دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۳
پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۳۰
DOI: 10.22034/JTAE.2022.313172.1209

(علمی – ترویجی)

مروری بر رویکردهای نو در پروازهای آرایشمند جت‌های تجاری

مهلا رئوف مقدم*[۱] و مسعود ابراهیمی **[۱]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، گروه هوافضا، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، کدپستی: ۱۴۱۱۵-۱۱۱

* دانشجوی دکتری (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:
mahlaraoof@gmail.com

** دانشیار

از جمله فناوری‌هایی که در سال‌های اخیر به صورت آزمایشی بکار گرفته‌شده، پرواز آرایشمند هواپیماهای مسافربری به سبک پرندگان است. شرکت‌های هواپیمایی مدام در حال ابداع و نوآوری هستند تا بهره‌وری هواپیماهایشان را بهبود بخشند. انتقال سریع‌تر مسافران و بارها به مقصد و مصرف سوخت کمتر از مشغله‌های اصلی ذهن این شرکت‌ها هستند. پرواز به صورت جمعی و با آرایش (آنچنان که پرندگان از سر غریزه انجام می‌دهند) مزیت‌هایی مانند کاهش نیروی درگ و مصرف انرژی دارد. اثرات تداخل آیرودینامیکی ناشی از پرواز آرایشمند و مشکل مربوط به آن، علاقه زیادی به تحقیق در این زمینه برانگیخته است. از نگرانی‌های مربوط به پرواز آرایشمند، راحتی مسافر در کنار ایمنی با توجه به مسافت طولانی است. مواردی مانند طراحی سنسور و خستگی سازه نیز در این پروازها مهم می‌باشند. در این مقاله هدف بررسی راحتی سرنشینان در پرواز آرایشمند در شرایط عدم قطعیت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: پرواز آرایشمند، راحتی سرنشین، هواپیمای پیشرو، هواپیمای پیرو، اغتشاشات جوی

Ride Quality & Passenger Comfort in Commercial Aircraft During Formation Flight

M. Raouf Moghadam[1*] and M. Ebrahimi [1*]**

1- Department of Mechanical, Group of Aerospace, Engineering, Tarbiat Modares, Postal Code: 14115111, Tehran, IRAN

* Ph.D. Student (Corresponding Author): Email:
mahlaraoof@gmail.com

** Associate Professor

*One of the technologies that has recently been used experimentally is the group flight of bird-style passenger aircraft. Airlines are constantly innovating to improve the efficiency of their aircraft. Faster transfer of passengers and cargo to destinations and less fuel consumption are the main concerns of these companies. Flying in a group and with **arrangement** (as birds do instinctively) has advantages such as reducing drag force and energy consumption. The effects of aerodynamic interference due to formation flight and its related problem have aroused great interest in research in this field. One of the concerns related to formation flight is passenger comfort along with safety due to the long distance. Things like sensor design and structural fatigue are also important in these flights. In this article, the aim is to investigate the comfort of passengers in formation flight and uncertainty conditions.*

Keywords: Formation Flight, Passenger Comfort, Leader Aircraft, Follower Aircraft, Atmospheric Turbulence

۱- مقدمه

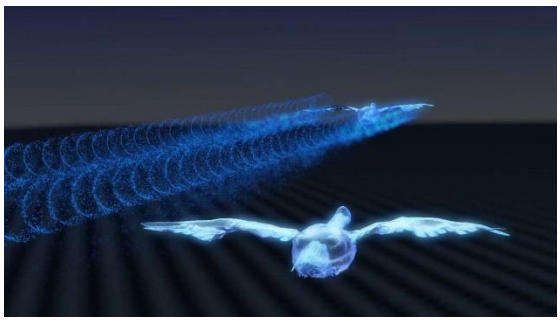
محرک اصلی استفاده از پرواز آرایشمند در هواپیماهای تجاری را می‌توان بهره‌مندی از مزایای آیرودینامیکی دانست. بر مبنای تئوری‌های آیرودینامیکی و نیز آزمایش‌های عملی انجام شده، هنگامی که یک هواپیما در جلوی دسته حرکت می‌کند، گردابه‌های خروجی از انتهای بال آن حاوی انرژی می‌باشد. ریزش گردابه‌های انتهایی هواپیمای پیشرو[1] روی بال‌های هواپیمای پیرو[2] باعث کاهش پسای القایی و افزایش نیروی برآ می‌شود. در صورتی که هواپیمای پیرو در نقطه‌ی مناسبی از این میدان جریان القایی قرار گیرد، مصرف سوخت آن نیز کاهش می‌یابد. از این رو، پرواز آرایشمند هواپیماهای تجاری می‌تواند با بهره‌گیری از این کاهش پسای القایی، کاهش محسوسی در میزان مصرف سوخت و متعاقب آن، افزایش چشمگیری در برد پرواز آرایشمند و نیز کاهش قابل توجهی در میزان آلاینده‌های طبیعی داشته باشد. البته لازم به ذکر است که استفاده از پرواز آرایشمند می‌تواند مزایای متعدد دیگری مانند بهبود مسائل مرتبط با حوزه‌ی ترافیک هوایی نیز داشته باشد [۱].

هدف از پرواز آرایشمند هواپیماهای مسافربری، کاهش مصرف سوخت است. اما، راحتی مسافران در هواپیماهای پیرو در یک پرواز آرایشمند کمی چالش برانگیز است. زیرا هواپیماهای پیرو ممکن است تحت تأثیر جریانات ناشی از هواپیماهای پیشرو، به دلیل ارتعاشات کیفیت کنترل مطلوب خود را از دست بدهند. از این رو، تغییر بالقوه سطح راحتی باید به عنوان یک امر مهم در تعیین مقبولیت پرواز آرایشمند در حمل و نقل هوایی ارزیابی شود. همچنین، بحث راحتی سرنشینان و خدمه پروازی هواپیماهای پیرو در روبرو شدن با اغتشاشات جوی بسیار حائز اهمیت بوده و ممکن است از کیفیت راحتی سرنشینان بکاهد.

۲- پرواز آرایشمند

پرواز دسته‌جمعی و آرایشمند که به معنای پرواز چند پرنده در مجاورت یکدیگر و با نظمی خاص می‌باشد، در پرندگان دلایل مختلفی دارد: ناوبری آسان و پیدا کردن راحت‌تر غذا، محافظت بهتر در برابر دشمن، ارتباط بصری مناسب‌تر برای جلوگیری از برخورد و بهره‌مندی از مزایای آیرودینامیکی (شکل **۱**). با اینکه دانشمندان زیادی از طریق محاسبات ابر کامپیوترها و آزمایشات تونل باد مشغول حل معادلات بسیار سخت و پیچیده پرواز پرندگان می‌باشند، تاکنون هیچ کدام نتوانسته‌اند معادلات را با واقعیت تطبیق دهند [۱]. از آنجا که پرندگان استادان بلامنازع آیرودینامیک هستند، از حدود یک قرن پیش دانشمندانی که بر روی رفتار پرندگان مطالعه می‌کردند و دریافتند که آنها با استفاده از جریان هوایی که در پی هر پرنده ایجاد شده و با پرواز در حالت نزدیک به هم، راندمان آیرودینامیکی را افزایش می‌دهند. این پروازهای آرایشمند، الهام بخش محققان شرکت ایرباس شده تا در آیندهای نزدیک آنها را در جت‌های تجاری به نمایش بگذارند (شکل **۲**) [۲].

