



E-ISSN: 2676-4253

Journal of Technology in Aerospace Engineering

Vol. 9, No. 3, pp. 85-96, 2025

<https://doi.org/10.22034/jtae.2025.9.3.6>

Journal Homepage: <https://jtae.ari.ac.ir>



Scientific Extension Paper

## A review of the Commercial Aircrafts Formation Flight Arrangements Via Aerodynamic Approach

Saeed Daryaei<sup>id</sup> and Saeed Karimian Aliabadi\*<sup>id</sup>

Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 11 November 2024

Revised 31 December 2024

Accepted 01 January 2025

Available Online 10 March 2025

#### Keywords:

Formation flight

Wing vortex

Lead aircraft

Follower aircraft

### ABSTRACT

Although formation flight offers improved aerodynamic efficiency, reduced fuel consumption, and diminished environmental impact, it introduces complexities beyond those of single-aircraft operations. These challenges primarily arise from increased lateral static instability and the generation of a downward pitching moment in the trailing aircraft. Aerodynamic interactions-particularly the wingtip vortices generated by the lead aircraft-affect the follower by reducing its effective angle of attack, lowering induced drag, and altering airflow distribution. The core objective in formation flight is to enhance aerodynamic performance, which has garnered interest in commercial aviation due to its potential for fuel savings. Performance optimization depends on spatial positioning adjustments of trailing aircraft along three rotational axes relative to the leader and one another, maintained at optimal cruising speeds. This review examines the aerodynamic advantages and limitations of formation flight in commercial aviation, with a focus on the trade-offs involved in its operational implementation.

\* Corresponding Author's E-mail: [Karimian@modares.ac.ir](mailto:Karimian@modares.ac.ir)

### How to Cite this Article:

S. Daryaei and S. Karimian Aliabadi, "A review of the commercial aircrafts formation flight arrangements via aerodynamic approach," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 85-96, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2025.9.3.6>.

### COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





# مروری بر آرایش‌های پرواز گروهی پرنده‌های تجاری با رویکرد آیرودینامیکی

سعید دریایی<sup>۱</sup> و سعید کریمیان علی‌آبادی<sup>۲\*</sup>

\*۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

## چکیده

پرواز گروهی علیرغم افزایش بهره‌وری، کاهش مصرف سوخت و اثرات زیست محیطی به دلیل تشدید در ناپایداری‌های استاتیکی جانبی و ایجاد گشتاور پیچ رو به پایین در پرنده‌های دنباله‌دار (پیرو)، از پیچیدگی بیشتری نسبت به پرنده تک فرونده برخوردار است. پرواز گروهی بهره‌وری بیشتری نسبت به هواپیمای تک فرونده به دلیل تداخلات آیرودینامیکی، گردابه‌های پیچشی نوک بال ناشی از جریان فرازشی هواپیمای رهبر (پیشرو) می‌شود، ایجاد می‌کند. حاصل این پدیده کاهش مقدار واقعی زاویه حمله، پسای القایی و تغییر توزیع برآ در هواپیمای پیرو خواهد بود. تابع هدف، افزایش و بهبود عملکرد آیرودینامیکی در پرواز گروهی است که باتوجه به کاهش مصرف سوخت مورد توجه صنعت هوانوردی می‌باشد. بهبود عملکرد با استفاده از تغییرات موقعیت فضایی پرنده حول سه محور نسبت به هواپیمای پیشرو و سپس با یکدیگر در سرعت بهینه خواهد بود. در این مقاله هدف بررسی مزایا و معایب پرواز گروهی در پرنده‌های تجاری با رویکرد آیرودینامیکی می‌باشد.

## اطلاعات مقاله

### تاریخچه مقاله:

دریافت ۲۱ آبان ۱۴۰۳  
بازنگری ۱۱ دی ۱۴۰۳  
پذیرش ۱۲ دی ۱۴۰۳  
اولین انتشار ۲۰ اسفند ۱۴۰۳

### واژه‌های کلیدی:

پرواز گروهی  
گردابه‌های دنباله‌دار  
هواپیمای پیشرو  
هواپیمای پیرو

\* نویسنده مخاطب: [Karimian@modares.ac.ir](mailto:Karimian@modares.ac.ir)

## How to Cite this Article:

S. Daryaei and S. Karimian Aliabadi, "A review of the commercial aircrafts formation flight arrangements via aerodynamic approach," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 85-96, 2025, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2025.9.3.6>.

## COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



فشار، پیش‌جریان در نزدیکی نوک بال‌هاست. این حرکت گردشی در پایین دست بال، دقیقاً گردابه دنباله‌دار نامیده می‌شود. گردابه‌های نوک بال باعث کاهش مولفه سرعت هوا در نزدیکی بال می‌شوند که به آن سرعت القایی می‌گویند. سرعت القایی باعث می‌شود هواپیماهایی که در پرواز گروهی شرکت دارند بتوانند از آن برای کاهش پسای القایی خود استفاده کنند. بنابراین، تجزیه و تحلیل آیرودینامیکی هواپیماهایی که در پرواز گروهی حضور دارند، در درجه اول به تعاملات گردابه‌های دنباله‌دار بال و پیامدهای آن‌ها بر سرعت‌های القایی مربوط می‌شود.

علت کاهش نیروی مورد نیاز در پرواز گروهی را می‌توان به کاهش پسای القایی و افزایش برآ در هنگام پرواز گروهی مرتبط دانست. پرواز یک هواپیما را که باعث تولید فراوزش می‌شود، در نظر بگیرید. در هر بال، جریان فراوزش بال منجر به کاهش نیاز به توان بیشتر در مجموعه هر دو بال می‌شود که به‌طور دقیق‌تر به عنوان حذف پسای القایی توصیف می‌شود. بنابراین مطالعه در مورد خصوصیات و ماهیت گردابه‌های تولید شده به‌وسیله بال، بدنه و سایر قسمت‌های هواپیمای پیشرو برای درک تاثیر آن در پرواز گروهی از اهمیت فراوانی برخوردار است [۴].

## ۲ مفهوم پرواز گروهی

در پرواز گروهی مکان بهینه شده‌ای وجود دارد که نقطه مطلوب<sup>۱</sup> است. نقطه مطلوب به جهت فواصل طولی، عرضی و ارتفاع موقعیت خاص و مناسبی است برای استفاده از مزایای پرواز گروهی پرنده‌های دنبال‌کننده (پیرو)<sup>۲</sup>، که در انتها و پشت هواپیمای رهبر (پیشرو)<sup>۳</sup> قرار دارد، مشخص است که هر نقطه‌ای به‌جز نقطه مطلوب در پشت هواپیمای پیشرو مطابق دارای اثرات مطلوب و یا نامطلوب دیگری است. فواصل بین وسایل پرنده معمولاً با اندازه و طول دهانه بال مشخص می‌شوند و تناسب دارند. این فواصل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و پروازهای گروهی بر اساس آن‌ها طبقه‌بندی می‌شوند [۵].

موضوع اصلی مورد بحث در پرواز گروهی، بررسی جنبه‌های آیرودینامیکی و کنترل هواپیما در حین پرواز است. هر دو علم ارتباط نزدیکی با هم دارند، زیرا مطالعات نشان داده‌است که میزان حفظ و صرفه جویی توان در پسای القایی می‌تواند به ویژگی‌های هر هواپیما و پیکربندی سازه‌ای آن وابسته باشد.

### ۱.۲ ساختار پرواز گروهی

به لحاظ ساختاری به دسته بیش از یک هواپیما، پرواز گروهی گفته می‌شود. کوچکترین واحد تشکیل دهنده، دسته است که شامل یک هواپیمای پیشرو و یک پیرو است. هواپیمای پیشرو، معمولاً در اختیار باتجربه‌ترین خلبان قرار

## ۱ مقدمه

با اینکه بیماری کووید-۱۹ بر روی تعداد پروازهای تجاری به شدت اختلال ایجاد کرد، اما شرکت ایرباس و بوئینگ افزایش ۷۰ درصدی را در ترافیک پروازهای مسافری و باری تا سال ۲۰۴۰ میلادی را در مقایسه با قبل از همه‌گیری پیش‌بینی کردند. این رشد سریع در ترافیک هوایی، منجر به آسمانی شلوغ‌تر و مواجهه با چالش‌های جدیدی در صنعت هوانوردی می‌شود، بنابراین نیاز به افزایش قابل توجهی در بهره‌وری با روش‌های نوین است. روش‌های فعال و غیرفعال زیادی برای هوانوردی پایدار پیش‌بینی شده است. یکی از روشها استفاده از ویژگی‌های آیرودینامیکی هواپیما برای بهبود کارایی در عملیات پرواز می‌باشد، که بدون ایجاد تغییرات قابل توجه در طرح‌های پروازی موجود انجام می‌شود [۱].

