



Outwash Flow Behavior of Tandem Rotors near Ground Effect

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Mehrabi A.¹ MSc,
Davari A.*¹ PhD

How to cite this article

Mehrabi A, Davari A. Outwash Flow Behavior of Tandem Rotors near Ground Effect. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(6):1567-1581.

¹Aerospace Engineering Department, Science & Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Science & Research Branch, Islamic Azad University, Daneshgah Square, Shahid Sattari Highway, Tehran, Iran. Postal Code: 1477893855
Phone: +98 (21) 44865154
Fax: +98 (21) 44865179
davariar@yahoo.com

Article History

Received: May 29, 2019
Accepted: December 24, 2019
ePublished: June 20, 2020

ABSTRACT

In this study, multipurpose testing equipment with a sub-scale model of a specific tandem rotor helicopter constructed to conduct a number of experiments to accurate understanding from the tandem rotor's outwash in ground effect. The experiments conducted as measuring rakes were positioned at two distances equal to 1.5 R and 3R from the rotor(s). Unlike the experiments that have been performed in wind tunnels or in special hover chambers, these experiments were performed in an open environment with fewer side walls effects. The results show that when the single rotor operates in a fixed altitude, and the blades tip velocity of 0.2M, the outwash velocities reduces as the flow moving away and vice versa, but for tandem rotors, increasing the rack distance from the model does not have a noticeable effect on the average values of the flow velocity. A comparison of the results of these measurements with the CH-47D helicopter outwash patterns confirms the accuracy of the obtained patterns and showed that the overlap between the rotors increases the velocity values and causes to the occurrence of maximum outwash velocity at lower altitudes. No overlap between the tandem rotors makes the outwash flow pattern of each of them similar to a single rotor. Increase in ground effect as the height of the rotor(s) decreases to 1R, changes the flow pattern in the forward and aft of the model helicopter. In this altitude, unlike their operation in altitude of 2R, the outwash flow increases when moving away from the rotor(s).

Keywords Testing Equipment, Tandem Rotors, Overlapping, Outwash, Ground Effect

CITATION LINKS

[1] CH-47D tandem rotor outwash ... [2] Experimental investigation of PV-14 overlap Part I-downwash ... [3] Rotary-wing aerodynamics: Basic theories of rotor ... [4] Rotary-wing ... [5] Wind Tunnel Tests on a 12-ft diameter helicopter ... [6] Results of wind-tunnel measurements on a helicopter rotor ... [7] Wind tunnel studies of the performance of multirotor ... [8] Twin rotor hover ... [9] Rotorcraft downwash flow field study to ... [10] An experimental investigation of ground effect on a quad tilt rotor ... [11] Aerodynamic interactions between a rotor and wing in ... [12] Eulerian simulation of the fluid dynamics of helicopter ... [13] Simulation of landing maneuvers of rotorcraft in brownout ... [14] The flow physics of helicopter ... [15] Numerical investigation of the aerodynamic interaction between ... [16] Design of 1/48th -scale models for ship/rotorcraft interaction ... [17] Model experiments of soil erosion by VTOL aircraft downwash ... [18] Investigation of sediment entrainment using dual-phase, high-speed particle image ... [19] nvestigation of the downwash environment generated by V/STOL aircraft operating in ... [20] Assessment of rotorcraft brownout severity in terms of rotor ... [21] An analytical method of determining general downwash ... [22] Environmental Effects on VTOL designs, Arlington ... [23] Measurements to understand the flow mechanisms contributing ... [24] Fluid dynamics of interacting blade tip vortices with a ground ... [25] Vortex approach for downwash and outwash of tandem rotors in ground ... [26] Experimental investigation of the hovering performance of a twin-rotor test ... [27] Multirotor drone aerodynamic interaction ... [28] Improved rotor aeromechanics predictions using a fluid structure interaction ... [29] Simulating unsteady aerodynamics of helicopter rotor with panel/viscous vortex particle ... [30] Assessment of CFD methods against experimental flow measurements for helicopter ... [31] Wind tunnel experiments on a model of a tandem rotor ... [32] Hovering performance of a rotor in a dynamic ground ... [33] Rotorwash operational footprint ... [34] Experimental study of rotor wake/body interactions in ... [35] Helicopter ... [36] The effect of the ground on a helicopter rotor in forward ... [37] The rolling up of the trailing vortex sheet and its effect on the downwash behind...

رفتار جریان برون ریز ملخ‌های پشت سرهم در مجاورت اثر زمین

علی مهرابی MSc

گروه مهندسی هوافضا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

علیرضا داوری PhD*

گروه مهندسی هوافضا، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه، یک سامانه آزمایشگاهی چندمنظوره همراه یک بالگرد مدل با ملخ‌های پشت سر هم با هدف انجام تعدادی از آزمایش‌ها برای درک دقیق و به‌دست‌آوردن یک الگوی واقعی از رفتار جریان برون ریز دو ملخ پشت سر هم در حضور اثر زمین طراحی و ساخته شده است. آزمایش‌ها در دو فاصله $1/5R$ و $3R$ ریک‌های اندازه‌گیری جریان از ملخ(ها) انجام شدند. برخلاف آزمایش‌های انجام شده در تونل باد یا محفظه‌های خاص، این آزمایش‌ها در یک محیط باز و با اثرات دیواره‌ای کمتر انجام شدند. با توجه به نتایج حاصل برای یک ملخ تکی در ماخ 0.7 نوک پره‌ها، در یک ارتفاع ثابت ملخ(ها)، همزمان با دور شدن جریان برون ریز از بدنه، سرعت آن کاهش پیدا نمود و بالعکس؛ ولی برای ملخ‌های پشت سر هم، افزایش فاصله ریک‌ها از مدل تاثیر خاصی بر مقادیر میانگین سرعت نداشتند. مقایسه نتایج این اندازه‌گیری‌ها با الگوهای جریان برون ریز بالگرد CH-47D ضمن تایید درستی الگوهای به‌دست‌آمده، نشان دادند که وجود همپوشانی بین ملخ‌ها باعث افزایش مقادیر سرعت و رخداد سرعت بیشینه جریان برون ریز در ارتفاع‌های پایین‌تر می‌شود. عدم وجود همپوشانی بین آنها نیز باعث می‌شود تا الگوی جریان برون ریز هر کدام از آنها شبیه به الگوی جریان برون ریز یک ملخ تکی باشد. افزایش اثر زمین همراه با کاهش ارتفاع ملخ‌ها به ارتفاع $1R$ باعث شد تا مدل و رفتار جریان در نواحی جلویی و عقبی بالگرد تغییر نماید و بر خلاف کارکرد آنها در ارتفاع $2R$ ، سرعت جریان برون ریز همراه با دور شدن آن از ملخ، افزایش یابد.

کلیدواژه‌ها: سامانه آزمایشگاهی، ملخ‌های پشت سر هم، همپوشانی، جریان برون ریز، اثر زمین

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۳

*نویسنده مسئول: davariar@yahoo.com

مقدمه

پیشرفت‌های به‌دست‌آمده در درک آیرودینامیک بالگرد منجر به کسب اطلاعات زیادی درباره عملکرد آن در مقایسه با دهه‌های گذشته شده است. در موارد بسیاری، درک بهتر بسیاری از مسائل مختلف آیرودینامیکی بالگرد از طریق کاربرد تئوری‌های تحلیلی، مدل‌سازی‌های عددی و روش‌های تجربی یا ترکیبی از این روش‌ها برای رسیدن به راهکارهای دیگر امکان‌پذیر شده است.

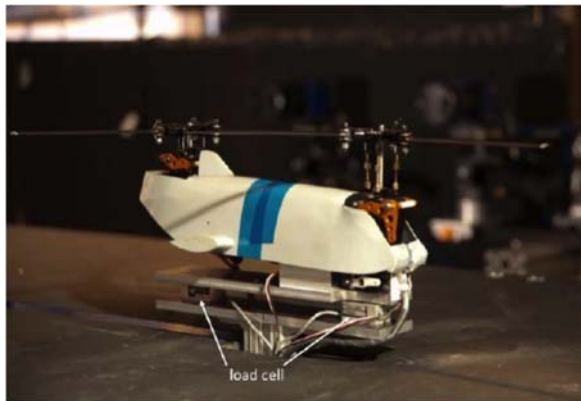
وقتی که بالگرد در مجاورت اثر زمین کار می‌کند، میدان جریانی بسیار پیچیده و غیردائم ایجاد می‌کند. علت تشکیل این میدان جریان پیچیده، انتقال جریان القایی ملخ از حالت غالباً عمودی (فرووزش) به حالت برون ریز شعاعی (Outwash) به‌وسیله

اندرکنش جریان با سطح زمین است. قدرت این جریان نیز تابعی از مقدار بارگذاری ملخ است. جریان برون ریز با سرعت زیادی از بالگرد دور می‌شود[1]. از حدود ۷۰ سال پیش، مساله ملخ‌های پشت سر هم و اولین آزمایش‌ها روی آنها به‌طور گسترده‌ای توسط محققان[2-4] انجام شد و منجر به معرفی فاکتور تصحیح همپوشانی شد که برای بهبود توان القایی به‌کار می‌رود. در این مدت، نتایج دیگر برای کارکرد ملخ‌های دوقلو توسط اسکوایر و همکاران[5] و سوویت و جنکینز[6] نیز ارائه شده‌اند. دینگلدین[7] و هریس[8] نشان دادند که یکی از ملخ‌ها در جریان فرووزش کاملاً توسعه‌یافته ملخ دیگر کار می‌کند.

در برخی از پژوهش‌های انجام شده بررسی مشخصات جریان برون ریز و فرووزش در بالگردهای تک‌ملخه و هواپیماهای عمودپرواز با ملخ‌های جانبی کنار هم با استفاده از روش پردازش‌کردن بدنه واقعی و مدل انجام شدند[9-11]. از نتایج یکی از این آزمایش‌های انجام شده بر بدنه بالگرد بلک‌هاوک یو-۶۰ (UH-60 Black Hawk) برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از محاسبات عددی روش ناویر-استوکس استفاده شد[9]. در این آزمایش‌ها، هنگام کارکرد بالگرد در حالت پرواز ایستایی، الگوهای غیردائم تشکیل شده در پره‌های نصب شده روی سطح زمین نشان دادند که در سطح زمین، در محدوده داخلی کمتر از دو سوم شعاع ملخ، جریان به سمت بدنه بود و جریان خارج از این محدوده به‌صورت برون ریز بوده است.

ترکیب اثرات ناشی از جریان‌های فرووزش و برون ریز پیرامون بالگرد منجر به پدیده‌ای به‌نام ضعف دید (Brownout) می‌شود که ناشی از برخاستن گرد و غبار شدید در اثر جریان فرووزش و برون ریز ملخ‌ها است و باعث می‌شود تا شن‌ها و اجسام سبک دیگر به داخل جریان هوای اطراف وسیله پرنده کشیده شوند (شکل ۱). برخی از پژوهش‌های انجام شده در مورد جریان برون ریز ملخ‌ها مربوط به شناسایی و درک بهتر سازوکار این پدیده، اکثراً هنگام فرود بالگرد یا هواپیماهای عمودپرواز است که در مناطق خاکی و صحرایی به‌وجود آمده و باعث کاهش دید خلبان، کشیده شدن اشیاء خارجی سبک در اطراف به ورودی‌های موتور، افزایش هزینه‌های نگهداری و تعمیر وسیله پرنده و همچنین کاهش ایمنی خدمه زمینی بر اثر بهم خوردن تعادل و کاهش دید می‌شود و یکی از علت‌های اصلی سوانح بالگردهای نظامی هنگام فرود بوده است؛ زیرا خلبان قادر به دیدن اشیاء نزدیک به خود به‌عنوان نقاط مرجع تخمین ارتفاع و محل فرود و کنترل بالگرد در نزدیک سطح زمین نخواهد بود[12-14]. البته این پدیده هنگام فرود وسایل پرنده در نزدیک سطح آب و روی کشتی‌ها نیز مشاهده شده است؛ با این تفاوت که روی سطح آب، این پدیده باعث برخاست ذرات آب در هوا و کاهش دید و اشتباه در تخمین ارتفاع می‌شود[15, 16]. آزمایش‌های تجربی برای شناسایی و بررسی اثرات منفی این پدیده در اطراف ملخ‌های تکی یا کنار هم که دارای میدان‌های جریان برون ریز و فرووزش ساده‌تری هستند، انجام شده

اندکی به یک جت خروجی هوا دارد؛ بنابراین باید از مدل‌سازی واقعی‌تری برای تحلیل و اندازه‌گیری پارامترهای جریان حول دو ملخ پشت سر هم استفاده کرد. لازم به ذکر است که اکثر اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط راماسامی محدود به کارکرد ملخ در ارتفاع برابر با شعاع آن بوده است. البته وی رویکردی محدود به اندازه‌گیری سرعت بیشینه جریان برون ریز ملخ در ارتفاع برابر با قطر آن از سطح زمین نیز داشته است. بدنه مدل به کاررفته در آزمایش‌های وی نیز بسیار ساده و شامل دو پوسته طولی بود که به همدیگر متصل شده بودند. به علت نحوه نصب بدنه مدل روی سیستم تعادلی لودسل‌ها، قسمت عمده جریان زیر بدنه مختل شده بوده است (شکل ۲)، در حالی که در شرایط پرواز ایستایی واقعی قسمت عمده‌ای از جریان القایی و فروزش به زیر بدنه نفوذ می‌نماید و باید در بررسی‌های مربوط به وجود این جریان، توجه نمود. در تحقیق حاضر، اندازه‌گیری‌های مذکور در دو ارتفاع مختلف و به صورت کامل اندازه‌گیری شده است.



