

# فهرست مطالب

## فصل ۱ سیر تاریخی توسعه بالگردها و مروری بر آن ۱

- ۱.۱ توسعه تاریخی ۲
- ۲.۱ سیر زمانی توسعه بالگردها ۵
- ۳.۱ پیکربندی بالگرد ۱۶
- ۴.۱ الزامات کنترل ۱۹
- ۵.۱ سامانه‌های روتور ۲۲
- ۶.۱ عملکرد توان موردنیاز ۲۴

## فصل ۲ مقدمه‌ای بر نظریه پرواز ایستا و پرواز عمودی ۲۷

- ۱.۲ نظریه مومنتوم ۲۸
- ۲.۲ فرضیات نظریه مومنتوم ۲۸
- ۳.۲ نظریه‌ی المان پره ۳۳
- ۴.۲ ضریب پیشرانه (تراست) ۳۸
- ۵.۲ ضریب گشتاور/توان ۴۰
- ۶.۲ نظریه ترکیبی المان جزئی پره و نظریه مومنتوم: محاسبه جریان ورودی غیر یکنواخت ۴۳
- ۷.۲ ضریب اتلاف نوک پره ۴۶
- ۸.۲ برش ریشه پره ۴۷
- ۹.۲ ضریب برآی (لیفت) متوسط ۴۷
- ۱۰.۲ روتور ایده‌آل در مقایسه با روتور بهینه ۴۹

- ۱۱.۲ نظریه‌ی مومنتوم برای پرواز عمودی ۴۹  
 ۱۲.۲ خودچرخشی در فرود عمودی ۵۷  
 ۱۳.۲ اثر زمین ۶۳

### فصل ۳ مقدمه‌ای بر نظریه‌ی پرواز روبه‌جلو ۶۵

- ۱.۳ نظریه‌ی مومنتوم در پرواز روبه‌جلو ۶۷  
 ۲.۳ نظریه‌ی المانی پره در حرکت روبه‌جلو ۷۴  
 ۳.۳ صفحات مرجع ۷۹  
 ۴.۳ ضریب نیروی پسای درون - صفحه (طولی) ۹۰  
 ۵.۳ ضریب نیروی درون - صفحه (جانبی) ۹۲  
 ۶.۳ ضریب گشتاور ( $C_{My}$  و  $C_{Mx}$ ) ۹۳  
 ۷.۳ ضریب گشتاور ( $CQ$ ) ۹۵  
 ۸.۳ توان در پرواز روبه‌جلو ۹۹

### فصل ۴ پره‌ی روتور در حرکت بال‌زنی: مدل ساده ۱۰۹

- ۱.۴ حرکت فلپ با فنر ریشه‌ی قرار داده‌شده در مرکز ۱۱۹

### فصل ۵ تحلیل تریم (تعادل) بالگرد ۱۲۹

- ۱.۵ مسئله‌ی نمونه‌ی تریم ۱۳۴  
 ۲.۵ روش کار ۱۳۵  
 ۳.۵ نتایج ۱۳۹  
 ۴.۵ جریان معکوس ۱۴۲

### فصل ۶ دینامیک پره‌ی روتور مستقل ۱۴۵

- ۱.۵ مسئله‌ی نمونه‌ی تریم ۱۳۴  
 ۲.۵ روش کار ۱۳۵

- ۱.۶ دینامیکِ فلپِ پره‌ی مستقل، در حالت غیر کوپل ۱۴۷
- ۲.۶ کوپلینگِ پیچ-فلپ ۱۶۰
- ۳.۶ کوپلینگِ گام-تاخیر (پیچ-لگ) ( $\delta_1$ ) ۱۶۲
- ۴.۶ کوپلینگِ ساختاری فلپ-لگ (فلپ-تاخیر) ۱۶۲
- ۵.۶ دینامیک تأخیر پره‌ی مستقل در حالت غیر کوپل ۱۶۶
- ۶.۶ دینامیک پیچشی پره مستقل در حالت غیر کوپل ۱۷۰

## فصل ۷ پایداری ایروالاستیک پره‌ی روتور: دینامیک حالت جفت‌شده ۱۷۷

- ۱.۷ دینامیک فلپ-لگِ کوپل‌شده ۱۷۸
- ۲.۷ رتبه تقریب ۱۸۰
- ۳.۷ تبدیل مختصات ۱۸۰
- ۴.۷ خلاصه‌ای از دستگاه‌های مختصات برای حرکت فلپ-لگ ۱۸۱
- ۵.۷ شتاب نقطه‌ی "P" در پره k ام ۱۸۴
- ۶.۷ بارهای ایرودینامیکی ۱۸۸
- ۷.۷ بارهای ایرودینامیکی و ممان ایرودینامیکی در ریشه پره ۱۹۱
- ۸.۷ معادلات تعادل ۱۹۸
- ۹.۷ معادلات پایداری اغتشاشی ۲۰۲
- ۱۰.۷ دینامیک فلپ-پیچش کوپل‌شده در حالت ایستا ۲۰۵
- ۱۱.۷ مؤلفه‌های سرعت نسبی هوا در سطح مقطع معمولی ۲۱۵