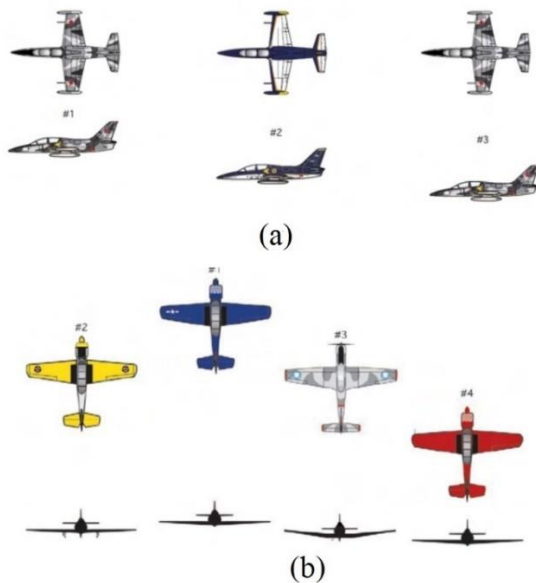
پدیده پرواز گروهی در طبیعت با پرواز پرندگان مهاجر نمود می‌یابد. علاوه بر این در ورزش‌های مختلف و همچنین در هوافضا نیز مورد مطالعه و کاربرد قرار گرفته‌است. اگرچه میزان بازدهی و تولید نیرو و یا ترکیبی از هر دو، دلیل انجام پرواز گروهی در پرندگان به وسعت دید خوب و نحوه ارتباطات آن‌ها بستگی دارد، اما فضای غالب بر پرواز گروهی برای انسان‌ها در درجه اول توجه به کاهش توان مورد نیاز است. این امر نه تنها از منظر صرفه جویی در هزینه بسیار مهم است، بلکه می‌تواند به کاهش سطوح انتشار گازهای گلخانه‌های برای حفاظت از محیط زیست نیز کمک کند [۲].

پرواز گروهی هواپیماها، از اواسط دهه‌ی ۱۹۲۰ میلادی مورد توجه قرار گرفته‌است. اما تا پایان قرن بیستم، استفاده از پرواز گروهی 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 هزاره سوم و با آشکار شدن ابعاد بیشتری از موضوع پرواز گروهی مشخص شد که این روش می‌تواند دارای کاربردهای بسیار گسترده‌تری باشد. چندین حالت مختلف پرواز گروهی وجود دارند که به‌طور عمده برای اهداف نظامی شکل گرفته‌اند. 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 [۳].

برای درک آیرودینامیک چند هواپیما که به‌صورت گروهی پرواز می‌کنند، لازم است ملاحظات طراحی آیرودینامیکی بال محدود در نظر گرفته شود. برآ به دلیل اختلاف فشار بین سطح بالا و پایین یک بال ایجاد می‌شود - فشار کم در بالا، فشار بالا در پایین. محصول جانبی این اختلاف

بنابراین هر کدام باید تمایل و فاصله جانبی/عمودی را از هوایمای پیشرو حفظ کنند. در این مورد، شکل‌پذیری حالت (c) ایجاد می‌شود. مزایای این حالت نیز شبیه حالت (b) می‌باشد، اما نمی‌تواند در منطقه ماموریتی کوچک به اندازه حالت (a) مفید باشد. در حالت (d) (پله شکل) هر دسته از هوایماها با یک زاویه مشخص و از پیش تعیین شده در سمت راست یا چپ هوایمای پیشرو قرار دارند. مزیت اصلی آن در وسعت دید بسیار زیاد برای هر هوایما است. در حالت کلی فروندهای دورتر در حالت‌های (b)، (c) و (d) نسبت  $L/D$  بیشتر و از راندمان آیرودینامیکی بهتری برخوردارند، زیرا از گردابه‌های نوک بال هوایماهای بیشتری در همان سمت استفاده می‌کنند. متعاقباً پایداری کمتری هم نسبت به فروندهای نزدیکتر به هوایمای پیشرو در همان سمت خواهند داشت. اگر زاویه بین هوایماها صفر باشد، این نوع پرواز را خط کناری (یا دیوار) می‌نامند. هوایماها همگی موقعیت نسبی یکسان خود را در این حالت در راستای مسیر پروازی حفظ می‌کنند و هر فروند در مسیر و جهت ایمن قرار می‌گیرد. این الگو بیشتر در هنگام تقرب ترافیک هوایی استفاده می‌شود (شکل ۲).

در شکل ۳ و حالت (e) ساختار چهارگوش (یا الماس) را در وضعیت بسیار دشوار نشان می‌دهد، زیرا هر هوایما باید بسیار نزدیک به هوایمای دیگری پرواز کند. اما مزیت این حالت در فشردگی دسته و قابلیت مانور بیشتر برای هر فروند است و همانند بلوکهای ساختمانی قابلیت تعمیر و گسترده‌تری دارد [۶]. فروند شماره ۴ از گردابه‌های بال سمت راست شماره ۲ و بال سمت چپ شماره ۳ استفاده می‌کند، بنابراین بازدهی آیرودینامیکی بیشتری دارد. اما به دلیل وجود گردابه‌های مزاحم فروند پیشرو از میزان پایداری آن کاسته می‌شود.



شکل ۱- ساختار پشت سر هم و انگشتی شکل در پرواز گروهی [۶].

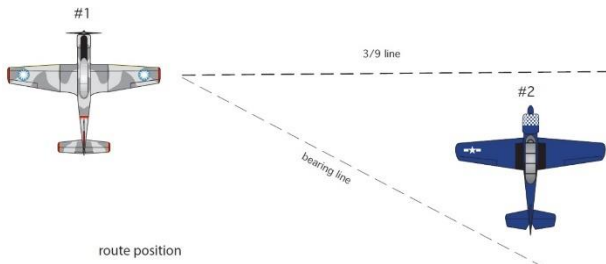
Fig. 1. Fingertip formation [6].

می‌گیرد که مسئولیت و وظیفه اجرای پروازی ایمن و همچنین برنامه‌ریزی مأموریت برعهده اوست. خلبانان دیگر، صرف نظر از تعداد آن‌ها، در هوایمای پیرو پرواز می‌کنند؛ وظیفه آن‌ها حفظ یکپارچگی شکل دسته است، حمایت متقابل را انجام دهند، از دستورات پیشرو پیروی کنند و همیشه هوایمای پیرو را در دید خود داشته باشند. هوایماها آرایش‌های مختلفی در داخل پرواز گروهی دارند و تعداد متنوعی از شکل و "هندسه" در پرواز گروهی ایجاد می‌کنند. هنگامی که دستورالعمل ماموریت تغییر می‌کند، پرواز گروهی باید با تغییر هندسه، خود را سازگار کند و مراقب باشد که از فروندهای دیگر و موقعیت‌های بن بست اجتناب کند (نباید مسیر یکدیگر را مسدود کنند). تحت تاثیر تداخل و تاثیر متقابل آیرودینامیکی، هوایمای پیرو دارای افزایش گشتاور پیچ دماغه در جهت پایین است و باعث ناپایداری استاتیکی جانبی می‌شود که بر خلاف ویژگی هوایمایی است که به تنهایی پرواز می‌کند. تداخل آیرودینامیکی عمدتاً از جریان فروزش ناشی از گردابه نوک بال هوایمای پیشرو ناشی می‌شود و مقدار واقعی زاویه حمله و پسای القایی هوایمای پیرو را کاهش می‌دهد و باعث توزیع برآ در هر دو سمت هوایمای پیرو می‌شود [۱]. در ذیل ساختار و هندسه قرار گرفتن انواع مختلف پرواز گروهی نمایش داده شده‌است که به اختصار در مورد هر یک و کاربردهای آن‌ها توضیح داده می‌شود:

اگر حالت (a) به صورت پشت سرهم انتخاب شود، هوایمای پیرو، هوایمای پیشرو را دنبال می‌کند و باتوجه به الزامات ماموریت، فاصله بین هوایماها متغیر خواهد بود. در طول جنگ جهانی اول یکی از رایج‌ترین الگوها بود، اما به زودی مشخص شد که ترکیبی ناکارآمد است، به‌ویژه به این دلیل که هوایماها نمی‌توانستند در صورت لزوم و موارد اضطراری به صورت دیداری با یکدیگر ارتباط برقرار کنند و همچنین بیشتر در خط آتش پدافند دشمن قرار می‌گرفتند. به لحاظ پایداری و کنترل و وجود گردابه‌های قدرتمند چرخشی پایین‌رونده و ریزشی ملخ موتور هوایمای پیشرو، فروندهای پشتی در بدترین نقطه ممکن قرار داشتند و باعث ناپایداری و مانورپذیری کمتری برای آن‌ها می‌شد. حالت (b) با نام انگشتی شکل به منظور غلبه بر این مشکل شکل گرفت. با نگاه از بالا، همانند شکل انگشتان دست راست است و اگر فروند تکی با دو فروند دیگر جابجا شود حالت انگشتی چپ است. این حالت قرارگیری، معمول و رایج‌ترین نوع در پرواز گروهی است. معمولاً فروندهای پشتی در محدوده ۳۰ تا ۴۵ درجه پشت هوایمای پیشرو، بسته به نوع هوایما، با فاصله عمودی و جانبی جزئی از نوک بال هوایمای شماره ۱ مسیر پروازی را نگه می‌دارند. از مزایای این حالت دید خوب برای خلبان، قابلیت مانور بهتر برای فروندهای پیرو، قرارگرفتن در مسیر ریزش گردابه‌های نوک بال به دور از سایر گردابه‌های مزاحم و در محل بیشترین پایداری موجود در پرواز گروهی است (شکل ۱).

اگر فروندها فرد باشند، آنگاه در هر طرف یک هوایما یا هوایماهای پیرو قرار می‌گیرند و نسبت به هوایمای پیشرو ساختار قرینه شکل می‌گیرد.

هوایما با قرارگرفتن در موقعیت خط مسیر در وضعیت آرایشی "آرام" است. اجازه داده می‌شود تا فاصله بیشتری بین هوایماها وجود داشته باشد و می‌توان از آن برای تسهیل امور جاری در زمانی که خلبان نیاز دارد به داخل کابین سرکشی کند، استفاده کرد. همچنین برای استراحت در پروازهای بین‌المللی، ایجاد فضای کافی برای هوایماهای پیرو در مناطق پرتراфик و یا انجام بررسی‌های سیستم‌ها، سوخت و یا سایر وظایف عملیاتی از این حالت استفاده می‌شود (شکل ۴).

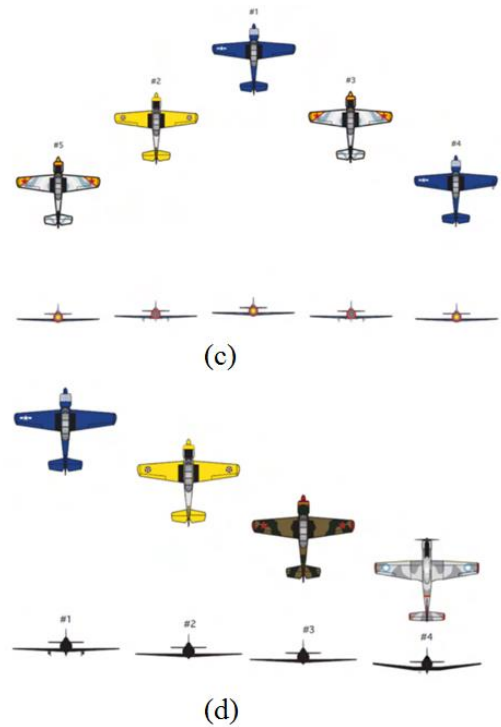


شکل ۴ - موقعیت خط مسیر در پرواز گروهی [۶].

Fig. 4. Route position [6].

## ۲.۲ ضرورت پرواز گروهی

تحقیقات تخمین می‌زنند که با ادامه رشد تقاضای مسافر برای استفاده از حمل‌ونقل هوایی بین ۵ تا ۶ درصد در سال رشد می‌کند و تعداد مسافران تا سال ۲۰۳۷ از هشت میلیارد نفر فراتر خواهد رفت [۷]. بنابراین، هوانوردی تجاری به‌طور مداوم به دنبال راه‌هایی برای مقابله با این افزایش تقاضا است تا هزینه‌ها کاهش یابند. این توسعه سریع در صنعت حمل و نقل هوایی جهان، تراکم هوایماها در حریم هوایی، توانایی پردازش داده‌ها برای متخصصین مراقبت پرواز و کنترل کننده‌های ترافیک هوایی را با چالش مواجه خواهد کرد. در نتیجه خطر سوانح پروازی در حریم هوایی افزایش می‌یابد [۸]. روش‌هایی که نیازهای صنعت هوانوردی را برآورده کند، ارایه شدند. یکی از این روش‌ها در برخی از خطوط هوایی تجاری ارایه و رواج مفهوم جدیدی با عنوان پرواز همانند غارهای وحشی<sup>۱</sup> به‌منظور نشان دادن قابلیت فنی، عملیاتی و تجاری دو هوایمایی که نزدیک به هم در طی یک پرواز طولانی پرواز می‌کنند، است (شکل ۵). این فعالیت مشترک، پتانسیل کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش اثرات زیست محیطی هوایماهای تجاری و رفع محدودیت‌های ترافیک هوایی در پرواز گروهی را دارد. این روش از مزایای بیشتری نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی برای صرفه‌جویی در مصرف سوخت مانند سوخت‌گیری هوایی و یا هوایمایی با ترکیب بال/بدنه دارد. پرواز گروهی مدت‌هاست که در ارتش‌های جهان به‌عنوان یک رویکرد مؤثر برای جابه‌جایی ایمن تعداد انبوه هوایماها مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبیه‌سازی‌های آیرودینامیکی و تخمین‌های معادله برد



شکل ۲ - ساختار پیکانی و پلکانی در پرواز گروهی [۶].

Fig. 2. Vic and Echelon formation [6].



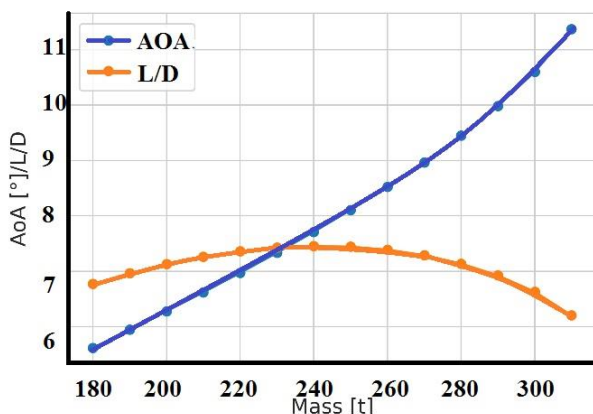
شکل ۳ - ساختار الماسی شکل در پرواز گروهی [۶].

Fig. 3. Diamond formation [6].

در فاصله ۱۰۰ پایی بصورت عمودی از فروند پیشرو توسط فروندهای پیرو باید حفظ شود [۱۳]. بنابراین رفع معضلات پیش‌گفته نیازمند آرایه راهکار و برنامه‌ریزیست، تا بتوان به موارد ذیل پرداخت. وجود فناوری کافی در هواپیما و دارا بودن سیستم توانمند، خدمه آموزش‌دیده و واجد شرایط، سازگاری عملیاتی (فواصل طولی/عرضی/جانبی، ارتقای کاربری فرودگاه، قابلیت مانور، مسیریابی/نقاط عملیاتی، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری مشترک و پذیرش پرواز گروهی از سوی مراجع قانونی و ذیصلاح) [۱۴]، نحوه تبادل اطلاعات در ارتباطات هوایی، شرایط آب و هوایی (تلاطم و تندباد) [۱۵] و از همه مهمتر تغییر ذهنیت مسافران از جمله مواردی هستند که باید به آن‌ها پرداخته شود.

