بسم الله الرحمن الرحيم

۴۴۹۱۲

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تاریخ ثبت مدارک

دانشکده فنی
گروه مکانیک

۱۳۸۱ /۱۲/ ۲۹

پایان نامه:
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

عنوان:

تحلیل عددی نیروهای آیرودینامیکی و تنش‌های حاصل از این نیروها بر روی پرهٔ روتور بالگرد

اساتید راهنما:

دکتر محمد حسن جوارشکیان و دکتر محمد زهساز

استاد مشاور:

دکتر محمد تقی شروانی تبار

٤٤٩١٢

پژوهشگر:

مرتضی سعیدی

بهمن ۱۳۸۱ شماره . . .

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

تقدیر و تشکر:

خدا را سپاس می‌گویم که توفیقی دیگر عطا نمود تا طی دو سال با اساتیدی گرانقدر و دوستانی فرهیخته در دانشگاه تبریز افتخار آشنایی پیدا کنم.

در ابتدا بر خود لازم می‌دانم از استاد گرانمایه؛ آقای دکتر محمد حسن جوارشکیان، به خاطر تمامی تلاش‌ها و زحماتی که در انجام این پایان‌نامه متحمل شدند و همچنین راهنمائیهای ارزندهٔ ایشان، تشکر و قدردانی نمایم. از آقای دکتر محمد زهساز که در بخش جامداتی این پایان‌نامه همکاری داشتند و آقای دکتر محمد تقی شروانی‌تبار استاد مشاور پروژه تشکر می‌کنم. از آقای دکتر اسماعیل‌زاده به خاطر ویرایش این پایان‌نامه بعنوان استاد ممتحن متشکرم. همچنین لازم است که از آقای دکتر علوی‌تبار؛ مدیریت محترم گروه مهندسی مکانیک به جهت همکاری‌ها و راهگشایی‌های ایشان در طول دورهٔ کارشناسی ارشد صمیمانه سپاسگذاری نمایم.

همچنین از خانوادهٔ مهربانم که در انجام این پروژه و گذراندن این دوره همواره مرا تشویق نمودند، بخصوص همسرم کمال تشکر و قدردانی را دارم. در پایان از تمامی دوستان عزیزی که در این پایان‌نامه مرا یاری نمودند، به ویژه آقای مهندس رضا شایسته صدفیان صمیمانه سپاسگذارم.

مرتضی سعیدی ۸۱/۱۱/۲۱

عنوان پایان‌نامه:

تحلیل عددی نیروهای آیرودینامیکی و تنش‌های حاصل از این نیروها بر روی پرهٔ روتور بالگرد

اساتید راهنما: *دکتر محمد حسن جوارشکیان و دکتر محمد زهساز*

استاد مشاور: *دکتر محمد تقی شروانی تبار*

مقطع تحصیلی: *کارشناسی ارشد* رشته: *مکانیک* گرایش: *تبدیل انرژی* دانشگاه: *تبریز*

دانشکده: *فنی* تاریخ فارق‌التحصیلی: *بهمن ۱۳۸۱* تعداد صفحات:

کلید واژه‌ها: آیرودینامیک بالگرد، پرهٔ روتور، دینامیک سیالات محاسباتی، تراکم پذیر، متلاطم، سه بعدی، تحلیل تنش

چکیده:

یکی از کارهایی که امروزه در صنایع هوایی انجام می‌گیرد، اضافه کردن تجهیزات مختلف نظامی یا غیر نظامی بر روی وسایل پرنده است. اولین قدم در این راه مطالعهٔ نیروهای آیرودینامیکی و جریان اطراف وسیلهٔ پرنده می‌باشد. با اطلاعات بدست آمده از این مطالعه تغییرات لازمه در شکل و سازهٔ تجهیزات مورد نظر و حتی وسیلهٔ پرنده انجام می‌شود. بالگرد یک نوع وسیلهٔ پرنده است که در صنایع نظامی و غیر نظامی دارای کاربرد زیادی می‌باشد. مهم‌ترین بخش هر بالگردی روتور اصلی آن است. چرا که نقش اصلیِ بالا بردن بالگرد را به عهده دارد. در این پایان‌نامه یک پرهٔ روتور بالگرد با استفاده از روش عددی تحلیل گردیده است. این تحلیل شامل حل عددی جریان و تنش حاصل از نیروهای آیرودینامیکی روی پره می‌باشد. بررسی انجام شده در حالت پروازی ایستا است. در انتها نتایج حاصل از حل عددی با تجربی موجود مقایسه شده‌اند. همچنین تأثیر لحاظ نمودن شفت نیز بررسی شده است.

برای این کار، ابتدا مدل هندسی پره در نرم‌افزار Gambit 1.1 طراحی شده است. پره دارای مقطع NACA0012 بوده و نسبت طول به عرض آن ۶ است. روتور مورد نظر دارای دو پره از نوع فوق می‌باشد.

محدودهٔ محاسباتی با استفاده از شرط مرزی متناوب، نصف شده است(نیم استوانه). برای شبکه‌بندی از شبکهٔ بی‌سازمان چهار وجهی استفاده گردیده است. شرط مرزی نقاط دور دست، فشار ورودی است. مرزهای دوردست در جهت محوری و شعاعی در فاصلهٔ ۷۵ برابر وتر پره قرار دارد. روی پره شرط مرزی عدم لغزش لحاظ شده است. پس از آن شبکه‌بندی به نرم افزار Fluent انتقال یافته و شرایط مرزی تنظیم شده‌اند.

برای تراکم‌پذیری جریان معادلهٔ حالت گاز ایده‌آل منظور شده و بنابراین معادلهٔ انرژی نیز برای بدست آوردن توزیع دما حل شده است. از آنجا که جریان اطراف روتور در محدودهٔ متلاطم قرار دارد، لذا مدل‌های توربولانس نیاز می‌باشد. در این پایان‌نامه سه مدل توربولانس با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این مدل‌ها عبارتند از مدل تک معادله‌ای Spalart-Allmaras، مدل دو معادله‌ای $k-\varepsilon$ و مدل تنش رینولدز RSM. این مدل‌ها بر اساس متوسط گیری جرمی (جریان تراکم پذیر) تنظیم شده‌اند. برای گسسته سازی جملهٔ جابجایی معادله‌های حاکم، اسکیم مرتبهٔ دوم بالادست به کار رفته است. روند حل معادله‌ها به صورت ضمنی و با استفاده از الگوریتم SIMPLE می‌باشد. در نزدیک دیواره از توابع استاندارد دیواره استفاده شده است.

در انتها توزیع نیروهای آیرودینامیکی که شامل نیروهای فشاری و لزجی است، به صورت یک توزیع برداری روی گره‌های شبکهٔ پره بدست آورده و از Fluent به Patran انتقال یافته است. در نرم‌افزار Patran ریشهٔ پره ثابت فرض شده و نیروی گریز از مرکز به آن اعمال گردیده است. توزیع نیروها روی پره نیز در نظر گرفته شده و سپس با استفاده از نرم‌افزار NASTRAN آنالیز استاتیک خطی انجام گرفته است.

نتایج حاصل از حل عددی دارای تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی چه در حالت دو بعدی و چه در حالت سه بعدی می‌باشد. به علت عدم جدایش روی پره هر سه مدل توربولانس نتایج تقریباً یکسانی داده‌اند. مدل نمودن شفت در توزیع فشار استاتیک روی پره تأثیر چندانی ندارد، ولی روی جریان اطراف آن مؤثر است.

