

بررسی تجربی اثر مجاورت زمین بر عملکرد یک بالگرد دو ملخه مدل در پرواز ایستایی

علی مهرابی^۱
استادیار

علیرضا داوری^{*۲}
دانشیار

جواد دلدار شیخی^۳
مربی

در تحقیق حاضر شناسایی اثر مجاورت زمین بر برخی پارامترهای عملکردی ملخ‌های چوبی گام ثابت ۸×۲۶ اینچ پشت سرهم با استفاده از یک دستگاه آزمایشگاهی چند منظوره انجام شد. آزمایش‌های اندازه‌گیری تراست، و توان ملخ‌ها در سه مقدار همپوشانی متفاوت (۰، ۱۰ و ۲۰ درصد) برای بررسی اثرات مجاورت زمین بر این مقادیر در پرواز ایستایی انجام شدند. نتایج نشان دادند که اثر افزایشی مجاورت زمین بر تراست تولیدی ملخ‌های پشت سرهم بیشتر از ملخ‌های تکی هستند. با افزایش همپوشانی ملخ‌ها و اثر جریان فواره‌ای برگشتی از سطح زمین، مقدار تراست تولیدی در مجاورت اثر زمین افزایش یافت. اندازه‌گیری‌های توان نشان دادند که با کاهش ارتفاع ملخ‌ها در مجاورت اثر زمین، اثر منفی تداخل آیرودینامیکی آنها و مقدار توان مصرفی حدود ۵ درصد کاهش یافت.

واژه‌های راهنما: بالگرد، ملخ‌های پشت سرهم، اثر زمین، تراست، توان القایی.

۱- مقدمه

مؤفقت در عملیات‌های نظامی، امدادسانی و نجات بستگی به شناسایی، پشتیبانی و خدمات رزمی، تحرک در میدان عملیات و پشتیبانی آمادی مناسب دارد. به همین جهت، این نوع عملیات‌ها نیاز به یک بالگرد ترابری پیشرفته و تاکتیکی با الزامات گوناگون برای توانایی بالابردگی مناسب دارند [۱، ۲]. با توجه به مؤلفه بهره‌وری و با توجه به محدودیت‌های بارگذاری ملخ و عدم نیاز به سرعت سیر بالا در بالگردهای ترابری، پیکره‌بندی‌های دو ملخه پشت سرهم، برترین انتخاب‌ها برای طراحی بالگردهای پیشرفته ترابری و بالگردهای بدون سرنشین هستند [۳-۵] و بررسی عملکرد و کارایی آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۶-۱۰]. در این نوع پیکره‌بندی‌ها جریان پیرامون ملخ‌های پشت سرهم بخاطر وجود دو برابری شار جرمی و گردابه‌های نوک و ریشه پره‌های دو ملخ و تداخل آیرودینامیکی غیر خطی آنها با یکدیگر دارای میدان جریان پیچیده‌تری نسبت به ملخ‌های تکی هستند، لذا مطالعات تجربی اندکی در خصوص بررسی مشخصات عملکردی آنها گزارش شده‌اند [۱۱]. بنابر این

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی و پرواز، گروه مهندسی بالگرد، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران ali.mehrabi110@gmail.com

^{*۲} نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی هوافضا، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران

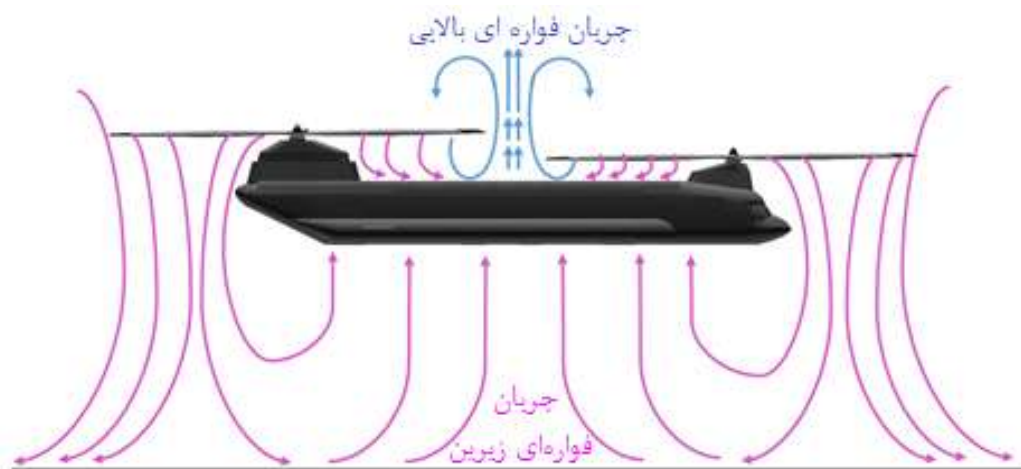
ardavari@srbiau.ac.ir

^۳ مربی دانشکده مهندسی و پرواز، گروه مهندسی بالگرد، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران deldar0239@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۲

انجام پژوهش‌های مختلف با استفاده از آزمایش‌های تجربی و روش‌های مکانیک سیالات محاسباتی برای درک صحیح عملکرد آیرودینامیکی ملخ‌های پشت سرهم ضروری به نظر می‌رسد [۱۲]. تفسیر نتایج و تجربیات قبلی انجام شده در خصوص تأثیر مجاورت زمین بر کارکرد و میدان جریان پیرامون این ملخ‌ها نیز نشان دهنده اثرات پیچیده و غیر قابل پیش‌بینی سطح زمین و تداخل آن با جریان مذکور است [۱۳]. این اثرات را نمی‌توان به صورت توابع خطی و تعریف شده از تراست و یا ارتفاع ملخ پیش‌بینی نمود. لازم به ذکر است که اکثر نتایج و تجربیات قبلی مربوط به یک ملخ ایزوله و تنهاست و ملخ‌های پشت سر هم قطعاً شرایط پیچیده‌تری را خواهند داشت که هنوز ناشناخته مانده‌اند و درک درست نیازمند انجام آزمایش‌های تجربی است [۱۴، ۱۵]. سیستم دو ملخ پشت سرهم، یک مورد منحصر به فرد است [۱۶]. در این مدل از چیدمان ملخ‌ها، تداخل جریان القایی ناشی از هر دو ملخ، جریان پیرامون هر کدام از آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۱۷]. نزدیک شدن به درک برخی از این مشکلات که در عملکرد آیرودینامیکی بالگرد حل شده‌اند یا فقط بخشی از آنها برطرف یا درک شده‌اند باعث می‌شود تا دانش خوبی در مورد این وسیله پرنده با ارزش و پیچیده کسب شود. در موارد بسیاری، درک بهتر بسیاری از مسائل مختلف آیرودینامیکی بالگرد از طریق کاربرد تئوری‌های تحلیلی، مدل-سازی‌های عددی و روش‌های تجربی و یا ترکیبی از این روش‌ها جهت رسیدن به راهکارهای دیگر امکان پذیر شده است [۱۸-۲۰].

در شرایط پرواز ایستائی^۱ و در نزدیکی سطح زمین، دنباله جریان بلافاصله در ناحیه زیر ملخ منقبض می‌شود اما پس از فاصله گرفتن از ملخ منبسط شده و به دلیل برخورد با زمین قطع شده و این برخورد آن را مجبور می‌کند تا به سمت بیرون رانده شود [۲۱]. این پدیده "اثر مجاورت زمین" نامیده می‌شود و از پدیده‌های مهم آیرودینامیکی اثرگذار بر عملکرد بالگرد است. برای تحلیل جریان پیرامون دو ملخ پشت سرهم در حضور اثر زمین، این میدان جریان به پنج ناحیه تقسیم‌بندی می‌شود. تقسیم‌بندی این نواحی بر اساس ساز و کارهای 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 (شکل ۱) [۲۲، ۲۳].



شکل ۱- مدل مفهومی از جریان بالگرد با دو ملخ پشت سرهم غیر همپوشان در مجاورت زمین.

^۱ Hovering

هنگامی که بالگرد دو ملخه در حالت پرواز ایستائی در مجاورت اثر زمین باشد، قسمت عمده‌ای از جریان برون‌ریز و گردابه‌های دنباله ملخ به محض برخورد با سطح زمین دچار بازچرخش شده و سپس با سطح زیر بدنه برخورد و یک جریان فواره‌ای رو به بالا را تشکیل می‌دهند [۱۶، ۲۴]. این جریان شبیه همان جریان فواره‌ای تشکیل شده در سطح بالای بدنه است ولی در زیر سطح بدنه به دام افتاده و باعث ایجاد نیروی به سمت بالا روی بدنه شده و بارگیری معکوس روی بدنه ناشی از جریان فواره‌ای سطح بالایی را کاهش می‌دهد. بررسی‌های گوپتا^۱ و همکارانش نشان دادند که برای هواپیماهای ملخی عمود پرواز در فاز بالگردی، این نیروی مثبت رو به بالا می‌تواند به بزرگی ۹ درصد از کل تراست ملخ‌ها باشد [۲۵].

