

آثار ملخ در عملکرد هواپیماهای سبک موتور ملخی

امیررضا کوثری^۱، محمدعلی شاهی آشتیانی^۲، محسن رستمی^۳

۱ استادیار و عضو هیئت علمی، دانشگاه تهران، تهران، ایران، kosari_a@ut.ac.ir

۲ دانشیار و عضو هیئت علمی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۹/۰۳

چکیده

اثر ملخ از جمله مباحثی است که در محاسبات مربوط به دینامیک و کنترل وسیله پروازی پیچیدگی‌های خاص خود را دارد. در هواپیماهای موتور ملخی، آثار ملخ بر شرایط تریم پرواز و رفتار پایداری استاتیکی تأثیر بسزایی دارد. آثاری که ملخ بر نیروها و ممان‌های جانبی هواپیما می‌گذارد، به اندازه‌ای مهم است که طراح باید آگاهی کاملی از آنها داشته باشد و در تکامل هواپیمای مورد نظر خود این پارامترها را لحاظ کند. خلبان‌های هواپیمای ملخی این آثار را در حین پرواز به‌خوبی لمس می‌کنند، اما از فیزیک آن اطلاعات چندانی ندارند. به‌طور کلی می‌توان آثار ملخ در هواپیماها را به چند دسته گشتاور ملخ، رانش نامتقارن ملخ، اثر لغزشی ملخ و اثر ژيروسکوپی تقسیم کرد. هر یک از این فاکتورها با توجه به ابعاد هواپیما، چیدمان و تعداد موتورهای آن و در شرایط مختلف پروازی مقدار و حساسیت ویژه‌ای خواهند داشت. هدف از این مقاله معرفی و بررسی هر کدام از این آثار به‌طور مجزا و پرداختن به پدیده‌هایی است که منجر به این آثار می‌شوند.

واژگان کلیدی: هواپیمای سبک، موتور، ملخ، پایداری، دینامیک پرواز

۱. مقدمه

پرنده‌ها نصب شود. سه چیدمان متداول وجود دارد که در ادامه هر کدام مورد بررسی قرار خواهد گرفت. گونه نخست با نام تراکتور شناخته می‌شود. گونه بعدی با نام اصطلاحاً هل‌دهنده^۲ شناخته می‌شود و گونه آخر از موتورهایی بهره می‌برد که با استفاده از نگهدارنده یا گهواره^۳ روی بال‌ها قرار می‌گیرند. از همان اوائل، در سال ۱۹۰۹ م، مشخص شد که یک ملخ در مواجهه با جریان جانبی، نیروی جانبی زیادی تولید می‌کند [۲-۴]. نخستین رفتار تحلیلی این پدیده در سال ۱۹۱۸ م توسط

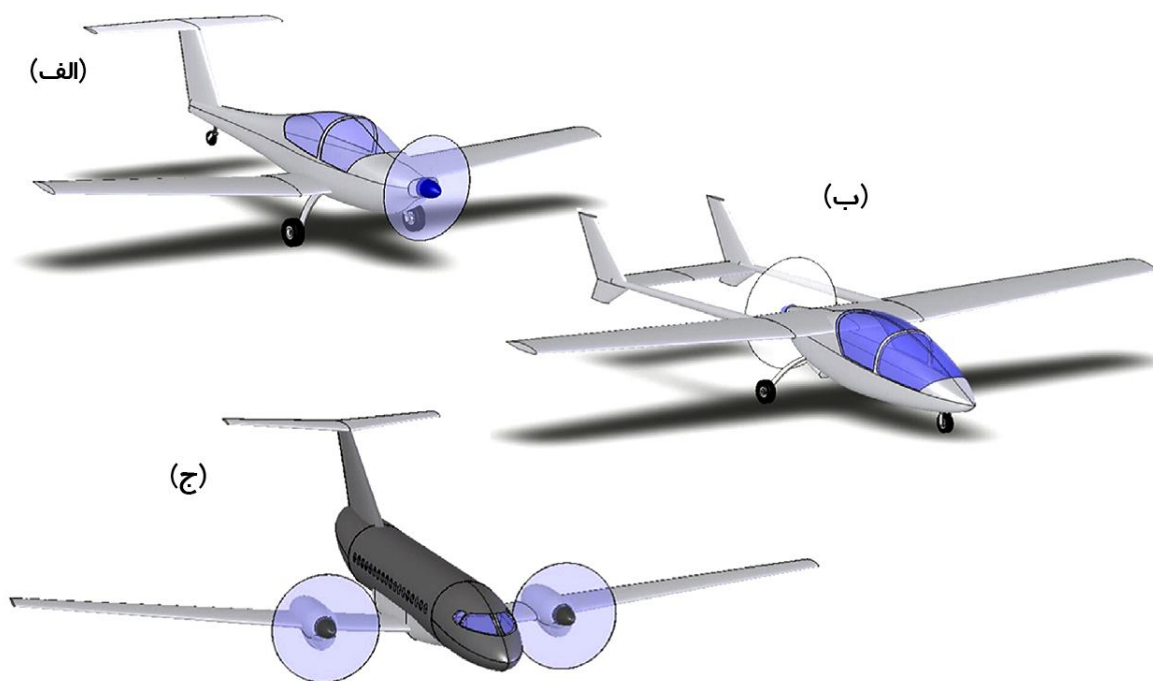
ملخ وسیله‌ای است که قدرت مکانیکی را به نیرو (پیشران) تبدیل می‌کند و برای به حرکت درآوردن وسیله پروازی به کار می‌رود. ملخ از یک یا چند پره تشکیل شده است که با استفاده از یک موتور به سرعت به چرخش درمی‌آید. پیشران، نیروی اثرودینامیکی برآ^۱ می‌باشد که توسط پرها تولید شده و معادل نیروی برای تولیدی توسط یک بال است. ملخ‌ها اصلی‌ترین بخش تولیدکننده پیشران در پرنده‌های حوزه هوانوردی عمومی به‌شمار می‌روند [۱]. ملخ در چیدمان‌های مختلفی می‌تواند روی

هریس ارائه شد و نشان داد که ممان پیچینگ^۴ از جریان جانبی نیز حاصل می‌شود [۵]. پس از آن گلورت این آنالیز را به دیگر مشتقات پایداری ملخ توسعه داد [۶-۷]. در ایالات متحده یافته‌های علمی این پدیده اوایل دهه ۲۰ م آغاز و طی جنگ جهانی دوم، زمانی که هواپیماهای مجهز به موتورهای قدرتمند عرضه شدند، شدت یافت. پس از آن روش‌های ارائه‌شده اغلب براساس روش تئوری کلاسیک ممنتوم خطی استوار بوده است [۸]. در سال ۱۹۷۲ م، در سازمان ناسا در ایالات متحده، تحقیقات گسترده‌ای درباره نحوه محاسبه ضرایب و مشتقات

پایداری پرنده‌های دوموتوره ملخی سبک صورت پذیرفت. نتیجه این تحقیقات دو گزارش با عناوین مشخصه‌های ائروپاینامیکی طولی و مشخصه‌های ائروپاینامیکی عرضی - سمتی در وسائل پرنده دوموتوره ملخی سبک بود [۹-۱۰].