شکل (۱): پرواز "V" شکل پرندگان جهت افزایش راندمان آیرودینامیکی [۲].

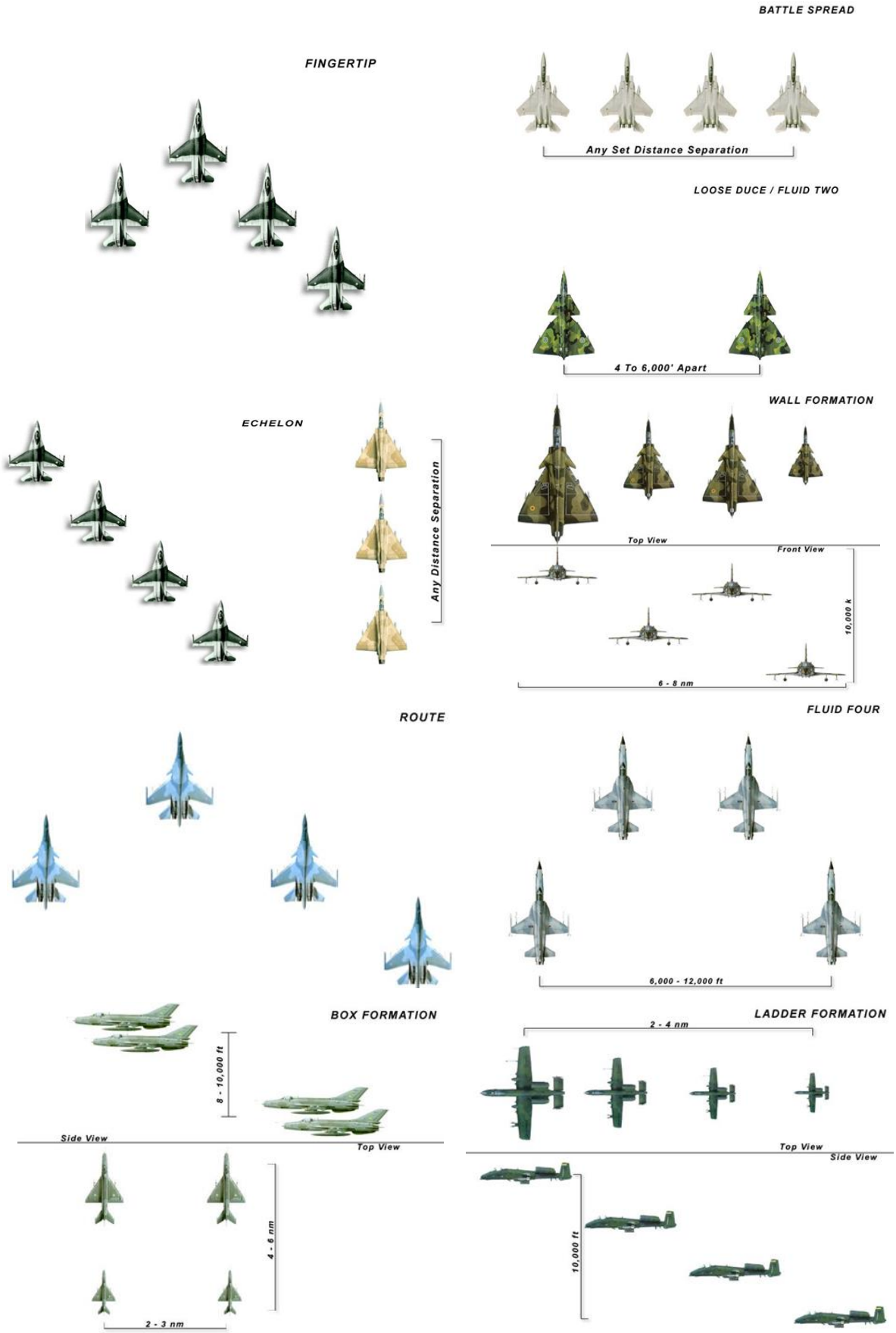


شکل (۲): پروژه هواپیمای ایرباس درصدد صرفه جویی در انرژی با تقلید پرواز آرایشمند "V" پرندگان [۲].

۲-۱- انواع پرواز آرایشمند

پرواز دسته‌جمعی هواپیماها، از اواسط دهه‌ی ۱۹۲۰ میلادی مورد توجه قرار گرفته است. اما تا پایان قرن بیستم، استفاده از پرواز آرایشمند هواپیماها تنها منحصر به هواپیماهای جنگنده بود تا این هواپیماها بتوانند از مزایای ناشی از حرکت در یک دسته مانند کاهش دید راداری و افزایش توان دفاعی در مقابل دشمن استفاده کنند. در ابتدای هزارهٔ سوم و با آشکار شدن ابعاد بیشتری از موضوع پرواز دسته‌جمعی مشخص شد که این روش می‌تواند دارای کاربردهای بسیار گسترده‌تری باشد [۳]. در شکل **۳** انواع آرایش و طرز قرارگیری هواپیماهای نظامی نسبت به هم مشاهده می‌شود [۴]. چندین حالت مختلف پرواز آرایشمند وجود دارند که به طور عمده برای اهداف نظامی توسعه یافته‌اند. برخی از آنها فقط در گذشته مورد استفاده قرار می‌گرفتند. برخی امروزه و برخی دیگر نیز فقط برای اهداف نمایشی استفاده می‌شوند. استفاده از آرایش‌های پروازی نظامی برای هواپیماهای مسافربری نیازمند بررسی بیشتر می‌باشد. در حال حاضر تعداد محدودی از این آرایش‌ها برای جت‌های تجاری مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته‌اند [۵].

1. Follower Aircrafts
2. Leader Aircrafts



شکل (۳): پرواز آرایشمند هواپیماهای نظامی [۴].

۲-۲- رشد تقاضای پروازهای مسافربری، خطرات زیست محیطی و روش‌های مقابله

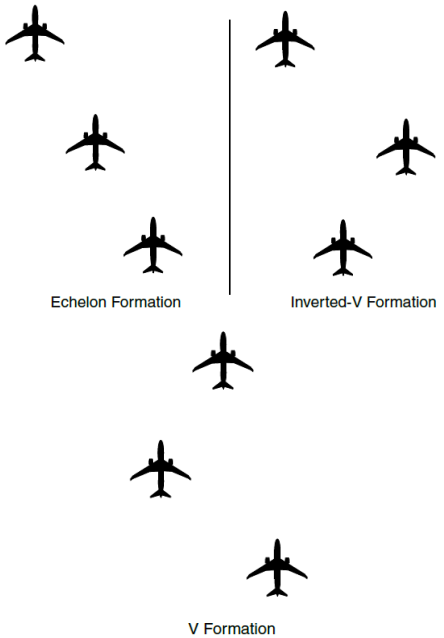
پیش‌بینی شرکت‌های بزرگ هوایی روندی سریع در افزایش تقاضای حمل و نقل هوایی نشان می‌دهد. این افزایش حجم در ترافیک هوایی از سویی موجب نگرانی سازمان‌های حفظ محیط زیست و از سوی دیگر، مراکز کنترل ترافیک هوایی از جهت کمبود فضا و محدودیت‌های کنترلی شده‌است [۶]. یاتا[1] پیش‌بینی کرده است که سفرهای هوایی تا سال ۲۰۳۹ بین ۳/۲ تا ۵/۳ درصد رشد خواهند داشت. به این ترتیب و با کمترین میزان رشد، تعداد مسافران هوایی در سال ۲۰۳۹ به بیش از ۲ میلیارد نفر خواهند رسید. صنعت هوانوردی که بدلیل کرونا وارد رکود شده است تا سال ۲۰۲۲ احیا خواهد شد. این بازیابی با سرعت کمی تا سال ۲۰۲۲ ادامه داشته و سپس شدت گرفته و در خاورمیانه، آسیا و آفریقا با سرعت بیشتری محقق خواهد شد [۷].