## فصل ۸ حالت‌های روتور: تبدیل مختصات چند پره‌ای ۲۲۷

- ۱.۸ تبدیل مختصات چند پره‌ای ۲۲۹
- ۲.۸ تبدیل به مختصات چند پره‌ای ۲۳۱

## فصل ۹ دینامیک بال‌زنی تحت حرکت عمومی هاب ۲۳۹

- ۱.۹ دستگاه‌های مختصات و نمایش کمیت‌های مختلف ۲۴۰
- ۲.۹ سینماتیک ۲۴۵

- ۳.۹ ممان گرانشی در بال زدن ۲۵۰  
 ۴.۹ ممان ایروودینامیکی در بال زدن ۲۵۱  
 ۵.۹ معادلات اغتشاشی بال زدن در دستگاه مختصات چند پره‌ای ۲۶۳

## فصل ۱۰ پایداری و کنترل بالگرد ۲۷۵

- ۱.۱۰ پایداری ۲۷۶  
 ۲.۱۰ کنترل ۲۷۷  
 ۳.۱۰ معادلات دینامیک پرواز برای یک مانور عمومی: تحلیلِ تریم (تعادل) و اغتشاش ۲۷۸  
 ۴.۱۰ معادلات خطی شده اغتشاش ۲۹۳  
 ۵.۱۰ ویژگی‌های پایداری ۲۹۴  
 ۶.۱۰ رفتار ساده شده دینامیک بالگرد در حالت ایستا ۲۹۷  
 ۷.۱۰ دینامیک طولی در حالت ایستا ۲۹۸  
 ۸.۱۰ نکات عمومی ۳۰۸  
 ۹.۱۰ دینامیک عمودی ۳۰۹  
 ۱۰.۱۰ دینامیک جانبی - سمتی ۳۱۲  
 ۱۱.۱۰ ویژگی‌های کنترل / پاسخ کنترل ۳۲۳  
 ۱۲.۱۰ پاسخ حرکت‌های پیچش، غلتش و سمت به ورودی‌های کنترل ۳۲۴  
 ۱۳.۱۰ پاسخ تندباد ۳۲۶

## فصل ۱۱ تشدید زمین - ناپایداری هوامکانیکی یک مدل ساده ۳۲۷

کتابنامه ۳۳۷

## مقدمه‌ی مترجمین

بالگردها از مهم‌ترین و پر استفاده‌ترین وسایل ترابری در دنیای امروز هستند. منهای استفاده‌های نظامی، از بالگردها برای اهدافی نظیر حمل بار و انسان و امداد استفاده می‌شود؛ با این حال منابع فارسی که به بررسی دقیق دینامیک و ایرودینامیک می‌پردازد، انگشت شمارند. پس از بررسی بیش از پانزده جلد کتاب در حوزه‌ی دینامیک بالگرد، کتاب پیش رو به‌عنوان کاملترین، روان‌ترین و دقیق‌ترین مرجع آموزش مباحث مرتبط با پرواز بالگرد، توسط ما مترجمین کتاب، انتخاب شد و پس از برقراری مکاتبات با صاحب اثر، بر آن شدیم تا آن را به فارسی ترجمه کنیم.

ونکاتسان با نکته‌سنجی و توجه قابل تحسین، پس از بیان مقدمات مهم در مورد تاریخچه‌ی ساخت و طراحی بالگرد در فصل‌های نخست، کتاب را با بررسی پرواز ایستا و عمودی شروع کرده است و به تشریح مباحث مرتبط با پرواز رو به جلو پرداخته است. در فصل‌های میانی، وی در مورد پره‌ی روتور و نظریه‌های مرتبط به آن نوشته که مقدمه‌ای برای فصل‌های بعد از خود هستند که مباحث اصلی پیرامون ایرودینامیک، کنترل و دینامیک بالگرد را شامل می‌شوند.

لازم به ذکر است که تلاش و هدف ما در راستای انتقال مفهوم پیام و همچنین رعایت نکات و اصول ترجمه بوده است، از این رو، از برگردان انگلیسی-فارسی برخی کلمات متداول نظیر روتور، هاب و ... پرهیز شده است.