۲. آثار ملخ

به‌طور کلی آثار ملخ در هواپیماها را می‌توان به چند دسته تقسیم‌بندی کرد: گشتاور ملخ، رانش نامتقارن ملخ^۵، اثر لغزشی ملخ^۶ و نهایتاً اثر ژيروسکوپی^۷.



شکل ۱. چیدمان‌های متداول پرنده‌های ملخی؛ الف) تراکتور، ب) هل دهنده، ج) چندموتوره روی بال

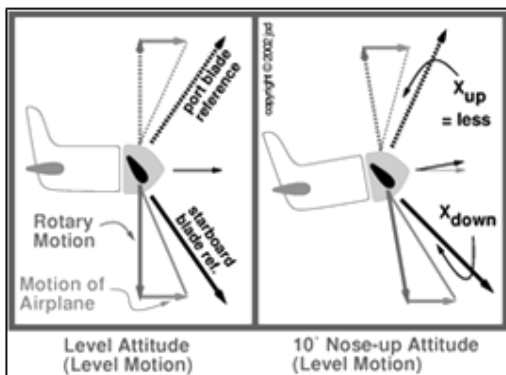
هر کدام از این فاکتورها با توجه به ابعاد هواپیما، چیدمان موتورهای آن و در شرایط مختلف پروازی مقدار و شرایط ویژه‌ای را به‌دنبال خواهند داشت. در ادامه هر کدام از این آثار به‌طور مجزا بررسی شده و تشریح خواهد شد که هر کدام ناشی از کدام پدیده‌هاست.

۲-۱. اثر گشتاور ملخ

اثر گشتاور در واقع نفوذپذیری گشتاور موتور در حرکت هواپیما و کنترل آن است. این وضعیت به‌طور کلی با توجه به هم‌جهت بودن چرخش ملخ‌ها تحت یک تمایل چرخش به چپ

موتورهای راستگرد و چرخش به راست (موتورهای چپگرد) در هواپیماهای ملخی خود را نمایان می‌کند. براساس قانون نیوتن برای هر عملی عکس‌العملی برابر با آن و در جهت خلاف آن وجود دارد. بدین ترتیب وقتی موتور به‌طور ساعتگرد می‌چرخد (در وضعیتی که ناظر در کابین خلبان قرار دارد) باعث می‌شود که هواپیما تمایل به چرخش پادساعتگرد داشته باشد. چون بیشتر هواپیماهای تک‌موتوره دارای ملخ‌های با جهت چرخش ساعتگرد هستند، به‌سمت چپ می‌چرخند و به بال سمت چپ نیرویی به سمت پایین وارد می‌کنند. معمولاً خلبان با استفاده از ورودی‌های کنترلی تحت اختیار این مسئله را جبران می‌کند.

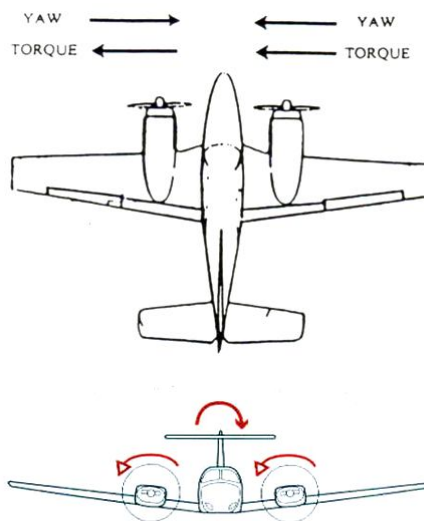
به وجود می‌آید و وقتی بالگرد در پرواز مستقیم قرار دارد، پرهٔ یک سمت دارای سرعت بیشتری نسبت به پرهٔ دیگر است. در هواپیماهای ملخی این حالت می‌تواند در شرایط بحرانی (از کار افتادن یک موتور) و یا شرایط معمولی (ناشی از یکی بودن جهت چرخش ملخ‌ها) رخ دهد. تیغهٔ سمت راست (دید از جایگاه خلبان) که پایین‌رونده است، زاویهٔ حملهٔ^۱ بالاتری در مقایسه با تیغهٔ بالارونده در سمت چپ دارد و بدین ترتیب پیشران بیشتری نیز ایجاد می‌کند. باید توجه داشت که در مورد رانش نامتقارن ملخ، زاویهٔ ذکرشدهٔ زاویهٔ بین ملخ و زاویهٔ حمله است، نه زاویهٔ ملخ با زمین. با توجه به α وقتی دیسک ملخ به سمت مسیر پروازی خم می‌شود، پرهٔ بالارونده زاویهٔ حملهٔ کمتری نسبت به پرهٔ نزولی خواهد داشت. بنابراین با توجه به شکل زاویهٔ X_{up} کمی کوچکتر از X_{down} خواهد بود که در حالت اولیه با هم برابر بودند.



شکل ۳. اختلاف زاویه‌ای بین پرهٔ پایین‌رونده و بالارونده

رانش نامتقارن ملخ به سادگی قابل مشاهده نیست. معمولاً این اثر در شرایط پروازی عادی هواپیما با توجه به بزرگتر بودن اثر لغزشی ملخ و برای پیچشی، کمتر نمایان می‌شود. در بعضی از هواپیماها اثر لغزشی ملخ، دم را تحت تأثیر قرار می‌دهد و باید با انحراف سطح کنترلی سکان عمودی به سمت راست برای جبران آن اقدام کرد. چنانچه دیسک ملخ نسبت به سرعت نسبی هواپیما دارای زاویهٔ حمله باشد، اثر رانش نامتقارن ملخ ظاهر می‌شود. بدین ترتیب تا وقتی که این زاویه صفر باشد، اثری هم از رانش نامتقارن ملخ وجود نخواهد داشت [۱۱]. در هواپیماهای دوموتوره، در شرایط اوج‌گیری، تیغهٔ نزولی ملخ پیشران بیشتری را در مقایسه با تیغهٔ بالارونده ایجاد می‌کند. با توجه به اینکه جهت چرخش ملخ‌های هواپیماهای مورد بررسی ساعتگرد است، تیغهٔ نزولی موتور سمت راست بازوی گشتاور بلندتری در مقایسه