مسئله ملخ‌های پشت سرهم و اولین آزمایش‌ها بر روی آنها بطور گسترده‌ای توسط استپنیوسکی^۲ و کیز^۳ [۲۶-۲۸] انجام شد و منجر به معرفی فاکتور تصحیح همپوشانی گردید که برای بهبود بخشیدن توان القائی بکار می‌رود. در این مدت نتایج دیگر برای کارکرد ملخ‌های دوقلو توسط فیل^۴ و اسکوئیر^۵ [۲۹] و سوئیت^۶ [۳۰] نیز ارائه شده‌اند. دینگلدین^۷ و هریس^۸ نشان دادند که در پرواز رو به جلو یکی از ملخ‌ها در جریان فرووزش کاملاً توسعه یافته ملخ دیگر کار می‌کند ([۳۱] و [۳۲]). در دهه‌های گذشته، اثر مشخصه‌های مهمی مانند مقدار بارگذاری ملخ، ارتفاع ملخ از سطح زمین، تعداد پره‌ها، ملخ‌ها و موقعیت آنها نسبت به همدیگر بر جریان پیرامون ملخ‌ها با استفاده از مدل‌سازی و آزمایش‌های تجربی بررسی شده‌اند [۳۳-۳۵]. شاهمیری [۳۶] آزمایش‌های تجربی را برای اندازه‌گیری کارآیی یک بالگرد مدل دو ملخه در مقادیر مختلف همپوشانی ملخ‌ها انجام داد و از نتایج این آزمایش‌ها برای توسعه مدل‌های ریاضی کارآیی بالگرد در پرواز ایستائی استفاده نمود. مدل استفاده شده در این آزمایش‌ها شامل دو ملخ با سه پره و با قطر ۱۲۲۰ میلی‌متر بود. پره‌ها دارای سطح مستطیلی و ایرفویل متقارن ناکا ۰۰۱۲ بودند و هیچ نوع پیچش و باریک‌شدگی نداشتند. ساختار ملخ‌های مدل بگونه‌ای بودند که بر روی یک ریل طولی نصب شده و می‌توانستند در راستای افقی بر روی این ریل حرکت نمایند بگونه‌ای که تا ۴۰ درصد نسبت همپوشانی را در پرواز ایستائی ایجاد نمایند. این آزمایش‌ها در اتاقک آزمون باز یک تونل باد مادون صوت مداربسته و خارج از محدوده اثر مجاورت زمین انجام شدند.

تئوری اندازه حرکت اولین بار توسط رانکین^۹ [۳۷] برای تحلیل ملخ‌های دریائی مورد استفاده قرار گرفت و سپس توسط فروود^{۱۰} [۳۸]، لانچستر^{۱۱} [۳۹] و بتز^{۱۲} [۴۰] توسعه داده شد و توسط گلائورت^{۱۳} [۴۱] برای تشریح آیرودینامیک ملخ در پرواز ایستائی بکار برده شد [۵]. با فرض ثابت بودن خواص جریان در هر صفحه موازی با

¹ Gupta

² Stepniewski

³ Keys

⁴ Fail

⁵ Squire

⁶ Sweet

⁷ Dingeldein

⁸ Harris

⁹ Rankine

¹⁰ Froude

¹¹ Lanchester

¹² Betz

¹³ Glauert

صفحه چرخش می‌توان از تئوری اندازه حرکت برای تحلیل ملخ‌های دارای همپوشانی استفاده کرد [۴۲]. چیزمن^۱ و بنت^۲ نیز برخی روابط تحلیلی را برای اثر مجاورت زمین بدست آوردند [۴۳]. راماسامی تأثیر همپوشانی و تداخل آیرودینامیکی بر عملکرد دو ملخ پشت سرهم را ارزیابی کرد. نتایج وی نشان دهنده تأثیر متقابل دو ملخ بر عملکرد یکدیگر و مقدار فاکتور القائی همپوشانی بود. در تحقیق مذکور از تئوری اندازه حرکت و تئوری اندازه حرکت المان پره برای تشریح اندازه‌گیری‌ها استفاده شده بود [۴۴]. تان^۳ و همکاران با استفاده از رویکرد عددی مبتنی بر گردابه‌ها و روش ذرات گردابه‌های لزج به بررسی جریان دنباله ملخ‌های پشت سرهم همپوشان در حضور اثر زمین پرداختند [۴۵]. نتایج بدست آمده از این روش عددی برای ملخ‌های پشت سرهم با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی مربوط به مدل به کاربرده شده در آزمایش‌های راماسامی [۱۶] مقایسه شده بودند که همبستگی خوبی با یکدیگر داشتند. در دو تحقیق اخیر اثرات جریان فواره‌ای ایجاد شده در بین ملخ‌های پشت سرهم را که اثر قابل توجهی بر رفتار جریان دنباله ملخ‌ها دارند در نظر نگرفته شده بود. در تحقیقی دیگر، تان^۴ و همکاران با استفاده از یک حلگر عددی بر اساس روش گردابه‌ها، مطالعات خود را در مورد جریان پیرامون بالگرد با دو ملخ پشت سرهم در نزدیکی موانع زمینی انجام داده و نتایج خود را با نتایج تجربی حاصل از مرجع [۱۶] بررسی نمودند. نتایج نشان دادند که تداخل آیرودینامیکی موجود در بین ملخ جلو و عقب باعث کاهش نیروی برآ شده و قدرت جریان برگشتی را در نزدیکی زمین و موانع کاهش می‌دهد [۴۶].

آدریان^۵ و همکارانش به بررسی تداخل ناشی از همپوشانی ملخ‌های وسایل پرنده بدون سرنشین در پرواز ایستایی پرداختند. مطالعات آنها نشان داد که مقدار ۲۰ درصد همپوشانی بین ملخ‌های پشت سرهم یک مقدار بهینه برای طیف گسترده‌ای از وسایل پرنده بدون سرنشین است [۴۷]. دوک هانگ^۶ و همکارانش آزمایش‌هایی را در داخل تونل باد برای بررسی مشخصات آیرودینامیکی یک کوادروتور و تداخل آیرودینامیکی بین دو ملخ پشت سرهم آن انجام دادند. بررسی‌های آنها نشان داد که در پرواز رو به جلو با محدوده سرعت مشخص، ضریب تراست ملخ عقب ۱۱ درصد کمتر از ملخ جلو بود [۴۸]. مهربابی و داوری رفتار جریان برون‌ریز، فرووزش و فواره‌ای ملخ‌های پشت سرهم را ارزیابی کردند. نتایج بدست آمده نشان دادند که در پیکره‌بندی ملخ‌های پشت سرهم، انتشار نوسانات و همچنین اغتشاشات ناشی از جریان‌های حلقوی لبه فرار پره‌های ملخ جلویی بر جریان فرووزش ملخ عقبی تأثیر گذاشته و باعث تغییر رفتار آن نسبت به یک ملخ تنها می‌شود. از طرفی دیگر افزایش اثر زمین باعث شد تا مدل و رفتار جریان برون‌ریز در نواحی جلویی و عقبی بالگرد تغییر نماید و سرعت جریان برون‌ریز همراه با دور شدن آن از ملخ، افزایش یابد [۴۹-۵۱]. آنها امکان وجود جریان فواره‌ای در بین دو ملخ پشت سرهم غیر همپوشان را بررسی کردند ولی آزمایش‌های اندازه‌گیری اثرات این پدیده بر مقدار تراست تولیدی و توان مصرفی ملخ‌ها در مطالعات مذکور گزارش نشده بودند [۵۲].

¹ Cheeseman

² Bennett

³ Tan

⁴ Tan

⁵ Adrian

⁶ Duc Hung

برخی مطالعات نیز در مورد بررسی جریان فواره‌ای تشکیل شده در سطح بالای بدنه هواپیماهای ملخی عمود پرواز در فاز بالگردی با ملخ‌های کنار هم^۱ برای شناسایی و کاهش بارگذاری معکوس و پیامدهای نامطلوب جریان فواره‌ای فوقانی انجام شده‌اند [۲۴, ۲۵] [۵۳-۵۵]. این آزمایش‌ها در مورد موضوعات اصلی مانند تأثیر هندسه بال هواپیمای عمود پرواز ملخی بر مقدار بارگذاری منفی، تأثیر محل نصب ملخ بر جریان فواره‌ای و بارگذاری منفی و تأثیر پارامترهایی مانند مجاورت زمین بر جریان فواره‌ای انجام شده‌اند. توجه به این نکته مهم است که برخلاف پیکره‌بندی ملخ‌های کنار هم، جریان فواره‌ای ملخ‌های پشت سرهم دوتائی در مجاورت اثر زمین و اثرات آن متفاوت‌تر و پیچیده‌تر هستند، زیرا در پیکره‌بندی کنار هم فاصله ملخ‌ها از همدیگر زیاد بوده و هر ملخ کمتر تحت تأثیر جریان دنباله ملخ دیگر قرار دارد اما در پیکره‌بندی ملخ‌های پشت سر هم، هر یک از ملخ‌ها، تحت تأثیر متقابل گردابه‌های دنباله ملخ دیگر قرار می‌گیرد [۵۶, ۵۷].

مطالعات و آزمایش‌هایی که تاکنون درباره تأثیر مجاورت زمین بر کارکرد ملخ‌های پشت سرهم انجام شده است نشان دهنده این است که درک صحیح اثرات و پیچیدگی‌های مذکور نیازمند انجام آزمایش‌های تجربی هستند [۵۸]. بنابر این، تجهیزات آزمایش و مطالعات تجربی عنصر اصلی بررسی و توسعه ملخ‌های پشت سرهم و پیکره‌بندی‌های مربوط به آنهاست. این آزمایش‌ها، مخصوصاً با شبیه‌سازی محیط آیرودینامیکی، منحصر به فرد بوده و بصورت ویژه برای رفع نیازهای گفته شده طراحی می‌شوند.