افزایش پروازها، افزایش گازهای گلخانه‌ای را در پی دارد و منجر به تغییرات اقلیم کره زمین می‌شود. در سال ۲۰۲۰ میزان انتشار سالانه حمل و نقل هوایی بین‌المللی در سطح جهان در حدود ۷۰ درصد بیشتر از سال ۲۰۰۵ بوده و سازمان جهانی هوانوردی ایکائو نیز پیش‌بینی می‌کند در صورت فقدان نظارت، این میزان در سال ۲۰۵۰ تا بیش از ۳۰۰ درصد رشد خواهد یافت. چنانچه اقدامی برای کاهش میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای تولید شده از هواپیماها صورت نگیرد، سهم این صنعت تا سال ۲۰۵۰ در ایجاد آلاینده کربن به بیش از ۳ گیگا تن می‌رسد که معادل ۵ درصد سهم صنایع آلاینده می‌باشد [۲]. برای رفع این مشکل در طول سال‌های اخیر، ایده‌های نوآورانه‌ای نظیر استفاده از سوخت قابل بازیافت جت و افزایش مالیات بر سفر به منظور انتخاب سفرهای هوایی کمتر برای کاهش اثر کربن صنعت هوانوردی مطرح شده است [۳]. راه حل‌های ارائه شده همانند طراحی هواپیماهای جدید و یا سوخت‌های جدید، اغلب نیازمند زیرساخت-های اساسی بوده و زمان‌بر می‌باشند. در این میان پرواز آرایشمند از جهت اجرایی بودن با زیرساخت‌های موجود، می‌تواند گزینه مناسبی برای کاهش نگرانی‌های مطرح شده باشد [۱].

روش‌های برنامه‌ریزی پروازها برای هواپیماها باید مطابق با مسیر، موقعیت و ارتفاع مختلف برای شروع پرواز آرایشمند تدوین شوند. همچنین، اولویت شرکت‌های هواپیمایی صرفه‌جویی در هزینه‌های سوخت است [۵]. با بهینه‌سازی مسیرها و با استفاده از پروازهای آرایشمند می‌توان در مقیاس جهانی، از نظر زیست محیطی و اقتصادی امیدوار بود [۸]. از جمله این تلاش‌ها می‌توان به پروژه شرکت ایرباس اشاره کرد. هدف این پروژه کمک به خطوط هوایی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است (شکل **۴**). در طرح پیشنهادی، هواپیمای پیرو از جریانات رو به بالا که توسط هواپیمای پیشرو ایجاد می‌شود استفاده می‌کند. مشابه همان کاری که غازها هنگام پرواز آرایشمند مثلث شکل انجام می‌دهند. طبق آزمایشات انجام شده، ایرباس به این نتیجه رسیده که هواپیماهای پیرو با پرواز در پی هواپیمای پیشرو می‌توانند به میزان ۵ تا ۱۰ درصد گازهای گلخانه‌ای کمتری ایجاد کنند که مقدار قابل توجهی است. کاهش ده درصدی مطابق بررسی مجله گاردین، در یک پرواز از فرودگاه کندی نیویورک به هیترو لندن معادل ۹۸۶ کیلوگرم CO_2 است. این مقدار بیشتر از تولید سالانه مردم در ۵۶ کشور جهان است [۷].

بیشتر آرایش‌ها با دو هواپیما انجام می‌شوند. وقتی تعداد هواپیماها بیش از دو فروند باشد، شکل آرایش تغییر می‌کند (شکل **۵**). سه گزینه اصلی آرایش برای هواپیماهای مسافربری عبارتند از: آرایش پل‌های یا خطی، آرایش V و V واژگون [۶].

شکل (۴): پروژه ایرباس با پرواز آرایشمند دو هواپیمای بزرگ تجاری با تقلید از رفتار پرندگان جهت ذخیره انرژی [۶].



شکل (۵): سه پیکره‌بندی اصلی پرواز آرایشمند [۸].

1. International Air Transport Association (IATA)

۳- تقسیم‌بندی، مزایا و چالش‌های پرواز آرایشمند

محققان در پرواز آرایشمند به دنبال مکان بهینه‌ای هستند که به آن نقطه مطلوب[1] گفته می‌شود. این مکان به یکی از چالش‌های تیم تحقیقاتی شرکت ایرباس تبدیل شده است. نقطه مطلوب، موقعیتی خاص و مناسب است که جهت استفاده از مزایای پرواز آرایشمند برای پرنده پیرو می‌باشد و در انتهای هواپیمای پیشرو قرار دارد [۵].

۳-۱- تقسیم‌بندی پرواز آرایشمند از منظر فاصله

فواصل بین وسایل پرنده معمولاً با اندازهٔ دهانهٔ بال[2] مشخص می‌شوند. این فواصل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و پروازهای آرایشمند بر اساس آن‌ها طبقه‌بندی می‌شوند.

- **پرواز آرایشمند نزدیک:**[3] پروازی با فاصله کمتر از ده برابر دهانه بال.

ابتدا مطالعات بر روی این نوع پرواز متمرکز بود، زیرا بیشترین مزایای استفاده از کاهش درگ را فراهم می‌کند. فواصل بسیار کوچک (حدود یک برابر دهانه بال) باعث کاهش قدرت مورد نیاز برای پرواز هواپیمای پیرو خواهد بود.

- **پرواز آرایشمند دور:**[4] پروازی با فاصله‌ی تقریبا ۱۰ تا ۴۰ برابر طول دهانه بال.

در این نوع آرایش، جریانات دنباله‌ای هواپیمای پیشرو تنزل کرده و انتشار پیدا می‌کنند. بهره بردن از کاهش نیروی درگ در فواصل بیشتر از ۲۰ برابر دهانه بال بسیار کمتر خواهد بود. با این حال، پرواز آرایشمند دور ذاتاً ایمن‌تر از آرایش نزدیک است. از آنجا که ایمنی یک عامل کلیدی برای پروازهای غیرنظامی می‌باشد، تقریباً تمرکز همه تحقیقات مرتبط با پروازهای آرایشمند اخیر روی این نوع آرایش قرار دارد [۶].

