فناوری‌های نوین کاهش نوفه در موتور انواع هواپیما

سهیلا عبدالهی‌پور[1]، سید آرش سید شمس طالقانی[2]

۱ کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران

۲ استادیار پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوی، تهران، taleghani@ari.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۰۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۰۲

چکیده

هواپیماهای تجاری مدرن از موتورهایی با نسبت‌های کنارگذر بالا بهره می‌برند که دارای سیستم‌های نازل با محفظهٔ کوتاه، جریان مجزا و غیرمخلوط‌شونده هستند. این سیستم‌های پیشرانش با توجه به سرعت و دمای بالا و طبیعت فشار زیاد جت خروجی سطح نوفهٔ بالایی تولید می‌کنند؛ به‌ویژه وقتی هواپیما در شرایط تراست حداکثر مانند لحظهٔ برخاستن قرار دارد. منبع اولیهٔ نوفهٔ جت خروجی، اختلاط آشفتهٔ لایه‌های برشی جریان در خروجی موتور است. این لایه‌های برشی جریان شامل ناپایداری‌هایی هستند که به تولید گردابه‌هایی به‌شدت آشفته منجر می‌شوند که نوسانات فشاری عامل ایجاد صوت را تولید می‌کنند. صنایع هوافضایی پیشرفتهٔ دنیا برای کاهش نوفهٔ ایجادشده در موتور جت هواپیما، فناوری‌های نوینی را توسعه داده‌اند. اصول این فناوری‌ها بر پایهٔ مختل‌کردن آشفتگی لایهٔ برشی جریان و به‌طور کلی کاهش سروصدای تولیدی متمرکز شده‌اند. هدف این مقاله معرفی فناوری‌های ارائه‌شده در حوزهٔ کاهش نوفه در موتور جت طی چند سال اخیر می‌باشد. نمونهٔ صنعتی موفقی که در چند سال اخیر طراحی، آزمایش و به تولید صنعتی رسیده است، نازل‌های چورون یا نازل‌های دارای دندانه است که چندین نمونهٔ ارائه‌شده در سال‌های اخیر معرفی می‌شوند. این نوع نازل‌ها برحسب نوع، افت راندمان موتوری در حد ۱ درصد تا صفر و توانایی کاهش شدت صوت در حد چند دسی‌بل را دارا هستند.

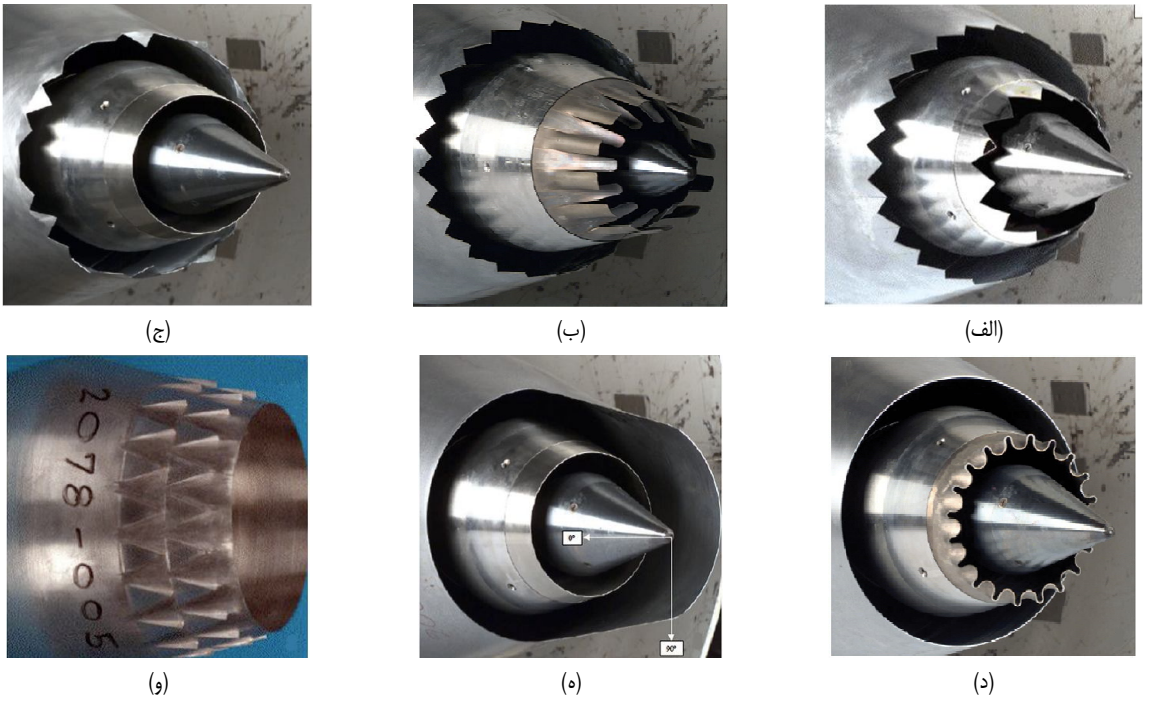
واژگان کلیدی: کاهش نوفه، نازل چورون، موتور جت، کنترل فعال، نازل فلوتی