مرور و بررسی مطالعات پیشین نشان دهنده خلأ تحقیقاتی درباره آزمایش‌های تجربی بررسی اثرات جریان فواره‌ای در حضور اثر مجاورت زمین بر عملکرد بالگردهای دو ملخه است. در این تحقیق اثر مجاورت زمین بر تشکیل جریان فواره‌ای بین دو ملخ پشت سرهم یک بالگرد مدل بررسی شده است که قدم نوبی در بررسی عملکرد آیرودینامیکی این پیکره‌بندی در محیط خارج از تونل باد محسوب می‌شود. در نهایت با توجه به نتایج تجربی تأثیر مجاورت زمین بر جریان بین دو ملخ، تغییر در تولید تراست و توان القائی ملخ‌ها نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- تجهیزات و روش انجام آزمایش‌ها

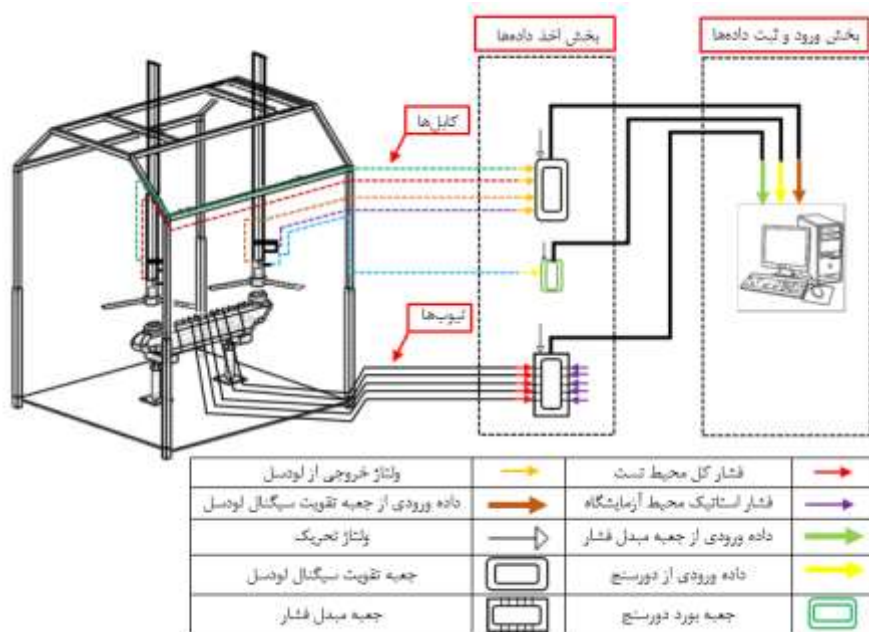
در این تحقیق، برای بررسی پدیده اثرگذار مجاورت زمین بر عملکرد آیرودینامیکی ملخ‌ها مقادیر تراست تولیدی و توان القائی آنها در مجاورت اثر زمین اندازه‌گیری شده‌اند. برای اطمینان از صحت نتایج، آزمایش‌ها بیش از پنج مرتبه تکرار شده و میانگین نتایج بدست آمده بیان شده‌اند. برای تشریح اثرات تداخل آیرودینامیکی ملخ‌ها، مقادیر تراست و فاکتور القائی همپوشانی ملخ‌ها، با پژوهش‌های قبلی و نتایج آزمایش‌های پروازی واقعی مقایسه شدند.

۲-۱- دستگاه اصلی انجام آزمایش

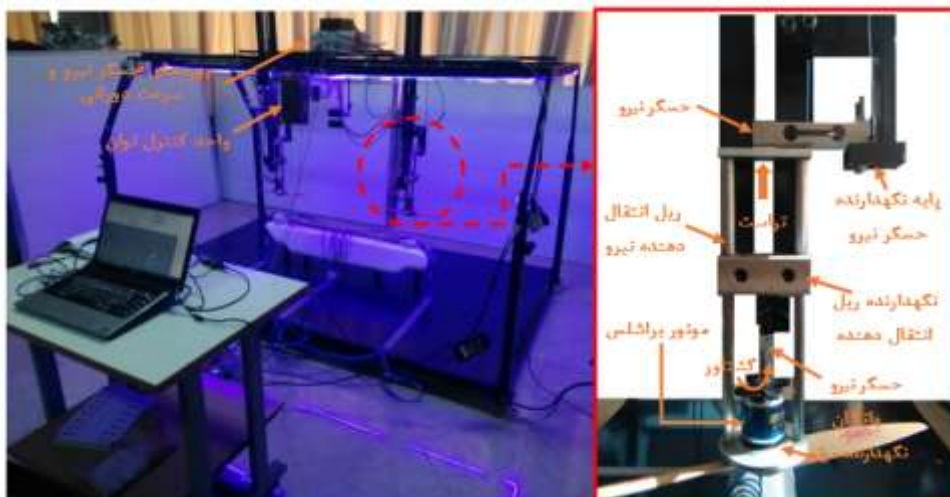
به منظور انجام آزمایش‌های اندازه‌گیری جریان فواره‌ای در زیر بدنه و اندازه‌گیری تراست و توان ملخ‌ها، دستگاه اصلی انجام آزمایش‌ها باید شامل سه زیر سامانه اصلی باشد که عبارتند از، چهارچوبه اصلی، بخش اخذ داده‌ها و بخش ورود و ثبت داده‌ها. مجموعه موتورها، سنجنده‌های نیرو، دوران سنج مغناطیسی (برای اندازه‌گیری

^۱ Side by side rotors

rpm ملخ‌ها) و لوله‌های حسگر فشار در بخش چهارچوبه آزمایش قرار می‌گیرند. این چهارچوبه دارای قابلیت تغییر ارتفاع است. بازوهای نگهدارنده موتورها نیز با استفاده از ریل‌های طولی خاص در طول چهار پایه اصلی حرکت می‌نمایند. از این دستگاه برای انجام آزمایش‌ها در وضعیت‌های مختلف ارتفاعی و همپوشانی ملخ‌های پشت سرهم استفاده می‌شود. توان الکتریکی جریان مستقیم^۱ مورد نیاز برای کارکرد موتورها با استفاده از یک مبدل جریان متناوب^۲ به مستقیم ۵۰ آمپری که در پنل کنترل دستگاه نصب شده است تأمین می‌شود. کنترل سرعت دوران ملخ‌ها با استفاده از یک کنترل کننده سرعت و نشانگر دیجیتالی سرعت که در پنل کنترل قرار گرفته‌اند انجام می‌شود (شکل ۲).



(الف)



(ب)

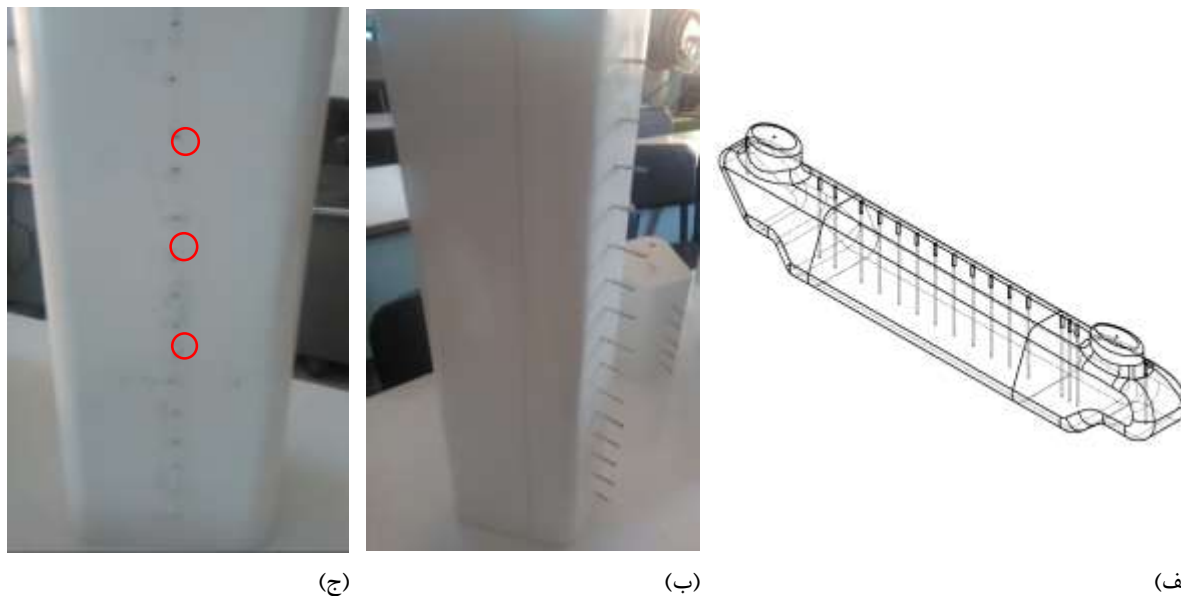
شکل ۲- (الف) شماتیک دستگاه ساخته شده برای انجام آزمایش‌ها (ب) دستگاه آزمایش و بازوی نگهدارنده ملخ‌ها

¹ Direct Current (DC.)

² Alternative Current (Ac.)

۲-۱-۱- ساخت بدنه مدل

بدنه بالگرد مدل بصورت ۳ تکه و با چوب و با استفاده از ماشین تراشکاری سی ان سی ساخته شده است تا بتوان با تعویض قطعه وسط، طول کلی بدنه را برای انجام آزمایش‌ها با مقادیر مختلف همپوشانی ملخ‌ها تغییر داد. به منظور اندازه‌گیری افزایش فشار جریان ناشی از برخورد جریان فواره‌ای به زیر بدنه، لوله‌های اندازه‌گیری فشار نیز در سراسر طول بدنه تعبیه شده‌اند تا بتوان برای اندازه‌گیری مقادیر فشار در زیر بدنه از آنها استفاده نمود (شکل ۳ و ۴).



شکل ۳- (الف) بدنه سه تکه بالگرد مدل، (ب) و (ج) لوله‌ها و مجراهای اندازه‌گیری فشار تعبیه شده در بدنه



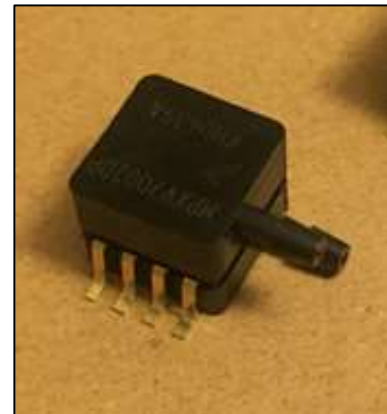
شکل ۴- ساخت بدنه مدل با استفاده از دستگاه تراشکاری

۲-۱-۲- ساخت بوردهای الکترونیکی سنجنده‌ها

جعبه‌های بوردهای الکترونیکی حسگرهای فشار، دوران سنج و لودسل‌ها بخش اخذ داده‌های دستگاه آزمایش را تشکیل داده‌اند. ۱۶ عدد حسگر و مبدل فشار تفاضلی، به صورت نصب سطحی بر روی بوردهای الکترونیکی خاص، در داخل جعبه حسگرهای فشار قرار دارند که یک طرف این حسگرها متصل به فشار استاتیک محیط خارج از محدوده دستگاه و طرف دیگر آنها به فشار کل محیط پیرامون ملخ‌ها متصل هستند (شکل ۵). برای اندازه‌گیری مقدار نیروی بالابرنده و گشتاور ملخ‌ها، لودسل‌های تک پایه ۲، ۳ و ۵ کیلوگرمی دارای استاندارد جهانی OIML به برد الکترونیکی طراحی شده وصل شده‌اند تا نیروی حس شده را به صورت ولتاژ خروجی و داده‌های کالیبره شده قابل ثبت تبدیل نمایند. برای اندازه‌گیری و کنترل سرعت دورانی چرخش ملخ‌ها یک حسگر مغناطیسی ساخته شده است. با هر بار عبور آهنربای متصل شده به شفت موتور از مقابل این حسگر مغناطیسی و تغییر قطب‌های مغناطیسی، سرعت دورانی چرخش موتور با دقت و حساسیت بالا اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۶).