شکل ۲) مدل به کاربرده شده در آزمایش‌های راماسامی و همکاران [23]

با توجه به تحقیق راماسامی و با استفاده از داده‌های آن، یک تحقیق دیگر در مورد درک رفتار جریان فروزش و برون ریز ملخ‌های پشت سر هم همپوشان و جریان دنباله مربوط به آن در حضور اثر زمین با استفاده از رویکرد عددی مبتنی بر گردابه‌ها و روش ذرات گردابه‌های لزج توسط تان و همکاران انجام شد [25]. نتایج به دست آمده از این روش عددی برای ملخ‌های پشت سر هم با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مربوط به مدل به کاربرده شده در آزمایش‌های راماسامی و همکاران [23] مقایسه شده بودند که همبستگی خوبی با یکدیگر داشتند. در مدل‌سازی عددی مذکور، اثرات جریان فواره‌ای ایجاد شده بین ملخ‌های پشت سر هم را که اثر قابل توجهی بر رفتار جریان برون ریز ملخ‌ها دارند، در نظر نگرفته بودند.

شاهمیری، آزمایش‌های تجربی را برای اندازه‌گیری کارایی یک بالگرد مدل دو ملخه در مقادیر مختلف همپوشانی ملخ‌ها (d/D) انجام داد و از نتایج این آزمایش‌ها برای توسعه مدل‌های ریاضی کارایی بالگرد در پرواز ایستایی استفاده نمود [26]. مدل استفاده شده در این آزمایش‌ها شامل دو ملخ با سه پره و با قطر ۱۲۲۰ میلی‌متر

است [17-22]؛ لذا این پدیده همچنان نیاز به بررسی و شناخت بیشتر با استفاده از مطالعه جریان برون ریز و اثرات آن بر شکل‌گیری این پدیده دارد. اثرات جریان برون ریز و فروزش ناشی از ملخ‌های یک هواپیمای عمودپرواز در فاز بالگردی آن بر نحوه تشکیل پدیده ضعف دید و ایمنی کارکنان توسط شین نیز بررسی شد [22].

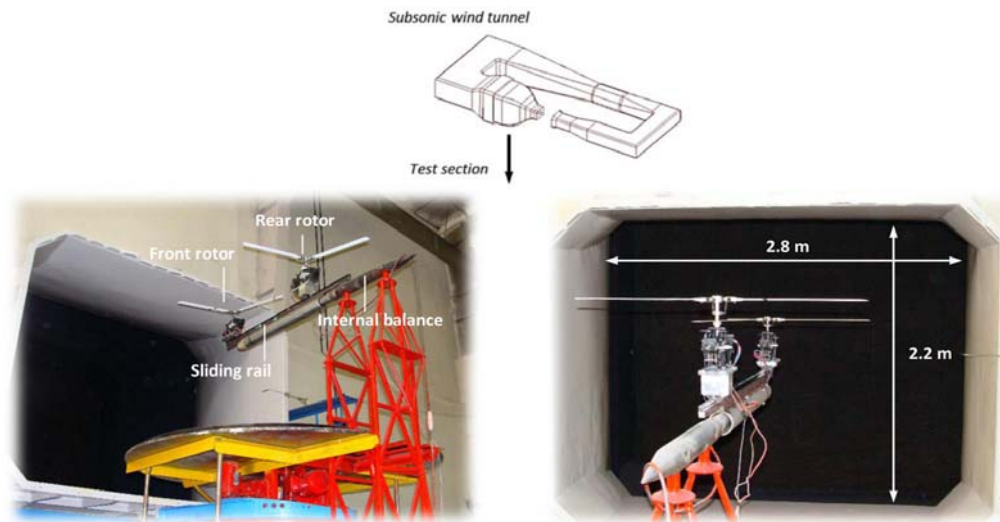


شکل ۱) ضعف دید ایجاد شده در اثر جریان فروزش و برون ریز بالگرد شینوک

در سال ۲۰۱۱، آزمایش‌های تجربی میدان جریان روی یک بالگرد CH-47D و در حالت پرواز ایستایی در ارتفاع معادل ۲۰ پا در شرایط وزش باد محیطی کم، توسط سیلو/ رابرتز انجام شد. این تحقیق بیشتر برای بررسی اثرات میدان جریان برون ریز ملخ‌ها و پتانسیل ایجاد ضربه نیروهای حاصل از آن انجام شد [1]. راماسامی و همکاران، مشخصات جریان فروزش و برون ریز یک بالگرد با ملخ‌های پشت سر هم در حضور اثر زمین را به وسیله مشخص کردن و درک فرآیندهای مشاهده شده در رفتار میدان جریان، تحلیل کردند. آنها برای ساده‌سازی مساله، اثرات بدنه و اثر یک ملخ بر ملخ دیگر را جدا کردند. سرعت‌های میدان جریان در یک صفحه عمودی و در چهار زاویه آیزموس مختلف تا شعاع چهار برابری قطر ملخ‌های پشت سر هم بالگرد مدل، با استفاده از تکنیک سرعت‌سنجی تصاویر ذرات به دست آمد. در این تحقیق با تطابق نواحی میدان جریان‌های فروزش و برون ریز ملخ در محدوده اثر زمین با یک جت سیال پاشش شده به سمت زمین، از فرمول‌های جریان جت برای تحلیل میدان جریان‌های فروزش و برون ریز ملخ استفاده شد. ارتفاع ملخ از سطح زمین، قطر و بارگذاری صفحه ملخ به ترتیب با ارتفاع نازل، قطر و فشار خروجی نازل معادل‌سازی شدند [23]. لی و همکاران، پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که سیستم دو ملخ پشت سر هم با همپوشانی اندک، یک مورد منحصربه‌فرد است. در این سیستم، جریان ناشی از ملخ جلو، جریان شعاعی ملخ عقب را تحت تاثیر قرار می‌دهد و برعکس. در واقع، جریان شعاعی از هر چهار سمت بالگرد ترکیبی از اثرات ناشی از هر دو ملخ است [24]؛ بنابراین کاربرد یک جت برای شبیه‌سازی جریان ناشی از دو ملخ پشت سر هم را زیر سوال می‌برد، زیرا در جت هوا، جت خروجی تحت تاثیر چنین پدیده‌های اندرکنشی نیست. از طرفی پیکره‌بندی دو ملخ پشت سر هم، تشابه

به‌گونه‌ای که تا ۴۰٪ نسبت همپوشانی را در پرواز ایستایی ایجاد نمایند. این آزمایش‌ها در اتاقک آزمون باز یک تونل باد فروصوت مدارسته و خارج از محدوده اثر مجاورت زمین انجام شدند (شکل ۳).

بود. پره‌ها دارای سطح مستطیلی و ایرفویل متقارن NACA0012 بودند و هیچ نوع پیچش و باریک‌شدگی نداشتند. ساختار ملخ‌های مدل به‌گونه‌ای بودند که روی یک ریل طولی نصب شده و می‌توانستند در راستای افقی روی این ریل حرکت نمایند،



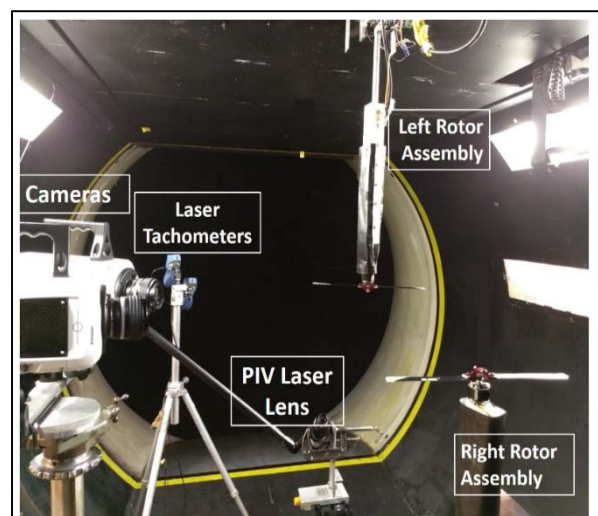
شکل ۳) اتاقک آزمون تونل باد استفاده‌شده در آزمایش‌های انجام‌شده توسط شاهمیری [26]

در سال‌های اخیر، با پیشرفت توانایی‌های پردازش و محاسبات رایانه‌ها و الگوریتم‌های عددی و با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، اطلاعات ارزشمندی درباره عملکرد و محیط آیرودینامیکی بالگردها حاصل شده است [28, 29]. علی‌رغم توانایی‌های روش‌های محاسبات عددی در تصویرکردن کل میدان جریان و محاسبه عملکرد ملخ که قابل مقایسه با داده‌های تجربی هستند [30]، تلاش‌های زیادی برای پیش‌بینی عددی تمام موارد مربوط به این مساله با یک هزینه محاسباتی معقول انجام شده است و همچنان این رویکرد جزو چالش‌های این حوزه است. مدل‌های اغتشاشی دقیق و روش‌های تولید شبکه مناسب‌تری برای تصویرکردن جزئیات جریان فواره‌ای و جریان‌های حلقوی ملخ مورد نیاز هستند؛ زیرا هنوز برخی تفاوت‌ها در نتایج شبیه‌سازی عددی با فیزیک واقعی و غیردائم گردابه‌های نوک پره‌ها، ویژگی‌های آیرودینامیکی پره‌ها و تداخل جریان‌های فروزش و برون‌وزش با بدنه وجود دارند [15, 28].

با بررسی و جمع‌بندی پژوهش‌های تجربی انجام‌شده در مورد بالگردهایی با دو ملخ پشت سر هم و با توجه به اینکه داده‌های محدودی از این نوع پژوهش‌ها منتشر شده است، می‌توان دریافت که هنوز حوزه‌های پژوهشی وجود دارند که در پژوهش‌های قبلی مغفول مانده‌اند یا به‌صورت کامل بررسی نشده‌اند. برخی از آنها عبارت‌اند از:

- در این پژوهش‌ها به‌ندرت از یک بدنه کامل در مدل‌های مورد آزمایش برای بررسی تأثیرات بدنه بر میدان جریان و مشخصات

آیرودینامیک تداخل دنباله بین یک جفت ملخ کوچک پهلو به پهلو در حالت پرواز ایستایی در داخل تونل باد و با استفاده از تکنیک سرعت‌سنجی سه‌بعدی سرعت بالا و بدون حضور بدنه و اثرات آن توسط شوکلا و کومرات بررسی شد. آنها مشاهده نمودند که در اعداد رینولدز کم، کارایی ملخ با کاهش فاصله ملخ‌ها کاهش می‌یابد [27]. همان‌طور که ذکر شد، آزمایش‌های مذکور در داخل تونل باد و بدون در نظر گرفتن اثرات تداخل گردابه‌های نوک پره‌ها با دیواره‌های تونل باد انجام گرفته‌اند (شکل ۴).



شکل ۴) یک جفت ملخ کوچک پهلو به پهلو در حالت پرواز ایستایی در داخل تونل باد [27]

اندازه‌گیری مقادیر سرعت برون ریز و ارایه یک الگوی فیزیکی از آن برای ملخ‌های پشت سر هم بدون همپوشانی و تحلیل خطای مربوط به این اندازه‌گیری‌ها انجام و نتایج آن با یافته‌های پژوهش‌های انجام‌شده قبلی برای ملخ‌های تکی و پشت سر هم همپوشان^[1, 23] مقایسه شده‌اند. سامانه نوآورانه ساخته‌شده برای انجام آزمایش‌ها دارای سه قابلیت همزمان برای اندازه‌گیری توزیع فشار و سرعت، سرعت دوران ملخ‌ها (rpm) و تراست و گشتاور تولیدی ملخ‌ها است؛ بنابراین، اندازه‌گیری سرعت جریان هوای برون ریز در نقاط مختلف زیر ملخ‌ها و بررسی اثر اندرکنش ملخ‌های پشت سر هم بر الگوی جریان برون ریز ملخ‌ها با استفاده از سامانه مذکور انجام شده است.

