای هسته پتانسیل به‌گونه‌ای که تا حد ممکن این عدد زیر صوت باشد متمرکز گردد. صدای اختلاط جت به شدت تابع سرعت خروجی



شکل ۹. سطح سر و صدای تولیدی هر یک از اجزای موتور در شرایط مرجع سازمان ایکائو [۱۶]

اما فناوری‌های کاهش سر و صدای تولید شده توسط موتور هواپیما به عنوان منبع بزرگ در تولید صدا مورد بررسی قرار گرفته است.

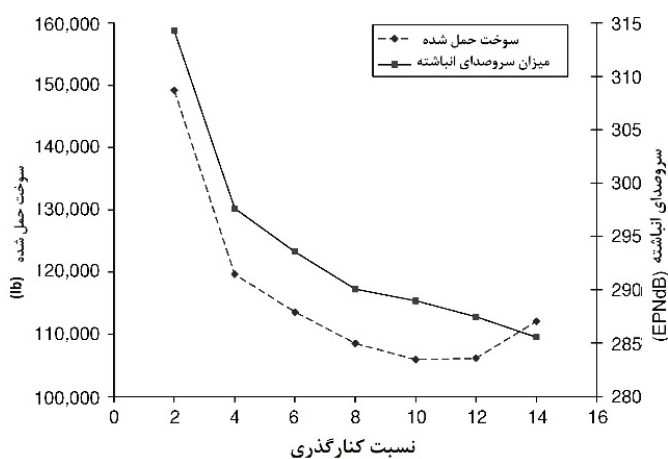
۳. فناوری‌های کاهش سر و صدای تولیدی

در این پژوهش سعی بر آن است که منابع تولید سر و صدا در کل هواپیما مورد مطالعه قرار گیرد.

۳-۱. افزایش نسبت کنارگذری

همان‌طور که اشاره شد، بخش اعظمی از سر و صدای تولید شده در شرایط پرواز بر روی شهر و باند فرودگاه ناشی از جت خروجی از موتور می‌باشد که برای اعطای گواهینامه‌های مربوط به آلاینده‌گی صوتی مؤثر است. همان‌طور که از تعریف نسبت کنارگذری پیداست، با افزایش نسبت کنارگذری موتور نسبت هوای عبوری از کنار هسته موتور به نسبت هوای عبوری از هسته بیشتر شده و اختلاط هوای سرد و گرم در خروجی موتور را بهبود می‌بخشد و سرعت گازهای خروجی از موتور را نیز کاهش می‌دهد.

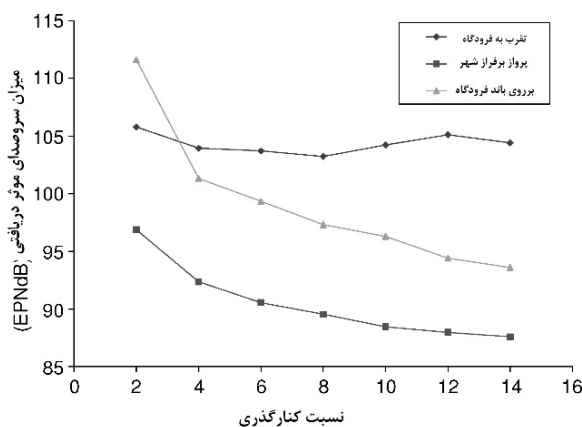
از آنجایی که سر و صدای تولیدی از جت جریان با سرعت جت جریان به توان ۸ رابطه دارد، این امر منجر به کاهش قابل ملاحظه سر و صدای ناشی از جت جریان خروجی می‌شود که در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. می‌توان دریافت که با افزایش نسبت کنارگذری از ۶ به ۱۴، سر و صدای انباشته تولیدی به میزان ۸dB کاهش می‌یابد. افزایش نسبت کنارگذری منجر به انتخاب فن با قطر بزرگ‌تر بوده که باعث تحمیل هزینه‌های بیشتر و انتخاب مواد مقاوم‌تر برای ساخت پره‌های فن می‌گردد [۹].