(ب)



(الف)

شکل ۵- (الف) حسگرهای فشار تفاضلی MPXV ۷۰۰۲ (ب) برد الکترونیکی حسگرهای فشار



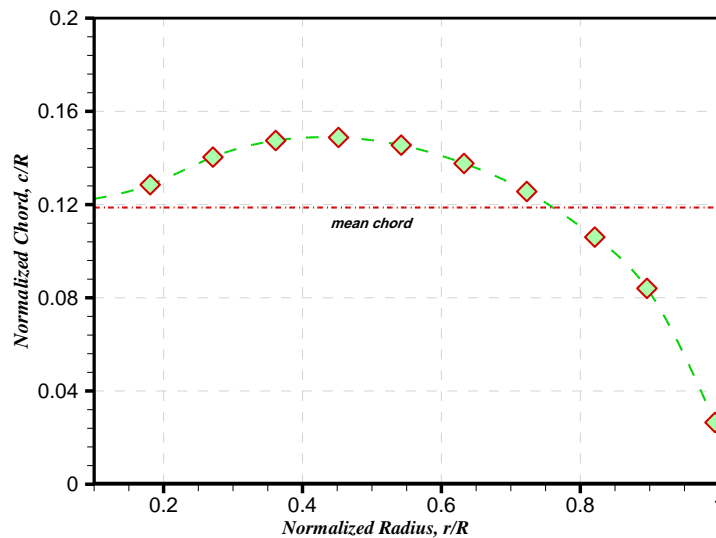
شکل ۶- جعبه برد الکترونیکی و حسگر مغناطیسی سرعت دورانی

۲-۱-۳- انتخاب ملخها

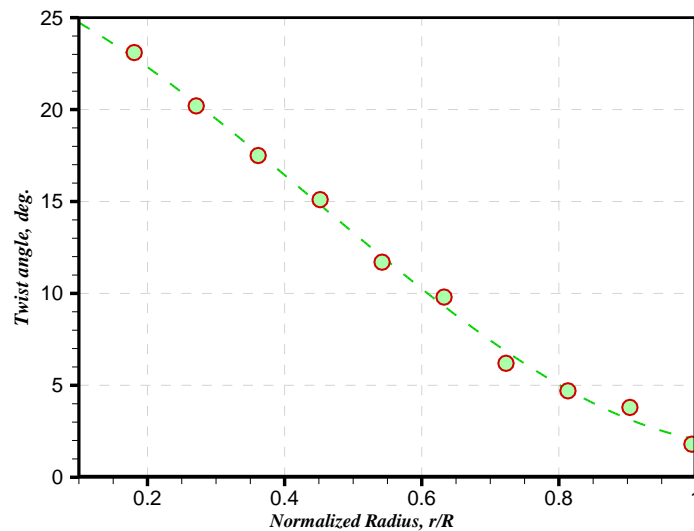
مشخصات محفظه آزمایش و ملخهای چوبی استفاده شده در انجام آزمایشها در جدول (۱) ذکر شدهاند. مقادیر مشخصات هندسی پرههای ملخ نیز در نمودارهای شکل‌های (۷) و (۸) نمایش داده شدهاند.

جدول ۱- مشخصه‌های اصلی ملخهای مدل استفاده شده در انجام آزمایشها

مشخصه	قطر ملخها (cm)	همپوشانی ملخها (d/D)	تعداد پره‌ها در ملخ	صلبیت ملخ	سرعت دورانی ملخ-ها (RPM)	سرعت نوک پره (m/s)	جهت دوران ملخها	اندازه محفظه تست (m ³)
مقدار	۶۶/۵	۰/۸ و ۰/۹	۲	۰/۰۷۵۵	۲۰۰۰	۶۶/۹	پادساعتگرد / ساعتگرد	۳/۵×۹/۱×۷/۳ بدون وزش باد



شکل ۷- مقادیر وتر در طول پره‌های ملخ مورد آزمایش



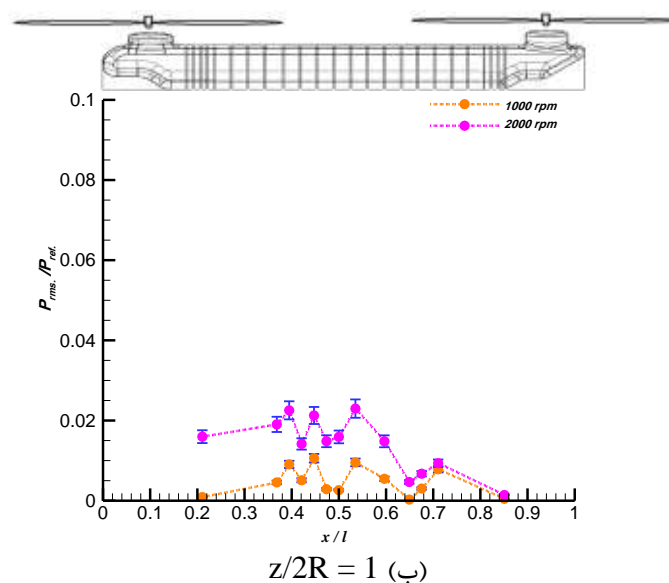
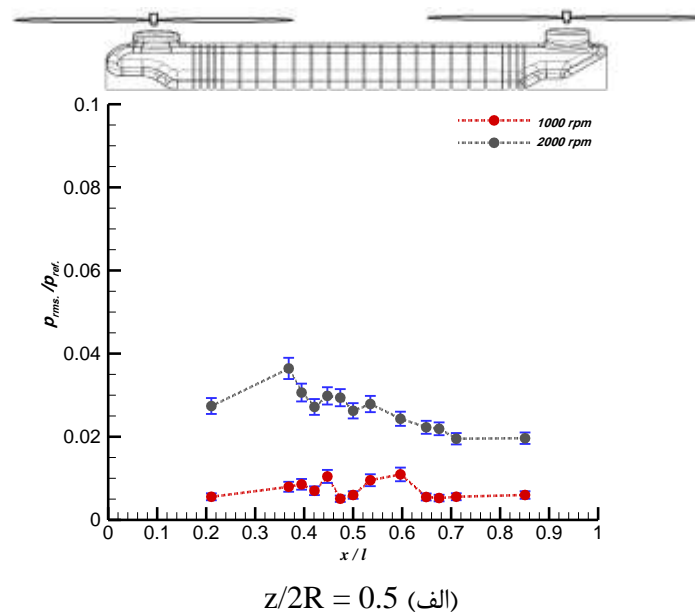
شکل ۸- مقادیر پیچش هندسی در طول پره‌های ملخ مورد آزمایش

۲-۲- آزمایش اندازه‌گیری فشار جریان فواره‌ای

برای بررسی اثر مجاورت زمین بر تشکیل جریان فواره‌ای بین دو ملخ پشت سرهم، در این تحقیق مقادیر فشار در زیر بدنه مدل اندازه‌گیری شدند. از آنجایی که آزمایش‌ها در شرایط بدون وجود بادهای محیطی انجام می‌شوند بنابراین این انتظار می‌رود که در صورت تشکیل و وجود جریان فواره‌ای در این مناطق، مقادیر فشار رو به بالای هوا رشد قابل توجهی در آنجا داشته باشد.

۲-۲-۱- ملخ‌های بدون همپوشانی

مقادیر فشار در زیر بدنه در حالت کارکرد دو ملخ پشت سرهم غیر همپوشان در نمودارهای شکل (۹) نمایش داده شده‌اند. در این آزمایش‌ها فاصله مرکز ملخ‌ها از همدیگر سه برابر مقدار شعاع آنهاست. آزمایش‌ها در دو سرعت دورانی متفاوت انجام شده‌اند.

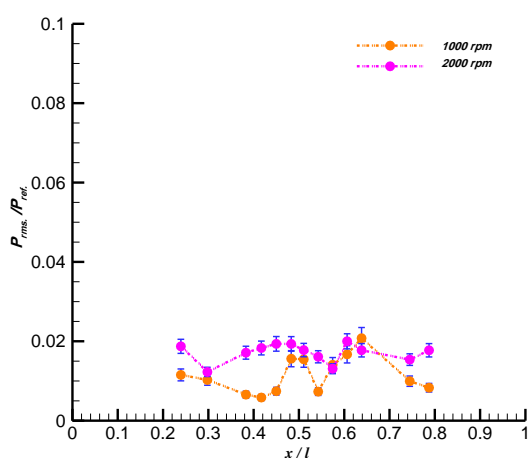


شکل ۹- مقادیر فشار در زیر بدنه بالگرد مدل در هنگام عملکرد دو ملخ پشت سرهم غیر همپوشان