تئوری و شرح مساله

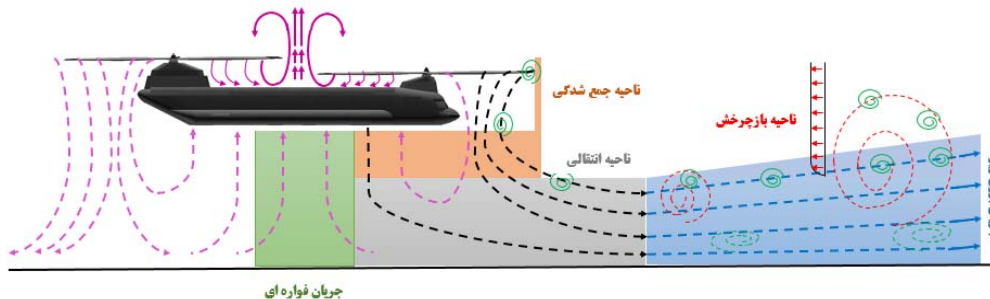
اثر مکشی پره‌های ملخ بر محیط اطراف خود در طول مدت پرواز ایستایی باعث می‌شود تا جریان هوای تقریباً راکد بالا و پیرامون صفحه چرخش ملخ به صورت تدریجی به سرعت‌های بالایی در زیر ملخ برسد. تشکیل گردابه‌ها در نوک پره‌ها به دلیل اختلاف فشار به وجود آمده در سطح بالا و پایین آنها باعث شکل‌گیری مرز جریان حلقوی در دنباله ملخ می‌شود. تشکیل این جریان در حالت پرواز ایستایی، باعث کاهش کارکرد موثر قسمت‌های بیرونی پره‌های ملخ و تاثیر بر نحوه تولید نیروی برای موثر پره بعدی می‌شود. هنگامی که وسیله پرنده در حضور اثر زمین پرواز ایستایی انجام دهد، گردابه‌های نوک پره‌ها در پشت و زیر هر کدام از پره‌ها کشیده شده و در طول خط مرزی و سرعت قابل توجهی منتقل می‌شوند تا با سطح زمین برخورد نمایند. این برخورد شرایط یا تغییر خاصی را به جریان پیرامون ملخ و جریان حلقوی دنباله آن تحمیل می‌نماید. البته مقدار این تاثیرگذاری به بارگذاری ملخ، نسبت منطری پره‌ها و مقدار پیچش آنها بستگی دارند^[32]. اثر مجاورت زمین (Ground Effect) همان قدری که مربوط به شرایط پرواز واقعی است، مربوط به شرایط آزمایش‌های ملخ در تونل باد یا پرواز ایستایی نیز است. در شرایط کارکرد در مجاورت اثر زمین هنگامی که جریان دنباله به سطح زمین نزدیک می‌شود، این جریان به سرعت از حالت محوری (عمودی به سمت زمین) به جهت شعاعی در راستای سطح زمین تغییر جهت می‌دهد و به سمت بیرون دیسک چرخش ملخ گسترده می‌شود (شکل ۵).

آیرودینامیکی آن استفاده شده است؛

- اکثر آزمایش‌ها روی مدل‌ها، در داخل محفظه‌های خاص تونل باد یا به کمک آن انجام شده است، در حالی که جریان‌های برگشتی از دیواره‌های تونل باد اثرات قابل توجهی بر نتایج این آزمایش‌ها در مقایسه با حالت واقعی دارند^[5, 26, 31]؛

- به نوسانات واقعی میدان جریان پیرامون بالگرد دو ملخه در اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی‌ها توجهی نشده است.

لذا با توجه به نتایج حاصل از پژوهش‌های انجام‌شده در خصوص بررسی تجربی ویژگی‌های جریان حول بالگرد با ملخ‌های پشت سر هم و تاثیر پیکره‌بندی بدنه بر آن در پرواز ایستایی، عملکرد این وسایل پرنده در شرایط مذکور همچنان ناشناخته و نیازمند بررسی‌ها و پژوهش‌های جدید است. نیاز است که شبیه‌سازی شرایط جریان آزاد برای ملخ بدون اثرات حضور دیواره‌های تونل باد بر کارکرد آن انجام شود؛ زیرا اثرات دیواره‌های تونل باد در نسبت‌های پیشروی کم و پرواز ایستا منجر به ایجاد بازچرخش در جریان خواهند شد. علی‌رغم استفاده از ابزارهای متعدد برای حذف اثرات لایه مرزی در آزمایش‌های تونل باد، مشاهده شده است که هنوز یک تفاوت و ناهمخوانی در داده‌های عملکرد به دست آمده از این آزمایش‌ها با آزمایش‌های انجام‌شده در هوای آزاد وجود دارد^[10]. دلایلی همچون ملاحظات هزینه‌ای بزرگ بودن اتاقک آزمایش تونل باد، اثرات آشفتگی جریان و محدودیت‌های سرعت پایین جریان با توجه به بزرگ شدن تونل باد، باعث می‌شود تا در پژوهش حاضر راهکار بهتری برای انجام آزمایش‌ها پیشنهاد شود. به نظر می‌رسد که ساخت یک سامانه آزمایش برای بررسی تجربی جریان در نواحی پنج‌گانه جریان اطراف و زیر ملخ‌های پشت سر هم در یک محیط آزاد (خارج از تونل باد) با ابعاد واقعی در ارتفاع‌های مختلف بهترین استراتژی انتخابی باشد. ولی از آنجایی که انجام آزمایش‌های آیرودینامیکی با توجه به پیچیدگی‌ها و ملاحظات هزینه‌ای این کار، تقریباً انجام آن را غیرعملی کرده است، در انجام پژوهش حاضر یک مدل خاص از پیکره پهن‌په‌ای عمود پرواز دو ملخه خاص همراه سامانه آزمایش آن برای انجام یک برنامه تحقیقاتی ساخته شده است. ابتدا روابط مربوط به جریان پیرامون ملخ در پرواز ایستایی بالگرد با استفاده از تئوری اندازه حرکت بیان شده است. سپس با هدف نشان دادن اثر وجود یا عدم وجود همپوشانی بین ملخ‌ها بر مقادیر و الگوی جریان برون ریز،



شکل ۵) نواحی جریان پیرامون ملخ‌های پشت سر هم

با توجه به روابط ۱ و ۲ ارتباط بین سرعت جریان القایی درون ریز (v_i) و سرعت فروزش (ω) با رابطه ۳ بیان می‌شود.

$$v_i = \frac{1}{2} \omega \quad (۳)$$

با استفاده از رابطه ۱ می‌توان نوشت:

$$T = \dot{m}\omega = \dot{m}(2v_i) = 2(\rho Av_i)v_i = 2\rho Av_i^2 \quad (۴)$$

با حل معادله ۴، برای سرعت القایی در صفحه ملخ رابطه ۵ حاصل می‌شود. با توجه به این رابطه، سرعت جریان القایی درون ریز در پرواز ایستایی وابستگی مستقیمی به مقدار بارگذاری ملخ $(\frac{T}{A})$ دارد.

$$v_i = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} = \sqrt{\left(\frac{T}{A}\right) \frac{1}{2\rho}} \quad (۵)$$

کمیت بدون بعد λ_i ، "نسبت جریان القایی درون ریز" در پرواز ایستایی نامیده می‌شود. این نسبت معمولاً یک کمیت ترجیحی برای مقایسه نتایج کارایی ملخ‌های مختلف در پرواز ایستایی است؛ زیرا یک کمیت بدون بعد است. عبارت $R\Omega$ برابر با سرعت نوک ملخ است.

$$v_i = \lambda_i \Omega R \rightarrow \lambda_i = \frac{v_i}{v_{tip}} \quad (۶)$$

از آنجایی که سرعت القایی تابعی از مقدار نیروی بالابرنده، سطح ملخ، سرعت نوک پره و چگالی جریان هوا است، با کاربرد روش بی‌بعدسازی پای پاکینگهام برای آنالیز ابعادی می‌توان نوشت:

$$C_T = \frac{T}{\rho_\infty A v_{tip}^2} = \frac{T}{\rho_\infty A \Omega^2 R^2} \quad (۷)$$

از آنجایی که می‌توان مولفه‌های سرعت را به‌وسیله سرعت نوک پرها بی‌بعد نمود، برای نسبت جریان درون ریز در پرواز ایستایی رابطه ۸ حاصل می‌شود:

$$\lambda_i = \frac{v_i}{\Omega R} = \sqrt{\frac{T}{2\rho A (\Omega R)^2}} = \sqrt{\frac{C_T}{2}} \quad (۸)$$

این رابطه با فرض یک‌بعدی بودن جریان و اینکه جریان درون ریز به‌صورت یکنواخت روی صفحه چرخش ملخ توزیع می‌شود، حاصل شده است. برای یک ملخ با پره‌های مستطیلی، صلبیت آن به‌صورت نسبت سطح پره‌ها نسبت به سطح ملخ بیان می‌شود:

$$\sigma = \frac{\text{سطح پره}}{\text{سطح صفحه چرخش ملخ}} = \frac{A_b}{A} = \frac{N_b c R}{\pi R^2} = \frac{N_b c}{\pi R} \quad (۹)$$

ضریب بارگذاری پره را نیز می‌توان به‌صورت رابطه ۱۰ نوشت.

$$\frac{C_T}{\sigma} = \frac{T}{\rho A (\Omega R^2)} \left(\frac{A}{A_b}\right) = \frac{T}{\rho A_b (\Omega R)^2} \quad (۱۰)$$

چیزمن و بنت، برخی روابط تحلیلی را برای اثر مجاورت زمین به‌دست آوردند [36]. بر اساس نتایج آنها، اثر مجاورت زمین بر نیروی تولیدی ملخ در توان ثابت با رابطه ۱۱ بیان می‌شود.

$$\left[\frac{T}{T_\infty}\right]_{p=const} = \frac{1}{1 - \frac{\left(\frac{R}{4Z}\right)^2}{1 + \left(\frac{h}{\lambda_i}\right)^2}} \quad (۱۱)$$

این رابطه برای محدوده ارتفاعی برابر و بیشتر از شعاع ملخ معتبر است. برای پرواز ایستایی و با صرف‌نظر کردن از هر گونه اثر بارگذاری ملخ، رابطه ۱۱ به‌صورت رابطه ۱۲ ساده می‌شود.

در این وضعیت یک ناحیه لایه مرزی نزدیک سطح و یک ناحیه جریان برشی آزاد در بالای آن وجود دارد که شامل مقادیر قابل توجهی از گردابه‌های باقی‌مانده، گردابه‌های مغشوش با مقیاس‌های مختلف و آشفتگی‌های با مقیاس‌های کوچک‌تر می‌شود [24]. مطالعات و آزمایش‌هایی که تاکنون درباره پیچیدگی‌های میدان جریان پیرامون ملخ‌های پشت سر هم و تاثیر مجاورت زمین بر کارکرد آنها انجام شده است، نشان‌دهنده این است که درک صحیح اثرات و پیچیدگی‌های مذکور نیازمند انجام آزمایش‌های تجربی هستند؛ بنابراین، تجهیزات آزمایش و مطالعات تجربی عنصر اصلی بررسی و توسعه ملخ‌های پشت سر هم و پیکره‌بندی‌های مربوط به آنها است. این آزمایش‌ها، مخصوصاً با شبیه‌سازی محیط آیرودینامیکی، منحصربه‌فرد بوده و به‌صورت ویژه برای رفع نیازهای گفته‌شده طراحی می‌شوند. برای تحلیل جریان برون‌وزش حول دو ملخ پشت سر هم در حضور اثر زمین، این میدان جریان به پنج ناحیه تقسیم‌بندی می‌شود (شکل ۵). تقسیم‌بندی این نواحی بر اساس سازوکارهای متفاوت غالب جریان در هر یک از این نواحی انجام شده است. این نواحی عبارتند از: ناحیه جمع‌شدگی، ناحیه انتقالی، ناحیه برون‌وزش و ناحیه بازچرخش و یک ناحیه جریان نسبتاً ساکن در زیر بالگرد که انتظار می‌رود در آنجا جریانی شبیه به فواره وجود داشته باشد؛ این ناحیه، جریان فواره‌ای نامیده می‌شود [33]. جریان برون‌ریز پایین دست ملخ در سطح زمین به‌طرز آشکاری به تاثیر جریان میانگین ملخ ترکیب‌شده با اثرات تناوبی محلی گردابه‌های نوک پره و ورقه‌های گردابه‌ای بستگی دارد. در ارتفاعات بالاتر ملخ، رشته‌های گردابه‌ای قبل از اینکه به سطح زمین برسند، پخش می‌شوند و در ارتفاع‌های کمتر ملخ، آشفتگی موجود در جت دیواره‌ای در حال توسعه با برش سریع گردابه‌های نوک پره‌ها باعث می‌شود تا نهایتاً این گردابه‌ها تا دو دور بعدی گردش ملخ باقی بمانند [24, 34].