#### ۴ مطالعات بهبود عملکرد آیرودینامیکی پرواز گروهی

مطابق مطالعات انجام شده عوامل و متغیرهای مختلفی در بهبود عملکرد آیرودینامیکی پرواز گروهی موثرند. از مهمترین عوامل می‌توان از وزن، سرعت، زاویه حمله، ملاحظات پایداری و کنترل، شناخت جریان‌های گردابی و همچنین به نحوه چینش و آرایش فروندهای مختلف نسبت به یکدیگر نام برد. بنابراین برای تحلیل و تاثیر هر یک از موارد ذکر شده در پرواز گروهی، تعدادی از مقالات ارائه شده از سال ۲۰۱۷ تاکنون بررسی می‌شود. سینک و همکاران [۱۶] در پژوهشی که به‌صورت عددی انجام دادند تاثیر افزایش وزن و زاویه حمله تا میزان معینی برای افزایش حداکثری نیروی برآ به پسا را مطالعه کردند. افزایش بیشتر موارد پیش‌گفته می‌تواند باعث ایجاد اختلال قابل توجهی در جریان‌های حلقوی و کاهش مقدار نسبت برآ به پسا شود (شکل ۶).



شکل ۶- تاثیر زاویه حمله و وزن بر نسبت حداکثری برآ به پسا [۱۶].

Fig. 6. Sensitivity of AOA and Mass to Max L/D [16].

نشان دادند که برای دستیابی به صرفه‌جویی بیشتر، هواپیما باید عدد ماخ خود را تقریباً ۰.۲٪ کاهش دهد و در ارتفاع کمی بالاتر پرواز کند. این نتایج برای محیط پرواز تجاری بسیار مهم بود [۷].



شکل ۵- الگوی قابلیت‌های پرواز گروهی در شرکت ایرباس [۳].

Fig. 5. Fello'fly [3].

#### ۳ مزایا، معایب و چالش‌ها

در ملاحظات تصمیم‌گیری، نیاز به محاسبات دقیق برای دریافت منافع در مقابل جریمه‌ها (بازدهی موج‌سواری بر روی گردابه‌ها)<sup>۱</sup> در پرواز گروهی است [۹] دستیابی و استفاده از انرژی پتانسیل موجود در گردابه‌ها و تبدیل آن به مزایا، تولید معایب و چالش‌های عملیاتی می‌کند. به دلیل کاهش میزان سوخت مصرفی ناشی از کاهش نیروی پسا، مزایای پرواز گروهی را می‌توان به افزایش مداومت و برد پروازی [۱۰]، حمل‌معلقات و بار بیشتر، جایگزین کردن و حمل سوخت بیشتر و عدم نیاز به توقف در طول مسیر برای سوخت‌گیری [۱۱]، کاهش آلودگی هوا و حفظ لایه ازن و... دسته‌بندی کرد. همه موارد پیش‌گفته از منظر استراتژی، مدیریت عملیات و قدرت مانور دارای اهمیت بسیاری هستند.

از معایب آن نیز می‌توان به مکان عملیاتی کمتر بهینه، ایجاد مسیرهای انحرافی<sup>۲</sup> و طولانی‌تر، کاهش رضایت و آسایش مسافر به دلیل تلاطم بیشتر، نیاز به نقاط ایستایی بیشتر، ایمنی و خطر بیشتر به دلیل نزدیکتر بودن فروندها نسبت به یکدیگر برای رفع نیاز به گردابه‌هایی با قدرت و تعداد کمتر برای حصول بازده آیرودینامیکی بیشتر، عدم وجود قوانین ترافیکی کافی و واضح برای پرواز گروهی، پسای بیشتر تعادل‌کننده‌ها، تعادل و پایداری کمتر در پرنده‌ها [۱۲] و... اشاره کرد.

برای انجام پرواز گروهی چالش‌هایی وجود دارد، زیرا مطابق قوانین سازمان بین‌المللی هوانوردی غیرنظامی حداقل فاصله ۲ هواپیما از یکدیگر در پرواز گروهی بیش از ۱ مایل به‌صورت جانبی یا طولی و

پسرو حاصل شود. به لحاظ عملکرد در یک پرواز گروهی فروند آخر کمترین میزان پسا را تجربه می‌کند و در برخی موارد حتی مشاهده می‌شود که پسای القایی تقریباً به مقدار صفر نزدیک می‌شود. در موارد خاص، آخرین فروند در پرواز گروهی ۵ فروندی تقریباً ۳۳٪ کمتر از فروند عقبی اول، پسای القایی ناشی از آن را تجربه می‌کند.

مجدداً سینگ و همکاران [۲۰] در آزمایشی دیگر با ایجاد یک شبکه محاسباتی جدید برای پرواز گروهی به تحلیل مزایای عملکرد آیرودینامیکی پرداختند. دو ایرفویل ناکا ۲۳۰۱۲ به شکل پشت سر هم قرار گرفتند. موقعیت نسبی بال دوم در موقعیت‌های مختلف طولی، افقی و عمودی قابل تغییر بود. آزمایش تخمین برآ، پسا و نحوه افزایش آن را با آزمایش‌های تجربی موجود مقایسه شد. تأثیر زاویه حمله بال هواپیمای پیشرو بر عملکرد آیرودینامیکی هر دو بال با لحاظ کردن سه زاویه مختلف در محدوده خطی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. مشخص شد که هیچ تغییر قابل توجهی در موقعیت جانبی و عمودی برای حداکثر عملکرد آیرودینامیکی برای این سه زاویه رخ نمی‌دهد. همچنین در بهترین موقعیت آیرودینامیکی هواپیمای پیرو، کاهش پسا به میزان ۳۰ درصد می‌رسد (جدول ۱).

جدول ۱- مقایسه ضرایب برآ و پسا در حالت منفرد و پرواز گروهی [۲۰].

Table 1. Drag and lift coefficients for isolated and trail aircraft in formation [20].

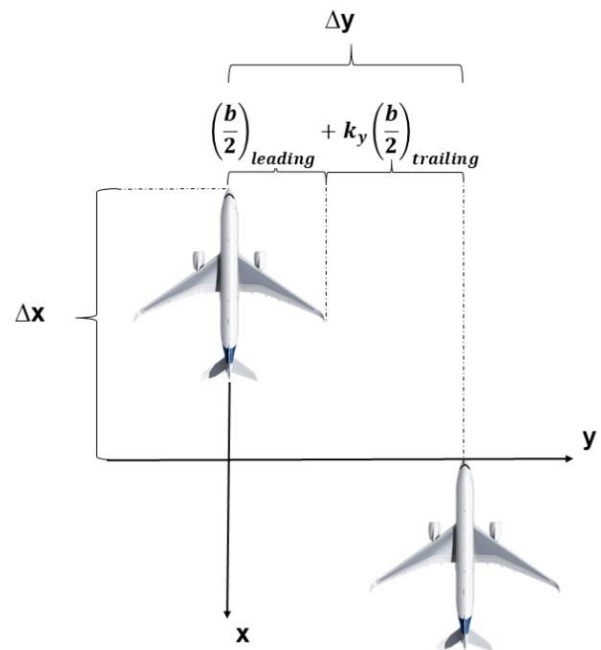
Configuration	Aerodynamic Coefficients	VLM	RANS
Isolated aircraft	$C_L$	0.0022	0.0028
	$C_D$	0.1758	0.1290
Trail aircraft formation	$C_L$	0.0016	0.0019
	$C_D$	0.1935	0.1450

دولونوردن و همکاران [۲۱] با روش شبیه‌سازی عددی نشان دادند که در محدوده سرعت بیشینه مجاز پرواز انفرادی، توان کل مورد نیاز برای هواپیمای پیرو تا میزان حداکثر ۲۰٪ در پرواز گروهی کاهش می‌یابد. همچنین در نتایج آزمایش‌های تونل باد نیز به دلیل کاهش تقریبی ۲۴ درصد در پسای پارازیت، توان بیشینه کل مورد نیاز نیز کاهش می‌یابد. همچنین دامنه سرعت پرواز در پرواز گروهی نسبت به پرواز انفرادی کاهش می‌یابد. جریان‌های گردابی<sup>۱</sup> در هواپیماهای نظامی و غیرنظامی کاربردهای آیرودینامیکی دارند. کاربردها در دینامیک سیالات گسترده وسیعی دارند. جریان‌های لایه مرزی فرعی<sup>۲</sup> که در لایه مرزی آشفته ایجاد می‌شوند، تا جریان‌های یکپارچه<sup>۳</sup> که روی بدنه هواپیما را در برمی‌گیرند، تحت تأثیر جریان‌های گردابی هستند.