به‌عنوان مثال هواپیمایی که در حال غلتش به سمت چپ است، خلبان با استفاده از شهپر^۲ سمت راست آن را خنثی می‌کند. البته این اصلاح با مقداری گردش معکوس نیز همراه خواهد بود که با استفاده از حرکت یا تنظیم سکان عمودی^۳ (سکان عمودی به سمت راست) این وضعیت نیز جبران می‌شود. در هواپیماهای دو موتوره چنانچه پره‌های دو موتور خلاف جهت هم بچرخند این اثر خنثی خواهد شد، اما با چرخیدن ملخ‌های موتورها در یک جهت در واقع این اثر تشدید خواهد شد. مثلاً در هواپیمایی که ملخ‌ها در آن به‌طور ساعتگرد در حال چرخش هستند، هواپیما تمایل به غلتش خلاف جهت ساعت دارد. در صورتی که موتور سمت راست خاموش شود، هواپیما به سمت راست غلتش خواهد داشت، اما با توجه به گشتاور به سمت چپ این غلتش کاهش خواهد یافت. اما چنانچه موتور سمت چپ خراب شود، با توجه به ساعتگرد بودن ملخ، غلتش ایجاد می‌شود به سبب گشتاور و غلتش هواپیما هر دو به سمت چپ خواهد بود و در عمل نیاز به انحراف بیشتر شهپر برای جبران وجود خواهد داشت. بدین ترتیب نتیجه می‌شود که در هواپیماهای دوموتوره، که موتورهای با چرخش ساعتگرد دارند، موتور سمت چپ موتور بحرانی خواهد بود که از دست رفتن آن شرایط پروازی پرنده را بیشتر می‌تواند تحت تأثیر قرار دهد.



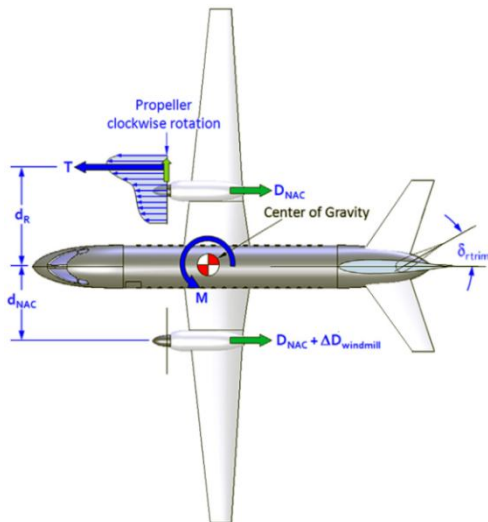
شکل ۲. گشتاور ایجادشده در اثر ملخ

۲-۲. رانش نامتقارن ملخ

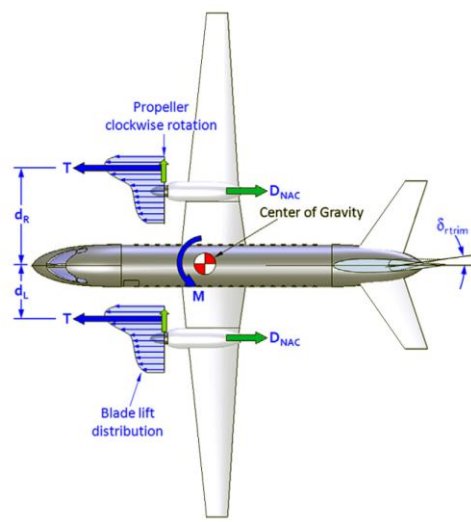
رانش نامتقارن ملخ، پدیده‌ای است که بیشتر در مورد بالگردها به کار می‌رود. این پدیده به سبب بارگذاری نامتقارن دیسک ملخ

با تیغه نزولی موتور سمت چپ خواهد داشت. بنابراین گشتاور گردش تولیدی حول مرکز جرم توسط موتور سمت چپ، کمتر از موتور سمت راست خواهد بود (۰). بدین ترتیب رانش نامتقارن ملخ می‌تواند سبب یک حرکت سمتی به سمت چپ در هواپیما شود. برای جبران این اثر نیاز به انحراف سطح کنترلی سکان عمودی به سمت راست است. حال فرض می‌شود موتور بحرانی^{۱۱} (موتور سمت چپ) کارایی خود را از دست بدهد. این حالت، که به شرایط یک موتور خاموش^{۱۲} معروف است، وضعیت

بسیار سختی برای خلبان به وجود می‌آورد (۰). مشاهده می‌شود که از دست رفتن موتور سمت چپ، گشتاور تولیدی بسیار بیشتری در مقایسه با از دست رفتن موتور سمت راست ایجاد می‌کند. به همین دلیل به موتور سمت چپ موتور بحرانی گفته می‌شود. پیشران نامتقارن منجر به ایجاد گشتاوری بسیار قوی می‌شود که هواپیما را به سمت موتور از دست رفته گردش می‌دهد [۱۰].



شکل ۵. اثر رانش نامتقارن ملخ در هواپیماهای دو موتوره ملخی در شرایط بحرانی (یک موتور خاموش)