۳-۲- مزایای پرواز آرایشمند

پرواز آرایشمند در هواپیماها علاوه بر استفاده از مزایای آیرودینامیکی از نظر استراتژیک، مدیریت عملیات و قدرت مانور نیز اهمیت زیادی دارد. به طور کلی، مزایای پرواز آرایشمند را می‌توان بدین صورت برشمرد: کاهش نیروی پسا و در نتیجه کاهش میزان مصرف سوخت و افزایش برد، کاهش آلودگی ناشی از مصرف سوخت هواپیما و همچنین افزایش ظرفیت فضای پروازی و غیره [۱]. در سال‌های اخیر، ابعاد مختلف پروازهای آرایشمند هواپیماهای مسافربری مورد بررسی قرار گرفته‌اند. از جمله این تحقیقات می‌توان به بررسی مصرف سوخت [۱, ۸-۱۰]، بررسی نیروی پسا [۱۱, ۱۲]، مسیر پرواز [۳, ۱۳, ۱۴]، کنترل پرواز [۱۵-۱۷]، شکل‌گیری پرواز و مزایا [۵, ۱۸-۲۵]، مدل‌سازی و شبیه‌سازی [۲۳-۲۸] اشاره کرد.

۳-۳- بیان چالش‌ها

در کنار مزایای بیان شده، پروازهای آرایشمند با مخاطرات و چالش‌هایی مواجه هستند که نیازمند بررسی‌های بیشتر می‌باشند. خطرات اصلی مشخص شده برای مفهوم پرواز آرایشمند در حمل و نقل هوایی غیرنظامی به شرح زیر می‌باشند:

۱- تلاطم[5] راحتی مسافر را کاهش می دهد. پروازهای آرایشمند باید راحتی مسافر را تضمین نمایند،

۲- هنگام شروع و خاتمه آرایش هواپیماها، پرواز ایمن باشد و

۳-قوانین باید تسهیل و در بعضی موارد تصحیح شوند تا هواپیماهای غیرنظامی بتوانند به صورت آرایشمند پرواز کنند [۲۹].

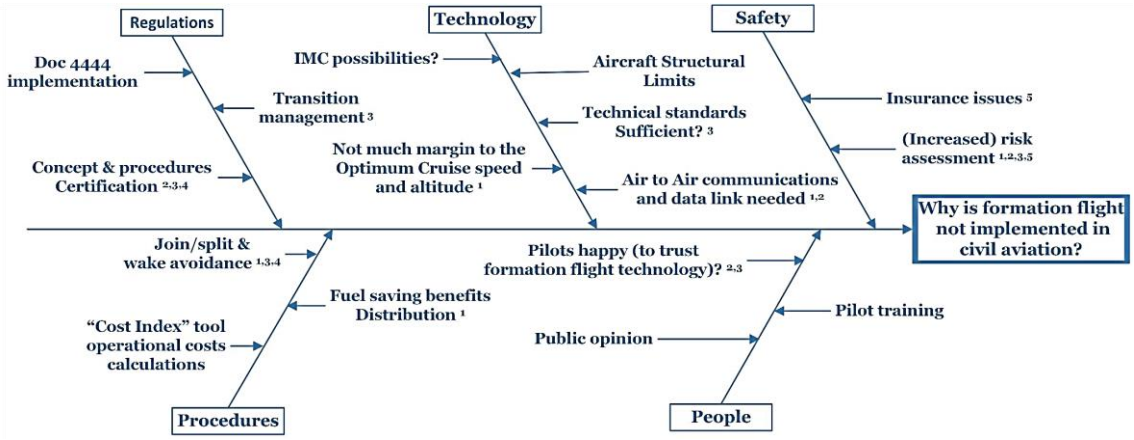
سایر چالش‌های مرتبط با پروازهای آرایشمند در شکل **۶** نشان داده شده‌اند.

۴- پایداری، راحتی و استاندارد

هنگام پرواز آرایشمند در پیکره‌بندی مورد نظر، کاهش درگ نامتقارن منجر به ایجاد گشتاور یاو[6] می‌شود که هواپیما را به سمت راست منحرف می‌کند. لیفت نامتقارن منجر به یک گشتاور رول[7] شده که باعث می‌شود هواپیما به سمت راست بنک[8] بزند. همچنین، هواپیما به دلیل فشار گرداب بر روی بدنه که تمایل دارد هواپیما را به سمت راست منتقل کند، تحت تاثیر یک نیروی جانبی قرار می‌گیرد. سرانجام، دماغه هواپیما به دلیل گشتاور پیچ[9] ناشی از جریانات رو به بالای گرداب به سمت بالا حرکت می‌کند. تمام این تأثیرات باعث می‌شوند تا آرایش شکسته شده و هواپیمای پیرو از پیشرو دورتر شود. به همین سبب لازم است پایداری هواپیما، از نظر طولی و عرضی، در محیط این نیروهای نامتقارن بررسی شود [۳۰].

1. Sweet Spot
2. Wing Span
3. Close Formation Flight
4. Extended Formation Flight

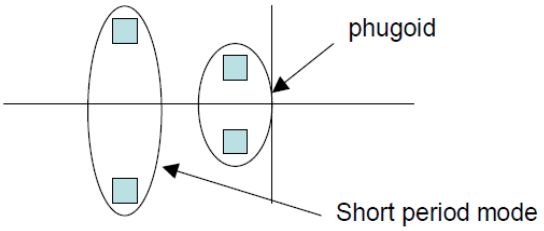
5. Turbulance
6. Yaw Moment
7. Roll Moment
8. Bank
9. Pitch Moment



شکل (۶): موانع موجود در اجرای پرواز آرایشمند مسافربری [۲۹].

۴-۱- پایداری طولی

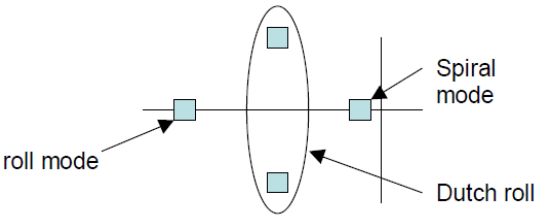
در حالت طولی دو مود پروازی وجود دارند: پریود بلند (فوگوید) و پریود کوتاه (شکل **۷**). با توجه به شکل، تنها فوگوئید خطر ناپایدار شدن را دارد. با این حال، فوگوئید یک حرکت آهسته بوده که به راحتی توسط خلبان قابل کنترل است. در نتیجه خطر ناپایداری پرواز آرایشمند در حالت طولی کم است [۳۰].



شکل (۷): قطب‌های مودهای طولی [۳۰].

۴-۲- پایداری عرضی-سمتی

در حالت عرضی-سمتی سه مود رول، داچ‌رول و اسپیرال وجود دارند. همانطور که در شکل **۸** نشان داده شده است، نزدیک‌ترین حالت به ناپایداری، مود اسپیرال می‌باشد. در نتیجه در پرواز آرایشمند، این مود باید با دقت مورد مطالعه قرار گیرد [۳۰].