### 3. Integrated Flows

وسکویل و همکاران [۱۷] از تحلیل معادلات مرتبط با برد هواپیما در سرعت‌های پرواز فرا صوتی تحت شرایط عدد ماخ و ارتفاع ثابت به این نتیجه رسیدند که در صورت اختلاف وزن، سبک‌ترین هواپیما باید پرواز گروهی را هدایت کند تا بیشترین مزیت در مصرف سوخت حاصل شود و با کاهش عدد ماخ (معمولاً از ۰/۸۵ به ۰/۸۰) می‌توان به صرفه جویی در مصرف سوخت به میزان ۱۲٪-۶٪ دست یافت.

زومگن و همکاران [۱۸] با استفاده از حالت پرواز گروهی پله‌ای شکل و با شبیه‌سازی دینامیک پرواز اثر ارتفاع و سرعت‌های مختلف، جرم هواپیما، فاصله‌های جانبی و عمودی و شدت متغیر تند بادها و تلاطم‌ها مورد ارزیابی قرار دادند که در آن فاصله بین دماغه دو هواپیما در راستای محور طولی با  $\Delta x$ ،  $\Delta y$  فاصله جانبی دماغه دو هواپیما،  $k_y$  ضریب جداسازی جانبی و  $b$  طول دهانه بال است. آن‌ها دریافتند که ارتفاع بالا و عدد ماخ کم در طول پرواز گروهی منجر به بیشترین کاهش پسا در هواپیمای پیرو می‌شود. تغییر محل هواپیمای پیرو به نقطه بهینه در گردابه هواپیمای پیشرو و انجام تغییرات لازم منجر به کاهش حدود ۱۰ درصد در مصرف سوخت می‌شود (شکل ۷).



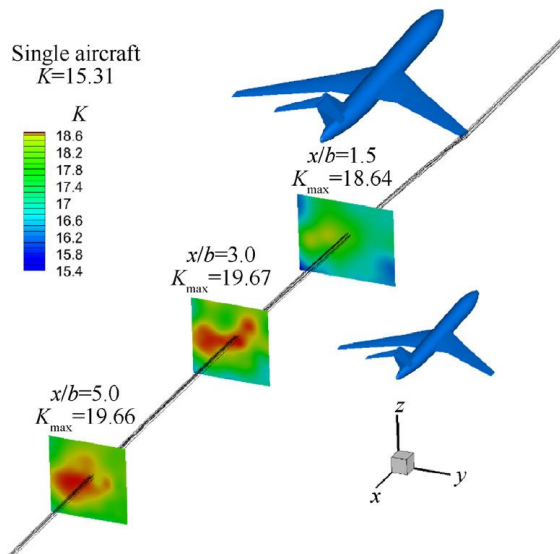
شکل ۷- فاصله افقی دو هواپیما در مدل زومگن [۱۸].

Fig. 7. Horizontal separation of the aircraft [18].

گوناسکاران و همکاران [۱۹] نیز به این نتیجه رسیدند که می‌توان پرواز گروهی را با پیش فرض اولیه به گونه‌ای طراحی کرد که در محدوده کوچکی از زوایای حمله، اما در زوایای حمله بزرگ، بیشترین میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت و توانایی حمل بار بیشتر در فروندهای

1. Vortex Flows
2. Sub-Boundary Layer

میدان‌های جریان گردابه تولید شده، آشفتگی‌های کوچک خطوط گردابه را ایجاد می‌کنند.



شکل ۸- نتایج گردابه های القایی هواپیمای پیشرو در تونل باد [۲۵].

Fig. 8. Overall view of leading aircraft wing tip vortex, by wind tunnel test [25].

شوگوکوپینار [۲۷] نشان داد که در حین صعود و ارتفاع گرفتن هواپیما جریان‌های گردابی به صورت چرخشی رو به بالا حرکت می‌کنند اما در زمان فرود این جریان‌ها به سمت پایین کشیده می‌شوند. همچنین گردابه‌هایی که در انتهای بدنه قرار دارند از گردابه‌های نوک بال ایجاد می‌شوند، اما این گردابه‌ها در مقایسه با گردابه‌های نوک بال بسیار بزرگ هستند. ژائو و همکاران [۲۸] با استفاده از نظریه موج سواری انرژی روی گردابه هواپیما<sup>۱</sup> به رفتاری اشاره کردند که حرکت هواپیمای پیشرو را روی گردابه هواپیمای پیشرو همانند پرواز گروهی پرنده‌گان مهاجر به «موج سواری» تشبیه می‌کند، و در پایان مزایای مربوط به آن را به طور گسترده در زمینه‌های سوخت گیری هوایی، کنترل ایمنی هواپیما در برخورد با گردابه، پرواز گروهی در نواحی نزدیک به اقیانوس و حمل بار در پرواز گروهی پهباد تحلیل می‌کند. از جمله نتایج حاصله می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد:

۱. میدان گردابه نزدیکتر، که بسیار نزدیک به لبه فرار بال هواپیما است، تقریباً برابر با مرتبه وتر میانگین آیرودینامیکی است. مشخصه آن یک لایه برشی گردابی متشکل از گردابه‌های بسیار متمرکزی هستند که از لبه فرار بال شروع می‌شوند، اما سرعت چرخش آن برای مدت زیادی پس از آن ثابت باقی می‌ماند، بنابراین موج سواری با انرژی روی گردابه در این مرحله انجام می‌شود (شکل ۸).

جریان آشفته پارامتری که به همراه دامنه و نوع اختلال تعیین کننده گذر به جریان آشفته است را عدد رینولدز برعهده دارد.

در "جریان یکپارچه" نیز مقدار تجمیع جریان مورد استفاده از شروع تا پایان اندازه گیری می‌شود. همچنین از اثر القایی که توسط گردابه‌ها بوجود می‌آید در انواع شرایط عملکردی هواپیما از جمله برخاستن و فرود، کروز و مانور با زاویه حمله بالا استفاده می‌شود [۲۲].

هنریک اسپارک و روبرت لاکتر [۲۳] مدل‌های مختلف سرعت گردابه بالارونده را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که ۲ مدل شبکه گردابه و مدل خط برآزا از برترین روش‌ها هستند. از ۲ مدل موصوف، مدل خط برآزا از نظر محاسباتی هزینه کمتری نسبت به روش شبکه گردابه دارد و نتایج مشابهی را برای مسیره‌های یکنواخت ارائه می‌کند. مطالعات ژینگدا کوی و همکاران [۲۴] نیز با کمک حل عددی نشان داد که هر ۲ فروند بر روی یکدیگر تاثیر معینی دارند. به دلیل تداخلات آیرودینامیکی که عمدتاً از جریان فراوزش ناشی از گردابه نوک بال هواپیمای پیشرو ایجاد می‌شود، مقدار واقعی زاویه حمله و پسای القایی هواپیمای پیرو کاهش می‌یابد و هواپیمای پیرو دچار افزایش گشتاور پیچ رو به پایین و ناپایداری استاتیکی سمتی می‌شود (جدول ۲).