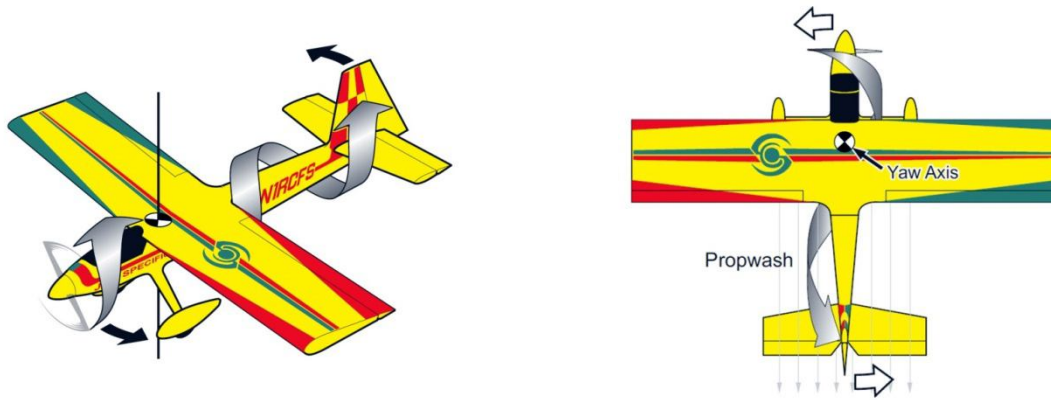


شکل ۴. اثر رانش نامتقارن ملخ در هواپیماهای دو موتوره ملخی

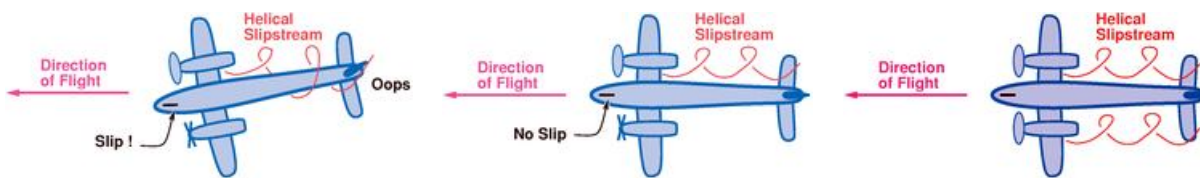
حالت‌های با قدرت بالا و سرعت کم یا همان شروع حرکت برخاست است. اما در مورد هواپیماهای چندموتوره ملخی در برخی حالات مشابه تک‌موتوره است و در برخی از مواقع شرایط متفاوت است و به همین ترتیب در هواپیماهایی که ملخ موتورهای در یک جهت چرخش دارند، شرایط کمی متفاوت خواهد بود. معمولاً در پروازهای عادی بیشتر اثر لغزشی ملخ به دم عمودی نمی‌رسد (۰). اما چون این جریان دنباله‌ای در مسیر خود از موتور به سمت سطح دم می‌رود، بخشی از اثر لغزشی ملخ با دم برخورد پیدا می‌کند. اثر این مقدار می‌تواند بسته به اندازه و شکل هواپیما بزرگ یا کوچک باشد. برای جبران این اثر می‌توان از سکان عمودی استفاده کرد. در حالت یک موتور از دست رفته تا جایی که سرش صفر باشد، اثر لغزشی ملخ می‌تواند نصف حالت دو موتور روشن باشد؛ زیرا تنها یکی از موتورهای اثر لغزشی خواهد داشت. این حالت نیز در شکل ۸ نمایش داده شده است.

۲-۳. اثر لغزشی ملخ

از جمله مسائلی که افراد به‌هنگام شروع به آموزش پرواز مشاهده می‌کنند، این است که سکان عمودی سمت راست (گاهی اوقات به مقدار بسیار زیادی) در همان ابتدای چرخش برخاست^{۱۳} برای حرکت مستقیم هواپیما مورد نیاز است. البته این مهم در مورد هواپیماهای تک‌موتوره اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. یک ملخ هوا را نه تنها به‌طور افقی، که بیشتر به‌صورت ماریپیچی حول بدنه به حرکت درمی‌آورد. با چرخش هوا حول بدنه در یک هواپیمای تک‌موتوره ملخی، هوای چرخیده شده در انتهای هواپیما با دم عمودی برخورد می‌کند و سبب حرکت سمتی هواپیما به چپ می‌شود. این شرایط را می‌توان برای یک هواپیمای تک‌موتوره ملخی به‌صورت زیر مشاهده کرد. اثر لغزشی ملخ، قوتی جریان هوا بیشتر دور بدنه می‌چرخد، تا اینکه در طول آن حرکت کند، نمایان می‌شود. در واقع منظور



شکل ۶. اثر لغزشی ملخ در هواپیماهای تک‌موتوره



شکل ۹. اثر لغزشی ملخ در حالت از دست رفتن یک موتور با حضور سرش

شکل ۸. اثر لغزشی ملخ در حالت از دست رفتن یک موتور بدون حضور سرش

شکل ۷. اثر لغزشی ملخ در حالت دوموتور روشن برای یک هواپیمای دوموتوره

برای هر دو موتور استفاده می‌شود. این انحراف شهپر نیز منجر به تولید برای زیادی شده و حتی بزرگی این برا در هر دو طرف یکسان است. بدین ترتیب نیاز خواهید بود که از سکان عمودی سمت راست برای خنثی‌شدن این وضعیت استفاده شود. این مسئله نیز بیشتر در شرایط سرعت‌های پایین و قدرت بالا قابل ملاحظه خواهد بود. البته شرایط ذکر شده برای حالتی است که موتورها ساعتگرد عمل می‌کنند. در مرجع [۱۲] ذکر شده است از میان تمامی آثار توان ملخ روی پایداری و کنترل، بررسی آن دسته‌ای که به‌خاطر جریان لغزشی ملخ یا دنباله جریان وجود دارد، از همه سخت‌تر است؛ چه از نظر تحلیلی و چه از منظر انجام آزمایش. همچنین ذکر شده است که یک وابستگی نیمه‌تجربی از میزان افزایش فروزش^{۱۵} به‌خاطر ملخ در حال کار توسط ویل و اسلیمین بر پایه فروزش موتور - خاموش و ضریب نیروی پیشران ایجاد گردید. دوران جریان لغزشی پشت ملخ هواپیماهای تک‌موتوره در سرعت‌های پایین یک نیروی جانبی روی دم عمودی ایجاد می‌کند که خلبان مجبور به اعمال انحراف سکان عمودی مخالف می‌شود تا مسیر مستقیم را حفظ نماید. این مورد می‌تواند در سطوح بالای توان کنترلی مورد نیاز عصبی‌کننده باشد؛ مثلاً در برخاست یا فرود هواپیماهای باربری،

در حالتی که سکان عمودی به اندازه کافی نباشد که سرش^{۱۴} را صفر کند، بیشتر دم تحت تأثیر اثر لغزشی قرار می‌گیرد، همان‌طور که در شکل ۹ نیز نشان داده شده است. در سرعت‌های پایین شرایط به‌سادگی می‌تواند به حالتی باشد که نتوان مقدار مناسبی برای مقابله سکان عمودی با این پدیده ایجاد کرد. با توجه به اینکه دم عمودی به سمت بالا قرار دارد و نه به سمت پایین؛ موتور سمت راست به‌گونه‌ای عمل خواهد کرد که اثرپذیری سکان عمودی کاهش پیدا کند. در اینچنین شرایطی برای جبران باید سکان عمودی راست به اندازه کافی اتخاذ شود. اینکه اثر لغزشی مقدار گشتاور مسیر گردش را بیشتر زمانی که دارای یک زاویه سرش بزرگ است تحت تأثیر قرار می‌دهد کمی بحث‌برانگیز است. در حالت عادی این اتفاق نمی‌افتد، مگر اینکه در شرایط آن قرار گرفته باشد. بدین ترتیب این اثر تنها در سرعت‌های پایین اهمیت زیادی دارد. مثلاً در وضعیت کمینه سرعت کنترل یا برخاست در حضور باد جانبی (به‌خصوص باد جانبی از چپ). در هواپیماهای ملخی دوموتوره در حالتی که موتورها به بدنه نزدیکتر باشند، دم بیشتر تحت تأثیر اثر لغزشی قرار می‌گیرد. از طرفی پسای ملخ خود منجر به گشتاور غلتشی می‌شود و برای جبران این مسئله از شهپر راست