فهرست مطالب

فهرست مطالب ۱

فصل اول ۴

بررسی منابع و پیشینهٔ پژوهش ۴

۱-۱- مقدمه ۵

۱-۲- انواع بالگردها ۶

۱-۲-۱- ترکیب یک روتور اصلی با دم ۷

۱-۲-۲- تاندم (پشت سرهم) ۸

۱-۲-۳- هم محور ۹

۱-۲-۴- سینکروپتر ۱۰

۱-۲-۵- روتور مایل / بال مایل ۱۰

۱-۲-۶- بدون دم ۱۱

۱-۳- تعاریف ۱۲

۱-۳-۱- پره و ایرفویل ۱۲

۱-۳-۲- باد نسبی ۱۴

۱-۳-۳- زاویهٔ گام ۱۵

۱-۳-۴- زاویهٔ حمله ۱۶

۱-۳-۵- برآ و پسا ۱۶

۱-۳-۶- مرکز فشار ۱۸

۱-۳-۷- نیروهای وارد بر روتور ۱۸

۱-۳-۸- ضرایب تراست و توان : ۲۰

۱-۳-۹- پرواز در حالت ایستا ۲۱

۱-۳-۱۰- تأثیر زمین: ۲۲

۱-۳-۱۱- جریان تراکم‌پذیر: ۲۴

۱-۳-۱۲- جریان متلاطم ۲۵

۱-۴- مدلهای آیرودینامیک روتور ۲۶

۱-۴-۱- جریان اطراف روتور ۲۶

۱-۴-۲- تئوری اندازه حرکت محوری: ۲۷

۱-۴-۳- تئوری المان پره ۲۸

۱-۴-۴- ترکیب تئوری اندازه حرکت محوری و المان پره ۲۹

۱-۴-۵- روشهای خطوط بالابر ۳۰

۱-۴-۶- روش‌های سطوح بالابر ۳۰

۱-۴-۷- روش پتانسیل کامل ۳۱

۱-۴-۸- روشهای اولر ۳۱

۱-۴-۹- روش‌های ناویراستوکس ۳۲

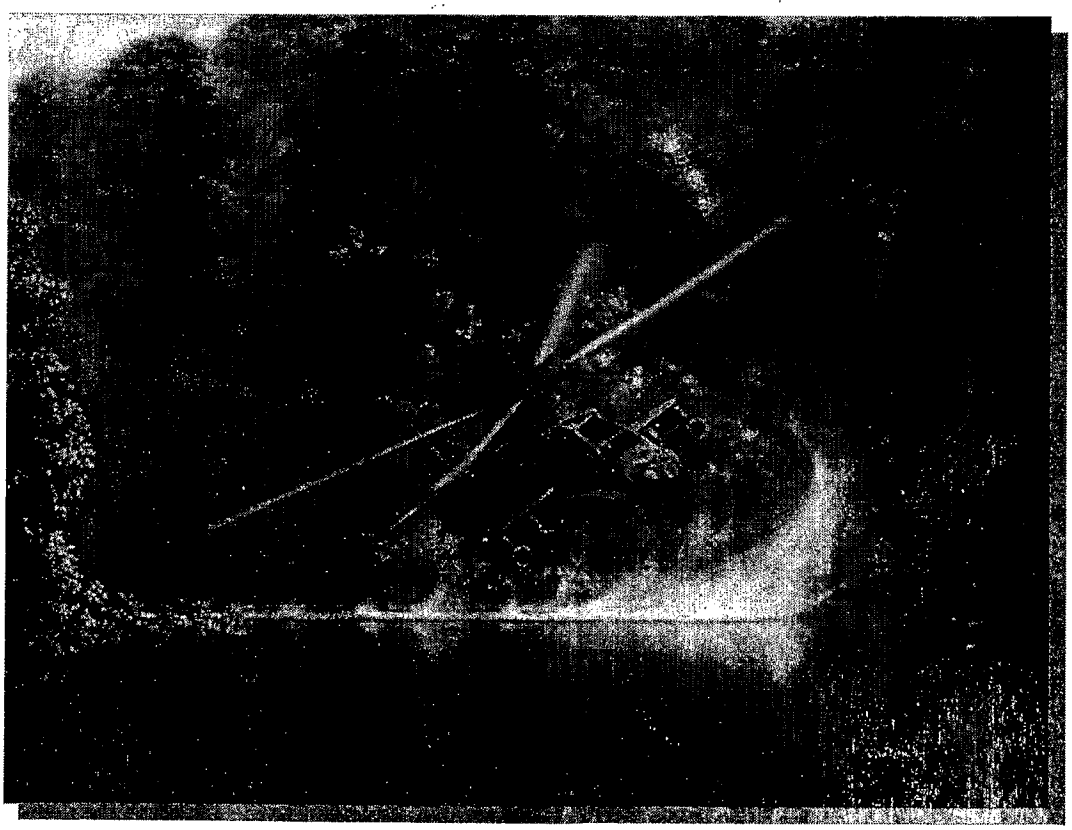
۱-۵- تحقیقات انجام شده ۳۳

۶-۱- هدف از پژوهش ۴۶
۱-۶-۱- اهمیت شبیه سازی روتور ۴۶