۱. مقدمه

امروزه نوفه و سروصدای هواپیما به‌عنوان یک نگرانی قابل توجه دائمی برای فرودگاه‌ها، ساکنان نزدیک به فرودگاه‌ها و مسافران مطرح است. در حالی‌که حجم سنگین ترافیک هوایی روبه افزایش است و فناوری موتور جت در حال پیشرفت است، صنایع هوانوردی دنیا برای کاهش سطح نوفهٔ ناشی از هواپیماهای جت مدرن با چالش مواجه‌اند [۱]. در اوائل سال ۱۹۶۰ م، توجه ویژه‌ای به فناوری کاهش نوفه معطوف شد [۲]. این توجه ویژه نیز به‌دلیل نقش قابل توجهی است که نوفهٔ جت در تاریخ هوانوردی داشته است. صنایع هواپیمایی همواره در دهه‌های گذشته برای توسعهٔ ظرفیت محموله‌ها سرمایه‌گذاری نموده است

و این صنعت دائماً در حال پیشروی به‌سمت پیشرانش‌های بزرگتر است. این مسئله نیازمند تحقیقات صنعتی پیوسته در جهت افزایش توان و راندمان در توربوجت‌ها و توربوفن‌هاست؛ به‌گونه‌ای که کاهش نوفه را نیز به‌همراه داشته باشد.

در اوائل سال ۱۹۹۰ م، طی یک دهه، حدود ۶۳/۱ میلیون دلار برای ضدصوتی‌کردن مدارس نزدیک به فرودگاه‌های میدوی[۱] و اوهیر[۲] شیکاگو هزینه شد [۳]. صنایع دفاعی نیز برای کاهش سطح نوفه به‌منظور توسعهٔ فناوری جاسوسی و ضد راداری پیشرفته همواره خواهان کاهش سطح نوفه در وسائل نظامی آینده بوده‌اند. ناسا تحت برنامهٔ کاهش نوفهٔ موتورها و طی قرارداد NAS3-27727 اقدام به طراحی، ساخت و آزمایش چندین نازل خروجی با جریان جدا در نسبت‌های کنارگذر[۳] ۵ تا ۸ نمود. نازل‌های انتخاب‌شده به‌منظور وسائلی برای فرونشانی نوفه و مطالعهٔ کارایی طرح‌های نوظهور استفاده شدند. شرکت پرات و ویتنی[۴] قراردادی با کمپانی بوئینگ برای کمک به طراحی شکل‌های متنوع آزمایش و آماده‌سازی تجهیزات میکروفن آرایهٔ فازی و اندازه‌گیری تست‌ها منعقد کرد. همچنین شرکت پرات و ویتنی قراردادی با مرکز تحقیقات فناوری متحده[۵] برای تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی سازوکارهای کاهش‌دهندهٔ منعقد کرد. نه شکل انتخابی توسط شرکت پرات و ویتنی برای تحلیل شامل تب‌های فلیپر، فن‌های شال‌دار، طراحی افست خط مرکزی، نازل‌های لوب‌دار موجود و ترکیبی از موارد ذکرشده بود. علاوه بر این ناسا قرارداد مشابهی به جنرال الکتریک اعطا کرد تا ۱۱ شکل نازل خروجی دیگر شامل دوقلوهای تولیدکنندهٔ ورتکس، اختلاط‌کنندهٔ زبانه (توسعه‌یافته به‌وسیله شرکت موتور آلیسون) و نازل‌های چورون[۶] را طراحی کند. نمونه این طراحی‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است. هر دو شرکت، شرکت مهندسی سیستم‌های هوایی[۷] را برای ساخت نازل انتخاب کردند. به‌دلیل درک بهتر اتلافات ذاتی به‌وجود آمده در نیروی پیشرانش ناشی از وسائل کاهش نوفه، ناسا همچنین قراردادی با شرکت مهندسی سیستم‌های هوایی برای مطالعهٔ روی جنبه‌های عملکردی این وسیله منعقد کرد.