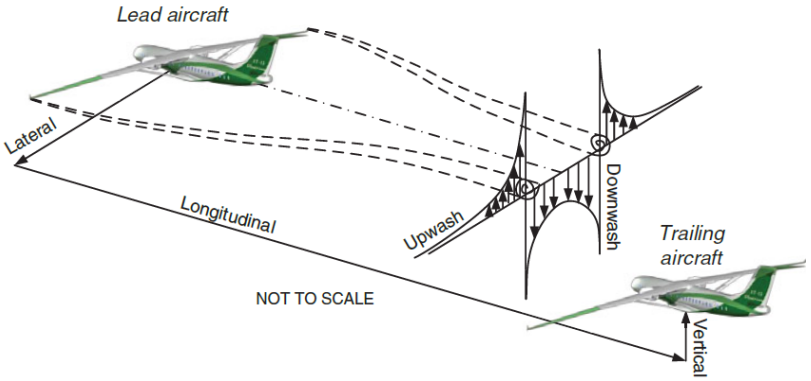
شکل (۸): قطب‌های مودهای عرضی-سمتی [۳۰].

۴-۳- کیفیت سواری و راحتی سرنشین

بحث کیفیت پرواز و راحتی سرنشینان و خدمه پروازی هواپیماهای پیرو در مواجهه با اغتشاشات جوی بسیار حائز اهمیت بوده و ممکن است ایمنی پرواز را به مخاطره انداخته و از کیفیت راحتی سرنشینان بکاهد. برای تعیین حرکت نامنظم هواپیمایی که از طریق جو آشفته در حال پرواز است، باید دو عامل اصلی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند: ۱- بارهای آشفته ناشی از تلاطم جوی و ۲- ورودی‌های کنترل جبرانی توسط خلبان یا خلبان خودکار. علاوه بر این در پروازهای آرایشمند ممکن است هواپیماهای پیرو تحت تأثیر جریانات و اغتشاشات ناشی از هواپیماهای پیشرو کیفیت کنترل مطلوب خود را از دست بدهند. از این رو، تغییر بالقوه سطح راحتی باید به عنوان یک امر مهم در تعیین پذیرش پرواز آرایشمند در حمل و نقل هوایی ارزیابی شود (شکل **۹**) [۱۶].

هدف پروژه شرکت ایرباس بهره‌مندی از انرژی موجود در گرداب‌های انتهایی است، بدون آنکه ایمنی به خطر بیفتد. در حالی که تلاطمات القایی معمولاً به عنوان تهدیدی برای هواپیماهای تجاری در نظر گرفته می‌شوند و خلبانان کار در این منطقه را غیرقابل پیش‌بینی می‌دانند. زیرا نمی‌توانند جریانات انتهایی را ببینند، بنابراین نمی‌توانند پیش‌بینی کنند که در مکان صحیح هستند. به همین دلیل این شرکت، برنامه‌های درسی و آموزشی برای خلبانانی که قرار است این پروازها را انجام دهند در پروژه خود گنجانده است.

طبق بررسی شرکت ایرباس و با تصور پرواز آرایشمند هواپیمای مسافربری که ساعت‌ها به دنبال هم پرواز می‌کنند، زنگ خطر به صدا در می‌آید. زیرا کمبود اطلاعات در مورد خطاهای احتمالی و غیر قابل پیش‌بینی وجود دارد. درنتیجه حاشیه خطا در این نوع پروازها به شدت کاهش یافته و واکنش زنجیرهای بیشتری ممکن است رخ دهد [۲]. به طور کلی، می‌توان فاصله و ویژگی جریانات انتهایی هواپیما را به ۴ ناحیه مطابق جدول **۱** تقسیم کرد.



شکل (۹): نمایش شماتیک جریانات هواپیمای پیشرو و تاثیر آن بر هواپیمای پیرو [۱۶].

جدول (۱): فاصله و ویژگی جریانات انتهایی در پرواز آرایشمند [۳۰].

Location	Zone	Characteristics
Up to 1 span	Near-Field	Formation of the vortices and roll-up into a multiple pair system
1 to 20 spans	Extended Near-Field	Multiple vortices continue to roll-up and merge
20 to 50 spans	Far Field	Linear instabilities begin to appear
50 to 200 spans	Dispersion Field	Destruction of the vortices (due to turbulence and instabilities)

۴-۳- استاندارد بین‌المللی ISO2631-1

اولویت این استاندارد، برای تعیین کمیت ارتعاشات کل بدن در رابطه با سلامت انسان، راحتی و بیماری‌های ناشی از حرکت است. همچنین، واکنش احتمالی انسان در مقادیر مختلف ارتعاش در وسائل حمل و نقل عمومی را ارائه می‌دهد. اگرچه ارتعاشات به عنوان عامل تأثیرگذار غالب شناخته می‌شوند، اما واکنش در مقدار ارتعاشات مختلف به عوامل دیگری نیز بستگی دارد. طبق این استاندارد، راحتی مسافر به فرکانس ارتعاشات وابسته است. جدول **۲** تأثیر شتاب کلی را بر راحتی انسان، طبق استاندارد فوق بیان می‌کند. طبق این استاندارد، مقدار موثر شتاب-های عمودی در یک بازه زمانی محاسبه می‌شود [۳۱]. ارزیابی راحتی مسافر کار آسانی نیست زیرا درک انسان از واژه راحتی، ذهنی و کیفی است و نمی‌توان تعریفی بر اساس کمی برای آن ارائه داد. این موضوع به شرایط محیطی (ارتعاشات، دما، رطوبت، سرعت صوت، فشار)، مانورهای اصلی و ترکیبی هواپیما (رول، افزایش سرعت، کاهش سرعت، صعود /نزول) و مکان قرارگیری مسافر (عرض صندلی، فضای خالی جلوی پا) و همچنین شرایط شخصی مانند سلامتی، فیزیولوژی و نگرش روانشناختی بستگی دارد [۳۲].

جدول (۲): تاثیر شتاب کلی بر سطح راحتی انسان طبق استاندارد ۱-۲۶۳۱ [۳۱].

Overall Acceleration	Consequence
$a_w < 0.315 m/s^2$	not uncomfortable
$0.315 < a_w < 0.63 m/s^2$	a little uncomfortable
$0.5 < a_w < 1 m/s^2$	fairly uncomfortable
$0.8 < a_w < 1.6 m/s^2$	uncomfortable
$1.25 < a_w < 2.5 m/s^2$	very uncomfortable
$a_w > 2.5 m/s^2$	extremely uncomfortable

اولین مطالعه در حوزه راحتی سرنشین در سال ۲۰۱۲ توسط آقای بیزینوس[1] انجام و توسط صنایع ایرباس و مرکز ملی هوافضای دانشگاه ویتواتسراند[2] ژوهانسبورگ پشتیبانی شد [۳۲]. در مطالعه وی دو بوئینگ ۱۰۰-۷۴۷ در فاز کروز و با سرعت و ارتفاع ثابت و آرایش پلکانی از سمت راست و با فاصله ۱۰ دهانه بال در نظر گرفته شدند. از جمله فرضیات تحقیق عبارتند از: قانون کنترل ایده‌آل، بدون هیچگونه ورودی کنترلی توسط خلبان یا اتوپایلوت، چشم‌پوشی از اثرات آیروالاستیک، در نظر گرفتن تلاطمات و گرداب‌های انتهایی بال، استفاده از مدل گرداب نعل اسبی برای نشان دادن گرداب بال، استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو برای سطوح مختلف تلاطمات و استفاده از استاندارد ۱-۲۶۳۱ برای بررسی سطح راحتی سرنشین. نتایج

1. Bizinos
2. Witwatersrand

این تحقیق نشان دادند که افزایش آشکار در اندازه شتاب‌های طولی، عمودی، رول و یاو باعث بیشترین میزان افزایش ناراحتی مسافران در قسمت جلویی هواپیمای پیرو می‌شود. میزان ناراحتی وابسته به فاصله جانبی، میزان شدت تلاطمات جوی و موقعیت صندلی‌های مسافران بود.