۲-۶-۱- تحقیق انجام شده در این پایان‌نامه ۴۸
فصل دوم ۵۰
مواد و روش‌ها ۵۰
۱-۲- معادله‌های اساسی ۵۱
۱-۱-۲- متوسط گیری رینولدز ۵۱
۲-۱-۲- متوسط گیری جرمی فِیور ۵۳
۳-۱-۲- دستگاه مختصات چرخان ۵۵
۴-۱-۲- معادلهٔ پیوستگی ۵۸
۵-۱-۲- معادله‌های اندازه حرکت ۵۸
۶-۱-۲- معادلهٔ حالت ۵۹
۷-۱-۲- روش بوزینسک در مقابل مدل تنش‌های رینولدز ۵۹
۸-۱-۲- مدل تک معادله‌ای Spalart-Allmaras ۶۰
۹-۱-۲- مدل دو معادله‌ای k-epsilon ۶۱
۱۰-۱-۲- مدل تنش رینولدز RSM ۶۳
۱۱-۱-۲- معادلهٔ انرژی ۶۵
۲-۲- گسسته سازی معادله‌ها ۶۶
۱-۲-۲- حجم محدود ۶۶
۲-۲-۲- اسکیم مرتبهٔ اول بالادست "First Order Upwind" ۶۹
۳-۲-۲- اسکیم مرتبهٔ دوم بالادست "Second Order Upwind" ۷۰
۴-۲-۲- الگوریتم SIMPLE ۷۱
۵-۲-۲- درونیابی فشار ۷۲
۳-۲- شبکه‌بندی ۷۳
۱-۳-۲- انواع شبکه‌بندی روتور ۷۳
۲-۳-۲- تراکم شبکه‌بندی ۷۶
۴-۲- شرایط مرزی ۷۷
۱-۴-۲- انواع شرایط مرزی برای روتور ۷۷
۲-۴-۲- شرط مرزی فشار ورودی ۸۰
۳-۴-۲- شرط مرزی متناوب ۸۱
۴-۴-۲- شرط مرزی دیواره ۸۲
۵-۴-۲- توابع دیواره ۸۲
فصل سوم ۸۵
نتایج و بحث ۸۵
۱-۳- شبیه‌سازی دو بعدی جریان اطراف یک ایرفویل ۸۶
۱-۱-۳- مقدمه ۸۶
۲-۱-۳- مشخصات نمونهٔ تجربی ۸۶
۳-۱-۳- شبکه‌بندی ۸۶