روابط و فرمول‌های ریاضی حاکم بر مساله

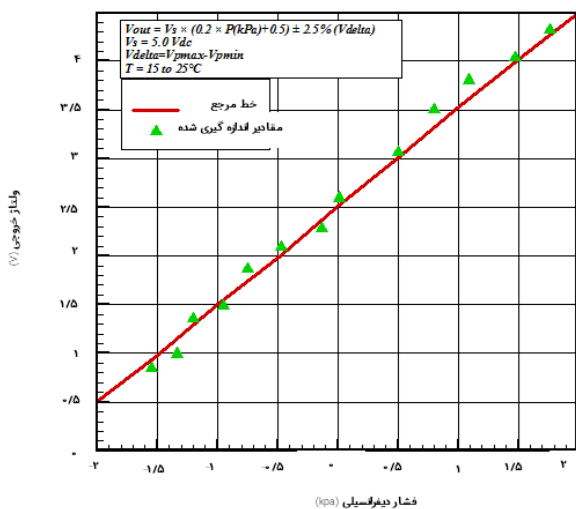
اگر خواص جریان در هر صفحه موازی با صفحه چرخش ملخ ثابت بماند، می‌توان از تئوری اندازه حرکت برای تشریح مساله پرواز در حالت ایستایی استفاده کرد [35]. با استفاده از قانون بقای جرم در داخل مرزهای حجم کنترل دنباله ملخ و با استفاده از رابطه بقای اندازه حرکت، رابطه بین نیروی بالابرنده و آهنگ زمانی خالص اندازه حرکت سیال به خارج از حجم کنترل به‌صورت رابطه ۱ حاصل می‌شود.

$$T = \iint_\infty \rho (\vec{V} \cdot d\vec{s}) \vec{V} = \dot{m}\omega \quad (۱)$$

با توجه به اصل بقای انرژی، کار انجام‌شده در واحد زمان یا توان مصرف‌شده به‌وسیله ملخ (توان القایی) در حالت پرواز ایستایی با رابطه ۲ بیان می‌شود.

$$T v_i = \iint_\infty \frac{1}{2} \rho (\vec{V} \cdot d\vec{s}) \vec{V}^2 = \frac{1}{2} \dot{m}\omega^2 \quad (۲)$$

آنها، خواندن خروجی فشار صفر را تحت تاثیر قرار دهند. بنابراین عملکرد فشارسنج‌ها به گونه‌ای است که دارای سیستم صفر خودکار (Autozero) در داده‌برداری هستند. با استفاده از این امکان، مقدار فشار خوانده‌شده در فشار صفر را در شرایط محیطی قبل از شروع تست و داده‌برداری عملیاتی ذخیره کرده و سپس این مقدار را از مقدار فشار خروجی خوانده‌شده دستگاه حین انجام عملیات داده‌برداری کم می‌کنند. بدون وجود این امکان، خطای داده‌برداری این فشارسنج‌ها تا مقدار بیشینه ۶/۵٪ افزایش خواهد یافت. جابجایی تولیدشده در دیافراگم داخلی این حسگرها که توسط اختلاف فشار دو مجرای ورودی به آن منتقل می‌شوند به ولتاژ تبدیل می‌شود. رابطه ولتاژ- اختلاف فشار این حسگرها خطی است و با داشتن شیب این نمودار و ولتاژ خوانده‌شده مقدار فشار حس شده توسط آنها حاصل می‌شود. قبل از شروع آزمایش‌ها برای به‌دست‌آوردن شیب نمودار ولتاژ- اختلاف فشار حسگرها کالیبره می‌شوند؛ زیرا بر اثر مرور زمان و تغییر دما و رطوبت محیط شیب ولتاژ- فشار دستخوش تغییر می‌شود. فشارهای دمشی (+) و مکشی (-) را برای کالیبره‌کردن تک تک مبدل‌ها تولید کرده و مقادیر آنها توسط فشارسنج دیجیتال دیفرانسیلی بسیار دقیق خوانده شده و از این طریق، داده‌های نمودار ۱ که مربوط به کالیبراسیون فشارسنج‌ها است، به‌دست می‌آید.



نمودار ۱) منحنی کالیبراسیون فشارسنج‌های به‌کاربرده‌شده در آزمایش‌ها

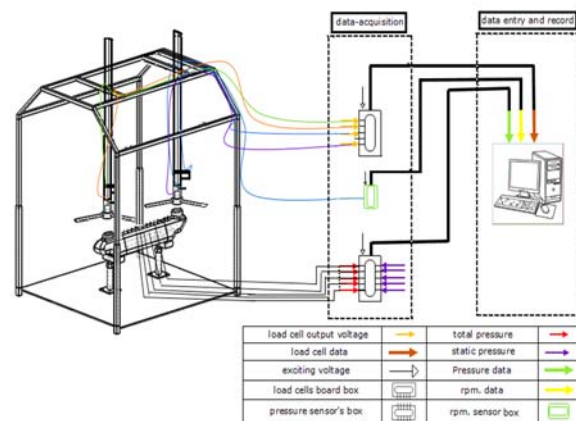
ولتاژ تحریک این مبدل‌ها نیز در این بخش به بوردها وارد می‌شود. یک ولتاژ تحریک دیگر نیز به جعبه تقویت سیگنال حسگرهای نیرو برای کارکرد حسگرهای نیرو و تقویت مقادیر ولتاژ خروجی تحریک آنها داده می‌شود. برای اندازه‌گیری و کنترل سرعت دورانی چرخش موتورها و ملخ‌ها نیز از یک کنترلر مغناطیسی استفاده شده است. در این مکانیزم از یک حسگر تغییر قطب‌های مغناطیسی و یک آهنربا که روی شفت موتور چسبانده شده است، استفاده می‌شود. با هر بار عبور این آهنربا از مقابل حسگر مغناطیسی، تعداد دورهای چرخش موتور با دقت و حساسیت بالا

$$\left[\frac{T}{T_{\infty}} \right]_{P=Const} = \frac{1}{1 - \left(\frac{R}{4Z} \right)^2} \quad (12)$$

با توجه به روابط فوق و مشخصات مدل مورد استفاده در آزمایش‌ها و مقادیر اندازه‌گیری تراست ملخ(ها)، بیشترین اثر مجاورت زمین بر کارکرد آیرودینامیکی ملخ(ها) در ارتفاع‌های کمتر از یک برابر قطر ملخ روی می‌دهد؛ بنابراین آزمایش‌ها در دو وضعیت ارتفاعی ملخ‌ها از زمین که برابر با قطر و نصف آن هستند انجام گرفته‌اند.

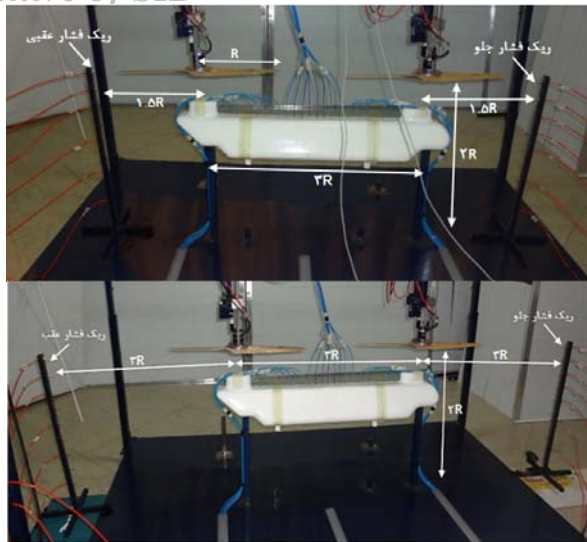
طراحی و ساخت سامانه انجام آزمایش‌ها

سامانه کلی انجام آزمایش‌ها از سه زیرسامانه تشکیل شده است که عبارت‌اند از چهارچوبه اصلی آزمایش، بخش اخذ داده‌ها و بخش ورود و ثبت داده‌ها (شکل ۶). مجموعه موتورها، حسگرهای نیرو، دورسنج مغناطیسی (برای اندازه‌گیری rpm ملخ‌ها) و لوله‌های حسگر فشار در بخش چهارچوبه اصلی آزمایش قرار گرفته‌اند. انتقال جریان الکتریکی به موتورها، حسگرهای نیرو، سرعت دورانی و تولید نیرو توسط ملخ‌ها و ایجاد شرایط مختلف آزمایش‌ها در این بخش انجام می‌شود.



شکل ۶) طرحواره کلی سامانه انجام آزمایش‌ها و ثبت داده‌ها

جعبه‌های بوردهای الکترونیکی حسگرهای فشار، دورسنج حسگرهای نیرو در بخش اخذ داده‌ها قرار دارند. ۱۶ عدد حسگر و مبدل فشار تفاضلی، به‌صورت نصب سطحی روی بوردهای الکترونیکی خاص در داخل جعبه حسگرهای فشار قرار دارند که یک طرف این حسگرها متصل به فشار استاتیک محیط و طرف دیگر آنها به فشار کل محیط پیرامون ملخ‌ها متصل هستند. زمان پاسخگویی به تغییرات فشاری و زمان حاضر به‌کاری (Warm-up) آنها برای داده‌برداری به‌ترتیب ۱ و ۲۰ میلی‌ثانیه هستند. ولتاژ و جریان تحریک به‌ترتیب ۵ ولت و ۱۰ میلی‌آمپر جریان مستقیم بوده و محدوده فشار ۲- تا ۲kpa+ است. خطای اندازه‌گیری این حسگرهای دیفرانسیلی در محدوده دمایی ۱۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد برابر ۲/۵٪ است. به‌دلیل حساسیت بالای این سری از حسگرها، ممکن است فشارهای مکانیکی خارجی و موقعیت و نحوه نصب



شکل ۷) ریک‌ها برای اندازه‌گیری توزیع فشار جریان برون‌ریز^[۵] در جلو و عقب مدل قرار گرفته‌اند

ریک‌ها شامل لوله‌های استیل نازک با قطر خارجی ۲/۵ میلی‌متر و قطر داخلی ۱/۵ میلی‌متر هستند. لوله‌ها در یک ستون چیده شده‌اند و فاصله بین آنها با یکدیگر برابر ۷ سانتی‌متر است. فاصله بین محل‌های نصب لوله‌های استیل چیده شده در یک ستون کاملاً خالی شده‌اند تا جریان به راحتی و بدون اغتشاش از میان آن عبور نماید و سکون و فشار سکون اتفاق نیفتد. هر یک از پیتوت‌ها با استفاده از تیوب‌های پلاستیکی به یک مجرای مبدل فشار دیفرانسیلی متصل شده‌اند. با مد نظر قراردادن برخی محدودیت‌های آمادی و ملاحظات و تجربیات مربوط به آزمایش‌ها، بهینه‌ترین طول و جنس تیوب‌ها انتخاب شدند به گونه‌ای که بهترین ترکیب برای به حداقل رساندن تاخیر زمانی مبدل‌های فشار تا حد امکان حاصل شود.

آزمایش‌ها در دو وضعیت ارتفاعی ملخ‌ها از زمین که برابر با شعاع و دو برابر شعاع آنها هستند، انجام می‌شوند. آزمایش‌ها در مرحله اول برای یک ملخ ایزوله تکی روی بالگرد مدل انجام شده و سپس همین آزمایش با کارکرد همزمان دو ملخ پشت سر هم روی بالگرد مدل انجام می‌شوند.

بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

می‌توان آزمایش‌ها و نتایج حاصل از آنها در این پژوهش را در سه مبحث تغییرات جریان برون‌ریز با تغییر فاصله از ملخ‌ها، اثرات اندرکنش ملخ‌ها و تأثیر حضور اثر زمین بر جریان برون‌ریز و پروفیل‌های سرعت آن تقسیم‌بندی نمود.