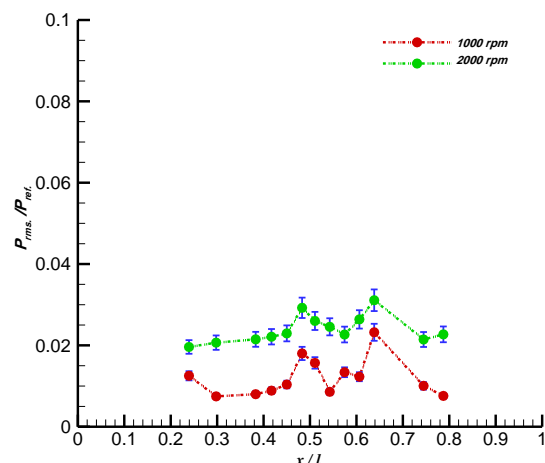
نکات قابل توجه در نمودار شکل (۹) این است که اولاً، همانطور که انتظار می‌رفت افزایش سرعت دورانی ملخ‌ها تأثیر قابل توجهی بر مقدار فشار در زیر بدنه دارد. دوم اینکه مقادیر فشار با کاهش ارتفاع ملخ‌ها و بدنه افزایش یافتند. باید توجه نمود که موقعیت مکانی بیشینه فشار در زیر بدنه با تغییر ارتفاع مدل جابجا شد (شکل ۹ (ب)). هنگام کارکرد ملخ در $z/2R=0.5$ ، بیشینه فشار در موقعیت طولی $x/l = 0.37$ روی داده است و هنگامی که ارتفاع ملخ به $z/2R=1$ افزایش می‌یابد، بیشینه فشار در موقعیت طولی $x/l = 0.55$ روی می‌دهد. با افزایش ارتفاع مدل و ملخ‌ها و با کاهش اثر زمین نیز، موقعیت رویداد فشار بیشینه تغییر نمود. بر اساس مدل مفهومی شکل (۱)، هنگامی که ارتفاع ملخ و بدنه کاهش می‌یابد، قسمت عمده‌ای از گردابه‌های موجود در دنباله دو ملخ پشت سرهم هنگامی که به سطح زمین برخورد می‌کنند بازچرخش یافته و به زیر بدنه بالگرد برخورد کرده و با تشکیل جریان فواره‌ای رو به بالا باعث افزایش فشار در زیر بدنه می‌شوند. اندازه‌گیری‌های فشار در زیر بدنه بر اثر جریان برخوردی که نتایج آن در نمودارهای شکل (۹) نشان داده شدند، تشکیل پدیده جریان فواره‌ای در بین دو ملخ پشت سرهم در مجاورت اثر زمین را تأیید می‌کنند.

۲-۲-۲- ملخ‌های همپوشان

برای بررسی تأثیر همپوشانی ملخ‌های پشت سرهم و تداخل آیرودینامیکی آنها با همدیگر بر الگوی جریان بین دو ملخ در مجاورت اثر زمین، طول بدنه و محل قرارگیری ملخ‌ها نسبت به وضعیت غیر همپوشان بگونه‌ای تغییر داده می‌شوند تا همپوشانی به اندازه ۱۰ سانتی‌متر ($d/D=0.1$) بین ملخ‌ها ایجاد شود. مقادیر فشار ایجاد شده توسط جریان برخوردی در زیر بدنه در شکل (۱۰) نمایش داده شده‌اند. با مقایسه این نمودارها با نمودارهای شکل (۹) مشاهده می‌شود که با ایجاد همپوشانی بین ملخ‌ها در هر دو ارتفاع کارکردی، فشار کلی زیر بدنه اندکی افزایش یافته است. علت این رویداد مربوط به افزایش تداخل ملخ‌ها و هم‌افزایی گردابه‌های نوک پره‌ها در تشکیل جریان بالا رونده است. به عبارت دیگر، به علت تغییر در تداخل آیرودینامیکی و گردابه‌های موجود در دنباله ملخ‌ها در هر دو ارتفاع کارکردی ملخ، مقدار کلی فشار نسبت به حالت غیر همپوشان اندکی افزایش یافته و توزیع متعادل تری در نواحی مرکزی بدنه و زیر ناحیه همپوشانی دو ملخ وجود دارد.



شکل ۱۰-ب) $z/2R = 1$



شکل ۱۰-الف) $z/2R = 0.5$

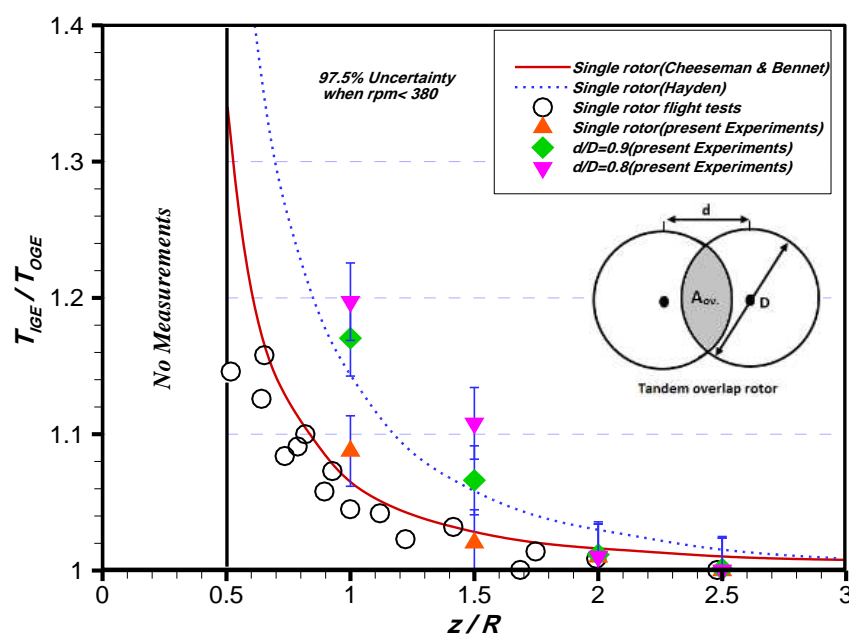
شکل ۱۰- مقایسه مقادیر فشار در زیر بدنه بالگرد مدل در هنگام عملکرد دو ملخ پشت سرهم همپوشان

هنگامی که ملخ‌ها همپوشانی با یکدیگر ندارند، یک جریان فواره‌ای فوقانی در بین آنها و در بالای بدنه وجود دارد که به سمت بالا جریان می‌یابد. وجود این جریان باعث بارگذاری معکوس بر روی بدنه شده و اثر اتلافی بر تراست تولیدی ملخ‌ها دارد ولی هنگامی که همپوشانی بین ملخ‌ها ایجاد می‌شود، با تداخل آنها با یکدیگر، اثر معکوس جریان فواره‌ای فوقانی کاهش یافته و از طرف دیگر فشار مطلوب ناشی از جریان فواره‌ای زیر بدنه نیز اندکی افزایش می‌یابد. بطور کلی، در هر دو حالت قرارگیری ملخ‌های پشت سرهم (همپوشان یا غیر همپوشان)، اثر مجاورت زمین تأثیر افزایشی بر مقادیر فشار جریان فواره‌ای برخوردی به زیر بدنه دارد. با ایجاد همپوشانی بین ملخ‌ها، کاهش اثر مجاورت زمین باعث می‌شود تا جریان فواره‌ای و مقادیر فشار ناشی از آن در زیر بدنه، نسبت به حالت غیر همپوشان افزایش یابد.

۲-۳- آزمایش اندازه‌گیری تراست

پس از شناسایی پدیده جریان فواره‌ای ایجاد شده در ناحیه بین دو ملخ پشت سرهم در مجاورت اثر زمین، به منظور اندازه‌گیری اثرگذاری آن بر کارایی ملخ‌ها در پرواز ایستائی، مقادیر تراست تولیدی و توان القائی آنها اندازه‌گیری و محاسبه شدند. مقادیر نسبت‌های تراست تولیدی ملخ‌ها در مجاورت اثر زمین (TIGE) به تراست تولیدی ملخ‌ها در خارج از مجاورت اثر زمین (TOGE) در پرواز ایستائی اندازه‌گیری و در نمودار شکل (۱۱) نمایش داده شده‌اند.

مشاهده می‌شود که برای ملخ تکی، اثر افزایشی مجاورت زمین بر تراست تولیدی در ارتفاع‌های کمتر از دو برابر شعاع ملخ قابل توجه است و بالاتر از این ارتفاع، اثر افزایشی مجاورت زمین بر تراست بسیار ناچیز بوده و بادور شدن از زمین از بین رفته است. مقادیر تراست تولیدی ملخ‌های همپوشان در دو مقدار همپوشانی متفاوت اندازه‌گیری شده‌اند. لازم بذکر است با توجه به نحوه قرارگیری ملخ‌ها و بدنه در دستگاه ساخته شده، در هنگام اندازه‌گیری تراست‌ها، ملخ‌ها از بدنه ایزوله هستند. با توجه به افزایش مقادیر فشار زیر بدنه بر اثر جریان فواره‌ای



شکل ۱۱- مقادیر تراست ملخ‌های تکی و پشت سرهم در مجاورت اثر زمین.

ایجاد شده در ناحیه بین دو ملخ در پرواز ایستائی که در آزمایش‌های مربوط به جریان فواره‌ای اندازه‌گیری شدند، نیروی فشاری رو به بالای ایجاد شده در زیر بدنه در اثر این پدیده نیز به مقادیر تراست تولیدی ملخ‌های پشت سرهم اضافه شده‌اند. بنابر این مشاهده می‌شود که اثر افزایشی مجاورت زمین بر تراست تولیدی ملخ‌های پشت سرهم بیشتر از ملخ‌های تکی هستند. با افزایش مقدار همپوشانی ملخ‌ها (کاهش نسبت d/D)، با توجه به افزایش اثر جریان فواره‌ای، مقدار تراست تولیدی در مجاورت اثر زمین نیز افزایش یافته است. جهت اعتبار بخشی به نتایج بدست آمده، مقادیر تراست اندازه‌گیری شده در پژوهش حاضر با نتایج حاصل از نتایج تجربی و آزمایش‌های پروازی ملخ تکی چند نوع بالگرد (OH-6A، OH-58A، UH-1H، BO-105) که توسط زبروزک^۱ [۵۹]، بتز^۲ [۶۰]، نایت^۳ و هفنر^۴ [۶۱]، فرادنبرگ^۵ [۶۲] و [۶۳]، استپنویسکی و کیز [۲۸]، پروتی^۶ [۶۴]، چیزمن و بنت [۴۳]، و هایدن^۷ [۶۵] ارائه شده بوده‌اند مقایسه شدند.