۴-۱-۳- شرایط مرزی ۸۷
۵-۱-۳- معادله‌های اساسی و روش حل ۸۸
۷-۱-۳- نتایج ۸۹
۲-۳- شبیه‌سازی سه بعدی جریان ۹۵
۱-۲-۳- مقدمه ۹۵
۲-۲-۳- مشخصات نمونهٔ تجربی ۹۵
۳-۲-۳- شبکه‌بندی ۹۵
۴-۲-۳- شرایط مرزی ۹۸
۵-۲-۳- معادله‌های اساسی و روش حل ۹۸
۶-۲-۳- نتایج ۹۸
۳-۳- شبیه‌سازی بارگذاری استاتیکی ۱۲۳
۱-۳-۳- مقدمه ۱۲۳
۲-۳-۳- روش نرمی یا نیرو ۱۲۳
۳-۳-۳- روش سختی یا تغییر مکان ۱۲۳
۴-۳-۳- مدل نمودن پرهٔ بالگرد ۱۲۶
۵-۳-۳- شبکه‌بندی و شرایط مرزی ۱۲۶
۶-۳-۳-نتایج ۱۲۷
فصل چهارم ۱۳۳
نتیجه گیری و پیشنهادها ۱۳۳
۱-۴- نتیجه گیری: ۱۳۴
۲-۴- پیشنهادها: ۱۳۴
فهرست مراجع ۱۳۶

فصل اول

بررسی منابع و پیشینهٔ پژوهش



۱-۱- مقدمه

اولین ایدهٔ بالگرد توسط لئوناردو داوینچی[1] در سال ۱۴۸۳ ارائه گردید. وسیلهٔ او شامل یک روتور پیچی با طولی در حدود ۳۰ متر بود. اگرچه این وسیله نتوانست در آن زمان پرواز نماید، ولی نام بالگرد از این طراحی گرفته شده است. بالگرد از دو لغت یونانی هلیکو و پلرون به معنی بال پیچی[2] اقتباس گردیده است. اولین بالگردی که با شکل معمولِ امروزی توانست پرواز نماید، توسط یک مهندس روسی بنام ایگور سیکورسکی[3] در سال ۱۹۱۰ ساخته شد[۱]. بعد از آن طراحان زیادی برای توسعهٔ وسیلهٔ وی تلاش نمودند و شرکت‌های زیادی به تولید این وسیله اقدام کردند. به خاطر کارآیی بسیار بالای بالگرد در عملیات‌های نظامی، یعنی عدم نیاز به باند فرود طولانی و توانایی ایستادن در یک نقطه و مانور پذیری بالا، دولت‌های مختلف به طراحی و ساخت و یا خریداری این وسیله اقدام نمودند. در نتیجه در طی چند دهه بعد از اختراع سیکورسکی، در طراحی بالگرد، پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای رخ داد. به طوریکه انواع مختلف و گوناگونی از آن طراحی و ساخته شدند. این مورد در دوران جنگ سرد بیشتر به چشم می‌آید. بعد از چند دهه از ساخت اولین بالگرد، در صنایع غیرنظامی نیز این وسیلهٔ پرنده مشتاقان زیادی پیدا نمود. از آن پس این دستگاه به عنوان یک وسیلهٔ ضروری در سازمان‌ها و صنایع مختلف شناخته شد. از جمله می‌توان به صنایع دریایی، استخراج نفت، امداد رسانی و آتش‌نشانی، سم‌پاشی مزارع و مواردی مانند آن اشاره نمود. اگرچه پیشرفت‌های زیادی در این زمینه رخ داده است، ولی هنوز برای استفادهٔ از بالگرد به عنوان یک وسیلهٔ نقلیهٔ شخصی راه درازی در پیش است. چراکه به علت پیچیدگی عملکرد آن تعمیرات و نگهداری و همچنین خلبانی آن مشکل می‌باشد. مراکز تحقیقاتی زیادی در دنیا بر روی توسعهٔ این وسیله کار می‌کنند تا کنترل بالگرد را آسان‌تر نموده و بسیاری از مشکلات آن را حل نمایند.