مرحله اول ۱۴۰۲/۰۴/۱۷

## پیش‌گفتار

به علت توانایی بی‌نظیر در پرواز ایستا و نشست و برخاست از هر زمینی، از جمله پشت‌بام‌ها، بالگردها به‌عنوان وسایل نقلیه پرنده منحصر به فرد شناخته می‌شوند. سودمندی آن‌ها در برنامه‌های نظامی و غیرنظامی به‌طور مداوم در حال رشد است. در هند، الزامات عملیات در ارتفاع بالا و دسترسی به مناطق دورافتاده کشور، استفاده از بالگرد را به‌عنوان وسیله حمل‌ونقل، ضروری می‌کند. بالگردها سیستم‌های دینامیکی پیچیده‌ای هستند که طراحی و توسعه‌ی آن‌ها، نیازمند سطح بالایی از تخصص و فناوری است. تا اوایل دهه ۱۹۹۰، در هند، فعالیت دانشگاهی و پژوهشی بسیار کمی بر روی مطالعه‌ی بالگردها متمرکز بود. برای تربیت نیروی انسانی آموزش دیده در زمینه طراحی و توسعه بالگرد، دوره کوتاهی توسط بخش مهندسی هوافضا، از موسسه فناوری هند کانپور<sup>۱</sup>، در سال ۱۹۹۷ سازمان دهی شد تا چندین جنبه مهم از فناوری بالگرد را برجسته کند. بازخورد شرکت کنندگان نشان داد که این دوره، بینش خوبی در مورد نظریه بالگرد ارائه کرده است. بسیار خرسند به ذکر این هستیم که این دوره، آگاهی و علاقه به بالگردها را در بین سازمان‌های مختلف ایجاد کرده است. بعلاوه، این دوره، به ایجاد پیوندی قوی بین مؤسسه دانشگاهی فناوری کانپور و صنعت (هندوستان ایروناوتیکس<sup>۲</sup>، بنگلور) منجر شد. این کتاب، نقطه اوج تلاش‌های انجام‌شده برای آماده‌سازی جزوه دوره مقدماتی مقطع تحصیلات تکمیلی و همچنین مجموعه‌ای از سخنرانی‌ها برای طراحان، مهندسين، اپراتورها، کاربران و محققان بر پایه اصول دینامیک و ایرودینامیک بالگرد است.

کتاب، در سطحی پایه برای ارائه درکی از مبانی و کلیات دینامیک و ایرودینامیک بالگرد نوشته شده است. تمام معادلات، از اصول اولیه استخراج شده‌اند و ساده‌سازی‌ها به‌وضوح توضیح داده شده‌اند. کتاب، به ۱۱ فصل تقسیم و به روش نظام مند با توسعه تاریخی، پرواز ایستا و پرواز عمودی، مدل ساده‌سازی شده‌ی پره روتور در حالت بال زنی و پرواز روبه‌جلو، شروع می‌شود. دو فصل به پاسخ ایروالاستیک و تحلیل پایداری پره روتور مستقل در حالت‌های جفت نشده و جفت شده اختصاص دارد. فصل‌های ۸ تا ۱۰ به مدل‌سازی دینامیک جفت شده روتور-بدنه و پایداری دینامیک پرواز مربوطه می‌پردازند. فصل ۱۱ به تحلیل ساده‌سازی شده پایداری هوامکانیکی (ایرومکانیکال) تشدید زمینی بالگرد اختصاص دارد. هر دانشجویی با دانش و پیشینه خوبی در دینامیک، ارتعاشات، ایرودینامیک و ریاضیات در مقطع کارشناسی، باید بتواند مطالب کتاب را دنبال کند.

<sup>1</sup> Indian Institute of Technology (IIT)

<sup>2</sup> Hindustan Aeronautics Limited (HAL)

تصاویر ارائه شده در فصل مقدمه، طرحهایی هستند که با استفاده از تصاویر موجود در متون آزاد و منابع مختلف برگرفته از وبسایت‌ها (تارنماها) ترسیم شده تا حق چاپ و مقررات حقوق مالکیت معنوی<sup>۱</sup> نقض نشود. در صورت علاقه خواننده ای به تصاویر واقعی، می‌تواند به متون اصلی مراجعه کند یا از گزینه جستجوی وبسایت استفاده نماید.