(الف) (ب) (ج)

(د) (ه) (و)

شکل ۱. نمونه‌هایی از نازل‌های طراحی‌شده برای کاهش نوفه [۳]

برای ارزیابی بهتر نتایج این تحقیقات بزرگ، ناسا گزارش‌های جداگانه‌ای از شرکتهای جنرال الکتریک، پرات و ویتنی و مهندسی سیستم‌های هوایی تقاضا کرد. نتایج تحقیقات نشان داد که تنها ۲ مورد از نازل‌های طراحی‌شده برای کاهش نوفه، مینیمم افت در نیروی جلوبرنده را دارند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که چورون‌های سطوح داخلی روی هستهٔ نازل اولیه و

تب‌های فلیپر روی هستهٔ نازل برای کاهش سطوح نوفهٔ مطلوب کافی بودند [۴]. آنها همچنین در گزارش خود برای کاهش نوفهٔ عمومی به افزودن چورون‌های اضافه روی نازل فن اشاره نمودند. این کار می‌تواند با انتقال امواج به محدودهٔ فرکانسی بالاتر، آنها را برای دمپ‌شدن در محیط آماده نماید. ازمایش‌های میکروفن آرایهٔ فازی انجام‌شده توسط بوئینگ این مطالب را تأیید کرد و همچنین آنها نشان دادند که نوفهٔ جت از دو منبع اصلی در موتور جت ناشی می‌شوند؛ یکی نزدیک صفحهٔ خروجی نازل که نوفهٔ وزوز اره‌ای[۸] نامیده می‌شود و دیگری پایین‌دست‌تر از پلوم[۹] جت که نوفهٔ سلول شوک نامیده می‌شود. این کشف به محققان اجازه می‌دهد تا در آینده روش‌های متنوعی را به‌طور ویژه برای هر کدام از منابع نوفهٔ جت هدف قرار دهند. این برنامه همچنین سازوکارهای مؤثر در وسائل کاهش صوت را تعیین نمود. هر دو نوع نازل چورون و تب‌های فلیپر برای کاهش نوفهٔ جت با ورتیسته‌های در جهت غالب جریان همراه دو لایهٔ مرزی برشی در جریان جت انتخاب شدند [۵]. ورتیسیتهٔ اضافه‌شده سبب اختلاط ملایمتر جریان فن و هسته می‌شود و نوسان‌های فشاری سریع که سبب نوفهٔ جت هستند را کاهش می‌دهد.

در این مقاله فناوری‌های نوین معرفی‌شده در زمینهٔ کاهش نوفه و صدای نامطلوب در موتور هواپیماهای مسافربری بررسی می‌شود. لذا در بخش‌های بعد، چهار مدل اصلی نازل چورون ساده، چورون مرطوب فعال، چورون فلوتی و چورون دوجداره مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. نازل چورون ساده

نازل خروجی یک توربین گاز شامل یک محفظه است که جت گاز حاصل از محصولات احتراق را به بیرون هدایت می‌کند. یکی از وسائل شناخته‌شده برای کاهش نوفه، که به‌طور موفقی توسعه یافته و روی چند هواپیمای تجاری به‌کار گرفته شده است، نازل چورون ثابت مکانیکی است. نام چورون به‌علت شکل دندانه‌ای که شبیه انگشت‌های یک دستکش است، انتخاب شده است و معمولاً به‌گونه‌ای است که ترکیبی از چورون‌های مجاور یا دندانه‌های مجاور در بخش انتهایی نازل خروجی در کنار هم قرار می‌گیرند تا یک اگزوز خروجی را فراهم نمایند. پارامترهای انتخاب چورون‌ها در طراحی شامل شکل و سایز چورون‌ها، تعداد دندانه‌ها در پیرامون نازل و همچنین مقدار نفوذ نوک دندانه در جریان می‌باشد. بنابراین شکل چورون، اندازه و موقعیت (یعنی مقدار نفوذ در جریان) به‌طور معمول در زمان برخاستن هواپیما برای کاهش نوفه بهینه می‌شود و معمولاً آثار منفی افزایش درگ وسیله را در حالت کروز به‌همراه دارد. در تحقیقاتی که طی سالیان اخیر انجام شده است، چورون‌های ثابت کاهش نوفه‌ای در حدود ۲ تا ۳ دسی‌بل را با توجه به نسبت‌های کنارگذر و پارامترهای مشخص دیگر نشان می‌دهند. شکل ۲ نمونه‌ای از نازل چورون را نمایش می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، هر کدام از چورون‌ها مثلثی‌شکل هستند؛ به‌گونه‌ای که از سمت قاعده به طرف رأس و در راستای محور موتور جت، پروفیلی مقعر دارند تا اختلاط جت را در داخل شکاف‌ها افزایش دهند. به‌منظور اثبات فناوری و در راستای صنعتی‌شدن این محصول، این نوع نازل روی هواپیمای بوئینگ ۷۸۷ مورد تست پروازی قرار گرفته است که در شکل ۳ نمایش داده شده است.