اساس کار بالگرد همانند هواپیماهاست، یعنی غلبه بر نیروی وزن توسط برخورد هوای محیط به مقاطع ایرفویلِ پره صورت می‌گیرد. تفاوت اصلی بالگرد و هواپیما در طریقهٔ این برخورد می‌باشد. هواپیما با حرکت رو به جلوی خود، یک باد نسبی برای پره‌های ثابت ایجاد می‌نماید، درصورتیکه بالگرد این باد نسبی را با چرخاندن دو یا چند پره حول یک محور عمودی به وجود می‌آورد. پره‌های

1 Leonardo Davinchi
2 Helical Wing
3 Igor Sikorsky

چرخان دارای مقطع ایرفویل هستند. زمانیکه زاویهٔ حملهٔ این مقاطع زیاد شود، نیروی برآ نیز زیاد شده و در نتیجه بالگرد به سمت بالا حرکت می‌کند. برای پرواز رو به جلو یا جوانب توسط اعمال نیروی ژیروسکوپی[1] محور روتور به جلو یا جوانب خم می‌شود. در نتیجه برآیند نیروی برآی پره‌ها، مؤلفه‌ای در راستای افقی پیدا خواهد کرد که موجب حرکت رو به جلو یا جوانب بالگرد می‌شود. اما خود پره‌ها در هنگام چرخش دارای نیروی پسا خواهند بود که در نهایت موجب یک گشتاور القایی در خلاف جهت چرخش می‌شود. این گشتاور باید به وسیلهٔ یک گشتاور معکوس که معمولاً از طریق دم به وجود می‌آید، خنثی شود. البته در بالگردهای مختلف طریقهٔ اعمال این گشتاور فرق می‌کند، که در قسمت انواع بالگردها به این موضوع نیز اشاره خواهد شد.

در این پایان‌نامه روتور اصلی بالگرد در حالت پروازی ایستا به طور مجزا بررسی می‌شود. این بررسی شامل شبیه‌سازی سه بعدی جریان اطراف پرهٔ بالگرد توسط یک نرم‌افزار معتبر دینامیک سیالات محاسباتی به نام فلوئنت[2] و شبیه‌سازی سازه‌ای و تحلیل تنش به وسیلهٔ یک نرم‌افزار اجزا محدود به نام نسترن[3] می‌باشد.

۲-۱- انواع بالگردها

بالگردها دارای انواع مختلفی می‌باشند که لازم است خلاصه‌ای از عملکرد آنها ذکر شود تا محدودهٔ کار در این پایان‌نامه مشخص شود. می‌دانیم که شرایط عمومی هر وسیلهٔ پرنده‌ای[4] آن است که اولاً نیروی تراست برابر یا بیشتر از وزن وسیلهٔ پرنده بوده و قابل کنترل باشد. دوماً نیروی پیشرانش در پرواز رو به جلو باید برابر یا بیشتر از پسای وسیلهٔ پرنده بوده و قابلیت کنترل داشته باشد. سوماً نیروها و گشتاورهایی باید وجود داشته باشند تا قابلیت تغییر حالتِ پیچ[5]، رل[6] و یاو[7] را به وسیلهٔ پرنده بدهند. منظور از تغییر حالت‌های پیچ، رل و یاو به ترتیب مایل شدن طولی در راستای بدنه، مایل شدن عرضی در جهت عمود بر بدنه و چرخش در سطح افقی می‌باشد.