در سال ۲۰۱۵، اوکولا[1] کیفیت سواری افراد مستقر در هواپیماهای پیرو را با هدف صرفه‌جویی در مصرف سوخت مورد بررسی قرار داد [۳۳]. وی از دو هواپیمای پیرو مختلف استفاده کرد که عبارتند از:

۱-پیرو KC-135R و رهبر یک هواپیمای سنگینتر KC-135R

۲-پیرو هواپیمای بزرگ EQ-II و رهبر KC-135R

فاصله آرایش ۴ دهانه بال در نظر گرفته شد. اوکولا برای تجزیه و تحلیل سطح کیفیت/راحتی سواری افراد مستقر در نقاط مختلف هواپیمای پیرو، باد را غیریکنواخت فرض کرد. از کنترلر فیدبک برای نگه داشتن هواپیمای پیرو در نقطه مطلوب پرواز آرایشمند استفاده نمود. نتایج حاصل شده با در نظر گرفتن طبق استاندارد ۱-۲۶۳۱ عبارتند از: کابین خلبان بیشترین میزان لرزش را نسبت به سایر نقاط داشت. همچنین، افراد مستقر در جلوی مرکز جرم، بیشترین سطح ناراحتی را تجربه کردند.

در سال ۲۰۱۶، ترولیپ[2] شبیه‌سازی و ارزیابی راحتی سواری در هواپیماهای بزرگ مسافربری را به صورت آرایشمند با استفاده از سیستم‌های کنترل پرواز با سیم ارائه داد [۳۴]. وی دو بوئینگ ۷۴۷-۱۰۰ را به صورت پلکانی از سمت راست در فاز کروز و با در نظر گرفتن تلاطمات جوی و گرداب‌های انتهایی بال هواپیمای پیشرو در نظر گرفت و به نتایج زیر دست یافت:

برای فاصله‌های جانبی کمتر از ۱٫۱ طول دهانه بال و همچنین با افزایش تلاطم، آرایش شکسته شد. همچنین، افراد مستقر در جلوی مرکز جرم، نسبت به سرنشینان انتهای هواپیما بیشترین سطح ناراحتی را تجربه کردند. جدول **۳** ارزیابی راحتی مسافر را با شدت تلاطمات جوی مختلف و فواصل جانبی بین هواپیماها (η) نشان می‌دهد.

جدول (۳): ارزیابی راحتی مسافر برای سناریوهای مختلف (شدت تلاطمات و فواصل جانبی مختلف) [۳۴].

η	Turbulence Intensity		
	Light	*Moderate*	*Severe*
1.5	Acceptable	Acceptable	Unacceptable
1.4	Acceptable	Acceptable	Unacceptable
1.3	Acceptable	Acceptable	Unacceptable
1.2	Acceptable	Acceptable	Unacceptable
1.1	Acceptable	Unacceptable	Unacceptable
1	Unacceptable	Unacceptable	Unacceptable

1. Okolo
2. Trollip

اوکولا در سال ۲۰۱۸ در ادامه تحقیقات سال ۲۰۱۵ خود پژوهشی انجام داد. بودجه آن توسط آزمایشگاه تحقیقاتی نیروی هوایی ایالات متحده و از طریق بورس تحصیلی دانشگاه تگزاس در آرلینگتون تأمین شد [۳۱]. در این مقاله، کیفیت سواری برای افراد مستقر در هواپیمای پیرو که به صورت آرایشمند در پشت هواپیمای پیشرو پرواز می‌کنند بررسی شد تا صرفه‌جویی در مصرف سوخت حاصل شود. فرضیات در نظر گرفته شده مشابه کار قبلی وی بودند که عبارتند از: اوکولا دو هواپیمای پیرو مختلف (یک تانکر KC-135R و یک هواپیمای معادل مدل IEQ-II، که یک هواپیمای غیر متعارف و شبیه بمب افکن است) و یک هواپیمای رهبر یک تانکر KC-135R در نظر گرفت. باد غیریکنواخت و اثرات تلاطمات جوی بررسی شد و هدف سوخت‌گیری هوایی بود. تخمین ضرایب آیرودینامیکی با استفاده از روش شبکه ورتکس[3] انجام پذیرفت. طراحی کنترلر برای دو هواپیمای IEQ-II و KC-135R، مشابه بود. اما این دو هواپیما در تعداد سطوح کنترل متفاوت بودند. KC-135R دارای سه سطح کنترلی (الرون، الویتور و رادر) و IEQ-II شش سطح کنترلی را دارا بود. این سطوح کنترلی شامل الرون‌های چپ و راست، الویتورهای خارجی چپ و راست و الویتورهای داخلی و چپ و راست بودند. نتایج بدست آمده عبارتند از: مکان‌های جلوی مرکز ثقل اما پشت کابین خلبان بهترین بیشترین سطح راحتی را دارا هستند. همچنین، از منظر کیفیت سواری در امتداد بدنه، مطلوب‌ترین مکان، چند متر از مرکز ثقل جلوتر است.

آخرین کار بررسی شده در راستای راحتی سرنشین در سال ۲۰۲۰ توسط لیو[4] انجام شده است [۳۵]. در این مقاله، هدف، بررسی تغییرات راحتی مسافران به‌دلیل تأثیر تلاطم ناشی از هواپیمای پیشرو در پرواز آرایشمند بوده است. با بهره‌گیری از چهارچوب کلی طراحی و بهینه‌سازی هواپیما و همچنین ماژول ارزیابی پرواز آرایشمند، سطح راحتی هواپیما در پرواز انفرادی و آرایشمند مطابق با استاندارد ۱-۲۶۳۱ در مورد مقدار کل ارتعاشات کمی‌سازی شده است. فرضیات در نظر گرفته شده لیو عبارتند از: دو هواپیمای CSR-01 دقیقا مشابه ایرباس ۳۲۰ و با آرایش پلکانی از راست، در فاز کروز، ارتفا۳۵۰۰۰ پا (۱۱۰۰۰متر)، سه شدت تلاطم ۰٫۲، ۱ و ۳ متربرثانیه و شدت تلاطم سبک، متوسط و شدید در نظر گرفته شده‌اند. بررسی مکان‌های مختلف شامل صندلی کاکپیت خلبان، صندلی‌های جلویی و عقب در هر دو جهت چپ و راست در هواپیماهای پیرو انجام شد. نتایج حاصل از مطالعه وی عبارتند از: پرواز آرایشمند امکان‌پذیر است. توربولانس‌ها دلیل اصلی ناراحتی در نتایج آزمایشات پروازی می‌باشند و مسافرانی که دورتر از مرکز جرم هواپیما بودند بیشتر دچار ناراحتی شدند.