۲-۴- اندازه‌گیری توان کل مصرفی

بوسیله اندازه‌گیری مقدار گشتاور تولیدی و سرعت دورانی هر کدام از ملخ‌ها مقدار توان تولیدی کل برای مصرف ملخ‌های پشت سرهم حاصل و در نمودار شکل (۱۲) نمایش داده شده‌اند. با توجه به این نمودار مشاهده می‌شود که با کاهش ارتفاع و افزایش اثر مجاورت زمین، توان مصرفی ملخ نیز کاهش می‌یابد. در این شرایط، به دو علت کارایی ملخ افزایش پیدا می‌کند. مهمترین علت، کاهش سرعت جریان القایی نزولی است. مختل و قطع شدن خطوط جریان القایی زیر سطح بالگرد توسط سطح زمین باعث می‌شود تا الگوی کل جریان عوض شده و سرعت آن کاهش یابد. نتیجه این فرآیند، کاهش مقدار پسای القایی و افزایش مقدار نیروی بالابرنده است. بنابر این، نیرو و توان کمتری لازم خواهد بود تا بالگرد تحت این شرایط بتواند در حالت پرواز ایستایی بماند. پدیده یا علت دوم، کاهش گردابه‌های نوک ملخ می‌باشد. با توجه به آزمایش‌های بررسی جریان مشاهده شد که هنگام کارکرد تحت اثر زمین، الگوی جریان هوای فرووزش و برون ریز تمایل دارد تا تولید گردابه‌ها را محدود سازد. این فرایند باعث می‌شود تا کارایی قسمت بیرونی پره ملخ افزایش یابد و باعث کاهش آشفتگی کلی در سیستم شود که به وسیله بلعیده شدن و جفت شدن گردابه‌های قدیمی با گردابه‌های جوان تر ایجاد شده بود.

۲-۵- اندازه‌گیری توان القائی

پسای القائی در نتیجه تولید نیروی بالابرنده به وجود می‌آید. همانطوری که در نمودار شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، بالاترین سهم از پسای ایجاد شده در پرواز ایستائی بالگردها، متعلق به پسای القایی است [۶۶]. توان مصرفی که توسط ملخ برای غلبه بر نیروی پسای ایجاد شده مصرف می‌شود، توان القائی بوده و به مقدار تراست

¹ Zbrozek

² Betz

³ Knight

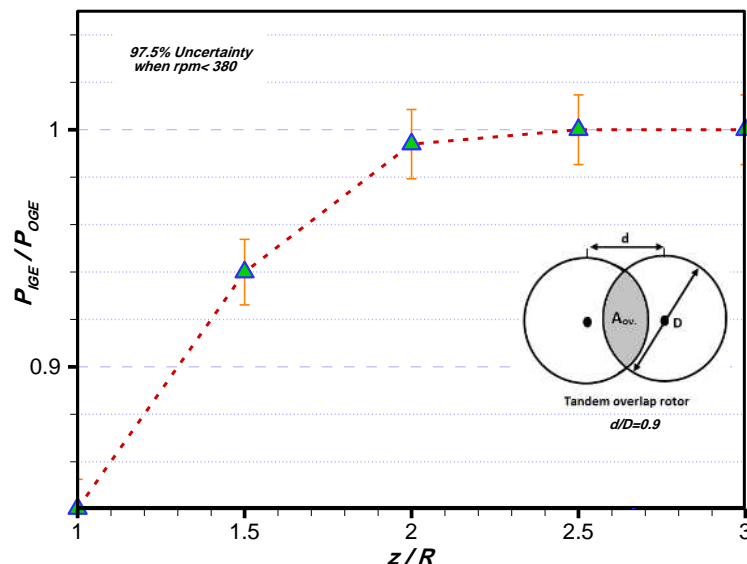
⁴ Hefner

⁵ Fradenburgh

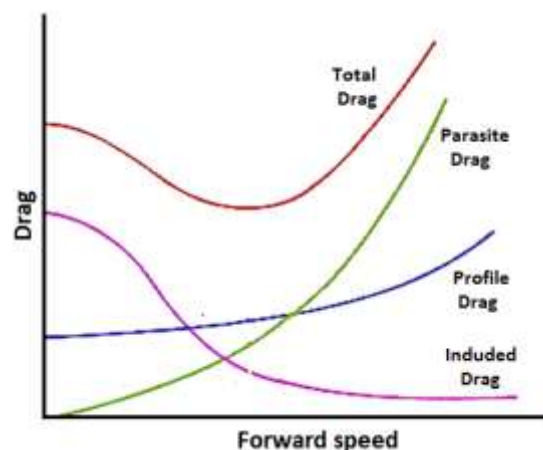
⁶ Prouty

⁷ Hayden

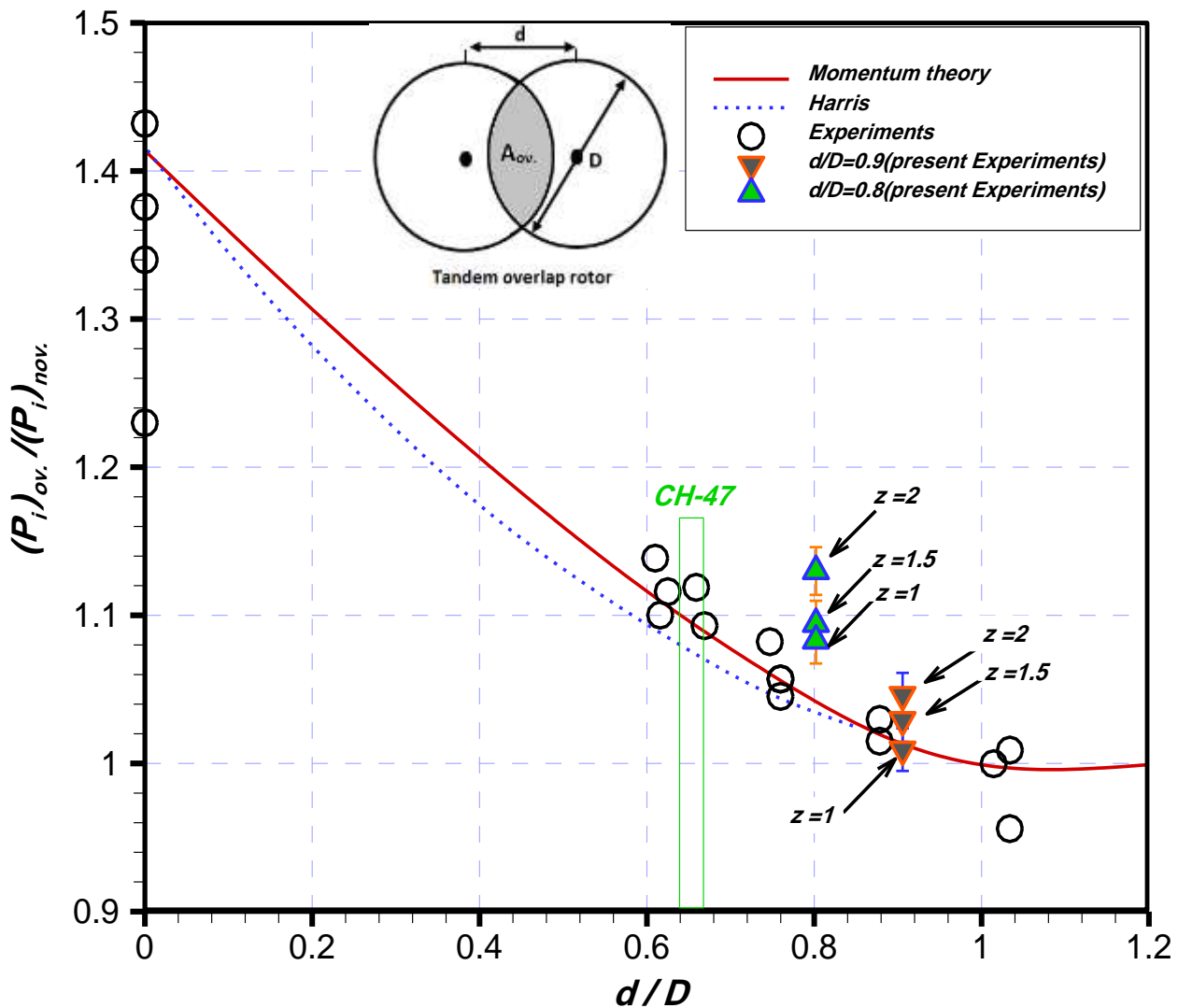
تولیدی ملخ‌ها وابسته است. نتایج اندازه‌گیری‌ها و محاسبات توان القائی برای ملخ‌های پشت سرهم و مقایسه آنها با نتایج قبلی نشان دهنده نزدیکی نتایج حاصل با آنهاست (شکل ۱۴). با توجه به این نمودار، با کاهش ارتفاع ملخ‌ها در مجاورت اثر زمین، مقدار K_{ov} که نشان دهنده نسبت توان القائی مصرفی ملخ‌ها در حالت همپوشان به توان مصرفی آنها در حالت غیر همپوشان است، کاهش یافته و به مقدار ۱ نزدیکتر شده است. این بدان معناست که با افزایش اثر زمین و افزایش اثر جریان فواره‌ای، اثر منفی تداخل آیرودینامیکی ناشی از همپوشانی ملخ‌ها بر توان مصرفی کاهش یافته است. با توجه به این نتایج، با افزایش همپوشانی ملخ‌ها، اثر تداخل آیرودینامیکی آنها بر افزایش مقدار توان مصرفی مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج حاصل برای مقادیر همپوشانی $d/D=0/8$ و $d/D=0/9$ ملخ‌های مورد آزمایش و مقایسه آنها با محدوده مربوط به همپوشانی ملخ‌های مدل‌های مختلف بالگردهای دو ملخه CH-47 [۴۴]، اثر کاهش نسبت همپوشانی آنها، علاوه بر کاهش نسبت توان مصرفی وسیله پرنده بخاطر کاهش تداخل آیرودینامیکی آنها، باعث افزایش نسبت بارگذاری ملخ‌ها نیز می‌شود.