---

1 Gyroscopic
2 Fluent
3 Nastran
4 Aircraft
5 Pitch
6 Roll
7 Yaw

بالگردها نیروی تراست خود را از طریق روتور یا روتورهایی که در حقیقت پره‌های گردان هستند، بدست می‌آورند. بنابراین این روتورها باید توانایی برآوردن سه شرط فوق را داشته باشند. این بدان معنی است که در حالت رو به جلو در سرعت‌هایی کمتر از آنچه از یک هواپیما با بال ثابت انتظار می‌رود، می‌توانند پرواز کنند. در هواپیما اگر یک روتور آزاد (روتوری با یک محورِ عمود بر سطح افق) در روی بدنه قرار گیرد و به وسیلهٔ وزش باد بچرخد (اتوجایرو[1])، سرعت‌های کم پرواز، ممکن خواهد بود. البته، اگر روتور به وسیلهٔ یک موتور داخلی بچرخد (بالگرد)، سرعت کم پروازی می‌تواند به صفر برسد، که اصطلاحاً وسیلهٔ پرنده در حالت ایستا است. تا زمانی که روتور یک اتوجایرو انرژی را از محیط اطراف می‌گیرد (منظور هوایی که از بالای آن عبور می‌کند)، وسیلهٔ پرنده هیچ تمایلی به چرخش در عکس جهت چرخش روتور ندارد. این پدیده توسط قانون سوم نیوتن نمایان‌تر می‌گردد، زیرا به وسیلهٔ هوایی که از دو طرف روتور با یک سرعت عبور کرده و گشتاورهای معکوسِ هم ایجاد می‌کند، بالانس گشتاور به وجود می‌آید. بنابراین اتوجایروها نیازی به گشتاور معکوس ندارند.

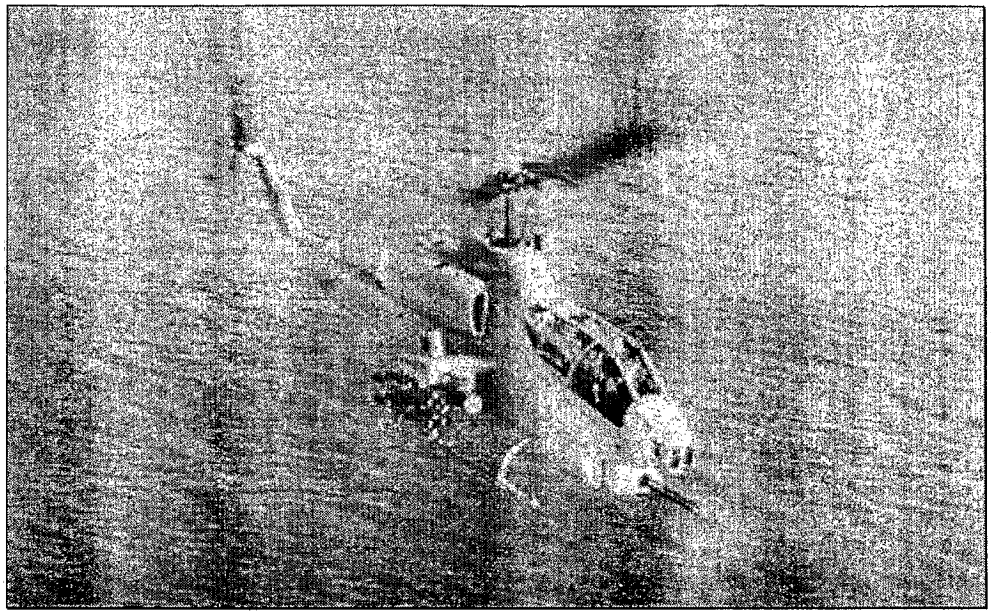
بالگردها در اشکال مختلفی گسترش یافته‌اند. هر کدام از آنها یک روش بالانس گشتاور را در پیش گرفته‌اند. همچنین لازم است که بردار برآ روی روتور اصلی در جهتی که پرواز انجام می‌شود، کج شود تا کنترل خواسته شده را اعمال نماید. راستای بردار برآی روتور معمولاً عمود بر صفحه خود روتور (صفحه‌ای که نوک پره آن را دنبال می‌کند) می‌باشد. با تغییر صفحه روتور در جهتی که نیروی برآ خواسته شده، حرکت آن قابل کنترل خواهد بود. در گذشته بالگردها با دو یا چند روتور اصلی طراحی می‌شده‌اند، اما امروزه بالگردهایی با یک روتور اصلی معمول‌ترند و ترکیب‌های چند روتوری در مقام دوم قرار دارند[۲].