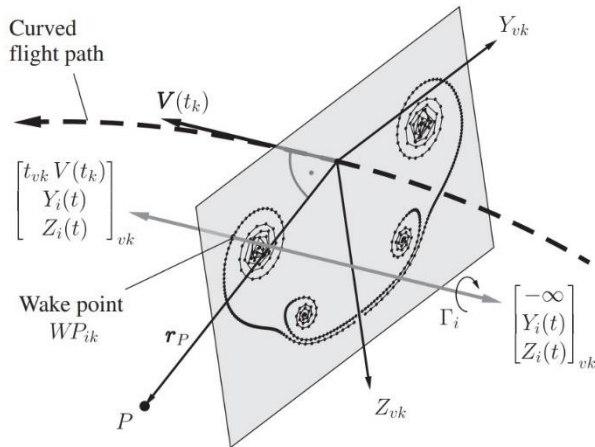
جدول ۲ - نتایج شبیه‌سازی در راستای طولی با  $\beta = 0$  و  $C_L = 0.315$  [۲۴].

Table 2. CFD results of longitudinal aerodynamic data for different aircrafts at  $\beta=0^\circ$  and  $CL \approx 0.315$  [24].

Name of Aircraft	Solo	Leader	Follower
$\alpha^\circ$	5.15	5.15	4.477
$C_L$	0.314827	0.315484	0.315369
$C_D$	0.016500	0.016473	0.012360
$C_M$	-0.007397	-0.007441	-0.009408
K	19.08	19.15	25.52

تائو و همکاران [۲۵] هم در تحقیقات خود نتایج مشابهی را استخراج کردند. با تمرکز بر روی نسبت نیروی برآ به نیروی پسا (K) نشان دادند که نواحی که از بیشترین نسبت K برخوردار هستند، مناسب‌ترین مکان برای انجام پرواز گروهی هستند. در شکل ۸ این نواحی به صورت کانتور ترسیم شده است. وچل و همکاران [۲۶] نشان دادند که نیروها و گشتاورهای ناشی از گردابه القایی در حین پرواز با مقدار ثابتی نسبت به هواپیمای پیشرو به طور پیوسته تغییر می‌کنند. زیرا

هواپیمای پیرو با فاصله جانبی به اندازه  $0.853$  طول بال و نسبت به سکان عمودی در  $0.22$  طول بال بود. پسای القایی در حالت بهینه به اندازه  $7/24\%$  کاهش یافت. به نظر رسید که عملکرد آیرودینامیکی هواپیمای پیرو از فاصله جانبی و فاصله عمودی متأثر است، اما به فاصله طولی در پرواز گروهی نزدیک تأثیرپذیر نیست. بهترین مکان برای کاهش پسا، نوک بال هواپیمای پیرو در هسته گردابه نوک بال هواپیمای پیشرو است.



شکل ۱۰ - موقعیت گردابه‌ها حین محاسبه سرعت القایی هنگام مانور [۳۰].

Fig. 10. Wake position determination for the induced velocity calculation considering flight maneuver [30].

ژانگ و همکاران [۳۳] به صورت عددی خصوصیات آیرودینامیکی پرواز گروهی در فاصله نزدیک را شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که ویژگی‌های آیرودینامیکی پرواز گروهی نزدیک برای سه پهپاد بر اساس موقعیت بهینه طراحی شده، قابل بهبود است. نسبت برآ به پسای پهپاد در آرایش V شکل در پرواز گروهی به  $22/36$  می‌رسد که تقریباً  $70\%$  درصد افزایش نسبت به پرواز عادی دارد (شکل ۱۱). ژانگ و همکاران [۳۴] نیز در مورد پرواز گروهی از فاصله نزدیک<sup>۲</sup> (اگر فاصله جانبی بین دو هواپیما کمتر از دو برابر دهانه باشد و کوپل نیروها و گشتاورهای آیرودینامیکی بر روی هواپیمای پیرو تأثیر بگذارد) به نتایج مشابهی دست یافتند.

شین و همکاران [۳۵] به بررسی بهبود عملکرد آیرودینامیکی پرواز گروهی در سرعت‌های فراصوتی پرداختند. معیار ارزیابی بهبود آیرودینامیکی، محاسبه پسا بود. پسای کل برای هر فروند در پرواز گروهی با یک پهپاد منفرد مقایسه و درصد کاهش نیروی پسای نهایی تخمین زده شد. متغیرها شامل تعداد هواپیما، فاصله و شکل پرواز گروهی بود. تحلیل‌ها نشان می‌دهند که تعداد فروندهای پرواز گروهی تا حد زیادی بر میزان بهبود تأثیر می‌گذارد.

۲. میدان جریان گردابه نزدیکتر به‌طور کلی در  $10$  برابر دهانه بال گسترش یافته و معمولاً با گردابه نوک بال تداخل می‌کند و در نهایت یک جفت گردابه با جهت چرخش مخالف یکدیگر را تشکیل می‌دهند.
۳. میدان گردابه میانی از  $100$  برابر دهانه بال فراتر نمی‌رود و گردابه در این ناحیه به دلیل القای متقابل شروع به حرکت به سمت پایین می‌کند، در حالی که مشخصاً حالت ناپایدار را نشان می‌دهد.
۴. میدان گردابه دور دست و پراکنده شده، فراتر از  $100$  برابر دهانه بال است، ویژگی‌های ناپایداری از خود نشان می‌دهد و در نهایت به دلیل القای متقابل گردابه‌ها از بین می‌روند.

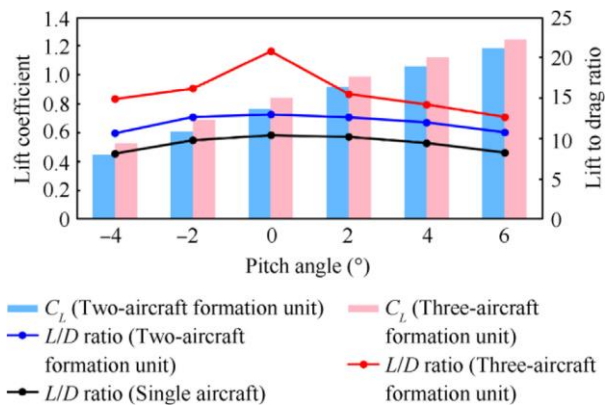


شکل ۹ - نمایی از گردابه‌های گسترش یافته [۲۸].

Fig. 9. Diagrammatic sketch of aircraft vortex development [28].

اوتنرسترزاه و همکاران [۲۹] بیان کردند که ستون‌های گردابه پرواز گروهی حاوی بیش از دو برابر ستون‌های گردابه هواپیمای منفرد است. علاوه بر این، ستون‌های گردابه هواپیما در پرواز گروهی کم عمق‌تر اما گسترده‌تر است و منتج شده از حرکت مستقیم گردابه از نوک بال است. کادن و همکاران [۳۰] با ایجاد روشی برای مدل‌سازی گردابه‌های چرخشی در مسیرهای منحنی با کمک سیستم‌های کنترل پرواز گروهی، روشی را برای تعیین موقعیت نسبی هواپیما در حرکت‌های عمودی و جانبی در پرواز فراهم کردند. تأثیر باد، آلودگی صوتی و تأخیر زمانی سیگنال‌های هواپیمای پیشرو در مدل‌سازی گردابه‌ها مورد توجه قرار گرفت (شکل ۱۰). در این روش محل گردابه  $WP_{ik}$  در یک شبکه مختصاتی با مرجعیت زمین ثابت  $Y_{vk} - Z_{vk}$  محاسبه می‌شود. میدل [۳۱] با روش جستجوی کنترلی حاد<sup>۱</sup> و به کمک یک خلبان خودکار در پرواز گروهی به دنبال مکان بهینه برای دستیابی به حداکثر صرفه‌جویی در انرژی بودند. در این روش پردازش از مقایسه بازده آیرودینامیکی مکان مناسب با وجود گردابه در مقابل عدم وجود گردابه انجام شد. یانگ و همکاران [۳۲] آزمایش‌هایی در تونل باد با سرعت کم اجرا کردند. عدد ماخ جریان آزاد  $0.85$ ، زاویه حمله هواپیمای پیشرو  $2$  درجه و زاویه حمله هواپیمای پیرو نیز  $2$  درجه بود. حداکثر نسبت برآ به پسا

۱۲). وانگ و همکاران [۳۸] تاثیر مسیر ورود را از سمت طولی، باعث تغییرات بیشتر در پایداری جهتی یافتند، در حالی که ورود از سمت جانبی باعث تغییرات بیشتر در پایداری طولی و جانبی می‌شود، بنابراین مسیر ورود باید بر اساس قابلیت کنترل هواپیماها طراحی شود. همچنین اثر هیستریزیس آیرودینامیکی ناشی از سرعت نسبی تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های آیرودینامیکی ندارد.