شکل ۱۰. اثر تغییر نسبت کنارگذری بر مصرف سوخت و سر و صدای تولیدی [۹]

در شکل ۱۱ برای یک هواپیمای مشخص میزان سر و صدای اندازه‌گیری شده در موقعیت‌های مرجع سازمان ایکائو برای

آلاینده‌گی صوتی (تقرب به باند فرودگاه، روی باند و پرواز بر روی شهر) بر حسب نسبت کنارگذری قابل مشاهده است [۹].



شکل ۱۱. میزان سر و صدای مؤثر دریافتی در شرایط مرجع اندازه‌گیری سازمان ایکائو بر حسب تغییر نسبت کنارگذری [۹]

۳-۲. کاهش سر و صدای تولیدی فن

همان‌طور که اشاره شد، سر و صدای تولید شده در فن امواج صوتی پهن بانندی است که از حرکت سیال عبوری از روی پره‌ها و اثر متقابل پره‌های ثابت و چرخان به وجود می‌آید. رایج‌ترین روش برای کاهش سر و صدای تولیدی در فن کاهش سرعت چرخش و نسبت فشار فن است. در موتورهای تجاری قدیمی‌تر سرعت خطی نوک پره فن در زمان برخاست 488 m/s و نسبت فشار فن نیز در حدود $1/7$ بوده است. در موتورهای تجاری جدید با نیروی رانش برابر در برخاست سرعت نوک پره 388 m/s و نسبت فشار در حدود $1/45$ است. البته قطر فن برای تأمین نیروی تراست مورد نیاز موتور برای جبران کاهش نسبت فشار فن و افزایش نسبت کنارگذری، بیشتر شده است. موتورهای مدرن تعداد پره‌های فن کمتری در مقایسه با نسل‌های قبل دارند. تعداد پره‌های فن با محاسبات آیرودینامیکی و برخی ملاحظات وزن و هزینه محاسبه می‌شود، با این حال محاسبات سر و صدای تولیدی فن نیز در طراحی و انتخاب تعداد پره‌ها، فاصله بین آنها و سرعت چرخش فن تأثیرگذار است. سر و صدای تولیدی در فن را می‌توان با انتقال برخی صداها در طیف نوفه ایجادی فن به مناطقی که میزان سر و صدای تولیدی مزاحمت کمتری دارد کاهش داد تا سطح سر و صدای مؤثر دریافتی از موتور کمتر گردد [۱۶]. در شکل ۱۲ فن موتور CF6 در مقایسه با موتور مدرن‌تر ارائه شده است.



CF6

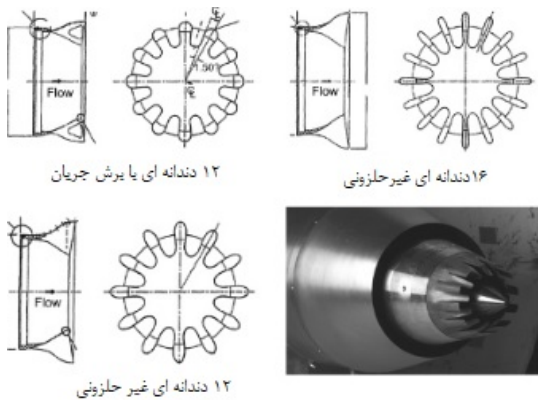
Pratt&whitney PW1000

شکل ۱۲. فن یک موتور قدیمی (CF6) با موتور مدرن

(PW1000)

۳-۳. نازل شورن^{۴۰}

امروزه موفق‌ترین روش برای کاهش صدای جت در موتورهای توربوفن با نسبت کنارگذری بالا نصب مخلوط کننده‌های شورن^{۴۱} مانند، بر روی نازل‌های خروجی نصب شده است. شورن‌ها یا دندانه‌دارها^{۴۲} که به هندسه نازل اضافه می‌شوند، به جریان تحمیل شده، و آشفتگی محوری ایجاد می‌کنند که باعث افزایش اختلاط در هسته، جریان کنارگذری و هوای کم فشار و کم دمای محیط می‌شود [۲۱]. قرار گرفتن دندانه‌ها موجب افزایش اختلاط بین جریان خروجی از نازل با جریان کنارگذری شده و در نتیجه سرعت میانگین جت کاهش می‌یابد و به طبع آن سر و صدای جت جریان نیز کاهش می‌یابد. مطابق با شکل ۱۳ شورن‌ها کنگره کنگره بوده و در انتهای نازل درحالی‌که دندانه‌هایشان کمی درون جریان فرو رفته، قرار دارند.