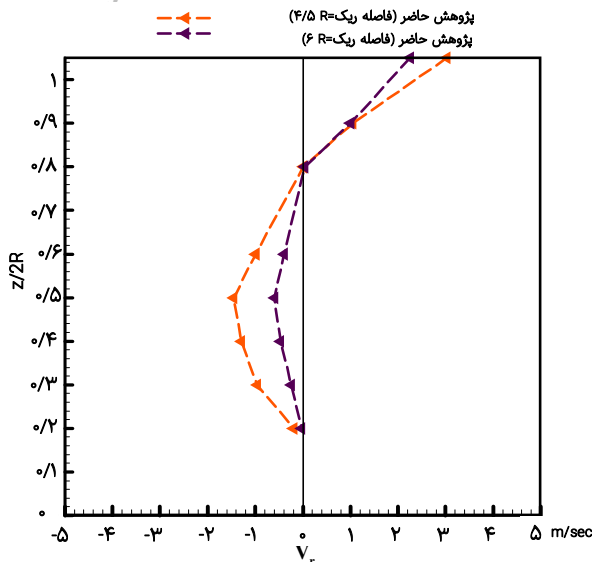
اثر تغییر فاصله از ملخ‌ها و اندرکنش ملخ‌ها بر جریان برون‌ریز

در نمودارهای ۲ و ۳، مقادیر سرعت‌های جریان برون‌ریز در نواحی جلویی و عقبی بالگرد مدل در حالتی نشان داده‌اند که فقط یک ملخ (ملخ جلو) در حال کارکردن است. این اندازه‌گیری‌ها به وسیله ریک‌های نصب شده به ترتیب، در فواصل ۱/۵R و ۳R جلو و ۴/۵R

اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از این حسگر، تعداد دورهای این موتورها تا ۳۷۵۰ دور بر دقیقه نیز اندازه‌گیری شده است. بخش ورود و ثبت داده‌ها نیز از پایانه‌های ویژه انتقال داده‌ها به رایانه و یک دستگاه رایانه به منظور ورود، کنترل و ثبت داده‌های آزمایش (به صورت اعداد) تشکیل شده است. در این بخش قابلیت داده‌برداری و ثبت آنها به صورت همزمان فراهم شده است. رایانه شامل نرم‌افزار داده‌برداری از سنجه‌های عملکردی، با استفاده از پایانه‌های سریال R232 و تبدیل‌های USB، داده‌های مربوط به فشار، نیروی تولیدی ملخ‌ها و سرعت دورانی آنها را از بخش اخذ داده‌ها با سرعت بسیار بالا گرفته و در بازه‌های چند میلی‌ثانیه‌ای آنها را ذخیره می‌نماید. نرم‌افزار دارای سه کانال داده‌گیری برای ثبت داده‌های سنجه‌های عملکردی مذکور را دارد. یک مجرای فشارسنج‌ها به لوله پیتوت اندازه‌گیری فشار استاتیکی محلی نقاط داده‌برداری متصل بوده و سمت دیگر آنها با استفاده از تیوب‌های پنوماتیکی به فشار کل نقاط داده‌برداری متصل هستند. مدت زمان داده‌برداری در هر آزمایش ۳۵ ثانیه است. با توجه به فرکانس داده‌برداری فشارسنج‌ها که ۲۲ هرتز است، در این مدت ۷۷۰ داده در سیستم ثبت داده‌ها ضبط می‌شوند. این آهنگ ثبت داده‌ها برای پوشش‌دادن تغییرات متناوب و غیردائم در میدان جریان القایی درون‌ریز و فروزش مناسب است. البته باید یادآوری نمود که با توجه به فرکانس چرخش ملخ‌ها که برابر ۳۲ هرتز هستند، نمی‌توان ادعا نمود که با استفاده از این سیستم داده‌برداری همه نوسانات در میدان جریان پوشش داده می‌شوند ولی از آنجایی که بر اساس مطالعات قبلی^[۲۴] اثرات غیردائم گردابه‌ها در جریان القایی درون‌ریز و فروزش ملخ‌ها تا سه دور بعدی باقی می‌مانند؛ بنابراین می‌توان انتظار داشت که قسمت عمده‌ای از اثرات نوسانات و پدیده‌های ناپایدار بر مشخصات جریان ثبت شوند. نرم‌افزار داده‌برداری که اختصاصاً برای فشارسنج‌های مذکور تهیه شده است، دارای ۳ کانال داده‌گیری برای ثبت داده‌های پارامترهای عملکردی مذکور است.

آزمایش بررسی جریان برون‌ریز

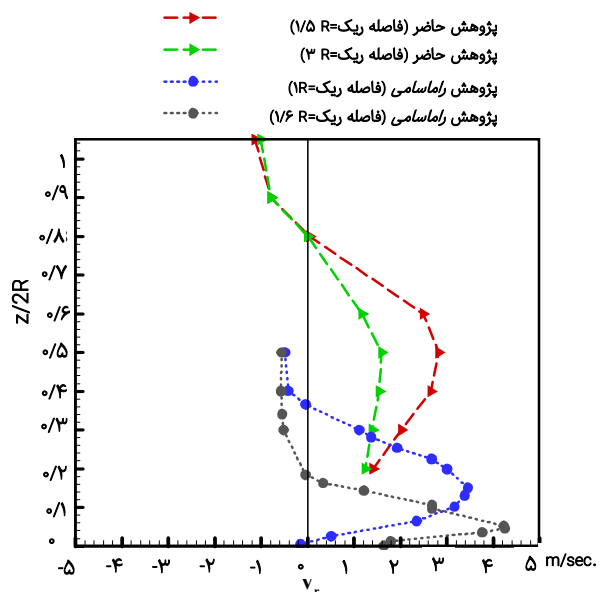
در انجام این آزمایش‌ها از ملخ‌های با گام ثابت ۸ اینچ ساخت شرکت منزپرپاس استفاده شده است. ملخ‌ها هیچ همپوشانی با یکدیگر ندارند. ریک‌ها برای اندازه‌گیری توزیع فشار و سرعت جریان برون‌ریز زیر بدنه بالگرد مدل استفاده می‌شوند و در فاصله‌های طولی مشخص از ملخ جلو و عقب قرار گرفته‌اند (شکل ۷). شعاع ملخ‌ها برابر با ۳/۴۵ متر است. ایرفویل‌ها از نوع NACA0012 بوده و ضریب نیروی تولیدی ملخ (CT)، ضریب ملخ (σ) و ضریب بارگذاری به ترتیب برابر با ۰/۰۰۷۸، ۰/۰۷۲ و ۰/۱ هستند. برای جلوگیری از ظهور اثرات تراکم‌پذیری جریان در نوک پره ملخ‌ها، آزمایش‌ها در سرعت دورانی ۱۹۵۰ دور بر دقیقه و سرعت ۰/۲ ماخ در نوک پره‌ها در پرواز ایستایی انجام شدند.



نمودار ۳) مقادیر سرعت‌های جریان برون ریز در نواحی عقبی بالگرد مدل در حالت کارکرد تک‌ملخ جلو

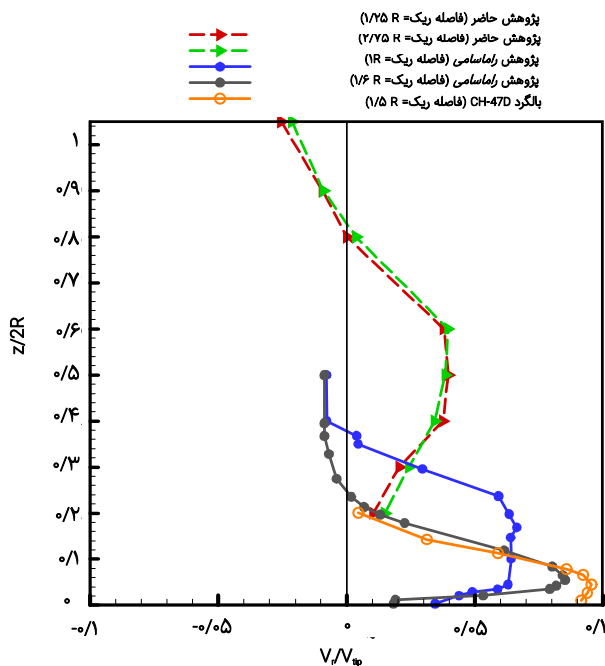
مقادیر متوسط سرعت جریان برون ریز در حالت کارکرد دو ملخ پشت سر هم در ریک‌های جلو و عقب در نمودارهای ۴ و ۵ نمایش داده است. با اضافه شدن کارکرد ملخ دوم به ملخ تنها، به دلیل وجود دو برابری گردابه‌های نوک و ریشه پره‌های دو ملخ و تداخل آیرودینامیکی غیرخطی آنها با یکدیگر، جریان برون ریز ملخ‌های پشت سر هم در مقایسه با ملخ‌های تکی دارای میدان جریان پیچیده‌تری می‌شوند و مشاهده می‌شود که الگوی سرعت جریان درون ریز و فرووزش ملخ‌های پشت سر هم اندکی نسبت به ملخ تکی، عمده جریان در قسمت جلو، دارای سرعت‌های متوسط مثبت و برون ریز است و در ارتفاع‌های بیشتر از $1/6R$ به دلیل بازچرخش جریان به سمت صفحه چرخش ملخ، مقادیر متوسط سرعت منفی و درون ریز است. در این حالت سرعت بیشینه برون ریز در محدوده ارتفاع $0.8R$ تا $1.2R$ روی داده است. بیشتر جریان در قسمت عقب بدنه مدل نیز مثبت و برون ریز است (نمودار ۵). پدیده خاصی که دو نمودار ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، این است که برای ملخ‌های پشت سر هم، افزایش فاصله ریک‌ها از مدل، تاثیر خاصی بر مقادیر متوسط سرعت جریان در ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین ندارد؛ یعنی برخلاف ملخ تکی، تغییرات مقادیر سرعت برون ریز با دور شدن از ملخ‌های پشت سر هم اندک است. علی‌رغم اینکه فاصله ریک‌ها از ملخ جلو و عقب یکسان بوده است، ولی مشاهده می‌شود که با توجه به انتشار نوسانات و همچنین اغتشاشات ناشی از جریان‌های حلقوی لبه فرار پره‌های ملخ جلویی در جریان سمت عقب آنها^[37]، عملکرد آیرودینامیکی ملخ عقبی تحت تاثیر قرار می‌گیرد که در پیکره‌بندی ملخ‌های پشت سر هم، اندرکنش آیرودینامیکی بین دو ملخ بر جریان برون ریز ملخ عقبی تاثیر گذاشته و باعث می‌شود تا رفتار متفاوت جریان در زیر آن نسبت به یک ملخ جلویی اتفاق بیفتد. با توجه به

و $6R$ عقب مدل انجام و ثبت شده‌اند. تأکید می‌شود که محل نصب ریک‌ها در جلو و عقب بدنه بالگرد مدل، نسبت به نقطه وسط طولی آن متقارن هستند (شکل ۷). برای نواحی جلویی و عقبی مدل، مقادیر میانگین سرعت در هر دو فاصله $1/5R$ و $3R$ دارای الگوی یکسان هستند و جهت‌گیری برآیند کلی جریان، به سمت بیرون و در حال دور شدن از بالگرد است. در هر دو حالت بیشینه سرعت جریان برون ریز در ارتفاعی از سطح زمین که برابر با شعاع ملخ است، رخ داده است. با توجه به قراردادن بدنه کامل در آزمایش‌ها، فاصله ریک‌های عقبی تا ملخ تکی جلو بیشتر از فاصله ریک‌های جلویی هستند؛ بنابراین مشاهده می‌شود که مقادیر میانگین سرعت در ناحیه عقبی، کمتر از مقادیر سرعت جلوی ملخ هستند. در مناطق بالاتر از $1/6R$ تمام مقادیر سرعت منفی می‌شوند. می‌توان گفت که در مناطق بالاتر از $1/6R$ ، بازچرخش جریان رخ داده و به علت اثر مکشی ملخ در این نواحی برای ایجاد جریان القایی فرووزش، جریان به صورت درون ریز و به سمت صفحه چرخش ملخ است. با توجه به این نمودارها، مشاهده شد که با افزایش فاصله ریک‌های جلویی و عقبی و با دور شدن از ملخ‌ها، مقادیر سرعت جریان برون ریز کاهش می‌یابند. با مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده در این آزمایش‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط راماسامی و همکاران^[23] در نواحی جلویی یک ملخ تکی با سرعت دوران 3040 دور بر دقیقه، مشاهده می‌شود که الگوهای جریان برون ریز حاصل از هر دو پژوهش تقریباً یکسان هستند ولی دارای مقادیر عددی متفاوتی هستند. اثرات ناشی از تفاوت در تعداد پره‌ها، زاویه حمله، پیچش ساختاری و صلبیت ملخ‌ها و اثرات دیواره‌ای محفظه به کاررفته در آزمایش‌های راماسامی از دلایل اصلی این اختلاف در مقادیر هستند. آزمایش‌های انجام شده توسط راماسامی محدود به ارتفاع‌های کمتر از شعاع ملخ و نواحی جلویی ملخ تکی هستند.

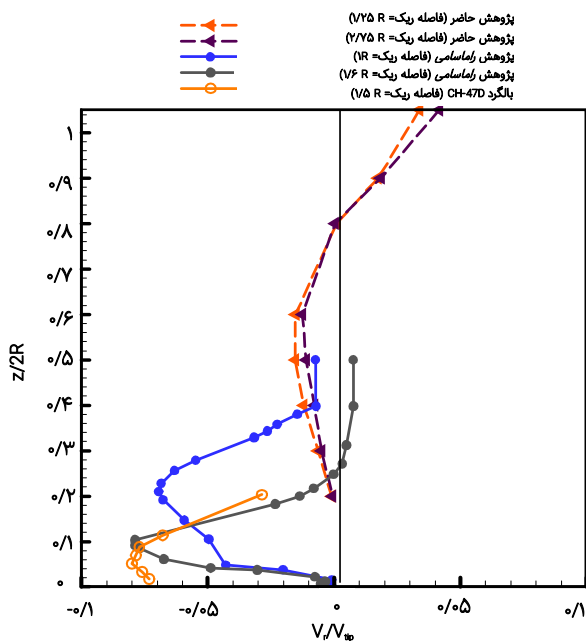


نمودار ۴) مقادیر سرعت‌های جریان برون ریز در نواحی جلویی بالگرد مدل در حالت کارکرد تک‌ملخ جلو

شعاعی دورشونده از وسیله پرنده در امتداد محورهای طولی تحت تاثیر جریان‌ها و گردابه‌های القایی حاصل از دو ملخ و جریان فواره‌ای بین دو ملخ قرار می‌گیرند.