3. Vortex Lattice Method (VLM)
4. Liu

(علمی-ترویجی)
مروری بر رویکردهای نو در پروازهای آرایشمند جت‌های تجاری

بطور خلاصه، پرواز آرایشمند هواپیماهای مسافربری به منظور کاهش مصرف سوخت در نظر گرفته می‌شود. با این حال، چالش راحتی مسافران در هواپیماهای پیرو در یک پرواز آرایشمند کمی نگران کننده است. زیرا هواپیماهای پیرو ممکن است تحت تأثیر جریانات ناشی از هواپیماهای پیشرو به دلیل ارتعاشات، کیفیت کنترل مطلوب خود را از دست دهند. از این رو، تغییر بالقوه سطح راحتی باید به عنوان یک امر مهم در تعیین پذیرش پرواز آرایشمند در حمل و نقل هوایی مورد ارزیابی قرار گیرد. همچنین، بحث راحتی سرنشینان و خدمه پروازی هواپیماهای پیرو در مواجهه با اغتشاشات جوی بسیار حائز اهمیت بوده و ممکن است از کیفیت راحتی سرنشینان بکاهد.

جدول (۳): بررسی راحتی پرواز آرایشمند توسط پژوهشگران در سال‌های اخیر.

سال	نام پژوهشگر	فرضیات	نتایج بدست آمده
۲۰۱۲	بیزینوس	۱- تعداد: دو بوئینگ ۱۰۰-۷۴۷ ۲- نوع آرایش: پلکانی از سمت راست ۳- فاز پروازی: کروز ۴- سرعت : ثابت ۲۳۶ متر بر ثانیه ۵- ارتفاع: ۴۰ هزارپا و مسیر مستقیم الخط ۶- فاصله آرایش: فاصله طولی ۱۰دهانه بال، فاصله عمودی صفر ۷- قانون کنترل ایده‌آل ۸- چشمپوشی از اثرات آیروالاستیک ۹- در نظر گرفتن تلاطمات و گرداب‌های انتهایی بال هواپیما ۱۰- استفاده از مدل گرداب نعل اسبی برای نشان دادن گردابه‌های بال ۱۱- استفاده از شبیه‌سازی مونتکارلو برای سطوح مختلف تلاطمات	۱- افزایش آشکار در اندازه شتاب‌های طولی، عمودی، رول و یاو باعث بیشترین میزان افزایش ناراحتی مسافران در قسمت جلویی هواپیمای پیرو می‌شود. ۲- میزان ناراحتی وابسته به فاصله جانبی، میزان شدت تلاطمات جوی و موقعیت صندلی‌های مسافران بود.
۲۰۱۵	اوکولا	۱- استفاده از هواپیماهای پیرو مختلف: الف) پیرو KC-135R و رهبر یک هواپیمای سنگین‌تر KC-135R ب)پیرو هواپیمای بزرگ EQ-II و رهبر KC-135R ۲- فاصله آرایش: ۴ دهانه بال ۳- تجزیه و تحلیل سطح کیفیت/راحتی سواری با استفاده از استانداردهای ISO 2631-1 برای افراد مستقر در نقاط مختلف هواپیمای پیرو صورت گرفت. ۴- از کنترلر فیدبک برای نگه داشتن هواپیمای پیرو در نقطه مطلوب استفاده گردید. ۵- باد غیریکنواخت	۱- کابین خلبان لرزش بیشتری نسبت به سایر نقاط دارا بود. ۲- نقاط جلوی مرکز جرم، بیشترین سطح ناراحتی را تجربه کردند.
۲۰۱۶	ترولیپ	۱-تعداد: دو بوئینگ ۱۰۰-۷۴۷ ۲-نوع آرایش:صورت پلکانی از سمت راست ۳-فاز: کروز ۴-در نظر گرفتن تلاطمات جوی و گرداب های انتهایی بال هواپیمای پیشرو ۵-استفاده از مدل VONKARMAN	۱- برای فاصله های جانبی کمتر از ۱/۱ طول دهانه بال و افزایش تلاطماتُ آرایش شکسته شد. ۲- افراد مستقر در قسمت جلویی هواپیما، ناراحتی بیشتری نسبت به انتهای هواپیما تجربه کردند.
۲۰۱۸	اوکولا	۱- استفاده از دو پیرو مختلف الف) تانکر KC-135R دارای سه سطح کنترلی (الرون، الویتور و رادر) ب) هواپیمای معادل مدل IEQ-II (یک هواپیمای غیرمتعارف خیالی و شبیه بمب افکن و دارای شش سطح کنترلی الرون‌های چپ و راست، الویتورهای خارجی چپ و راست و الویتورهای داخلی و چپ و راست) ۲- هواپیمای پیشرو یک تانکر KC-135R ۳- باد غیریکنواخت و تلاطمات جوی ۴- استفاده از کنترلر فیدبک چند ورودی چند خروجی (MIMO) ۵- هدف سوخت گیری هوایی ۶- تخمین ضرایب آیرودینامیکی با استفاده از روش VLM	۱- مکان های جلو مرکز ثقل اما پشت کابین خلبان بهترین سطح راحتی را دارا بودند. ۲- از منظر کیفیت سواری در امتداد بدنه، مطلوب ترین مکان چند متر جلوتر از مرکز ثقل است.
۲۰۲۰	لیو	۱- تعداد: دو هواپیما CSR-01 و کاملا مشابه ایرباس ۳۲۰ ۲- آرایش: پلکانی از راست ۳- فاز: کروز ۴- ارتفاع: ۳۵۰۰۰ پا (۱۱۰۰۰متر) ۵- بررسی در سه شدت تلاطم ۰،۲ ۱ و ۳ متربرثانیه (تلاطم سبک ، متوسط و شدید) ۶- بررسی مکان‌های مختلف شامل صندلی کاکپیت خلبان ، صندلی‌های جلویی و عقب در هر دو جهت چپ و راست در هواپیماهای پیرو	۱- پرواز آرایشمند هواپیماهای تجاری از لحاظ عملی امکانپذیر است. ۲- توربولانس‌ها دلیل اصلی ناراحتی مسافران در نتایج آزمایشات پروازی می‌باشند. ۳- مسافران دورتر از مرکز جرم هواپیما، ناراحتی بیشتری را احساس کردند.