برخی سازنده‌ها بسته به جهت چرخش ملخ، به دم زاویه نصب می‌دهند تا زوایای مورد نیاز سکان عمودی در سطوح توان مورد نیاز بالا و سرعت‌های پایین را کمینه کنند. با اینحال، دم‌هایی با زاویه نصب، در برخی مانورها نیروهای پدال را نامطلوب می‌نمایند. فاصله عرضی مرکز جرم از محور تقارن هواپیما نیز در کاهش انحراف‌های سکان عمودی برای تریم در برخی شرایط مؤثر است. البته این مورد نیز در برخی موارد معضلاتی در پی داشته و بعضاً عدم تمایلی به این کار صورت گرفته است. اما این مورد کاملاً قابل بررسی است. جریان لغزشی روی بال، دم و بدنه باعث موارد زیر می‌شود [۱۳]:

۱. افزایش فشار دینامیکی

۲. مارپیچی کردن جریان

۳. اثر روی فرورزش و وزش جانبی در دم

جریان لغزشی ملخی که در جلوی بال است، برای بال را تقویت نموده و تأثیر مثبتی روی واماندگی بال دارد [۱۵]. این مورد، چون توزیع برای در راستای محور عرضی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، می‌تواند در تریم و پایداری عرضی هواپیما اثرگذار باشد. آثار غیرمستقیم نیروی پیشران عمدتاً موارد زیر هستند [۱۵]:

۱. اثر جریان لغزشی ملخ روی بال، وقتی ملخ جلوی بال قرار گرفته باشد

۲. اثر جریان لغزشی ملخ روی فرورزش بال که می‌تواند بر اثرودینامیک دم افقی و یا عمودی اثر بگذارد

۲-۳-۱. اثر روی فشار دینامیکی

نیروهای اثرودینامیکی روی سطوح برآ، با فشار دینامیکی محلی جریان متناسب است [۱۵]. مرجع فشار دینامیکی در جریان آزاد، برای محاسبه نیروها و گشتاورهای اثرودینامیکی در کل هواپیما، بر پایه سرعت حقیقی هواپیماست: $q = 0.5 \rho V^2$. اما فشار دینامیکی در دنباله فرورزش بال، با تلفات اصطکاک یا با پدیده جدایش و آثار لایه مرزی^{۱۶} کاهش می‌یابد. اگر یک سطح در عقب در دنباله جریان ملخ باشد، محتمل است که بسته به قدرت موتور در نهایت فشار دینامیکی از فشار دینامیکی جریان آزاد بزرگتر باشد. برای دم عمودی از نسبت زیر استفاده می‌گردد:

۱. اثر جریان لغزشی ملخ روی بال، وقتی ملخ جلوی بال قرار گرفته باشد

۲. اثر جریان لغزشی ملخ روی فرورزش بال که می‌تواند بر

اثرودینامیک دم افقی و یا عمودی اثر بگذارد

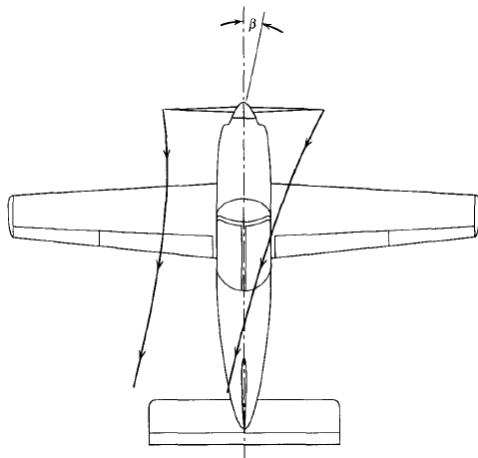
$$\eta_v = \frac{\bar{q}_v}{\bar{q}} \quad (1)$$

فشار دینامیکی، q ، در طول دهانه دم، ممکن است به‌خاطر لایه مرزی بدنه و جریان لغزشی ملخ کمتر یا بیشتر از جریان دوردست باشد. همچنین مشخص کردن توزیع فشار دینامیکی در دم سخت و عمدتاً به مقدار جریان دوردست نزدیک است [۱۶]. چون با کاهش سرعت و افزایش توان، فشار دینامیکی در جریان لغزشی نسبت به فشار دینامیکی جریان آزاد افزایش می‌یابد، اهمیت آثار جریان لغزشی نیز افزایش خواهد یافت [۱۷]. جریان لغزشی پشت هر ملخ، ناحیه‌ای است که سرعت در مقایسه با جریان آزاد به‌دلیل جریان داخلی ملخ افزایش می‌یابد. این افزایش سرعت جریان لغزشی به‌صورت افزایش فشار دینامیکی آشکار می‌شود. افزایش فشار دینامیکی روی اثربخشی سطوح کنترلی و اثرودینامیکی، که در معرض جریان لغزشی قرار دارند، تأثیر خواهد داشت. کاتر و جانسون نشان دادند که استفاده از توان باعث افزایش میرایی در گردش (C_{nr}) و افزایش پایداری سمتی ($C_{n\beta}$) می‌شود که این آثار را ناشی از افزایش فشار دینامیکی روی دم عمودی در نظر می‌گیرند. همچنین اثربخشی سکان عمودی ($C_{n\delta r}$) زمانی که در معرض جریان لغزشی قرار دارد افزایش می‌یابد.