نمودار ۴) مقایسه مقادیر سرعت‌های جریان برون‌ریز در نواحی جلویی بالگرد مدل در حالت کارکرد دو ملخ پشت سر هم



نمودار ۵) مقایسه مقادیر سرعت‌های جریان برون‌ریز در نواحی عقبی بالگرد مدل در حالت کارکرد دو ملخ پشت سر هم

از آنجایی که اندازه‌گیری‌های مقادیر سرعت در فواصل زمانی بسیار کم و در حد میلی‌ثانیه ثبت شده‌اند، در آزمایش‌ها مشاهده شد که

توضیحات مذکور، می‌توان گفت که انتشار اغتشاشات و انحراف بیشتر جریان در ناحیه عقب و زیر ملخ اتفاق می‌افتد، به همین دلیل ملخ جلویی به دلیل موقعیت طولی خود کمتر تحت تاثیر تغییرات جریان آزاد قرار می‌گیرد. مقادیر اندازه‌گیری‌شده در این پژوهش با نتایج حاصل از اندازه‌گیری جریان برون‌ریز یک بالگرد مقیاس واقعی CH-47D [1] و نتایج حاصل از پژوهش راماسامی در مورد ملخ‌های همپوشان مقایسه شده‌اند [25]. برای انجام مقایسه‌ها، سرعت برون‌ریز نسبت به سرعت نوک پره ملخ‌ها بی‌بعد شدند (نمودارهای ۴ و ۵).

در این حالت مشاهده می‌شود که الگوهای جریان برون‌ریز حاصل، تقریباً یکسان هستند ولی دارای مقادیر عددی متفاوتی هستند. اثرات ناشی از تفاوت در میزان همپوشانی ملخ‌ها، اندرکنش آیرودینامیکی ملخ و بدنه، تعداد پره‌ها، زاویه حمله، پیچش ساختاری و صلبیت ملخ‌ها و اثرات دیواره‌ای متفاوت در آزمایش‌های راماسامی از دلایل اصلی این اختلاف در مقادیر هستند. با توجه به فاصله یکسان قرارگیری ریک‌ها نسبت به ملخ‌ها در پژوهش حاضر و آزمایش‌های انجام‌شده برای بالگرد CH-47D، مقایسه نتایج با یکدیگر نشان‌دهنده این است که وجود همپوشانی بین ملخ‌ها در بالگرد CH-47D باعث بیشتر شدن سرعت جریان برون‌ریز نسبت به ملخ‌های بدون همپوشانی شده است. گزارش نتایج آزمایش‌های انجام‌شده برای بالگرد CH-47D محدود به ارتفاع‌های کمتر از ۰/۴ شعاع ملخ آن بوده است. از طرف دیگر، بدنه مدل به‌کاررفته در آزمایش‌های راماسامی بسیار ساده و شامل دو پوسته طولی بود که به همدیگر متصل شده بودند. به علت نحوه نصب بدنه مدل بر سیستم تعادلی لودسل‌ها، قسمت عمده جریان زیر بدنه مختل شده بوده است (شکل ۳)، در حالی که در شرایط پرواز ایستایی واقعی قسمت عمده‌ای از جریان القایی و برون‌ریز به زیر بدنه نفوذ می‌نماید و باید در بررسی‌های مربوط به وجود این جریان توجه نمود.

در پژوهش حاضر در سامانه انجام آزمایش‌ها از یک صفحه فلزی صاف به ابعاد ۱/۸×۲/۴ متر به‌عنوان سطح مرجع زمین استفاده شده است. شرایط سطح زمین، مرجع آزمایش‌ها و مشخصات لایه مرزی تشکیل‌شده نیز از عوامل تاثیرگذار بر پروفایل سرعت برون‌ریز و اختلاف مقادیر آنهاست.

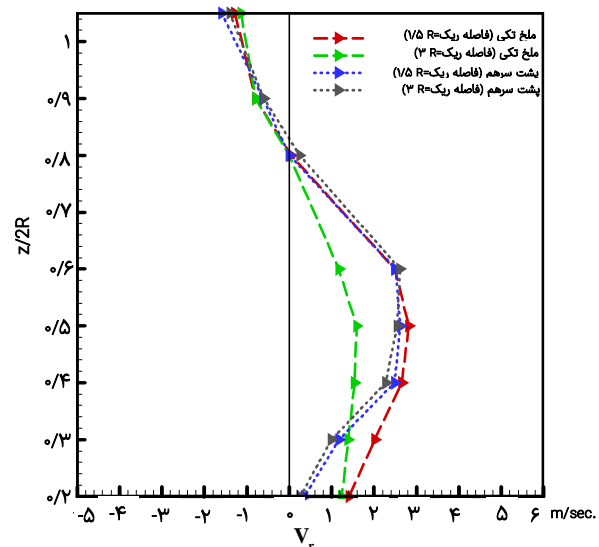
مقایسه مقادیر متوسط سرعت جریان برون‌ریز در حالت کارکرد یک ملخ تکی و دو ملخ پشت سر هم در ریک‌های جلو و عقب در نمودارهای ۶ و ۷ نمایش داده شده‌اند. با اضافه‌شدن کارکرد ملخ دوم، الگوی سرعت جریان برون‌ریز ملخ‌های پشت سر هم اندکی نسبت به ملخ تکی تغییر می‌کند. مشاهده می‌شود که نحوه رفتار و مقادیر جریان در نواحی جلویی و عقبی بالگرد مدل با یک ملخ اندکی متفاوت‌تر از مدل جریان برای دو ملخ پشت سر هم است. برخلاف ملخ تکی، جریان در نواحی برون‌ریز در اطراف پیکره‌بندی‌های دو ملخ پشت سر هم، متقارن نیست؛ زیرا جریان

با توجه به افزایش جریان نزولی القایی ملخ‌های پشت سر هم نسبت به ملخ تکی، تاثیر ناشی از آشفتگی جریان و گردابه‌ها بر سرعت متوسط کاهش می‌یابد و تغییر فاصله ریک‌ها از ملخ‌ها تاثیر محسوسی بر سرعت جریان ندارند. مقادیر متوسط سرعت در ارتفاع‌های بالاتر از $1/6R$ و بالای صفحه چرخش ملخ منفی هستند که دلیل این رویداد همان‌طور که قبلاً گفته شد، رخداد بازچرخش جریان در اثر جفت‌شدگی گردابه‌های دنباله و گردایان معکوس فشار و وجود جریان برگشتی در این ناحیه است. با توجه به این نتایج می‌توان مدل مفهومی نشان‌داده‌شده در شکل ۵ را ارایه نمود. لازم به ذکر است که وجود جریان بازگشتی در نواحی بالا و پایین نزدیک صفحه چرخش ملخ در پژوهش *راماسامی* و با استفاده از مدل یک جت پاششی نیز عنوان شده بود^[23] ولی اندازه‌گیری‌های تجربی در این مورد انجام نگرفته بوده است.

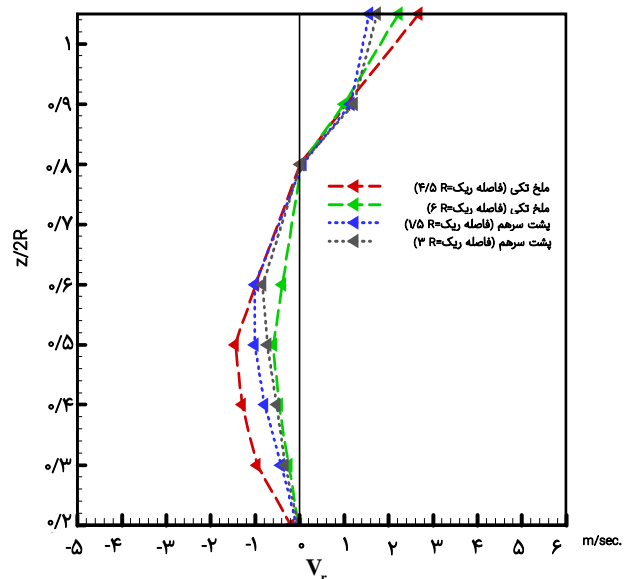
تاثیر حضور اثر زمین بر جریان برون ریز

برای بررسی اثر ارتفاع ملخ(ها) از سطح زمین و تغییر اثر مجاورت زمین بر جریان برون ریز آنها، مقادیر اندازه‌گیری شده سرعت‌های متوسط جریان در دو ارتفاع مختلف $2R$ و R (برابر و نصف قطر ملخ) با همدیگر مقایسه می‌شدند. با توجه به نمودارهای ۸ و ۹، با کاهش ارتفاع ملخ تکی به نصف مقدار قطر ملخ، الگو و مقادیر جریان در نواحی جلویی و عقبی بالگرد مدل تغییر می‌کند. این موضوع در نمودارهای ۱۰ و ۱۱ برای ملخ‌های پشت سر هم نیز رویت می‌شود. بر اساس مدل ارایه‌شده در مرجع^[24]، هنگام کارکرد ملخ در ارتفاع برابر با نصف قطر ملخ، گردابه‌های نوک ملخ بلافاصله پس از ایجاد با سطح زمین برخورد نموده و کشیده می‌شوند و با دورشدن جریان از ملخ، از قدرت انتشار و اثر کاهندگی آنها کاسته می‌شود. به همین دلیل، برخلاف کارکرد ملخ در ارتفاع $2R$ ، با افزایش اثر زمین همراه با دورشدن جریان برون‌وزش از ملخ، سرعت آن افزایش می‌یابد. *راماسامی* و همکاران، نیز با استفاده از تکنیک سرعت‌سنجی ذرات (PIV) به این نتیجه رسیده بودند که کاهش ارتفاع ملخ از سطح زمین باعث افزایش سرعت جریان برون ریز در همه زوایای آزیموس می‌شود^[23]. پس از کاهش ارتفاع ملخ(ها) مشاهده می‌شود که تقریباً در همه حالت‌های ملخ‌های پشت سر هم جریان در ناحیه ارتفاعی کمتر از $1/6R$ در نواحی جلو و عقب بالگرد مدل منفی و درون ریز است؛ زیرا گردابه‌های دنباله در برخورد و نزدیکی با سطح زمین، اثر دورانی خودشان را هنگام برخورد با جریان در حال توسعه روی زمین حفظ کرده و اثر بازچرخشی آنها باعث منفی شدن و درون‌ریزی جریان برآیند در این ناحیه می‌شود. در این حالت نیز بازچرخش جریان و جریان برگشتی باعث می‌شود تا مقادیر متوسط سرعت در ارتفاع‌های بالاتر از صفحه چرخش ملخ درون ریز شوند. به علت وجود اثرات گردابه‌ای قوی‌تر در ارتفاع‌های پایین‌تر و نزدیک سطح زمین، درون‌ریز بودن جریان ناحیه بالای ملخ ($z > R$) با آهنگ بیشتری اتفاق می‌افتد.

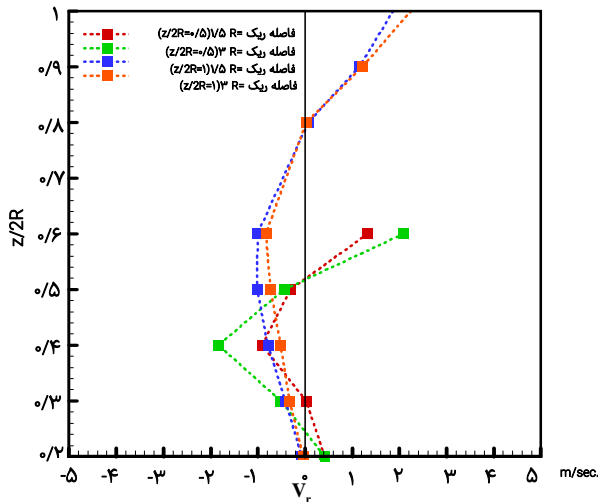
علی‌رغم ثبت برخی مقادیر منفی سرعت در این نواحی، برهم‌نهی مقادیر مثبت سرعت با آنها باعث شده است تا مقدار متوسط سرعت برآیند در مناطق زیر ارتفاع $1/6R$ مثبت شود. با دورشدن جریان از ملخ تکی، آشفتگی در جت دیواره‌ای و گردابه‌های تقویت‌شونده جریان در نزدیک سطح زمین^[24] و اثر کاهنده آنها بر مقدار سرعت متوسط جریان اتفاق می‌افتد و به همین دلیل در نمودار ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که با زیادشدن فاصله ریک از ملخ، مقادیر متوسط سرعت جریان نیز کمتر می‌شوند؛ ولی مشاهدات و اندازه‌گیری‌ها در آزمایش‌ها نشان‌دهنده این است که شبیه این رفتار برای دو ملخ پشت سر هم اتفاق نمی‌افتد.