شکل ۱۲- مقادیر توان مصرفی ملخ‌های پشت سرهم همپوشان در مجاورت اثر زمین



شکل ۱۳- نمودار مقادیر نیروهای پسای تولیدی در پرواز بالگرد [۶۶]



شکل ۱۴- مقادیر توان القائی ملخ‌های پشت سرهم همپوشان در مجاورت اثر زمین

۳- تکرار پذیری و عدم قطعیت نتایج

عدم قطعیت نتایج، شاخصی برای بررسی تکرارپذیری آزمایش‌ها می‌باشد. برای اندازه‌گیری عدم قطعیت در این پژوهش، برخی از تست‌ها در پنج نوبت تکرار شده‌اند. عدم قطعیت نتایج، طبق تعریف، حاصلضرب انحراف معیار در مقداری موسوم به توزیع تی^۱ است که بسته به تعداد مشاهدات و بازه اطمینان در نظر گرفته شده، در قالب جدول (۲) بیان می‌شود [۶۷]. با محاسبه میانگین و انحراف معیار مقادیر فشار نشان داده شده توسط سنجه‌ها، و با در نظر گرفتن بازه اعتماد ۹۵ درصد، متوسط میزان عدم قطعیت در نتایج کنونی $\pm 5/6$ درصد محاسبه شده است. به بیان دیگر چنانچه آزمایش‌ها در شرایط یکسان تکرار شوند به احتمال ۹۵ درصد نتایج جدید بطور متوسط $\pm 5/6$ درصد با نتایج ارائه شده در مقاله متفاوت خواهند بود. این مقادیر در نمودارهای نتایج آزمایش‌ها با نوارهای خطا نمایش داده شده‌اند. عواملی مانند اختلال ایجاد شده توسط کارکرد فشارسنج‌ها بر یکدیگر، خطای پایانه‌های انتقال داده‌ها، خطای اندک لودسل‌ها و اصطکاک مکانیکی موجود در ریل‌های بالارونده متصل به لودسل‌ها بعنوان عوامل این عدم قطعیت در نتایج ارزیابی می‌گردند.

^۱ t-Distribution

جدول ۲- مقادیر توزیع تی برای ۵ درجه آزادی [۶۷].

بازه درجه	%۷۵	%۸۰	%۸۵	%۹۰	%۹۵	%۹۷/۵	%۹۹	%۹۹/۵	%۹۹/۷۵	%۹۹/۹
۱	۱/۰۰۰	۱/۳۷۶	۱/۹۶۳	۳/۰۷۸	۶/۳۱۴	۱۲/۷۱	۳۱/۸۲	۶۳/۶۶	۱۲۷/۳	۳۱۸/۳
۲	۰/۸۱۶	۱/۰۶۱	۱/۳۸۶	۱/۸۸۶	۲/۹۲۰	۴/۳۰۳	۶/۹۶۵	۹/۹۲۵	۱۴/۰۹	۲۲/۳۳
۳	۰/۷۶۵	۰/۹۷۸	۱/۲۵۰	۱/۶۳۸	۲/۳۵۳	۳/۱۸۲	۴/۵۴۱	۵/۸۴۱	۷/۴۵۳	۱۰/۲۱
۴	۰/۷۴۱	۰/۹۴۱	۱/۱۹۰	۱/۵۳۳	۲/۱۳۲	۲/۷۷۶	۳/۷۴۷	۴/۶۰۴	۵/۵۹۸	۷/۱۷۳
۵	۰/۷۲۷	۰/۹۲۰	۱/۱۵۶	۱/۴۷۶	۲/۰۱۵	۲/۵۷۱	۳/۳۶۵	۴/۰۳۲	۴/۷۷۳	۵/۸۹۳

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، آزمایش‌ها با استفاده از یک دستگاه آزمایشگاهی چند منظوره به همراه یک بدنه مدل با ملخ‌های پشت سرهم برای اندازه‌گیری کارایی این ملخ‌ها در مجاورت اثر زمین انجام شدند. این آزمایش‌ها قسمتی از برنامه آزمایش‌های توسعه‌ای پهنادهای عمود پرواز با ملخ‌های پشت سرهم هستند. آزمایش‌ها در حالت‌های مختلف فواصل عمودی ملخ‌ها و بدنه از زمین و مقادیر مختلف همپوشانی آنها انجام شدند. بر خلاف آزمایش‌های انجام شده در تونل باد، این آزمایش‌ها در یک محیط آزمایشگاهی بزرگ و با اثرات دیواره‌ای کمتر انجام شدند.

اندازه‌گیری‌های فشار در زیر بدنه بالگرد با دو ملخ در هر دو حالت همپوشان و غیر همپوشان نشان دهنده این بود که در مجاورت اثر زمین، یک ناحیه برخورد جریان فواره‌ای در مرکز طولی زیر بدنه و بین دو ملخ وجود دارد. اثر مجاورت زمین تأثیر افزایشی بر مقادیر فشار این جریان فواره‌ای دارد. افزایش نیروی بالابرنده به وسیله نیروی فشاری بعنوان مزایای ایجاد جریان فواره‌ای در محدوده اثر زمین شناخته شدند.

آزمایش‌های اندازه‌گیری تراست و توان ملخ‌های همپوشان در دو مقدار همپوشانی مختلف برای بررسی اثرات مجاورت زمین و تشکیل جریان فواره‌ای در مقادیر آنها در پرواز ایستایی انجام شدند. نتایج نشان دادند که اثر افزایشی مجاورت زمین بر تراست تولیدی ملخ‌های پشت سرهم بیشتر از ملخ‌های تکی هستند. با افزایش مقدار همپوشانی ملخ‌ها (کاهش نسبت d/D)، با توجه به افزایش اثر جریان فواره‌ای، مقدار تراست تولیدی در مجاورت اثر زمین نیز افزایش یافت. نتایج اندازه‌گیری‌های توان نشان دادند که گرچه با افزایش همپوشانی ملخ‌ها، اثر تداخل آیرودینامیکی آنها باعث افزایش مقدار توان مورد نیاز آنها می‌شود ولی با کاهش ارتفاع ملخ‌ها در مجاورت اثر زمین، مقدار توان مصرفی و همچنین اثر منفی تداخل آیرودینامیکی ناشی از همپوشانی ملخ‌ها بر توان مصرفی کاهش یافت. بررسی اثر مجاورت زمین بر تشکیل جریان فواره‌ای و شناسایی اثرات آن بر تراست تولیدی در پیکره‌بندی ملخ‌های پشت سرهم برای اولین بار در این پژوهش انجام شدند.

مراجع

[1] Petrescu R.V., Aversa R., Akash B., Corchado J., Berto F., Apicella A. and Petrescu F.I., "About Helicopters", Journal of Aircraft and Spacecraft Technology, Vol. 1(3), pp. 204-223, (2017).

- [2] Meier, W., and Olson, J., "The Influence of Usage Spectrum and Multi Lift on the Efficient Size of a Cargo Rotorcraft", Aircraft Design, Systems and Operations Conference September 7-9, Atlanta, U.S.A, pp. 62-77, (1988).
- [3] Schrage, D., Costello, M., and Mittleider, D., "Design Concepts for an Advanced Cargo Rotorcraft", Journal of the American Helicopter Society, Vol. 34(4), pp. 56-65, (1989).
- [4] Sal, F., "Variance Constrained Trajectory Tracking for Tandem-Rotor Helicopters", Aircraft Engineering and Aerospace Technology Journal, Vol. 92, pp. 398-403, (2018).
- [5] Abhiram, D., Ganguli, R., Harursampath, D., and Friedmann, P.P., "Robust Design of Small Unmanned Helicopter for Hover Performance Using Taguchi Method", Journal of Aircraft, Vol. 55(4), pp. 1746-1753, (2018).
- [6] Head, R.E., "Warm Cycle Propulsion for the 1990's Heavy Lift Helicopters", Rotary Wing Propulsion System Specialist Meeting of the American Helicopter Society, November 12-14, Williamsburg, Virginia, USA, pp. 1-7, (1982).
- [7] Head, R., "Preliminary Design of a Tip-Jet-Driven Heavy Lift Helicopter Incorporating Circulation Control", Report DTNSRDC/ASED-81/07, Hughes Helicopters INC. HH-80-466, (1981).
- [8] Stepniewski, W., "Factors Shaping Conceptual Design of Rotary-Wing Aircraft", 37th Annual Forum of the American Helicopter Society, May 17-20, New Orleans, La., USA., pp. 6-21,(1981).
- [9] Germanowski, P.J., Stille, B.L., and Strauss, M.P., "Technology Assessment for Large Vertical-Lift Transport Tilt-rotors, Technical Report ARC-E-DAA-TN1427, NASA/CR-2010-216384, (2010).
- [10] Stepniewski, W.Z., and Shinn, R., "A Comparative Study of Soviet vs. Western Helicopters", Technical Report 82-A-9, NASA CR-3580, (1983).
- [11] Chen, P.W., Sankar, L.N., Prasad, J., Schatzman, N.L., and Rajagopalan, R.G., "Extraction of Dynamic Inflow Models for Coaxial and Tandem Rotors from CFD Simulations", Vertical Flight Society's Annual Forum and Technology Display, May 13-16 , Philadelphia, Pennsylvania, USA., pp. 1-10, (2019).
- [12] Antoniadis, A., Drikakis, D., Zhong, B., Barakos, G., Steijl, R., Biava, M., Vigevano, L., Brocklehurst, A., Boelens, O., and Dietz, M., "Assessment of CFD Methods against Experimental Flow Measurements for Helicopter Flows", Aerospace Science and Technology Journal, Vol. 19(1), pp. 86-100, (2012).
- [13] Hwang, J.Y., and Kwon, O.J., "Assessment of S-76 Rotor Hover Performance in Ground Effect Using an Unstructured Mixed Mesh Method", Aerospace Science and Technology Journal, Vol. 84, pp. 223-236, (2019).
- [14] Lee, J.W., Oh, S.J., Yee, K.J., and Kim, D.K., "Numerical Investigation on Overlap Effects of Tandem Rotors in Forward Flight", Journal of Aeronautical and Space Sciences, Vol. 10(2), pp. 63-76, (2009).