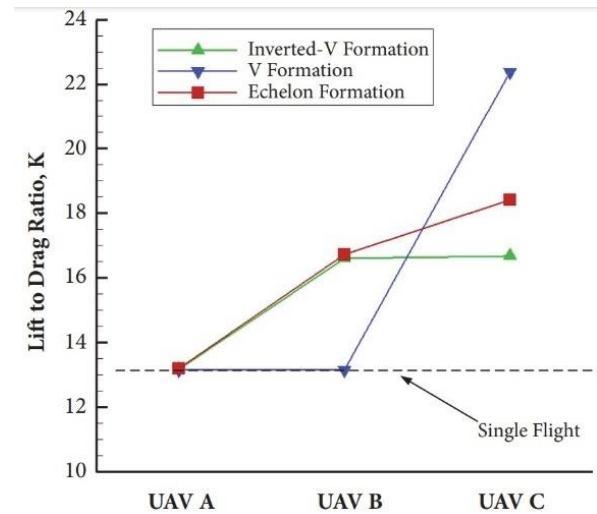


شکل ۱۲- مقایسه عملکرد طولی ۲ و ۳ فروند [۳۷].

Fig. 12. Comparison of longitudinal aerodynamic performance [37].

## ۵ نتیجه گیری

با توجه به تحقیقات انجام شده تا سال ۲۰۲۴، استفاده از نتایج ذیل برای مطالعات آینده راهگشا خواهد بود: بر اساس نتایج حل عددی، حداکثر دامنه سرعت هواپیما هنگام پرواز گروهی در مقایسه با پرواز انفرادی کاهش می‌یابد. بنابراین ارتفاع بالا و عدد ماخ کم در طول پرواز منجر به بیشترین کاهش پسا در هواپیمای پیرو می‌شود. می‌توان پرواز گروهی را با پیش فرض اولیه به گونه‌ای طراحی کرد که در محدوده کوچکی از زوایای حمله (اما زوایای حمله بزرگ) بیشترین میزان صرفه‌جویی در مصرف سوخت در فروندهای پیرو را داشته باشد. شناخت جریان‌های گردابی از اهمیت بسیاری برخوردار است. تأثیر باد، آلودگی صوتی و تأخیر زمانی سیگنال‌های هواپیمای پیشرو در مدل‌سازی گردابه‌ها نقش دارند. جریان‌های گردابی به صورت چرخشی رو به بالا حرکت می‌کنند اما در زمان فرود به سمت پایین کشیده می‌شوند. همچنین گردابه‌هایی که در انتهای عقب بدنه قرار دارند از گردابه‌های نوک بال ایجاد می‌شوند، اما گردابه‌های انتهای عقب بدنه در مقایسه با نوک بال بسیار بزرگ هستند. به دلیل تداخلات آیرودینامیکی که عمدتاً از جریان فراوزش ناشی از گردابه نوک بال هواپیمای پیشرو ایجاد می‌شود، مقدار واقعی زاویه حمله و پسای القایی هواپیمای پیرو کاهش می‌یابد و هواپیمای پیرو دچار افزایش گشتاور پیچ رو به پایین و ناپایداری استاتیکی سمتی می‌شود. تعداد فروندهای پرواز



شکل ۱۱- نسبت برآ به پسا در ۳ حالت مختلف پرواز گروهی [۳۳].

Fig. 11. The lift-to-drag ratio of the three UAVs in the three different formation types [33].

این تحقیق با حالت‌های کنار هم، نوع V شکل، به شکل الماس و نیم الماس و با تغییر تعداد هواپیما (۲ تا ۱۰ فروندی) ارزیابی شد. در همه‌ی ۱۷ حالت مختلف شبیه‌سازی، درصد کاهش پسا تخمین زده شد. مشخص شد که کارآمدترین نوع پرواز گروهی، نوع الماس گونه است، پس از آن نیمه الماس، سپس نوع V و در نهایت کنار هم است. کاهش پسای پیش‌بینی شده برای دو و سه هواپیما مشابه با برآوردهای کاهش پسا در مطالعات گزارش شده بود.

گوناسکاران و همکاران [۳۶] اثرات پیش‌پیش هندسی و آیرودینامیکی بال بر ضریب پسای القایی ناشی از نیروی برآ را مورد مطالعه قرار دادند. نتیجه تغییر در پیش‌پیش هندسی با تغییر کمی در پیش‌پیش کل تغییر قابل توجهی در پسای القایی در زوایای حمل بالاتر را ایجاد کرد. تاثیر پیش‌پیش آیرودینامیکی بر روی فروند پیشرو نیز تغییرات قابل توجهی در بخش فروند پیرو در توزیع  $C_L$ ،  $C_{D_i}$  و  $C_m$  در امتداد دهانه بال ایجاد کرد، زمانی که پیش‌پیش بال مثبت باشد، واماندگی در زوایای حمل بالاتر به تأخیر می‌افتد. ترکیبی از نسبت‌های منطقی مختلف در هر دو یا یکی از فروندها به همراه پیش‌پیش بال هواپیمای پیشرو به تأخیر در واماندگی کمک می‌کند. بنابراین از چنین ترکیبی برای کنترل عملکرد فروندهای متعدد با نسبت منطقی متوسط تا زیاد در پرواز گروهی استفاده می‌شود.

ژیایو و همکاران [۳۷] هم عملکرد طولی آیرودینامیکی ۳ فروند را نسبت به ۲ فروند مناسب‌تر برآورد کردند. همچنین پایداری استاتیکی جهتی و جانبی هواپیمای ۳ فروندی را با هواپیمای منفرد تقریباً یکسان دیدند. اما به دلیل وجود جریان‌های فراوزش نامتقارن، پایداری استاتیکی جهتی و جانبی دو فروندی با هواپیمای منفرد کمی متفاوت است (شکل

- Forum, 2023, Paper 4148, <https://doi.org/10.2514/6.2023-4148>.
- [7] T. E. Kent and A. G. Richards, "Potential of formation flight for commercial aviation: Three case studies," *Journal of Aircraft*, vol. 58, no. 2, pp. 320-333, 2021, <https://doi.org/10.2514/1.C035954>.
- [8] Y. Zhou, X. Tang, and X. Ren, "Autonomous flight strategy selection and interval maintenance for aircraft with unknown flight intentions," *IEEE Access*, 2024, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3438083>.
- [9] D. Erbschloe *e. al.*, "Operationalizing flight formations for aerodynamic benefits," *Presented at the AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020, <https://doi.org/10.2514/6.2020-1004>.
- [10] C. M. Verhagen, H. G. Visser, and B. F. Santos, "A decentralized approach to formation flight routing of long-haul commercial flights," *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 233, no. 8, pp. 2992-3004, 2019, <https://doi.org/10.1177/0954410018791068>.
- [11] A. Koloschin and N. Fezans, "Flight physics of fuel-saving formation flight," in *AIAA Scitech 2020 Forum*, 2020, Paper 1002, <https://doi.org/10.2514/6.2020-1002>.
- [12] T. Marks, C. Zumegen, V. Gollnick, and E. Stumpf, "Assessing formation flight benefits on trajectory level including turbulence and gust," 2019, <https://orcid.org/0000-0002-4225-5672>.
- [13] A. Sipos, "ICAO standards and recommended practices (SARPs)," in *International Aviation Law: Regulations in Three Dimensions*: Springer, 2024, pp. 203-231.
- [14] S. Hartjes, H. G. Visser, and M. E. van Hellenberg Hubar, "Trajectory optimization of extended formation flights for commercial aviation," *Aerospace*, vol. 6, no. 9, 2019, Art. no. 100, <https://doi.org/10.3390/aerospace6090100>.
- [15] T. M. C. Zumegen, and E. Stumpf, "Evaluation of formation flights with long range aircraft for different flight conditions and atmospheric disturbances," *Deutsche Gesellschaft für Luft-und Raumfahrt-Lilienthal-Oberth eV*, 2020, <https://doi.org/10.25967/530159>.
- [16] S. Singh, S. Stappert, L. Bussler, M. Sippel, Y. C. Kucukosman, and S. Buckingham, "Full-scale simulation and analysis of formation flight during in-air-capturing of a winged reusable launch vehicle," *Journal of Space Safety Engineering*, vol. 9, no. 4, pp. 541-552, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2022.09.005>.
- [17] M. Voskuil, "Cruise range in formation flight," *Journal of Aircraft*, vol. 54, no. 6, pp. 2184-2191, 2017, <https://doi.org/10.2514/1.C034246>.
- [18] C. Zumegen, T. Marks, and E. Stumpf, "Evaluation of formation flights with long range aircraft for different flight conditions and atmospheric