نوشتن این کتاب برای من یک تجربه چالشی و آموزنده بود. بدون حمایت افراد زیر، تکمیل این کتاب برای من ممکن نبود. صمیمانه از شاگردانم گاندیپ سینگ<sup>۲</sup>، وادیواژگان<sup>۳</sup> و کی. آر. پراشانث<sup>۴</sup>، پونیت سینگ<sup>۵</sup> و وی. لاکسمن<sup>۶</sup>، روہین کومار<sup>۷</sup>، سریرام پالیکا<sup>۸</sup> و کارمندان پروژه نیکیتا سربواستاوا<sup>۹</sup> و اسمیتا میشر<sup>۱۰</sup> تشکر می‌کنم.

مایلم تا تشکر خالصانه خودم را از همکارانم وی. تی. ناگراج<sup>۱۱</sup>، پی. پی. فریدمن<sup>۱۲</sup>، آی. چوپرا<sup>۱۳</sup>، دی. هاجز<sup>۱۴</sup>، دی. پیترز<sup>۱۵</sup>، جی. اچ گاونکار<sup>۱۶</sup>، ای. آر. منجونات<sup>۱۷</sup> و آر. اورمیستون<sup>۱۸</sup> رسماً اعلام کنم. به عنوان یک محقق در زمینه دینامیک و ایرودینامیک بالگرد، از خواندن کتاب‌های عالی نوشته شده توسط دلیو. جانسون<sup>۱۹</sup>، جی. پدفلد<sup>۲۰</sup>، ای. آر. اس. برامول<sup>۲۱</sup>، دلیو. زد. ستینوسکی<sup>۲۲</sup>، جی. لیشمن<sup>۲۳</sup>، آر. دلیو. پروتی<sup>۲۴</sup>، ای. گسو<sup>۲۵</sup> و جی. سی. میرز<sup>۲۶</sup> بی‌اندازه سود برده‌ام.

در نهایت، مدیون خانواده و دوستانم برای حمایت سخاوتمندانه‌شان هستیم. مطالب ارائه شده در این کتاب، توسط نویسنده تهیه شده و هرگونه شباهت به مطالب موجود در متون آزاد، غیرعمدی است. بااین حال، در صورت مشاهده شباهت، خواهشمندم آن را به اطلاع من برسانید تا اقدامات اصلاحی مناسب انجام شود.

سی. ونکاتسان<sup>۲۷</sup>

<sup>1</sup> Intellectual Property Rights (IPR)

<sup>2</sup> Gagandeep Singh

<sup>3</sup> Vadivazhagan

<sup>4</sup> K. R. Prashanth

<sup>5</sup> Puneet Singh

<sup>6</sup> V. Laxman

<sup>7</sup> Rohin Kumar

<sup>8</sup> Sriram Palika

<sup>9</sup> Nikita Srivastava

<sup>10</sup> Smita Mishra

<sup>11</sup> V. T. Nagaraj

<sup>12</sup> P. P. Friedmann

<sup>13</sup> I. Chopra

<sup>14</sup> D. Hodges

<sup>15</sup> D. Peters

<sup>16</sup> G. H. Gaonkar

<sup>17</sup> A. R. Manjunath

<sup>18</sup> R. Ormiston

<sup>19</sup> W. Johnson

<sup>20</sup> G. Padfield

<sup>21</sup> A. R. S. Bramwell

<sup>22</sup> W. Z. Stepniewski

<sup>23</sup> G. Leishman

<sup>24</sup> R.W. Prouty

<sup>25</sup> A. Gessow

<sup>26</sup> G.C. Myers

<sup>27</sup> C. Venkatesan



## نویسنده

سی. ونکاتسان دارای مدرک کارشناسی ارشد فیزیک از مؤسسه فناوری مدراس<sup>1</sup> هند و دکترای مهندسی از مؤسسه علوم بنگلور هند است. پس از کسب تجربه در تحقیقات صنعتی و دانشگاهی، او به عنوان عضو هیئت علمی به گروه مهندسی هوافضا، مؤسسه فناوری کانپور هند پیوست. او فعالیت‌های دانشگاهی و تحقیقاتی قوی را در مؤسسه فناوری کانپور هند در زمینه ایروالاستیسیته بالگرد آغاز کرد. با بودجه وزارت علوم و فناوری، ونکاتسان یک آزمایشگاه بالگرد مستقل در آی. آی. تی کانپور تأسیس کرد. او بیش از صد مقاله پژوهشی در مجلات و کنفرانس‌ها دارد. او جوایزی را از انجمن هوانوردی هند دریافت کرده است. او عضو برجسته آکادمی ملی مهندسی هند و همکار مؤسسه هوانوردی و فضانوردی آمریکا است. در حال حاضر او سمت استاد کرسی هندوستان ایروناوتیکس در مؤسسه فناوری کانپور هند را دارد.



---

<sup>1</sup> Madras