- [15] Shuilin H., Guohua, X., Yongfeng, L., Jianping, H., and Zhangwen, L., "Parametric Effect Investigation on Aerodynamic Interaction Characteristics for Tandem Rotors in Forward Flight", The Second Asian/Australian Rotorcraft Forum and The Fourth International Basic Research Conference on Rotorcraft Technology, September 08-11, Tianjin, China, pp. 358-367, (2013).
- [16] Ramasamy, M., Potsdam, M., and Yamauchi, G.K., "Measurements to Understand the Flow Mechanisms Contributing to Tandem-Rotor Outwash". American Helicopter Society 71st Annual Forum, May 21-23, Virginia Beach, Va. VA, USA., pp. 1-36, (2018).
- [17] Lu, Y., Su, T., Chen, R., Li, P., and Wang, Y., "A Method for Optimizing the Aerodynamic Layout of a Helicopter that Reduces the Effects of Aerodynamic Interaction", Aerospace Science and Technology Journal, Vol. 88, pp. 73-83, (2019).
- [18] Su, T., Lu, Y., Ma, J., and Guan, S., "Electrically Controlled Rotor Blade Vortex Interaction Airloads and Noise Analysis Using Viscous Vortex Particle Method", Shock and Vibration Journal, Vol. 2019, pp. 1-15, (2019).
- [19] Tan, J.F., Zhou, T.Y., Sun, Y.M., and Barakos, G.N., "Numerical Investigation of the Aerodynamic Interaction between a Tiltrotor and a Tandem Rotor during Shipboard Operations", Aerospace Science and Technology Journal, Vol. 87, pp. 62-72, (2019).
- [20] Linton, D., Widjaja, R., and Thornber, B., "Simulations of Tandem and Coaxial Rotors using a CFD-Coupled Rotor Model", 21st Australasian Fluid Mechanics Conference, December 10-13, Adelaide, Australia, pp. 81-85, (2018).
- [21] Kalra, T.S., Lakshminarayan, V.K., and Baeder, J.D., "CFD Validation of Micro Hovering Rotor in Ground Effect", AHS International Specialists Conference Proceedings on Aeromechanics, January 20-22, San Francisco, California, USA, pp. 675-696, (2010).
- [22] Lee, T.E., Leishman, J.G., and Ramasamy, M., "Fluid Dynamics of Interacting Blade Tip Vortices with a Ground Plane", Journal of the American Helicopter Society, Vol. 55(2), pp. 005-015, (2010).
- [23] Bagai, L.J., "A Study of Rotor Wake Developments and Wake-Body Interactions in Hover Using Wide-Field Shadowgraphy", Journal of the American Helicopter Society, Vol. 37(4), pp. 48-57, (1992).
- [24] Catherine, A. M., "Download Reduction on a Wing -Rotor Configuration", Ph.D. Thesis, School of Aerospace Engineering, Institute of Technology, Georgia, (2001).
- [25] Gupta, V., and Baeder, J.D., "Quad Tilt Rotor Aerodynamics in Helicopter Mode", 61st American Helicopter Society Annual Forum, June 1-3, Grapevine, Texas, USA, pp. 416, (2005).
- [26] Stepniewski, W. Z., "Simplified Approach to the Aerodynamic Rotor Interference of Tandem Helicopters", American Helicopter society Meeting, September 21-22, West Coast, USA, pp. 71-91, (1955).

- [27] Stepniewski, W. Z., "Rotary-wing aerodynamics. Volume 1: Basic theories of rotor aerodynamics with application to helicopters", Contractor Report NAS2-7007, NASA-CR-3082, New York, USA, (1979).
- [28] Dingeldein, R. C., "Wind Tunnel Studies of the Performance of Multirotor Configurations", NACA-TN-3236, Virginia, USA, (1954).
- [29] Sweet, G.E., "Hovering Measurements for Twin-Rotor Configurations with and without Overlap", Report L-95399, NASA Technical Note D-534, (1960).
- [30] Harris, F.D., "Twin Rotor Hover Performance", Journal of the American Helicopter Society, vol. 44(1) pp. 34-37, (1999).
- [31] Fradenburgh, E.A., "Flow Field Measurements for a Hovering Rotor Near the Ground", Fifth Annual Western Forum, Sept. 24-26, Los Angeles, CA, USA, pp. 62-80, (1958).
- [32] Shahmiri, F., "Experimental Investigation of the Hovering Performance of a Twin-Rotor Test Model", Journal of Aerospace Science and Technology (JAST), Vol. 10, pp. 1-7, (2013).
- [33] Rankine, W.J.M., "On the Mechanical Principles of the Action of Propellers", Transactions of the Institute of Naval Architects Journal, Vol. 6, pp. 13-39, (1865).
- [34] Froude, W., "On the Elementary Relation between Pitch, Slip and Propulsive Efficiency", Transactions of the Institute of Naval Architects Journal, Vol. 19, pp. 47-57, (1878).
- [35] Lanchester, F.W., "A Contribution to the Theory of Propulsion and the Screw Propeller", Transactions of the Institute of Naval Architects Journal, Vol. 57, pp. 98-116, (1915).
- [36] Ramasamy, M., "Hover Performance Measurements toward Understanding Aerodynamic Interference in Coaxial, Tandem, and Tilt Rotors", Journal of the American Helicopter Society, Vol. 60(3), pp. 1-17, (2015).
- [37] Tan, J.F., Sun, Y.M., and Barakos, G.N., "Vortex Approach for Downwash and Outwash of Tandem Rotors in Ground Effect", Journal of Aircraft, Vol. 55(6), pp. 2491-2509, (2018).
- [38] Tan, J.F., Cai, J.G., Barakos, G.N., Wang, C., and Huang, M.Q., "Computational Study on the Aerodynamic Interference between Tandem Rotors and Nearby Obstacles", Journal of Aircraft, Vol. 57(3), pp. 456-468, (2020).
- [39] Weishäupl, A.B., and Prior, S.D., "Influence of Propeller Overlap on Large-Scale Tandem UAV Performance", Unmanned Systems Journal, Vol. 7(04), pp. 245-260, (2019).
- [40] Nguyen, D.H., Liu, Y., and Mori, K., "Experimental Study for Aerodynamic Performance of Quad Rotor Helicopter", Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences Journal, Vol. 61(1), pp. 29-39, (2018).
- [41] Mehrabi, A., and Davari, A., "Outwash Flow Behavior of Tandem Rotors near the Ground Effect", Modares Mechanical Engineering Journal, Vol. 20(6), pp. 1567-1581, (2020).

- [42] Mehrabi, A., and Davari, A., "Empirical Investigation of Induced Inflow and Down wash Under the Small Tandem Rotors", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 52(11), pp. 71-80, (2019).
- [43] Mehrabi, A., and Davari, A., "Outwash Flow Measurement around the Subscale Tandem Rotor in Ground Effect", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 23, pp. 1374–1384, (2020).
- [44] Felker, F.F., and Light, J.S., "Aerodynamic Interactions between a Rotor and Wing in Hover", *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 33(2), pp. 53-61, (1988).
- [45] Mcveigh, M., "The V-22 Tilt-rotor Large-scale Rotor Performance/Wing Download Test and Comparison with Theory", *Vertica Journal*, Vol. 10(3), pp. 281-297, (1986).
- [46] Polak, D.R., Rehm, W., and George, A.R., "Effects of an Image Plane on the Tilt Rotor Fountain Flow", *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 45(2), pp. 90-96, (2000).
- [47] Piccinini, R., Tugnoli, M., and Zanotti, A., "Numerical Investigation of the Rotor-rotor Aerodynamic Interaction for eVTOL Aircraft Configurations", *Energies Journal*, Vol. 13, pp. 59-95, (2020).
- [48] Preston, J.R., Troutman, S., Keen, E., Silva, M., Whitman, N., Calvert, M., Cardamone, M., Moulton, M., and Ferguson, S.W., "Rotorwash Operational Footprint Modeling", Technical Report of the U.S. Army Research, Development, and Engineering Command, AL 35898-5000; Technical Report RDMR-AF-14-02, (2014).
- [49] Pasquali, C., Serafini, J., Bernardini, G., Milluzzo, J., and Gennaretti, M., "Numerical-Experimental Correlation of Hovering Rotor Aerodynamics in Ground Effect", *Aerospace Science and Technology Journal*, Vol. 106, pp. 60-79, (2020).
- [50] Betz, A., "The Ground Effect on Lifting Propellers", NACA-TM-836, (1937).
- [51] Knight, M., and Hefner, R. A., "Analysis of Ground Effect on the Lifting Airscrew", NACA-TN-835, (1941).
- [52] Fradenburgh, E.A., "The Helicopter and the Ground Effect Machine", *Journal of American Helicopter Society*, Vol. 5(4), pp. 26-28, (1960).
- [53] Prouty, R.W., "Ground Effect and the Helicopter", AIAA/ASEE Aircraft Design Systems and Operations Meeting, Oct. 14-16, Colorado Springs, CO., USA., pp. 14-25, (1985).
- [54] Hayden, J.S., "The Effect of the Ground on Helicopter Hovering Power Required", 32th Annual National V/STOL Forum of the American Helicopter Society, May 10-12, Washington, D.C., USA., pp. 1-11, (1976).
- [55] Department of, T.U.S., Federal, A. A., "*Rotorcraft Flying Handbook (FAA-H-8083-21)*", Federal Aviation Administration, Washington, D.C., USA., (2013).
- [56] Pham, H., "*Springer Handbook of Engineering Statistics*", Springer Science & Business Media, Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 301, (2006).

فهرست نمادهای انگلیسی

- A : مساحت
d : فاصله بین مرکز دو ملخ
D : قطر ملخ
l : طول بدنه بالگرد
m : ضریب ناحیه همپوشانی
P : توان
 P_{rms} : فشار میانگین
Q : گشتاور
R : شعاع ملخ
rpm : دور بر دقیقه (سرعت دورانی)
T : تراست (نیروی رانش بالابرنده)
V : سرعت
X : فاصله طولی
Z : فاصله عمودی از زمین

نمادهای یونانی

- Ω : سرعت دورانی ملخ
 ρ : چگالی

Abstract

In the present study, the effect of ground proximity on some performance parameters of fixed pitch 26×8 inches wooden rotors was identified using a multifunctional laboratory stand. To investigate the effects of ground proximity on the trust and power values in hover flight, the measurements were performed in three different overlap values (0, 10 and 20%). The results showed that the increasing effect of ground proximity on the trust of tandem rotor is greater than single rotor. As the overlap of the rotors increased and the effect of the backflow jets flowing from the ground, the amount of produced trust in ground effect increased. Power measurements showed that by reducing the height of the rotors in the ground effect, the negative effect of their aerodynamic interference and the amount of power consumption reduced by about 5%.