۱-۲-۱- ترکیب یک روتور اصلی با دم

در این نوع بالگردها روتور اصلی برآی لازم را برای بلند شدن وسیلهٔ پرنده از زمین و کنترل آن در جهت عمودی مهیا می‌سازد. همچنین کنترل در جهات جلو، عقب و جوانب به وسیلهٔ روتور اصلی و با کج شدن دیسک صفحه روتور و تغییر جهت بردار برآ، تأمین می‌شود. تغییر جهت بردار برآ می‌تواند در کنترل رل و پیچ به کار آید. کنترل یاو به وسیلهٔ روتور کوچکتری در انتهای دم که توسط نیروی محرکهٔ داخلی می‌چرخد، امکان‌پذیر است. روتور دم در صفحهٔ عمودی قرار گرفته است. این روتور

1 Autogiro

برای کنترل یاو بالگرد، با یک نیروی افقی گشتاور لازم را مهیا می‌کند. یک مثال از این ترکیب، بالگرد کبری است که در شکل (۱-۱) مشاهده می‌شود.



شکل(۱-۱) یک نوع بالگرد با یک روتور اصلی و یک روتور دم[۳]

برای مدل کردن این نوع بالگردها از لحاظ آیرودینامیکی معمولاً روتور اصلی به طور جداگانه مدل می‌شود. اما وجود روتور دم و بدنه نیز مهم می‌باشد[۲و۳].

۲-۲-۱- تاندم (پشت سرهم)

ترکیب تاندم در هر انتهای بدنه یک روتور اصلی دارد. این بدان معنی است که روتورهای اصلی در یک ردیف در جهت طولی چیده شده‌اند. روتور عقب در محیطی مستقل می‌تواند عمل نماید. همچنین روتور جلو مقداری از روتور عقب، پایین‌تر قرار می‌گیرد. یک نمونه از این بالگرد در شکل (۲-۱) آمده است.

قرار گرفتن روتورها در طول بالگرد باعث می‌شود که محدودهٔ تغییر مرکز ثقل در طول بالگرد بیشتر گردد. روتورهای اصلی در خلاف همدیگر می‌چرخند و از آنجائیکه مقداری از سطح مؤثر آنها روی هم قرار می‌گیرد، برای مدلسازی آیرودینامیکی این نوع بالگردها لازم است که هر دو روتور به طور همزمان مدل گردند. از طرفی به علت وجود گردابه‌های نوک هر کدام از روتورها و تداخل و برخورد بین آنها، شبیه سازی آیرودینامیکی چنین سیستم‌هایی بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد[۳].

شکل (۲-۱) بالگرد شنوک CH-47 [۳]

۳-۲-۱- هم محور

ترکیب هم محور دارای دو روتور اصلی است که در یک محور قرار دارند. مزیت این ترکیب فشرده بودن آن است که به همین علت این نوع بالگرد اغلب در روی کشتی‌ها استفاده می‌شود. به خاطر اینکه روتور پایین در جریان حاصل از روتور بالایی قرار می‌گیرد، توان مصرفی در بالگردهای هم‌محور نسبت به دیگر اشکال روتورهای دوگانه بیشتر است. بنابراین راندمان آنها نیز کمتر خواهد بود. کنترل در جهت یاو به وسیلهٔ تفاوت گشتاور در روتورها تأمین می‌شود. در اینجا نیز مدلسازی آیرودینامیکی یک روتور به طور مجزا نمی‌تواند مفید باشد، بلکه دو روتور باید توأماً شبیه‌سازی شوند. در شکل (۳-۱) یک نوع از این بالگردها نشان داده شده است.

شکل(۳-۱) بالگرد هم محور Kamov [۳]