گروهی تا حد زیادی بر میزان بهبود تأثیر می‌گذارند. برای مثال پایداری استاتیکی جهتی و جانبی هواپیمای ۳ فروندی را با هواپیمای منفرد تقریباً یکسان است، اما به دلیل وجود جریان‌های فرازش نامتقارن، پایداری استاتیکی جهتی و جانبی دو فروندی با هواپیمای منفرد کمی متفاوت است. برای پهباد سه فروندی نسبت برآ به پسا در آرایش V شکل که یکی از بهینه‌ترین انواع آرایش در پرواز گروهی است به ۲۲/۳۶ می‌رسد که تقریباً ۷۰ درصد افزایش نسبت به پرواز عادی دارد. جهت و مسیر ورود برای شکل‌گیری دسته پروازی از سمت طولی، باعث تغییرات بیشتر در پایداری جهتی می‌شود، در حالی که ورود از سمت جانبی باعث تغییرات بیشتر در پایداری طولی و جانبی خواهد شد. بنابراین مسیر ورود باید بر اساس قابلیت کنترل هواپیماها طراحی شود. همچنین اثر هیستریزیس آیرودینامیکی متاثر از سرعت نسبی تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های آیرودینامیکی ندارد.

## تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده‌است.

## مراجع

- [1] J. C. Chan, P. C. Wang, and H. Hesse, "Aerodynamic interactions in formation flight for wake vortex surfing," in *AIAA AVIATION 2023 Forum*, 2023, Paper 4221, <https://doi.org/10.2514/6.2023-4221>.
- [2] I. Ransquin and P. Chatelain, "Bio-inspired wake tracking for aircraft formation flight based on reinforcement learning," in *AIAA Scitech 2021 Forum*, 2021, Paper 0885, <https://doi.org/10.2514/6.2021-0885.vid>.
- [3] M. Ebrahimi and M. Raouf Moghadam, "Ride quality passenger comfort in commercial aircraft during formation flight," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 53-64, 2022, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jtae.2022.313172.1209>.
- [4] O. Bidar, "Aerodynamics and control aspects of formation flight for induced drag savings," part of a Directed-Study course at the Department of Aerospace Engineering, University of Michigan, on a Global Engineering Education Exchange programme, Michigan, USA, 2019.
- [5] S. Ehtesham, "Development of sustainable models for discovery and presence in a flight arrangement," M.S. thesis, Faculty of Aerospace Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2017, (in Persian).
- [6] A. Favia, A. Lerro, P. Gili, U. Papa, and A. Chiesa, "Formation flight of multiple UAVs using artificial potential field algorithm," in *AIAA AVIATION 2023*

- Art. no. 012026, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1786/1/012026>.
- [29] S. Unterstrasser and A. Stephan, "Far field wake vortex evolution of two aircraft formation flight and implications on young contrails," *The Aeronautical Journal*, vol. 124, no. 1275, pp. 667-702, 2020, <https://doi.org/10.1017/aer.2020.3>.
- [30] A. Kaden and R. Luckner, "Maneuvers during automatic formation flight of transport aircraft for fuel savings," *Journal of Aircraft*, vol. 59, no. 2, pp. 433-446, 2022, <https://doi.org/10.2514/1.C036339>.
- [31] B. Moidel, A. A. Elgohary, S. Bajpai, and S. Eisa, "Reintroducing the formation flight problem via extremum seeking control," in *AIAA SCITECH 2024 Forum*, Orlando, FL, 2024, Paper 2317, <https://doi.org/10.2514/6.2024-2317>.
- [32] T. Yang, L. Zhiyong, X. Neng, S. Yan, and L. Jun, "Optimization of positional parameters of close-formation flight for blended-wing-body configuration," *Heliyon*, vol. 4, no. 12, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e01019>.
- [33] 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, no. 1, 2028, Art. no. 3136519, <https://doi.org/10.1155/2018/3136519>.
- [34] R. Zheng, Q. Zhu, S. Huang, Z. Du, J. Shi, and Y. Lyu, "Extended state observer-based sliding-mode control for aircraft in tight formation considering wake vortices and uncertainty," *Drones*, vol. 8, no. 4, 2024, Art. no. 165, <https://doi.org/10.3390/drones8040165>.
- [35] A. F. A. H. S. Shin, and A. Tsourdos, "Parametric study on formation flying effectiveness for a blended-wing UAV," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 93, pp. 179-191, 2019, <https://doi.org/10.1007/s10846-018-0842-4>.
- [36] M. Gunasekaran and R. Mukherjee, "Behaviour of trailing wing (s) in echelon formation due to wing twist and aspect ratio," *Aerospace Science and Technology*, vol. 63, pp. 294-303, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.01.009>.
- [37] Q. Nanxuan, M. Tielin, W. Xiangsheng, W. Jie, F. Jingcheng, and X. Pu, "An approach for formation design and flight performance prediction based on aerodynamic formation unit: Energy-saving considerations," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 37, no. 3, pp. 77-91, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2024.01.002>.
- [38] X. Wang, Y. Li, S. Ma, G. Liu, and Y. Tao, "Numerical study on aerodynamic performance during the process of entering the formation flight," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2709, no. 1, 2024, Art. no. 012009, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2709/1/012009>.
- disturbances," in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2020*, Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt - Lilienthal-Oberth e.V., Bohn, Germany, Paper 530159, 2020, (in Germany), <https://doi.org/10.25967/530159>.
- [19] M. Gunasekaran and R. Mukherjee, "Aerodynamic analysis of basic and extended lead-trail formation using numerical technique," *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, vol. 79, pp. 480-491, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.11.001>.
- [20] D. Singh *et al.*, "A multi-fidelity approach for aerodynamic performance computations of formation flight," *Aerospace*, vol. 5, no. 2, 2018, Art. no. 66, <https://doi.org/10.3390/aerospace5020066>.
- [21] R. Duivenvoorden, M. Voskuijl, L. Morée, J. de Vries, and F. van der Veen, "Numerical and experimental investigation into the aerodynamic benefits of rotorcraft formation flight," *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 67, no. 1, pp. 1-17, 2022, <https://doi.org/10.4050/JAHS.67.012011>.
- [22] J. M. Luckring and A. Rizzi, "Prediction of concentrated vortex aerodynamics: Current CFD capability survey," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 147, 2024, Art. no. 100998, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2024.100998>.
- [23] H. Spark and R. Luckner, "Simplified vortex methods to model wake vortex roll-up in real-time simulations for fuel-saving formation flight," *CEAS Aeronautical Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 763-778, 2022, <https://doi.org/10.1007/s13272-022-00587-1>.
- [24] X. Cui, Y. Yu, S. Ma, Z. Xiao, L. Zhang, and F. Liu, "Numerical investigation of the aerodynamic interference in 2-aircraft formation flight," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2280, no. 1, 2022, paper 012017, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2280/1/012017>.
- [25] Y. Tao *et al.*, "Experimental and computational investigation of hybrid formation flight for aerodynamic gain at transonic speed," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, no. 1, pp. 32-43, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.033>.
- [26] D. F. D. Vechtel 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, <https://doi.org/10.1007/s13272-018-0318-z>.
- [27] H. Sogukpinar, "Low speed numerical aerodynamic analysis of new designed 3D transport aircraft," *International Journal of Engineering Technologies IJET*, vol. 4, no. 4, pp. 153-160, 2019, <https://doi.org/10.54365/adyumbd.1085034>.
- [28] Y. Zhao, H. Wu, Q. Zhang, and Q. Cheng, "Overview of surfing aircraft vortices for energy," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1786, no. 1, 2021,