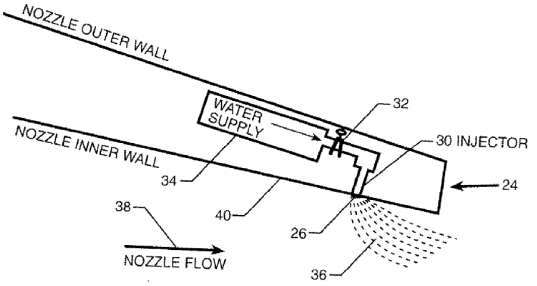
۳. نازل چورون مرطوب فعال

روش دیگری که قبلاً مطالعه شده اما تاکنون در هواپیماهای تجاری عملیاتی نشده است، تزریق آب به پلوم خروجی جت است. آب تزریقی به پلوم خروجی می‌تواند سطح نوفه را روی یک فضای گستردهٔ بزرگ و در محدوده‌های فرکانسی نسبتاً عریض کاهش دهد. وقتی قطره‌های آب تبخیر می‌شوند و داخل پلوم پخش می‌شوند، دو منظور حاصل می‌شود: کاهش دمای گاز و تضعیف انرژی‌های جنبشی آشفتگی و حرارتی. این دو اثر، نوسان‌های دما و فشار در ناحیهٔ تولید نوفهٔ جت را کاهش می‌دهد. تزریق آب از طریق پورت‌های تخلیهٔ آب به‌سمت لبهٔ فرار به‌منظور افزایش اختلاط آشفتگی به‌جای حالت مشابه چورون‌های مکانیکی، هنری است که نازل چورون مرطوب فعال در کنترل کاهش نوفه مطرح کرده است [۷]. پورت‌های تزریق به‌طور اساسی پیرامون نازل توزیع و چیده می‌شوند. آنها قابل سایزشدن، چرخیدن یا تغییر شکل هستند تا خم‌شدگی‌های مختلف یا همراستا با جریانی که در نازل چورون ثابت وجود دارد، ایجاد کنند. برخلاف نازل‌های چورون مکانیکی، در این نازل، جریان سیال می‌تواند افزایش راندمان بیشتری را برای موتور رقم بزند. این نوع چورون در زمان برخاستن و نشستن که

کاهش نوفه مورد نظر است می‌تواند فعال شود و در زمان کروز غیرفعال شود و در نتیجه هیچ نوع کاهش احتمالی راندمان موتور را به‌همراه نخواهد داشت. در شکل ۴ نقشهٔ ساده‌ای از این نوع نازل نمایش داده شده است.

شکل ۲. نمونه‌ای از نازل چورون مثلثی ساده
مورد استفاده با هدف کاهش نوفه [۳]

شکل ۳. استفاده از نازل چورون روی بوئینگ ۷۸۷
ساخته‌شده توسط شرکت بوئینگ با همکاری ناسا و جنرال الکتریک [۶]



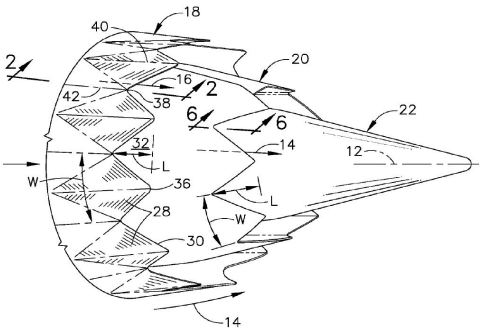
شکل ۴. طرحواره‌ای از نازل چورون مرطوب فعال [۷]

مومنتم ناشی از آب تزریقی می‌تواند اثر مشابهی با چورون‌ها ایجاد کند؛ با این مزیت که اتمیزاسیون آب می‌تواند به کاهش یا حذف نوفهٔ اضافی کمک کند. به هر حال، با استفاده از تزریق آب روی نازلی که دارای چورون‌های ثابت نیز هست، در طول برخاستن هواپیما تولید ورتیسیتهٔ محوری انجام می‌شود و اختلاط جریان‌های هسته با فن یا جریان فن با جریان آزاد صورت می‌گیرد. آب این اختلاط را در مقایسه با چورون‌های ثابت افزایش می‌دهد و در نتیجه چورون‌ها نفوذ کمتر و طول دندانه‌های کوچکتری نسبت به حالت بدون نازل آب خواهند داشت. بنابراین این جت‌های آب یا در ترکیب با دندانه‌های ثابت استفاده می‌شود که دندانهٔ مرطوب[۱۰] نام دارد یا در حالت تنها و بدون دندانه به‌کار گرفته می‌شود که دندانهٔ آبی[۱۱] نام دارد. بهینه‌سازی این روش براساس انتخاب متغیرهایی مثل زاویهٔ تزریق آب، شکل‌های پورت تزریق، دبی جرمی آب، توزیع پورت تزریق و جزاین‌ها انجام می‌شود. به‌عنوان یک مزیت دیگر، افزودن سیال به جریان می‌تواند بهبود کاهش نوفهٔ اضافی را با اختلاط پلوم جت در پایین‌دست جریان و کاهش نوسان‌های دما و فشار آشفتگی که می‌تواند سبب تشعشع نوفه به دوردست شود را به‌همراه داشته باشد.