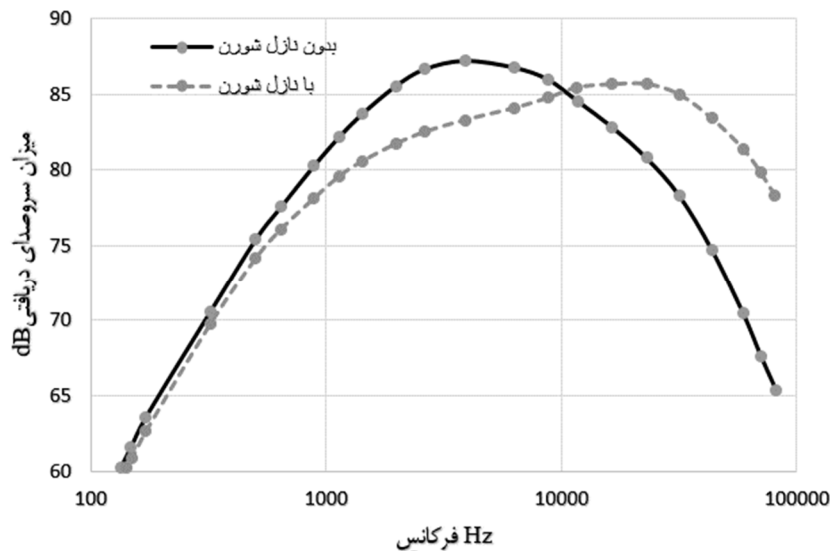
۱۲ دندانه ای یا یرش جریان

۱۶ دندانه ای غیر حلزونی

۱۲ دندانه ای غیر حلزونی

شکل ۱۳. نمونه‌ای از نازل شورن [۱۶]

استفاده از نازل شورن علاوه بر کاهش سر و صدای دریافتی از موتور، فرکانس ماکزیمم سر و صدای دریافتی را نیز افزایش می‌دهد و هرچه فرورفتگی دندانه‌ها در داخل جریان گرم بیشتر شود، تغییر فرکانس بیشینه خواهد شد. این موضوع در شکل ۱۴ قابل مشاهده است [۲۲].

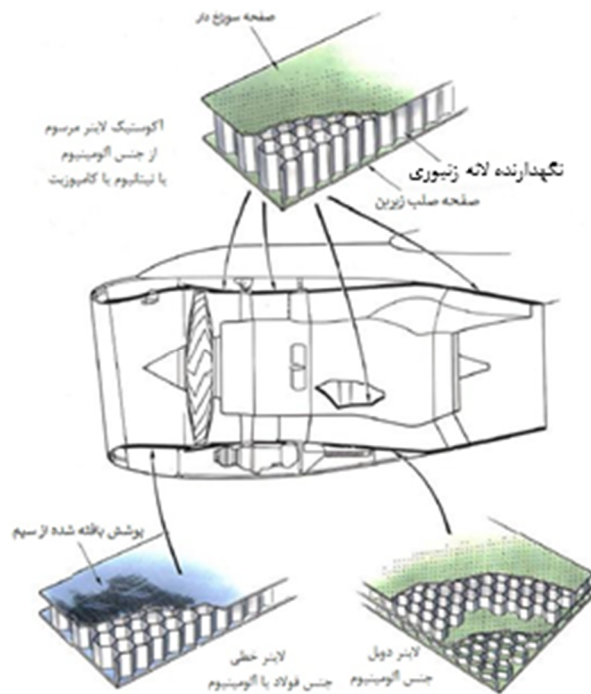


شکل ۱۴. تغییر در سر و صدای تولیدی جت خروجی موتور با نصب نازل شورن [۲۲]

صوتی حول محیط کانال به وجود می‌آید. در حالت کلی حذف صدای فن در صورتی که توان موتور در حال افزایش است به خصوص در سرعت‌های مافوق صوت فن دشوار است. استفاده از آکوستیک لاینرها باعث افزایش وزن موتور می‌شود که نامطلوب بوده و در صورت استفاده از موتورهای با گذردهی بالا که طول ورودی و قطر آن در یک بعد نیستند، مزیت استفاده از آکوستیک لاینرها کم رنگ‌تر می‌شود. نمونه‌ای از آکوستیک لاینرها در شکل ۱۵ قابل مشاهده است [۱۷].