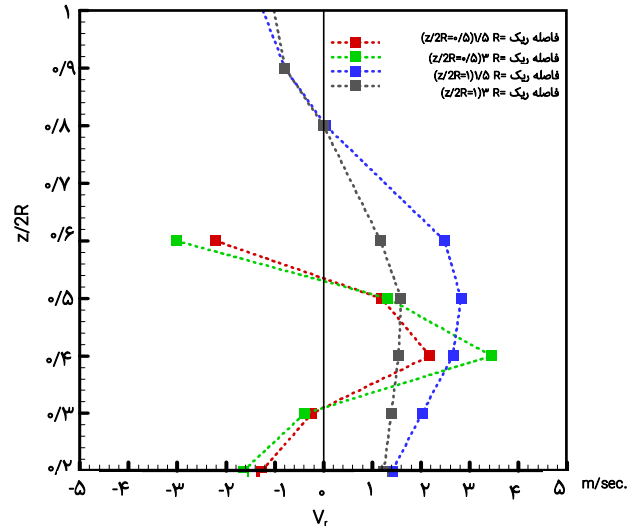
نمودار ۶) مقایسه مقادیر سرعت‌های جریان برون ریز در نواحی جلویی بالگرد مدل در حالت کارکرد ملخ تکی و دو ملخ پشت سر هم



نمودار ۷) مقایسه مقادیر سرعت‌های جریان برون ریز در نواحی عقبی بالگرد مدل در حالت کارکرد ملخ تکی و دو ملخ پشت سر هم

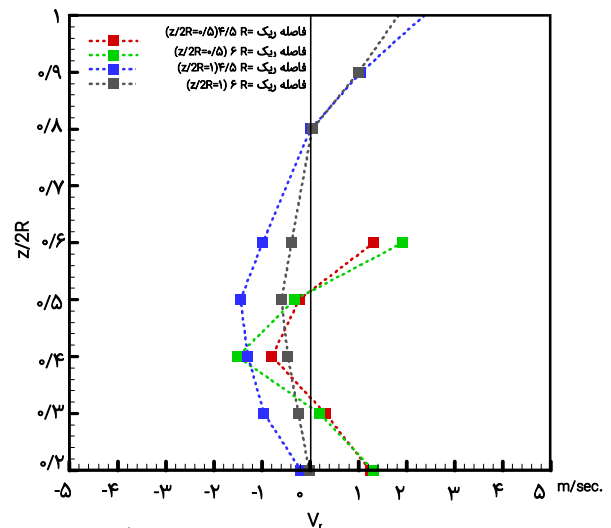


نمودار (۱۱) مقادیر سرعت‌های جریان برون‌ریز در نواحی عقبی بالگرد مدل در دو ارتفاع مختلف ملخ‌های پشت سر هم ($z=2R$ و $z=R$)

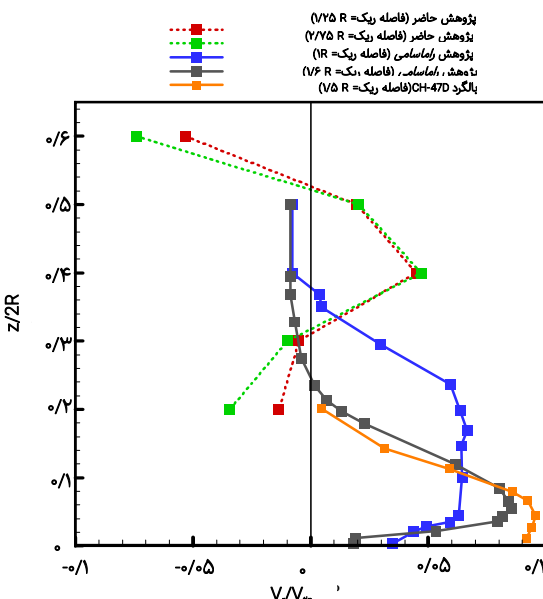


نمودار (۸) مقادیر سرعت‌های جریان برون‌ریز در نواحی جلویی بالگرد مدل در دو ارتفاع مختلف ملخ تکی ($z=2R$ و $z=R$)

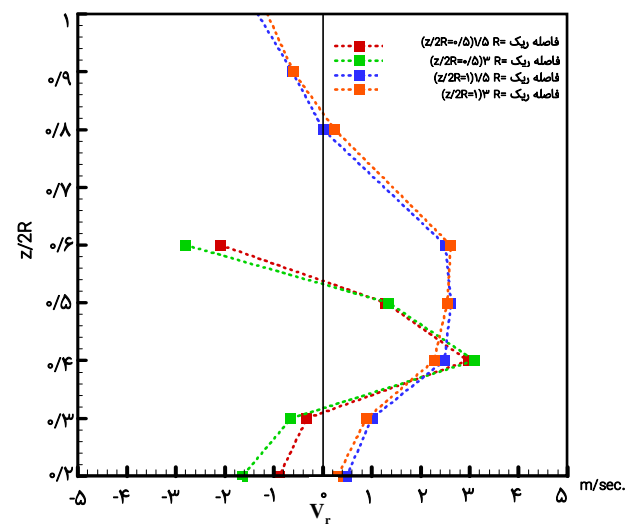
الگوی سرعت جریان برون‌ریز هنگام کارکرد ملخ‌های پشت سر هم در ارتفاع برابر با شعاع ملخ نیز با نتایج حاصل از اندازه‌گیری جریان برون‌ریز یک بالگرد مقیاس واقعی CH-47D [1] و نتایج حاصل از پژوهش راماسامی در مورد ملخ‌های همپوشان در نمودارهای ۱۲ و ۱۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند [25]. مشاهده می‌شود که الگوهای کلی جریان برون‌ریز در ناحیه توسعه‌یافته آن شبیه هستند ولی در مقدار با یکدیگر متفاوت هستند. با توجه به این نمودارها و مقایسه‌های قبلی انجام‌شده در نمودارهای ۴ و ۵، یک ارتفاع کارکردی منحصربه‌فردی برای هر نوع ملخ در مجاورت زمین وجود دارد که مقدار میانگین سرعت برون‌ریز در آن ارتفاع، بیشینه مقدار است. در تمام الگوهای ارایه‌شده نیز پروفایل سرعت برون‌ریز متاثر از وجود لایه مرزی در نزدیک سطح زمین و میزان ضخامت آن بوده و سرعت در مجاورت سطح زمین بسیار کم و با فاصله‌گرفتن از آن افزایش یافته است.



نمودار (۹) مقادیر سرعت‌های جریان برون‌ریز در نواحی جلویی بالگرد مدل در دو ارتفاع مختلف ملخ تکی ($z=2R$ و $z=R$)



نمودار (۱۲) مقایسه مقادیر سرعت‌های جریان برون‌ریز در نواحی جلویی ملخ‌های پشت سر هم در ارتفاع $z=R$

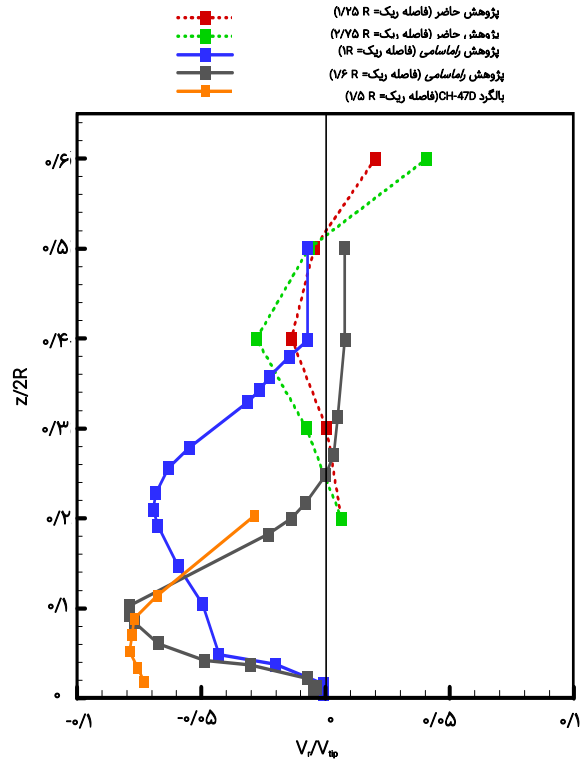


نمودار (۱۰) مقادیر سرعت‌های جریان برون‌ریز در نواحی جلویی بالگرد مدل در دو ارتفاع مختلف ملخ‌های پشت سر هم ($z=2R$ و $z=R$)

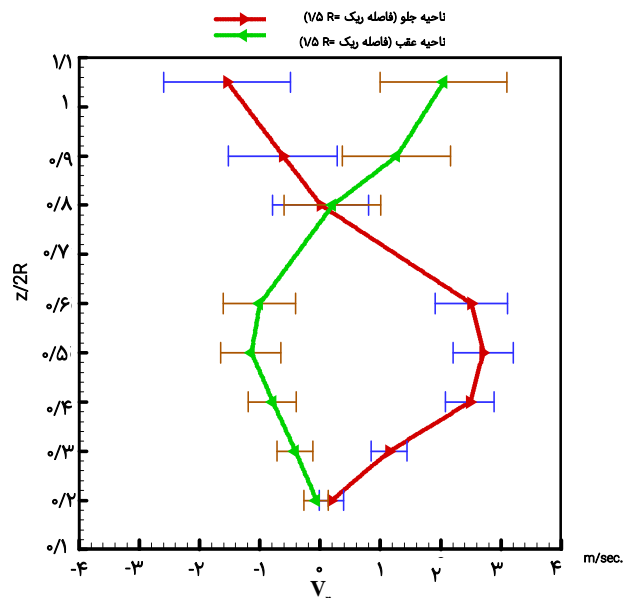
در نظر گرفته شده، در قالب یک جدول بیان می‌شود. با محاسبه میانگین و انحراف معیار مقادیر فشار نشان داده شده توسط شاخه‌های ریک در ارتفاع‌های مختلف، و با در نظر گرفتن بازه اعتماد ۹۵٪، متوسط میزان عدم قطعیت در نتایج کنونی $\pm 5/6\%$ محاسبه شده است. به بیان دیگر، چنانچه آزمایش‌ها در شرایط یکسان تکرار شوند، به احتمال ۹۵٪ نتایج جدید به‌طور متوسط $\pm 5/6\%$ با نتایج ارائه شده در مقاله متفاوت خواهند بود. نمودار ۱۴ عدم قطعیت در اندازه‌گیری مقادیر سرعت برون ریز را به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد. عواملی مانند اختلال ایجاد شده توسط کارکرد حسگرها بر یکدیگر (مخصوصاً فشارسنج‌ها)، خطای پایانه‌های انتقال داده‌ها، اُفت اصطکاکی ناشی از طول تیوب‌های پنوماتیکی و نوسانات ایجاد شده در اثر چرخش ملخ‌ها به‌عنوان عوامل این عدم قطعیت در نتایج ارزیابی می‌شوند.