۵- نتیجه‌گیری

طبق مطالعات محققان که از سال ۲۰۱۲ تا سال ۲۰۲۰ راجع به راحتی سرنشین انجام شده و آزمایشات و بررسی‌های شرکت ایرباس، این پروازها در صورتی امکانپذیر هستند که علاوه بر کاهش نیروی پسا و مصرف سوخت، راحتی و کیفیت سواری نیز در نظر گرفته شوند. زیرا هواپیمای پیرو ممکن است علاوه بر جریانات انتهایی هواپیمای پیشرو، همزمان در معرض اغتشاشات جوی قرار گیرد که ترکیب همزمان این جریانات بر سطح راحتی سرنشینان قطعا تأثیرگذار خواهد بود. به همین دلیل، طراحی سیستم‌های کنترل مناسب برای افزایش راحتی سرنشین در مواجهه با اغتشاشات امری بسیار مهم است. این سیستم‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که علاوه بر بهره‌وری بهینه سوخت، پایداری، کنترل‌پذیری و راحتی مسافر در همه زمان‌ها در سطح قابل قبولی حفظ شوند. زیرا در پروازهای آرایشمند، احتمال افزایش اندازه شتاب‌های طولی، عرضی، رول و یاو در هواپیمای پیرو به دلیل اثرات متقابل آیرودینامیکی با گرداب‌های انتهایی از هواپیمای پیشرو وجود دارد. انتخاب اصولی عوامل تأثیرگذار و شرایط در انجام موفق این پروازها نقش به سزایی دارند: به عنوان مثال، تعداد هواپیماها، پیکره-بندی، نوع آرایش، نوع هواپیماها، فاز پروازی تشکیل آرایش، تاثیر وزن و تعادل بر آرایش، ارتفاع و عدد ماخ و شرایط اضطراری که منجر به شکست آرایش می‌شوند. موقعیت قرارگیری صندلی سرنشین، شدت تلاطمات جوی و فاصله هواپیماها در آرایش نیز از مواردی بودند که مطالعات ذکر شده به بررسی آنها پرداخته و به نتایج مشترکی دست یافتند. شدت تلاطم جوی در مقایسه با جریانات ناشی از پرواز آرایشمند تأثیر بیشتری در تعیین کیفیت سواری مسافر دارند.

۶- مراجع

[1] F. A. S. M. B. Malaik, "Optimizing Fuel Consumption Using PSO Algorithm in Group Flight," presented at the 7th Iranian Aerospace Association Conference, Tehran, 2007.

[2] H. Slutsken, "Why passenger jets could soon be flying in formation," *Winston- salem journal*, 2020.

[3] A. B. S. S. M. B. Malaik, "Study of effective parameters in optimizing the mass flight paths of commercial aircraft," presented at the 10th Conference of the Iranian Aerospace Association, Tehran, 2010.

[4] Available: http://www.combataircraft.com/en/Formations/

[5] S. Ehtesham, "Development of sustainable models for discovery and presence in a flight arrangement," Master Thesis, Sharif University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, 2017.

[6] G. Durango, C. Lawson, and A. Z. Shahneh, "Formation flight investigation for highly efficient future civil transport aircraft," *The Aeronautical Journal*, vol. 120, pp. 1081-1100, 2016.

[7] *Civil Aviation Network News*. Available: https://www.cannews.aero

[8] I. Kroo, J. Xu, S. A. Ning, and G. Bower, "Aircraft Route Optimization for Formation Flight," 2014.

[9] A. Koloschin and N. Fezans, "Flight Physics of Fuel-Saving Formation Flight," in *AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020, p. 1002.

[10] Y. Liu and E. Stumpf, "Estimation of vehicle-level fuel burn benefits of aircraft formation flight," *Journal of Aircraft*, vol. 55, pp. 853-861, 2018.

[11] F. Behnamnia, "Study of the possibility of developing a general model for post-behavior (post-poles) in arranged flight," Sharif University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, 2015.

[12] O. Bidar, "Aerodynamics and Control Aspects of Formation Flight for Induced Drag Savings," 2019.

[13] S. Hartjes, M. E. van Hellenberg Hubar, and H. G. Visser, "Multiple-phase trajectory optimization for formation flight in civil aviation," *CEAS Aeronautical Journal*, vol. 10, pp. 453-462, 2019.

[14] C. M. Verhagen, H. G. Visser, and B. F. Santos, "A decentralized approach to formation flight routing of long-haul commercial flights," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, vol. 233, pp. 2992-3004, 2019.

[15] A. B. S. S. M. B. Malaik, "Fuzzy control of group flights near commercial aircraft," presented at the 10th Conference of the Iranian Aerospace Association, Tehran, 2010.

[16] L. DeVries and D. A. Paley, "Wake sensing and estimation for control of autonomous aircraft in formation flight," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 39, pp. 32-41, 2016.

[17] D. Buchner, "Automatic control of commercial airliners in formation flight," Stellenbosch: Stellenbosch University, 2015.

[18] B. Baleghi, "Study of how to form the flight arrangement of passenger aircraft using the logic of multi-operating systems," Master Thesis, Sharif University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering, 2015.

[19] T. E. Kent and A. G. Richards, "Potential of Formation Flight for Commercial Aviation: Three Case Studies," *Journal of Aircraft*, vol. 58, pp. 320-333, 2021.

[20] L. Kovačik, A. Novík, A. Kazda, and T .Lusiak, "Automatic commercial aircraft formation flight," in *2019 New Trends in Aviation Development (NTAD)*, 2019, pp. 106-109.

[21] Y. Liu and Y. Zhou, "Investigation on the benefit of formation flight with a focus on the leading and trailing aircraft rotation," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2018.

[22] J. Rife, "Collaborative positioning for formation flight of cargo aircraft," *Journal of guidance, control, and dynamics*, vol. 36, pp. 304-307, 2013.

[23] A. Gaifullin, O. Animitsa, I. Bosnyakov, P. Kuzmin, Y. N. Sviridenko, S. Suprunenko, *et al.*, "Modeling of aircraft flight through the wake vortex," *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, vol. 60, pp. 314-322, 2019.

[24] P. Humbert, "An Efficient Formation Flight Simulator with Extensions to Unsteady Maneuvers," 2018.

[25] D. Zhang, Y. Chen, X. Dong, Z. Liu, and Y. Zhou, "Numerical Aerodynamic Characteristics Analysis of the Close Formation Flight," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, 2018.

[26] D. Vechtel, D. Fischenberg, and J. Schwithal, "Flight dynamics simulation of formation flight for energy saving using LES-generated wake flow fields," *CEAS Aeronautical Journal*, vol. 9, pp. 735-746, 2018.

[27] Q. Zhang and H. H. Liu, "Aerodynamics modeling and analysis of close formation flight," *Journal of Aircraft*, vol. 54, pp. 2192-2204, 2017.

[28] A. Inasawa, F. Mori, and M. Asai, "Detailed observations of interactions of wingtip vortices in close-formation flight," *Journal of aircraft*, vol. 49, pp. 206-213, 2012.

[29] J. Hogervorst, "Formation Flight in Civil Air Transport," University of Westminster, 2015.

[30] J. Brachet, R. Cleaz, A. Denis, A. Diedrich, D. King, P. Mitchell, *et al.*, "Reference material for a proposed formation flight system," *Dept. of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Inst. of Technology, Cambridge, MA*, 2004.

[31] W. A. Okolo, A. Dogan, and W. Blake, "Ride quality within conventional and delta-wing trail aircraft in formation flight," *Journal of Aircraft*, vol. 55, pp. 1592-1604, 2018.

[32] C. Redelinghuys and N. Bizinos, "Tentative Study of Passenger Comfort During Formation Flight Within Atmospheric Turbulence," 2013.

[33] W. Okolo, A. Dogan, and W. Blake, "Ride quality within trail aircraft in formation flight," in *7th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference*, 2015, p. 3325.

[34] E. F. Trollip and J. Engelbrecht, "Ride comfort in commercial aircraft during formation flight using

conventional flight control," in *2016 IEEE Aerospace Conference*, 2016, pp. 1-20.

[35] Y. Liu, "Study on the vibrational comfort of aircraft in formation flight," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2020.