۳-۴. پوشش‌های آکوستیک لاینر

یکی از معمول‌ترین روش‌های غیرفعال در کنترل صدا استفاده از آکوستیک لاینرها است. لاینرها باعث جذب انرژی صوتی منتشر شده و در نتیجه کاهش سطح صدای میدان - بلند می‌گردند. آکوستیک لاینرها تمامی سطح کانال‌های ورودی و یا خروجی را میپوشانند. لاینرها معمولاً در مقاطعی که هر کدام قسمتی از محیط کانال را احاطه کنند نصب می‌شوند. این روش تولید و نصب لاینرها را در داخل نازل آسان می‌کند. مقاطع از طریق نوارهای طولی به هم وصل می‌شوند در نتیجه یک ناپیوستگی در امپدانس



شکل ۱۵. انواع آکوستیک لاینرهای مورد استفاده در موتور جت [۲]

۴. نتیجه گیری

لزوم کاهش آلاینده‌های زیست محیطی در صنایع هوایی دنیا با توجه به گسترش روزافزون این صنایع بر کسی پوشیده نیست. استفاده از فناوری‌های کاهش آلاینده‌ها به عنوان راه‌کاری کم‌هزینه و با قابلیت اطمینان در موتورهای نسل قدیم می‌تواند به بهبود وضعیت زیست محیطی صنایع هوایی کمک شایانی نماید. در این پژوهش برخی از فناوری‌های کاهش آلاینده‌ها مؤثر و گاهی غیرفعال (به‌گونه‌ای که نیاز به طراحی مجدد یک موتور را ندارد) شرح داده شده است. در موتورهای نسل جدید علاوه بر به‌کارگیری برخی از این روش‌ها با بهبود طراحی آیرودینامیکی از ایجاد برخی سر و صداهای نودال جلوگیری کرده است.

از جمله فناوری‌های فعال بررسی شده در این تحقیق می‌توان به افزایش نسبت کنارگذری موتور از ۶ به ۱۴ و کاهش ۸dB از سر و صدا مؤثر دریافتی از موتور اشاره کرد.

برای دستیابی به این مطلوب باز طراحی مجدد بخش فن موتور اجتناب‌ناپذیر است. در فناوری استفاده از نازل شورن و کاهش حدود ۵dB سر و صدا و تغییر محل فرکانس ماکزیمم، نیازی به باز طراحی موتور وجود ندارد و با محاسبات به مراتب ساده‌تری قابلیت به‌کارگیری در موتور وجود دارد.

استفاده از فناوری آکوستیک لاینرهای مرسوم، در فرکانس و امپدانس صوتی مشخص به میزان ۴dB سر و صدا تولیدی را کاهش می‌دهد، لذا با مشخص کردن محل قرارگیری لاینر، افزایش وزن موتور ناشی از نصب لاینر و نوع لاینر استفاده شده می‌توان حالت بهینه بین میزان اثرات سر و صدای دریافتی از موتور و وزن موتور دست یافت.