۲-۳-۲. اثر دایهدرال^{۱۷}

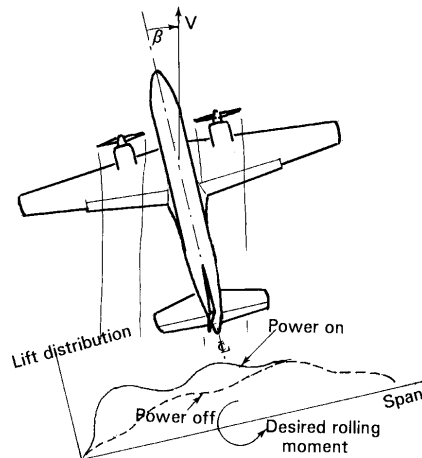
اثر دیگری که جریان لغزشی ملخ روی پایداری دارد، اثر دایهدرال معکوس در زوایای حمله بالاست. این اثر هندسی در نمایش داده شده است. سرش جانبی، جریان لغزشی ملخ را به سمت بال بادپناه^{۱۸} (بالی که عقب‌تر قرار دارد) برده و سبب افزایش برای این بال نسبت به بال بادگیر^{۱۹} (بالی که جلوتر است) می‌شود، که یک گشتاور چرخشی ناپایدارکننده به‌خاطر سرش جانبی تولید می‌نماید و یک اثر دایهدرال منفی است. این پدیده منجر به ساخت دوباره نمونه آزمایشی هواپیمای مسافری مارتین ۲۰۲^{۲۰} شد؛ زیرا حضور پوسته‌های موتور در بال یک‌تکه اصلی آن سبب دایهدرال بیش‌تری در بخش‌های بیرونی می‌شد؛ اصلاحی که تقریباً شرکت را تا مرز ورشکستگی برد [۱۲]. زمانی که یک هواپیمای ملخی به یک سمت سر

برای یک هواپیمای بال پایین، جریان لغزشی ملخ زمانی که توان افزایش یابد اثر دایهدرال مؤثر را کاهش می‌دهد [۱۹]. این امر به این دلیل است که جریان لغزشی ملخ به‌طور غالب زمانی که هواپیما تحت سرش جانبی قرار دارد، از روی جریان پایین دست بال عبور می‌کند.

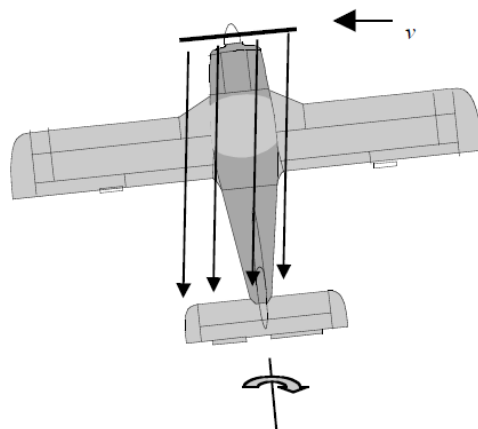


شکل ۱۱. تأثیر سرش جانبی در اثر دایهدرال

می‌خورد، دنباله جریان لغزشی ملخ به سمت دیگر کشیده شده و باعث افزایش برا در آن سمت می‌شود. این مورد می‌تواند منتج به افزایش قابل توجه $C_{l\beta}$ گردد. متأسفانه پیش‌بینی این تداخلات سخت بوده و بهتر است با آزمایش‌های تونل باد با مدل هواپیمای مجهز به سامانه تولید توان به دست آیند [۱۸].



شکل ۱۰. اثر دایهدرال ناپایدار به خاطر بارهای جریان لغزشی



شکل ۱۲. Propwash منتج به گشتاور چرخشی ناپایدارکننده به سمت سرش جانبی

خواهد بود. تأثیر کلی توان ملخ معمولاً کاهش $C_{l\beta}$ است. یک هواپیما با تأثیر دایهدرال، دور از یک سرش جانبی (دور از بردار سرعت) دوران می‌کند [۱۹].

۲-۳-۳. تداخل جریان لغزشی با بال

مؤلفه مارپیچی سرعت که در هر گونه جریان لغزشی ناشی از ملخ حضور دارد، (به جز در ملخ‌های پادگرد) پیامدهای قابل توجهی روی پایداری و فرمان‌پذیری هواپیما دارد [۱۷]. با

در نتیجه نیروی برای بال افزایش پیدا کرده و دایهدرال مؤثر کاهش می‌یابد. دومین تأثیر مهم به دلیل ماهیت مارپیچی جریان لغزشی بال است که باعث می‌شود مقاطعی روی بال کاهش زاویه حمله محلی و مقاطعی دیگر افزایش آن را تجربه کند که این تغییرات سبب تغییر توزیع نیروی برا روی بال می‌شود. همان‌طور که توزیع نیروی برا در زوایای سرش جانبی مثبت و منفی متفاوت است، تغییرات در $C_{l\beta}$ ناشی از توان، برای زوایای سرش جانبی مثبت و منفی نیز متفاوت

این وجود، طبیعت دقیق این پیامدها به پیکربندی هواپیما (یعنی تعداد موتورها و موقعیت آنها نسبت به بال‌ها، بدنه و دم) بستگی دارد. خصوصاً برای هواپیماهای تک‌موتوره این مورد بسیار مهم است. در مورد تقرب نهایی نیز ذکر شده که در تنظیمات توان بالا و در سرش جانبی، محتمل است که جریان ماریپیچی باعث شود یک بال زودتر از بال دیگر دچار واماندگی شود، هواپیما در سقوط ماریپیچی قرار بگیرد و در الگوی فرود بازیابی از آن غیرممکن خواهد بود. حوادث زیادی از این قبیل ذکر شده است. به‌علاوه باید توجه کرد که همیشه یک گشتاور چرخشی به خاطر جریان ماریپیچی وجود خواهد داشت که با انحراف شهپر باید متوازن گردد. این معضلات، برای هواپیماهای دو و یا چندموتوره به این اندازه مهلک نیستند، هرچند همچنان اهمیت دارند. برخی در زمینه بهینه‌سازی پیکربندی ملخ - بال برای دستیابی به عملکرد بیشینه اقدام نموده‌اند. مسئله مهم برای هواپیماهای دو یا چندموتوره این است که ملخ‌هایی را به کار برده‌اند که در جهت موافق می‌چرخند. این موضوع عمدتاً به خاطر شباهت بیش‌تر طرف راست و چپ هواپیما و کم‌شدن معضلات انبارداری و قطعات یدکی و دور شدن از پیچیدگی‌های تعمیر و نگهداری صورت پذیرفته است. هرچند تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که مزیت‌های عملکردی قابل توجهی در این است که ملخ‌ها در بخش داخلی، به صورت بالارونده بچرخند؛ یعنی در صورتی که از پشت ملخ‌ها نظاره شوند، سمت راستی‌ها در جهت حرکت عقربه‌های ساعت و سمت چپی‌ها خلاف آن بچرخند. این مزیت‌های عملکردی به صورت افزایش در برا و کاهش در پسا در ناحیه‌ای از بال که جریان لغزشی ملخ از آن می‌گذرد ظاهر می‌شوند. به‌علاوه، جریان لغزشی ملخ در پروفیل لایه مرزی و در نتیجه در پسای اصطکاکی نیز آثاری می‌گذارد.