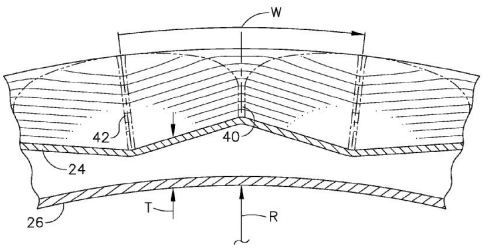
۴. نازل چورون فلوتی

طرح دیگری که به‌منظور کاهش نوفه در موتور توربین گاز توسعه یافته است، طرح نازل خروجی فلوتی[۱۲] یا چین‌دار موتور توربین گاز نام دارد. این طرح شامل یک پوستهٔ فلوتی شکل است که به یک ردیف از چورون‌ها و دندانه‌ها ختم می‌شود. این نازل به‌طور محیطی در اطراف پوسته، مارپیچ شکل است و لبهٔ فرار مارپیچی در پیرامون دارد. نازل‌های چورون، در حال توسعه روی کاهش نوفه در موتور هواپیماهای زیرصوت که نیاز به ماکزیمم راندمان عملکردی است، می‌باشند. به هر نحو، موتورهای جت فراصوت، در حال حاضر برای رسیدن به شرایط کروز فراصوت هواپیماهای تجاری، در حال توسعه‌اند. شرایط پرواز فراصوت هواپیما، نیاز به موتورهای قوی‌تری دارد و

شدیدتر شدن نوفه و میرایی آن را به‌همراه دارد. در شکل ۵ تصویر ایزومتریکی از نازل خروجی یک موتور هواپیمای توربوفن فراصوت نمایش داد شده است. در فرم جریان معکوس نشان داده شده در این شکل، گازهای محفظهٔ احتراق در هسته مرکزی (شمارهٔ ۱۶ در شکل ۵)، به نازل خارجی (شمارهٔ ۱۸) تخلیه می‌شود و هوای فن فشرده شده(شمارهٔ ۱۴) به نازل داخلی (شمارهٔ ۲۰) تخلیه می‌شود. در جریان غیر معکوس، هوای فن به نازل خارجی شمارهٔ ۱۸ تخلیه می‌شود و گازهای هسته اصلی (شمارهٔ ۱۶) به نازل داخلی (شمارهٔ ۲۰) تخلیه می‌شود و



شکل ۵. نازل چورون فلوتی [۸]



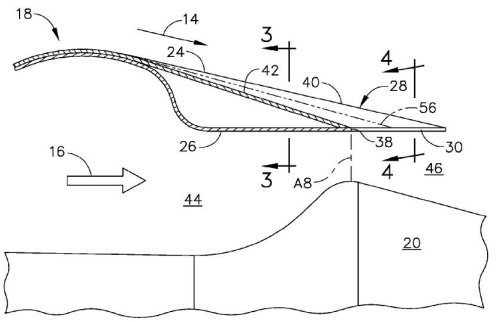
شکل ۷. نازل چورون فلوتی از نمای شعاعی با برش مقطع ۳-۳ [۸]

شکل۶ تصویر مقطع محوری بخش نازل خارجی نشان داده شده در شکل ۵ را نمایش می‌دهد. شکل ۷، نمای مقطعی شعاعی از برش ۳-۳ شکل ۶ را نمایش می‌دهد. نمای ۴-۴ شکل ۶ نیز، در شکل ۸ نمایش داده شده است. تصویر ایزومتریک نازل خروجی داخلی شکل ۵ در شکل ۹ نمایش داده شده است. سایر نماها و نقشه‌های جزیی برش خورده برای این نوع نازل در مرجع [۸] آمده است.

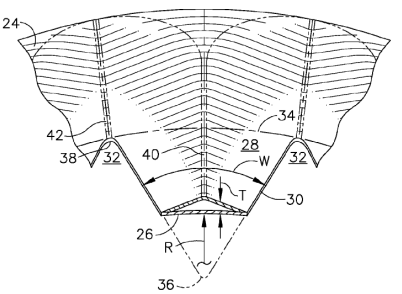
۵. نازل چورون دوجداره برای موتور توربوفن

طرح جدید دیگری که برای کاهش نوفه در موتورهای توربوفن توسعه یافته است نازل چورون دوجداره می‌باشد. این طرح شامل

جریان هوای آزاد (شمارهٔ ۱۴) وقتی موتور هواپیما را به حرکت درمی‌آورد، در خارج نازل‌ها تخلیه می‌شود. دو نازل با شماره‌های ۱۸ و۲۰ شکل‌دهی شده‌اند تا اختلاط بین جریان‌های داخلی و خارجی برای کاهش سرعت جریان ماکزیمم و در نتیجه میرایی یا کاهش نوفه در طول زمان کارکرد، بهبود یابد. نازل خارجی اکوستیک (شمارهٔ ۱۸) از نماهای مختلف در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. نازل خروجی ۱۸، شامل پوسته‌های داخلی یا خارجی یا دیواره‌های حلقوی ۲۴ و ۲۶ می‌شود که به‌طور محوری حول محور خط مرکزی ۱۲ در شکل ۵ ادامه یافته است.