- [1] Hearing threshold, <http://iranvocology.com/hearing-injuries-in-singers> (Accessed April 9, 2019) (in Persian فارسی).
- [2] Rolls Royce, plc, "The jet engine", John Wiley & Sons, 2015.
- [3] Vedantham, Anu, "Aviation and the Global Atmosphere: A Special Report of IPCC Working Groups I and III", 1999.
- [4] Vanker, Signe, Mart Enneveer, and Imre Rammul, "Noise assesment and mitigation schemes for Estonian airports", *Aviation*, 2009, Vol.13, no.1, pp.17-25.
- [5] Huff, Dennis, "Technologies for turbofan noise reduction", In *10th AIAACEAS Aeroacoustics Conference*, 2004, Vol.1012.
- [6] Sietzen Jr, Frank, "New blueprint for NASA aeronautics", *Aerospace America*, 2002, Vol.40, no.8, pp.24-28.
- [7] Erickson, J. D., "Environmental Acceptability," *Office of Environment and Energy, presented to the Federal Aviation Administration*, 2000.
- [8] Noise Compatibility Report of Cleveland Airport in 4th quarter of 2017. <https://www.clevelandairport.com/about-us/community/noise-compatibility-reports> (Accessed Nov.28, 2019)
- [9] Antoine, Nicolas E., and Ilan M. Kroo, "Framework for aircraft conceptual design and environmental performance studies", *AIAA journal*, 2005, Vol.43, no.10, pp.2100-2109.
- [10] Ventres, C. S., M. A. Theobald, and W. D. Mark, "Turbofan noise generation. Volume 1: Analysis", 1982.
- [11] Meyer, Harold D., and Edmane Envia, "Aeroacoustic analysis of turbofan noise generation", 1996.
- [12] Huff, Dennis L., "Noise reduction technologies for turbofan engines", 2007.
- [13] Ferris, Ryan, Jason Appelbaum, and Mehdi R. Khorrami, "Simulations of a full-scale aircraft with installed airframe noise reduction technologies", In *2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2018, p.2974.
- [14] Milidonis, Kypros F., Tom Hynes, Martin Doherty, and Howoong Namgoong, "The effect of steady intake distortion on Fan MPT Noise under sideline flight conditions", In *2018 AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2018, p.4188.
- [15] Daroukh, Majd, Stéphane Moreau, Nicolas Gourdain, Jean-François Bousuge, and Claude Sensiau, "Tonal Noise Prediction of a Modern Turbofan Engine with Large Upstream and Downstream Distortion", *Journal of Turbomachinery*, 2019, Vol.141, no.2, p.021010.
- [16] Nelson, Emily S., and Dhanireddy Ramalinga Reddy, eds., "Green Aviation: Reduction of Environmental Impact through Aircraft Technology and Alternative Fuels", CRC Press, 2018.
- [۱۷] عظیمی، م. ر، "بررسی مشخصه‌های صوتی آکوستیک لاینر به منظور کاهش صدای موتور توربوفن هواپیمای مسافربری"، ۱۳۹۳، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.
- [18] Gorj-Bandpy, M., and M. Azimi, "Passive techniques for fan noise reduction in new turbofan engines", *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 2013, Vol.6, no.1.
- [19] Tam, Christopher KW, and Ping Chen, "Turbulent mixing noise from supersonic jets", *AIAA journal*, 1994, Vol.32, no.9, pp.1774-1780.
- [20] Saiyed, Naseem, James Bridges, and Kevin Mikkelsen, "Acoustics and thrust of separate-flow exhaust nozzles with mixing devices for high-bypass-ratio engines", In *6th Aeroacoustics Conference and Exhibit*, 2000, p.1961.

- [21] Uzun, Ali, and M. Yousuff Hussaini. "Noise generation in the near-nozzle region of a chevron nozzle jet flow." In *13th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (28th AIAA Aeroacoustics Conference)*, 2007, p.3596.
- [22] Engblom, W., Khavaran, A. and Bridges, J., "Numerical prediction of chevron nozzle noise reduction using WIND-MGBK methodology", In *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2004, p.2979.

پی نوشت:

-
1. Frank Whittle
 2. Rolls-Royce Welland
 3. Derwent
 4. Nene
 5. Dart
 6. Ducted Fan
 7. Unducted Fan
 8. Prob Fan
 9. ICAO
 10. Federal Aviation Administration
 11. Approach measurement
 12. Sideline measurement
 13. Takeoff and Flyover measurement
 14. Effective perceived noise level
 15. Maximum takeoff weight
 16. Flyover
 17. Rotor
 18. Stator
 19. Guide vane
 20. Gulfstream GIII
 21. Power Flow
 22. Buzz
 23. Ultra-high bypass ratio
 24. Unsteady Reynolds-averaged Navier–Stokes
 25. Large Eddies
 26. Small Eddies
 27. Nose gear
 28. Main gear
 29. Flap noise
 30. Inflow distortion
 31. Direct
 32. Indirect
 33. Nonuniformities
 34. Lean-burning
 35. Turbulent mixing
 36. Imperfectly expanded
 37. Shock noise
 38. Spectrum
 39. Potential core
 40. Chevron nozzles
 41. Chevron mixer
 42. Serration