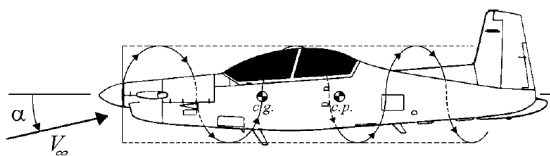
۲-۳-۴. تولید نیروی عمودی، گشتاور پیچشی و گشتاور گردش در دم افقی

مشابه آنچه برای بال وجود دارد، برای دم افقی نیز ممکن است به‌وجود آید [۱۹]؛ یعنی به‌خاطر تغییر کردن توزیع برا و سایر آثار توضیح داده‌شده، ممکن است گشتاور چرخشی و نیز یک نیروی عمودی در دم افقی تولید شود که مقدار نیروی افقی ناچیزتر است. اینکه چقدر این نیروها و گشتاورها اهمیت داشته باشند به این بستگی دارد که دم افقی چقدر در جریان لغزشی

ملخ قرار داشته باشد. به‌علاوه، ممکن است بخشی از دم، خصوصاً اگر به‌صورت نامتقارن باشد، داخل جریان لغزشی ملخ قرار گیرد که این نیز خود با تغییر توزیع برا روی دم، پیامدهایی خواهد داشت.

۲-۳-۱. تولید نیروی جانبی به بدنه در زاویه حمله

حتی در صورتی که دم‌ها روی مدل آزمایش نباشند، باز هم نیروهای جانبی و گشتاور گردشی موجود خواهد بود [۱۹]. این مورد به این صورت تفسیر می‌شود که اگر در هواپیمایی فرض شود که بال و دم‌ها از آن جدا شده باشند، محور برابند نیروی پیشران روی محور طولی بدنه باشد، و بدنه تا یک زاویه حمله مشخص بالا آورده شود، سرعت دورانی موجود در جریان لغزشی ملخ افزایشی در مؤلفه محوری سرعت ایجاد خواهد نمود (برای ملخ‌های راستگرد)، که در طرف چپ بدنه جریان پایین‌رونده و در طرف راست بدنه جریان بالارونده خواهد بود. با در نظر گرفتن قانون برنولی، این بدان معناست که فشار در طرف راست، بیشتر از فشار در طرف چپ خواهد بود (توجه شود که بدنه در زاویه حمله‌ای بزرگتر از صفر قرار دارد) و در نتیجه یک نیروی جانبی به طرف چپ حضور خواهد داشت. به‌خاطر توزیع جرم و مساحت یک بدنه معمولی مرکز فشار معمولاً پشت مرکز جرم خواهد بود و این نیروی جانبی یک گشتاور گردشی نیز به‌سمت راست تولید می‌کند. اکنون اگر همین بدنه این‌بار با حضور بال فرض گردد، اثر مهم بال، کاهش دوران جریان لغزشی جریان پایین‌دست است و فروزش بال، زاویه حمله مؤثر قسمت عقب بدنه را کاهش می‌دهد. نتیجه این مورد جلوتر رفتن مرکز فشار نسبت به حالتی خواهد بود که بدنه تنها بود و گشتاور گردشی ناشی از نیروی جانبی کاهش خواهد یافت.



شکل ۱۳. نیروی جانبی بدنه در حین داشتن زاویه حمله

۲-۳-۲. فاصله عرضی جریان لغزشی از محور تقارن

خصوصاً در هواپیماهای تک‌موتوره، در صورت استفاده از ملخ‌های پادساعت‌گرد تقریباً جریان لغزشی حول دم عمودی

است. حرکت ژيروسکوپي اغلب در حالي که چيدمان ارايه فرود چرخ دماغه‌اي است داراي اهميت مي‌شود (در همان آغاز کار در غلتش برخاست). براي اينکه یک ژيروسکوپ در مسير پيچشي حرکت کند گشتاوري در مسير گردش ياد وجود داشته باشد. اين در واقع کاری است که دم عمودي و سکان عمودي براي آن درست شده‌اند. ملخ‌ها يا موتورهاي توربيني که شبیه گردنده‌ها عمل مي‌کنند، گشتاورهاي ژيروسکوپي روی جسمي که به آن متصل‌اند اعمال مي‌کنند [۱۵]. گشتاورهاي ژيروسکوپي که به‌خاطر گردنده‌هاي در حال چرخش به‌وجود مي‌آيند، به‌سادگي مي‌توانند به معادله گشتاور پايه اضافه گردند. براي رسيدن به اين، فرض مي‌شود که هواپيما به یک يا چند گردنده در حال چرخش با یک برآيند کلي گشتاور زاويه‌اي است:

$$\vec{h} = \sum_{i=1}^n \vec{h}_i \quad (2)$$

فرض مي‌شود هر گردنده یک گشتاور لختي I_{R_i} حول محور چرخش خودش دارد. همچنين فرض مي‌شود که گردنده، با سرعت زاويه‌اي $\vec{\omega}_{R_i}$ مي‌چرخد. لذا معادله ۲ به‌صورت ۳ بازنويسی مي‌شود:

$$\vec{h} = \sum_{i=1}^n I_{R_i} \vec{\omega}_{R_i} \quad (3)$$

اين جمله، به جملات معادلات گشتاور پايه اضافه مي‌گردد.

۳. نتیجه‌گيري

آنچه در اين مقاله بدان پرداخته شد، معرفي آثار ملخ در هواپيماهاي موتور ملخي با چيدمان‌هاي مختلف و بررسي پيامدهاي حضور آنها در شرايط پروازي متفاوت وسيله پروازي بود. با توجه به آنچه ارائه شد، مهمترين آثار ملخ شامل اثر گشتاور، رانش نامتقارن، اثر لغزشي و حرکت ژيروسکوپي است. همچنين مشخص شد که در مورد هواپيماهاي تک‌موتوره مهمترين پديده ناشي از ملخ اثر لغزشي است، در حالي که در مورد هواپيماهاي چندموتوره و به‌ويژه دوموتوره با چيدمان موتورهاي روی بال، علاوه بر اثر لغزشي اثر رانش نامتقارن ملخ نيز بسيار حائز اهميت است. مي‌توان اين‌گونه نتیجه‌گيري کرد که آثار بررسي‌شده در اين مقاله در صورت حضور حين پرواز منجر به کاهش راندمان کلي ملخ خواهند شد. باوجود شناخت بسياري از اين پديده‌ها، محاسبات دقيق براي اندازه‌گيري مقادير