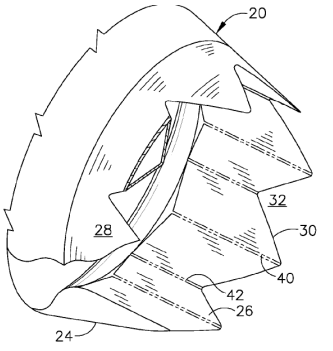
شکل ۶. نازل چورون فلوتی از نمای محوری [۸]



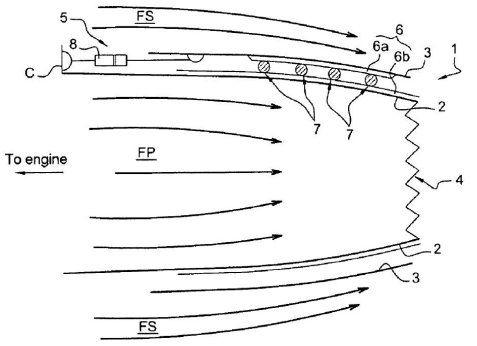
شکل ۸. نازل چورون فلوتی از نمای شعاعی با برش مقطع ۴-۴ [۸]

یک خروجی دوجداره است؛ جدارهٔ داخلی، که جریان اصلی موتور و محصولات احتراقی از این قسمت بیرون می‌آید، دارای دندانه‌های نوع چورون بوده و جداره خارجی به‌طور جزیی جداره داخلی را احاطه کرده و در امتداد پوشش داخلی قابل حرکت است تا عملکرد آن در کاهش نوفه قابل کنترل باشد. در شکل ۱۰ نمایی شماتیک از این نوع نازل نمایش داده شده است. وقتی هواپیما به سرعت کروز رسید و به حد کافی ارتفاع گرفت، مسئلهٔ صدا و نوفه به‌علت فاصلهٔ زیاد با منازل مسکونی کم‌اهمیت می‌شود و در آن ارتفاع نیازی به کاهش نوفه نخواهد بود و در این حالت راندمان و کاهش مصرف سوخت در اولویت است و اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. این طرح بر این اساس ارائه شده

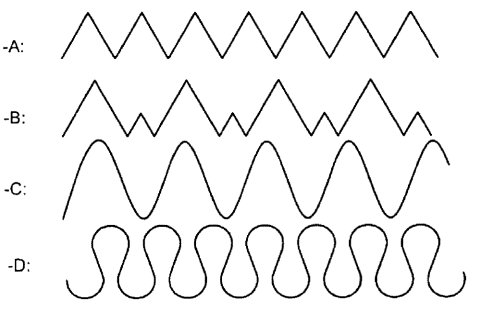
است. بهینه‌سازی اکوستیکی با استفاده از نازل چورون به هر حال راندمان موتور را کاهش می‌دهد. برای یک مقدار تراست مشخص، موتور توربوفن دارای چورون به‌علت سطح توربولانس بالاتر مقدار سوخت بیشتری در مقایسه با نازل بدون دندانه دارد. در هواپیماهای سایز کوچک که برد کوتاهی دارند این افزایش مصرف سوخت به‌علت کوتاه‌بودن فاز کروز مقدار کمی در حد ۰/۱ درصد است. اما در هواپیماهایی که برد بیشتری دارند، این مقدار افزایش می‌یابد. علاوه بر این در سرعت‌های پایین، وجود دندانه‌های چورون در نازل سبب افزایش نیروی تراست می‌شود، در صورتی که در سرعت‌های بالاتر، چورون‌ها روی تراست تأثیر منفی می‌گذارند. به‌همین منظور این طرح برای رفع این نقص ارائه شده است. بدین منظور پوشش خارجی نازل متحرک شده است تا در سرعت‌های بالا و ارتفاع پایین؛ یعنی در فاز برخاستن با عقب رفتن پوشش خارجی از دندانه‌های چورون و مزیت آن در کاهش نوفه استفاده شود و در سرعت‌های زیاد و ارتفاعات بالا با پوشانده شدن چورون‌ها به‌کمک پوشش خارجی از مزیت نازل بدون چورون بهره برده شود. جابه‌جایی پوشش خارجی که در شکل ۱۰ با سازوکار متصل شمارهٔ ۸ نمایش داده شده است، می‌تواند با استفاده از حداقل یک تراستر با کمک غلتک‌ها یا ریل‌های هادی انجام شود که این تراستر نیز با جریان هوا قابل کنترل خواهد بود. چورون‌ها می‌توانند شکل‌های مختلفی داشته باشند که برخی از آنها در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۱۰، پوشش داخلی شمارهٔ ۲ در تماس با هوای داغی است که از موتور خارج می‌شود که در شکل با FP نشان داده شده است. پوشش خارجی شمارهٔ ۳ که به‌طور جزیی پوشش داخلی شمارهٔ ۲ را احاطه کرده است، با هوای سرد در تماس است که با FS نشان داده شده است. این دو پوشش باید از دو مادهٔ مختلف ساخته شود. پوشش داخلی شمارهٔ ۲ باید از مواد مقاوم مکانیکی در دمای بالا مثل اینکونل که آلیاژ نیکل با ترکیبات کرومیوم و آهن و مقاوم به خوردگی در برابر حرارت بالا است، ساخته شود. البته این مواد وزن مجموعه را افزایش می‌دهند. پوشش خارجی شمارهٔ ۳، که در مجاورت هوای سرد است، باید از مواد مقاوم مکانیکی مثل تیتانیوم انتخاب شود تا در برابر نیروهایی که به بدنه اگزوز وارد می‌شود مقاومت کند. مزیت دیگر نازل چورون دوجداره این است که بهینه‌سازی ائرودینامیکی جریان‌های سرد و داغ امکان‌پذیر است. در طول پرواز، چورون‌ها در اثر حرکت ناشی از ارتعاشات موتور توربوفن یا پدیدهٔ فلاتر تحت تنش قرار می‌گیرند. این تنش‌ها منبعی از خستگی در بخش مقعر یا گودی دندانه‌ها که کرنش در آنجا بالاست، محسوب می‌شوند.