نتیجه‌گیری

ساخت دستگاه آزمایشگاهی چندمنظوره هوشمند همراه یک بالگرد مدل و انجام آزمایش‌ها در حضور اثر زمین و در ارتفاعات مختلف که قسمتی از برنامه آزمایش‌های توسعه‌ای بالگردها با ملخ‌های پشت سر هم هستند، در این پژوهش‌ها انجام شد. ملخ (ها) روی یک بدنه مدل کوچک شده با پیکره‌بندی ملخ‌های پشت سر هم کار می‌کنند. آزمایش‌ها در دو فاصله $1/5R$ و $3R$ ریک‌های اندازه‌گیری جریان از ملخ (ها) و ارتفاع ملخ‌ها در R و $2R$ و با سرعت دوران 1950° دور بر دقیقه انجام شدند. هدف اصلی از انجام پژوهش به‌دست آوردن الگوی کلی و داده‌ها در مورد جریان برون ریز ملخ‌های پشت سر هم در حضور زمین است که ضمن مقایسه آنها با نتایج مشابه و اندک گذشته بتوان از آنها در آینده برای اعتبارسنجی روش‌های عددی نیز استفاده نمود. برخلاف آزمایش‌های انجام شده در تونل باد، این آزمایش‌ها در یک محیط باز و با اثرات دیواره‌ای کمتر انجام شدند. نتایج به‌دست آمده نشان دادند که برای یک ملخ تکی، هنگامی که جریان از بدنه مدل دورتر می‌شود، به‌علت کشیدگی گردابه‌ها و کاهش اثر کاهنده آنها، سرعت‌های جریان برون ریز کاهش می‌یابند و برعکس. افزایش جریان نزولی القایی ملخ‌های پشت سر هم نسبت به ملخ تکی باعث کاهش تاثیر ناشی از آشفتگی جریان و گردابه‌ها بر سرعت متوسط می‌شود، ولی برای ارتفاع‌های مختلف ملخ‌های پشت سر هم، افزایش فاصله ریک‌ها از $1/5R$ به $3R$ در یک ارتفاع ثابت، ملخ‌ها تاثیر خاصی بر مقادیر میانگین سرعت نداشتند. مشاهده شد که برخلاف ملخ تکی، جریان در نواحی برون ریز در اطراف پیکره‌بندی‌های دو ملخ پشت سر هم، متقارن نیست؛ زیرا جریان شعاعی دورشونده از وسیله پرنده در امتداد محورهای طولی تحت تاثیر جریان‌ها و گردابه‌های القایی حاصل از دو ملخ و جریان فواره‌ای بین دو ملخ قرار می‌گیرد. بازچرخش جریان و وجود جریان برگشتی در ارتفاع‌های بالاتر از $1/6R$ و بالای صفحه چرخش ملخ باعث شد تا در این ناحیه جریان درون ریز باشد. مقایسه نتایج این



نمودار ۱۳ مقایسه مقادیر سرعت‌های جریان برون ریز در نواحی عقبی ملخ‌های پشت سر هم در ارتفاع $z = R$



نمودار ۱۴ منحنی میزان عدم قطعیت در اندازه‌گیری مقادیر سرعت برون ریز برای ملخ‌های پشت سر هم

عدم قطعیت نتایج

عدم قطعیت نتایج، شاخصی برای بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها است. برای اندازه‌گیری عدم قطعیت در این پژوهش، برخی از تست‌ها در پنج نوبت تکرار شده‌اند. عدم قطعیت نتایج (طبق تعریف)، حاصل ضرب انحراف معیار در مقداری موسوم به t -Distribution است که بسته به تعداد مشاهدات و بازه اطمینان

علامت یونانی

λ	نسبت جریان القایی درون ریز
v	سرعت (m/sec)
ρ	چگالی (kg/m^3)
μ	لزجت (N.s/m^2)
ω	سرعت جریان فروزش (m/sec)
σ	صلبیت ملخ
Ω	سرعت دورانی زاویه‌ای (rev/min)

زیرنویس

b	پره
i	جریان القایی
s	استاتیکی
T	تراست
t	کل
tip	نوک ملخ
∞	محیط آزاد

منابع

- 1- Silva MJ, Riser R. CH-47D tandem rotor outwash survey. American Helicopter Society 67th Annual Forum 3-5 May 2011, Virginia Beach, USA. Virginia: American Helicopter Society International; 2011. pp. 447-481.
- 2- Stepniewski W, Sloan L. Experimental investigation of PV-14 overlap Part I-downwash distribution. Unknown city: Piasecki Helicopter Corp; 1948.
- 3- Stepniewski WZ. Rotary-wing aerodynamics: Basic theories of rotor aerodynamics [Report]. Washington: NASA; 1979. Report No: CR-3082. Contract No: 7007.
- 4- Stepniewski WZ, Keys CN. Rotary-wing aerodynamics. Chelmsford: Courier Corporation; 1984.
- 5- Squire HB, Fail RA, Eyre RC. Wind Tunnel Tests on a 12-ft diameter helicopter rotor. HM Stationery Office; London, 1953.
- 6- Sweet GE, Jenkins JL. Results of wind-tunnel measurements on a helicopter rotor operating at extreme thrust coefficients and high-tip-speed ratios. Journal of the American Helicopter Society. 1963;1;8(3):4-9.
- 7- Dingeldein RC. Wind tunnel studies of the performance of multicopter configurations [Report]. Washington: NASA; 1954. Report No: TN-3236.
- 8- Harris FD. Twin rotor hover performance. Journal of the American Helicopter Society. 1999;44(1):34-37.
- 9- Wadcock AJ, Ewing LA, Solis E, Potsdam M, Rajagopalan G. Rotorcraft downwash flow field study to understand the aerodynamics of helicopter brownout. American Helicopter Society Southwest Region Technical Specialists' Meeting, Technologies for the Next Generation of Vertical Lift Aircraft, October 15-17, 2008, Dallas-Fort Worth, TX. Unknown City: Unknown Publisher; 2008.
- 10- Mylapore AR, Schmitz FH. An experimental investigation of ground effect on a quad tilt rotor in hover. Journal of the American Helicopter Society. 2015;60(1):1-4.
- 11- Felker FF, Light JS. Aerodynamic interactions between a rotor and wing in hover. Journal of the American Helicopter Society. 1988;33(2):53-61.
- 12- Phillips C, Brown RE. Eulerian simulation of the fluid dynamics of helicopter brownout. Journal of Aircraft. 2009;46(4):1416-1429.

پژوهش برای ملخ‌های غیرهمپوشان با اندازه‌گیری‌های جریان برون‌ریز یک بالگرد مقیاس واقعی CH-47D و نتایج حاصل از پژوهش راماسامی در مورد ملخ‌های مدل همپوشان نشان داد که الگوهای جریان برون‌ریز حاصل تقریباً یکسان هستند ولی وجود همپوشانی بین ملخ‌ها باعث افزایش مقادیر سرعت و رخداد سرعت بیشینه جریان برون‌ریز در ارتفاع‌های پایین‌تر ملخ می‌شود. از طرفی، عدم وجود همپوشانی بین ملخ‌های پشت سر هم، باعث می‌شود تا الگوی جریان برون‌ریز هر کدام از آنها شبیه به الگوی جریان برون‌ریز یک ملخ تکی باشد. با کاهش ارتفاع کارکرد ملخ‌ها از ۲R به R، کشیدگی گردابه‌های نوک ملخ بلافاصله پس از ایجاد و برخورد با سطح زمین از قدرت انتشار و اثر کاهندگی آنها کم می‌کند، به همین دلیل برخلاف کارکرد ملخ در ارتفاع ۲R، با افزایش اثر زمین همراه با دور شدن جریان برون‌ریز از ملخ، سرعت آن افزایش می‌یابد.

مجموعه رویدادهای تجربه‌شده در این پژوهش نشان‌دهنده تفاوت الگوهای جریان برون‌ریز ملخ‌ها با تغییر مقدار همپوشانی است؛ بنابراین نیاز است تا در طراحی و کارکرد پهپادهای عمودپرواز دو ملخ و بالگردها، به این تفاوت‌ها و تغییر رفتارها توجه شود. می‌توان از نتایج این تحقیق و توسعه آنها برای مشخص نمودن الگوی جریان برون‌ریز ملخ‌ها و شرایط و محدوده ایمن برای کارکنان زمینی هنگام کارکرد این پرنده‌ها و پیش‌بینی‌های لازم برای تعیین وضعیت فرود وسیله پرنده در شرایط کاهش دید ناشی از جریان‌های برون‌ریز ملخ‌ها استفاده نمود.

تشکر و قدردانی: به این وسیله از حمایت‌های انجام‌شده در طراحی و ساخت سامانه و انجام آزمایش‌ها تشکر و قدردانی می‌شود.
تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.
سهم نویسندگان: علی مهرابی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪) و علیرضا داوری (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰٪).
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

علامت

A	مساحت (m^2)
c	طول وتر (m)
C_T	ضریب تراست
M	ماخ
\dot{m}	دبی جرمی (kg/sec)
N	تعداد
P	فشار (N/m^2)
R	شعاع ملخ (m)
rpm	دور بر دقیقه (rev/min)
T	نیروی بالابرنده؛ تراست (N)
V	سرعت (m/sec)
x	فاصله طولی (m)
z	ارتفاع از سطح زمین (m)

- 24- Lee TE, Leishman JG, Ramasamy M. Fluid dynamics of interacting blade tip vortices with a ground plane. *Journal of the American Helicopter Society*. 2010;55(2):22005.
- 25- Tan JF, Sun YM, Barakos GN. Vortex approach for downwash and outwash of tandem rotors in ground effect. *Journal of Aircraft*. 2018;6(55):2491-2509.
- 26- Shahmiri F. Experimental investigation of the hovering performance of a twin-rotor test model. *Journal of Aerospace Science and Technology*. 2013;10(2):1-7.
- 27- Shukla D, Komerath N. Multicopter drone aerodynamic interaction investigation. *Drones*. 2018;4(2):43.
- 28- You Y, Na D, Jung SN. Improved rotor aeromechanics predictions using a fluid structure interaction approach. *Aerospace Science and Technology*. 2018;73:118-128.
- 29- Tan JF, Wang HW. Simulating unsteady aerodynamics of helicopter rotor with panel/viscous vortex particle method. *Aerospace Science and Technology*. 2013;30(1):255-268.
- 30- Antoniadis AF, Drikakis D, Zhong B, Barakos G, Steijlb R, Biavac M, et al. Assessment of CFD methods against experimental flow measurements for helicopter flows. *Aerospace Science and Technology*. 2012;19(1):86-100.
- 31- Halliday AS, Cox D. Wind tunnel experiments on a model of a tandem rotor helicopter [Report]. London: Ministry of Aviation Aeronautical Research Council; 1961. Report No: 23-9012-17. Contract No: 517.
- 32- Naohiro I, Noriaki I, Kouichi M, Prasad JVR. Hovering performance of a rotor in a dynamic ground effect. *Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*. 2004;52(606):302-308. [Japanese]
- 33- Preston JR, Troutman S, Keen E, Silva M, Whitman, N, Calvert, M, et al. Rotorwash operational footprint modeling. Unknown City: US Army RDECOM; 2014.
- 34- Bagai A, Leishman JG. Experimental study of rotor wake/body interactions in hover. *Journal of the American Helicopter Society*. 1992;37(4):48-57.
- 35- Johnson W. Helicopter theory. Chelmsford: Courier Corporation; 2012.
- 36- Cheeseman IC, Bennett WE. The effect of the ground on a helicopter rotor in forward flight. [Report] London: Her Majesty's Stationery Office; 1955. Report No: 3021.
- 37- Spreiter JR, Sacks AH. The rolling up of the trailing vortex sheet and its effect on the downwash behind wings. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1951;1(18):21-32.
- 13- Garrick DP, Rajagopalan RG, Guntupalli K. Simulation of landing maneuvers of rotorcraft in brownout conditions. 2013 International Powered Lift Conference, August 12-14, 2013, Los Angeles, CA. Reston: AIAA; 2013.
- 14- Phillips C, Kim HW, Brown RE. The flow physics of helicopter brownout. 66th American Helicopter Society Forum: Rising to New Heights in Vertical Lift Technology, 11-13 May 2010, Phoenix, Arizona. Glasgow: Strathprints; 2010.
- 15- Tan JF, Zhou TY, Sun YM, Barakos GN. Numerical investigation of the aerodynamic interaction between a tiltrotor and a tandem rotor during shipboard operations. *Aerospace Science and Technology*. 2019;87:62-72.
- 16- Derby MD, Yamauchi GK. Design of 1/48th -scale models for ship/rotorcraft interaction studies. 21st Applied Aerodynamics Conference, June 2003, Orlando, FL. Orlando: AIAA; 2003.
- 17- Barton ME, Edwards MC. Model experiments of soil erosion by VTOL aircraft downwash impingement. *Journal of Terramechanics*. 1968;5(2):45-51.
- 18- Johnson B, Leishman JG, Sydney A. Investigation of sediment entrainment using dual-phase, high-speed particle image velocimetry. *Journal of the American Helicopter Society*. 2010;55:042003.
- 19- George M, Kisielowski E, Douglas DS. Investigation of the downwash environment generated by V/STOL aircraft operating in ground effect [Report]. Unknown City: Dynasciences Corp Blue Bell PA; 1968. Report No 68-52.
- 20- Milluzzo J, Leishman JG. Assessment of rotorcraft brownout severity in terms of rotor design parameters. *Journal of the American Helicopter Society*. 2010;55:032009.
- 21- Hohler DJ. An analytical method of determining general downwash flow field parameters for V/STOL aircraft. Unknown City: Air Force Aero Propulsion Lab Wright-Patterson AFB OH; 1966.
- 22- Schane WP. Effects of downwash upon man. Environmental Effects on VTOL designs, Arlington, Texas. New York: American Helicopter Society; 1967.
- 23- Ramasamy M, Potsdam M, Yamauchi GK. Measurements to understand the flow mechanisms contributing to tandem-rotor outwash. American Helicopter Society 71st Annual Forum, 21-23 May 2015, Virginia Beach, Va. Washington: NASA; 2015.