مقارن خواهد شد، البته زماني که گردش هواپيما صفر باشد [۱۷]. اما براي ملخ‌هاي تکی جريان مارپيچي موجود در جريان لغزشي ملخ، جابه‌جايي به یک سمت نسبتاً قابل توجه خواهد بود؛ که به‌خاطر پيچيدگي دنباله جريان پشت ملخ، مشخص کردن مقدار جابه‌جايي اين دنباله بسيار سخت خواهد بود. توضيح اين جابه‌جايي اين‌گونه است که جرياني که ملخ تکی ايجاد مي‌کند پادمتقارن است، در حالي که اگر بدنه پشت ملخ کاملاً متقارن باشد، دنباله جريان ملخ در طول محور دوران مسير خود را ادامه خواهد داد. اما اگر هرگونه عدم تقارني در بدنه باشد يا بدنه از محور تقارن جريان لغزشي (در واقع محور دوران جريان لغزشي) کنار رود، ماهيت پادمتقارن بودن جريان سبب خواهد شد که دنباله جريان منحرف شود و حتی فشار روی بال‌ها هم منتج به انحراف دنباله ملخ‌ها خواهد شد. جابه‌جايي دنباله ملخ دو پيامد عمده دارد: نخست اينکه اين جابه‌جايي بزرگي نيروي جاني دم عمودي را تحت تأثير قرار خواهد داد (به‌خاطر قرارگيري در جريان لغزشي، خصوصاً در هواپيماهاي تک‌موتوره) و ديگر اينکه زاويه گردش که در آن دم عمودي از جريان لغزشي بيرون مي‌آيد، براي گردش مثبت يا منفي متفاوت خواهد بود. اريب کردن محور نيروي پيشران موتور به یک سمت مي‌تواند موقعيت جريان لغزشي را حرکت داده و به غلبه بر اين قبيل مشکلات که ذکر شد، کمک نمايد.

۲-۳-۴-۳. نيروي جاني، گشتاور گردش و گشتاور چرخشي ناشي از دم عمودي

يکي از آثار مهم ناشي از چرخش جريان لغزشي ملخ توليد نيروي جاني روی دم عمودي است، زماني که در معرض اين جريانات قرار دارد [۱۹]. اين نيروي جاني سبب توليد گشتاور گردش مي‌شود. در شرايط پروازي سرعت پايين و توان بالا، ممکن است سکان عمودي قدرت مقابله با اين نيرو را نداشته باشد.

۲-۴. حرکت ژيروسکوپي

اين موضوع در واقع تمايل چرخش هواپيما براي حرکت حول محورش زماني که توسط یک نيرو تحت تأثير قرار مي‌گيرد است. موتور و ملخ همچون یک ژيروسکوپ بسيار بزرگ عمل مي‌کنند. اما حرکت ژيروسکوپي تقريباً در یک هواپيماي متداول بسيار کم

آثار مختلف ملخ در شرایط پروازی متفاوت وجود نداشته و غالباً
آزمایشگاهی قرار می‌دهند تا نتایج دقیق رفتار پرنده با حضور
هوایماها را پس از بسته‌شدن چیدمان اولیه تحت شرایط
تمامی آثار حاصل گردد.

۴. مأخذ

- [1] S. Gudmundsson, *General Aviation Aircraft Design*, 1st ed., Elsevier Inc., pp.584-585, 2014.
- [2] T. W. K. Clark, Effect of Side Wind on a Propeller, *Reports and Memoranda*, No. 80, British Aeronautical Research Council, 1913.
- [3] F. H. Bramwell, A. Page, E. K. Relf, W. Bryant, Experiments on Model Propellers at the National Physical Laboratory, *Reports and Memoranda*, No. 123, British Aeronautical Research Council, 1914.
- [4] F. W. Manchester, *the Flying-Machine from an Engineering Standpoint*, London, Constable, 1917.
- [5] R. G. Harris, Forces on a Propeller Due to Sideslip, *Reports and Memoranda*, No. 427, British Aeronautical Research Council, 1918.
- [6] H. Glauert, The Stability Derivative of an Airscrew, *Reports and Memoranda*, No. 642, British Aeronautical Research Council, 1919.
- [7] H. Glauert, Aeroplane Propellers, Miscellaneous Airscrew Problems, *Aerodynamic Theory*, Vol. IV, W. F. Durand, Berlin, Julius Springer, pp. 351-359, 1935.
- [8] W. F. Phillips, E. A. Anderson, Logan, Utah State University, AIAA, pp. 2-4, 2002.
- [9] H. Wolowicz, B. Roxanab, Lateral Directional Aerodynamic Characteristics of Light, Twin-Engine Propeller-Driven Airplanes, *NASA Technical Note*, 1972.
- [10] H. Wolowicz., B. Roxanab, Longitudinal Aerodynamic Characteristics of Light, Twin-Engine Propeller-Driven Airplanes, *NASA Technical Note*, 1972.
- [11] J. S. Denker, *See How It Flies*, Section 8.5-P-Factor, 1996-2014.
- [12] M. J. Abzug, E. Larrabee, *Airplane Stability and Control: A History of the Technologies That Made Aviation Possible*, 2nd ed., 2005.
- [13] Formulas for Propellers in Yaw and Charts of the Side-Force Derivative - Report No. 819. s. 1, NACA, 1945.
- [14] H. Mohammad, *Aircraft Design: A Systems Engineering Approach*, Daniel Webster College, 2013.
- [15] J. Roskam, *Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls*, the University of Kansas, 2001.
- [16] B. W. McCormick, *Aerodynamics, Aeronautics & Flight Mechanics*, The Pennsylvania State University, Department of Aerospace Engineering, 1995.
- [17] R. Nelson, *Airplane Stability and Automatic Control*, University of Notre Dame, 1989.
- [18] R. Stengel, *Aircraft Flight Dynamics (Lecture Notes)*, Princeton University, 2010.
- [19] N. VanBronswijk, *The Effects of Propeller Power on the Stability and Control of a Tractor-Propeller Powered Single-Engine Low-Wing Monoplane*, University of Sydney: Department of Aeronautical Engineering, Thesis Report, 2001.
- [20] Stability, Flightlab Ground School: 4. Lateral/Directional, Flight Emergency & Advanced Maneuvers Training, Inc. dba Flightlab, 2009.

پی‌نوشت

1. lift
2. pusher
3. nacelle
4. pitching moment

5. asymmetric blade effect
6. slipstream effect
7. gyroscopic effect
8. aileron

-
9. rudder
 10. angle of attack
 11. critical engine
 12. one engine inoperative-OEI
 13. takeoff roll
 14. slip
 15. downwash
 16. boundary layer
 17. dihedral effect
 18. leeward
 19. windward
 20. Martin 202