شکل ۹. نمای ایزومتریک نازل خروجی داخلی از نازل چورون فلوتی [۸]



شکل ۱۰. نمایی از طرح نازل دوجدارهٔ چورون برای موتور توربوفن [۹]



شکل ۱۱. شکل‌های مختلف از نوع دندانه‌های چورون [۹]

پوشش خارجی شمارهٔ ۳ در شکل ۱۰ با لغزیدن و پوشاندن چورون‌های شمارهٔ ۴، از این حرکت‌ها و جنبش‌های نامطلوب و ناخواسته جلوگیری می‌کند. تراستر نشان داده شده (شمارهٔ ۸ در شکل ۱۰) از یکسو به پوشش خارجی شمارهٔ ۳ و از سوی دیگر به پوشش c موتور توربوفن مقید شده است و با روش‌های کنترلی مثل طریقه‌های الکتریکی یا هیدرولیکی می‌تواند کنترل شود. ترجیح داده می‌شود که این کنترل با جریان هوای فشرده موجود در پشت کمپرسور انجام شود. لذا شکل ۱۰ برای حالت برخاستن هواپیما مناسب است و با عقب رفتن پوشش خارجی ۳ دندانه‌های چورون شمارهٔ ۴ مخفی شده و برای فاز کروز مناسب خواهد بود. باید توجه داشت که حرکت پوشش خارجی در طول پرواز تنها دو بار نیاز است. اولین جابه‌جایی پوشش خارجی قبل از برخاستن است و دومین جابه‌جایی زمانی است که دیگر به حد کافی از سطح زمین فاصله باشد که نوفه مسئلهٔ آزاردهنده‌ای نباشد. جابه‌جایی اول می‌تواند براساس رسیدن مقدار دریچهٔ گاز به حدی مشخص انجام شود. جابه‌جایی دوم نیز می‌تواند براساس ارتفاع و رسیدن به ارتفاعی کافی انجام شود. درپی ارائهٔ طرح‌های مختلف نازل چورون و انجام آزمایشات تجربی، کارهای عددی متفاوتی مثل آنالیز عددی چورون با ترکیب هوا در کناره‌ها [۱۰]، توسعهٔ یک مدل عددی برای پیش‌بینی کاهش نوفهٔ نازل چورون [۱۱–۱۲] و مدلسازی عددی تأثیر کاهش نوفهٔ چورون‌ها تحت جریان با ۳ دمای مختلف [۱۳] و مدلسازی عددی جریان با ترکیب شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و ائرواکوستیک محاسباتی [۱۴] نیز صورت گرفت.

۶. نتیجه‌گیری

با پیشرفت روزافزون صنعت مسافربری هوایی، توسعهٔ فرودگاه‌ها و نیاز به طراحی و ساخت هواپیماهای سنگین‌تر، کاهش نوفه و صدای نامطلوب ناشی از پرواز هواپیماها در نزدیکی منازل مسکونی به چالش جدی جوامع پیشرفته امروزی مبدل شده است. چند نمونه از نازل‌های چورون طراحی‌شدهٔ جدید برای کاهش نوفهٔ موتور هواپیماها، که منبع اصلی تولید نوفه هستند، در این مقاله ارائه شد. تمام دغدغهٔ طراحان در صورت کاستن شدت صوت و نوفهٔ موتور، جلوگیری از افت راندمان موتور است. در میان روش‌های پیشنهادشده به‌نظر می‌رسد روش‌های کاهش نوفه با استفاده از تکنیک کنترل فعال در آیندهٔ نزدیک بیشتر مورد استفاده قرار گیرد و امکان تجاری‌شدن بیشتری داشته باشد. با توجه به بحرانی‌بودن نوفه در فاز برخاستن، که موتور با حداکثر توان در حال به‌کارگیری است و هواپیما در نزدیک منازل مسکونی در حال اوج‌گیری است، نیاز به کاهش نوفه فقط در این فاز حیاتی است و روش‌های کنترل فعال می‌تواند هم مشکل کاهش نوفه را حل کند و هم تضمین‌کنندهٔ حفظ راندمان موتور در فاز کروز باشد. توانایی کاهش نوفه و صدای نامطلوب روش‌های ارائه‌شده تاکنون در حد چند دسی‌بل گزارش شده است، اما چیزی که اهمیت دارد برنامهٔ طولانی‌مدتی است که بیش از یک دهه به‌طور جدی شروع شده است تا بتوان در آینده شاهد محیط آرامتری بود. علاوه بر ایجاد محیط کم سروصدا در نزدیک فرودگاه‌ها، کاهش نوفه و صدا در پروازهای نظامی نیز مورد توجه صنایع نظامی قرار گرفته است.

۷. مآخذ

[1] Noise regulations: The regulatory response to limiting aircraft noise is embodied in Federal Aviation Regulation (FAR) chapter 36 in the United States and in International Civil Aeronautics Organization (ICAO) Annex 16, which impose increasingly strin-gent limits on acceptable jet noise.

[2] B. A. Janardan, G. E. Hoff, J. W. Barter, S. Martens, P. R. Gliebe, V. Mengle, W. N. Dalton, N. Saiyed, AST critical propulsion and noise reduction technologies for future commercial subsonic engines: separate-flow exhaust system noise reduction concept evaluation, 2000.

[3] C. J. Bargsten, M. T. Gibson, *NASA Innovation in Aeronautics: Select Technologies That Have Shaped Modern Aviation*, National Aeronautics and Space Administration, NASA Headquarters, 2011.

[4] J. Low, P. S. Schweiger, J. W. Premo, T. J. Barber, N Saiyed, Advanced Subsonic Technology (AST) Separate-Flow High-Bypass Ratio Nozzle Noise Reduction Program Test Report, 2000.

[5] W. H. Herkes, R. F. Olsen, S. Uellenberg, The quiet technology demonstrator program: flight validation of airplane noise-reduction concepts, *AIAA Paper*, 2720, 2006.

[6] A Boeing-led team is working to make quiet jetliners even quieter, accessed November 01, 2016, http://www.boeing.com.

[7] R. H.Thomas, K. W. Kinzie, Wet active chevron nozzle for controllable jet noise reduction, U.S. Patent 8,015,819, issued September 13, 2011.

[8] B. J. Renggli, Fluted chevron exhaust nozzle, U.S. Patent 7,963,099, issued June 21, 2011.

[9] P. Feuillard, P. Hemeury, C. Gerri, Chevron-type primary exhaust nozzle for aircraft turbofan engine, and aircraft comprising such a nozzle, U.S. Patent 7,469,529, issued December 30, 2008.

[10] V. Dippold III, CFD analyses and jet-noise predictions of chevron nozzles with vortex stabilization, *AIAA Paper* 37, 2008.

[11] N. K. Mohan, A. P. Dowling, A Single–stream Jet Noise Prediction Model for a Family of Chevron Nozzles, 2013.

[12] N. K. Depuru Mohan, A. P. Dowling, S. A. Karabasov, H. Xia, O. Graham, T. P. Hynes, P. G. Tucker, Acoustic sources and far-field noise of chevron and round jets, *AIAA Journal*, Vol. 53, No. 9, pp. 2421-2436, 2015.

[13] J. Liu, A. Corrigan, K. Kailasanath, N. Heeb, D. Munday, E. Gutmark, Computational Study of the Impact of Chevrons on Noise Characteristics of Imperfectly Expanded Jet Flows, In *52nd Aerospace Sciences Meeting*, p. 0178, 2014.

[14] N. S. Dhamankar, G. A. Blaisdell, A. S. Lyrintzis, Analysis of Turbulent Jet Flow and Associated Noise with Round and Chevron Nozzles using Large Eddy Simulation, In *22ndAIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, p. 3045, 2016.

پی‌نوشت

1. Midway
2. O'Hare
3. bypass ratio
4. Pratt & Whitney
5. UTRC
6. Chevron Nozzle
7. aero systems engineering
8. buzz saw noise
9. Plume
10. wet chevron
11. water chevron
12. fluted chevron

جهت تسهیل در کار چاپ آگهی‌های ارسالی نرم‌افزارهای ذیر پیشنهاد می‌شوند:

Adobe Photoshop

Adobe FreeHand

ابعاد آگهی‌های ارسالی بدین شرح توصیه می‌شوند:

۱. آگهی ربع صفحه: اندازهٔ ۸ در ۱۲ سانتی‌متر

۲. آگهی نیم‌صفحه: اندازهٔ ۱۲ در ۱۶/۵ سانتی‌متر

۳. آگهی تمام‌صفحه: اندازهٔ ۲۱/۵ در ۲۹/۵ سانتی‌متر