

(علمی - ترویجی)

طرح باند بی انتها: افقی جدید در توسعه صنعت هوانوردی

دانشمندان و محققین همواره با توسل به ایده‌های خلاقانه خود، سعی در بهینه‌سازی توسعه انواع مدهای حمل‌ونقل از جمله حمل‌ونقل هوایی دارند. یکی از این مصادیق، طراحی فرودگاه‌هایی با باندهای دایره‌ای (بی‌انتهای) می‌باشد که اخیراً بسیار مورد توجه قرار گرفته است. برای این نوع باند نیازی به در نظر گرفتن مؤلفه‌های سرباد و باد عرضی برای جانمایی فرودگاه نیست. با استفاده از باند دایره‌ای ظرفیت و مدیریت ناوگان حمل‌ونقل هوایی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، زمین کمتری برای احداث فرودگاه لازم است. علاوه‌براین، امکان پرواز و عملیات چند هواپیمای غول‌پیکر در یک زمان مشخص فراهم می‌شود که مزایای فراوانی در زمان اوج تقاضا و شرایط بحرانی به همراه دارد.

واژه‌های کلیدی: باند بی‌انتهای، هوانوردی، بادبرشی، کانتور صدا، نیروی گریز از مرکز

پویان ایار^{۱*} و علیرضا پورفیض^{۲**}

۱- دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، کدپستی: ۱۶۸۴۶-۱۳۱۴

۲- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

* استادیار (نویسنده پاسخگو)، ایمیل:

ayar@iust.ac.ir

** دانشجوی کارشناسی ارشد

Endless Runway Design: A New Horizon in the Development of the Aviation Industry

Scientists and researchers are always trying to optimize and develop a variety of transportation modes, including air transportation, by using their creative ideas. In this regard, the design of airports with circular runways (i.e., Endless Runways) has recently received much attention. In these kinds of airports, there is no need to consider the headwind and cross-wind competence in order to locate the airport site. By using circular runways, the capacity and management of air transport could be significantly enhanced. Furthermore, the need for land to build the airport will be considerably reduced. In addition, the possibility of flight and operation for several large aircraft at a specific time interval can provide different advantages at peak traffic demand and critical conditions.

Keywords: Endless Runway, Aviation, Crosswind Component, Sound Contour, Centrifugal Force

P. Ayar^{1*} and A. Pourfeiz^{2**}

1- School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Postal Code: 16846-1314, Tehran, IRAN

2- Noshirvani University of Technology, Babol, IRAN

* Assistant Professor (Corresponding Author): Email:

ayar@iust.ac.ir

** M.Sc. Student

۱- مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت جهان و لزوم کاهش زمان سفرهای هوایی در آینده، پروژه ایجاد فضای واحد اروپا برای مدیریت ترافیک هوایی^۱ پیش‌بینی می‌کند، ترافیک هوایی در سال ۲۰۲۰ نسبت به سال ۲۰۱۳، ۳ برابر و تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۱۵ برابر شود. همچنین، انتظار می‌رود حجم ناوگان هوایی از ۱۹۸۰۰ فروند در سال ۲۰۱۱ به ۱۰۰ هزار فروند در سال ۲۰۵۰ برسد [۱]. علاوه بر این، تحقیقات شورای مشورتی هوانوردی در اروپا^۲ نشان می‌دهد ظرفیت کم فرودگاه‌ها مهم‌ترین دلیل و مانع برای رشد سفرهای هوایی در سال‌های اخیر است. این اعداد بیانگر این است که داشتن یک طرح جدید برای فرودگاه‌ها که بتواند سرعت و کارایی عملیات پروازی را افزایش دهد و ظرفیت کافی جهت نشست و برخاست به طور هم‌زمان برای چندین هواپیما را به ارمغان بیاورد، الزامی است. به همین دلیل ایده ساخت فرودگاه‌هایی با باند بی‌انتها به میان آمد و در حال توسعه است [۲].

طرح فرودگاه‌هایی با باند بی‌انتها یک طرح پایدار است که امکان نشست و برخاست در هر جهت، مستقل از باد را فراهم می‌کند. مساحت کل زمین فرودگاه نسبت به فرودگاهی با باند مستقیم و تعداد عملیات پرواز مشابه کمتر است ولی هزینه‌های ساخت فرودگاه ۱۰ تا ۶۰ درصد بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر، محدودیت‌های فیزیکی مانند جریان مغشوش برگشتی گردابه‌ای^۳ و وزش باد از پشت هواپیما^۴ محدودیت‌های اجتماعی و زیست‌محیطی و غیره باعث بهبود عملکرد فرودگاه‌ها و ارائه طرح‌های جدید کار بسیار دشوار و پیچیده‌ای باشد [۳]. در فرودگاه با باند بی‌انتها، ترمینال‌ها با کلیه امکانات عمدتاً در وسط فرودگاه قرار دارند. همچنین، شعاع این باند باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا فضای مورد نیاز برای زیرساخت‌ها را فراهم کند. بنابراین، شعاع آن ۱/۵ کیلومتر و به صورت شیب‌دار به عرض ۴۰۰ متر برای افزایش ایمنی و مقابله با نیروهای گریز از مرکز جهت جلوگیری خروج هواپیما از باند پیشنهاد شده است. براساس موارد مطرح شده و با توجه به اهمیت و جدید بودن موضوع، در این مقاله به بررسی تاریخچه، ساختار و ویژگی‌های باند دوار و محاسبات اجرایی و فنی این طرح می‌پردازیم.

۲- تاریخچه و عوامل پیدایش ایده اولیه طرح باند بی‌انتها

در واقع باندهای دایره‌ای از همان روزهای نخست هوانوردی ظهور کردند. کلمنت ادلر^۵ در فرانسه تحقیق روی باندهای دایره‌ای را در اواخر قرن ۱۹ آغاز کرد و در اوایل قرن بیستم مهندسين مقالات و گزارش‌های مربوط به مفهوم باندهای دایره‌ای را ثبت کردند. در سال ۱۹۱۹ مسیر دایره‌ای فرود برای اولین بار در مطبوعات مطرح شد [۴]. چالش اصلی در آن دوران یافتن راهی برای نشست و برخاست هواپیما در داخل شهرهای بزرگ مانند نیویورک با آسمان‌خراش‌هایی با ارتفاع متفاوت بود. ایده‌ای که در این مورد مطرح شد، ساخت یک باند دایره‌ای بالای آسمان‌خراش‌ها بود. یک باند شیب‌دار ساخته شده از آهن که توسط چند ساختمان نگه‌داشته شده است. شکل ۱ طرح اولیه باند بی‌انتها را در منهن نیویورک نشان می‌دهد [۵].



شکل (۱): طرح اولیه باند دایره‌ای در منهن ۱۹۱۹ [۶].

در سال ۱۹۲۱ اولین باند دایره‌ای توسط پی.جی. باکوس^۶ به ثبت رسید. او یک مسیر دایره‌ای مسطح و کوچک که با هواپیماهای سبک آن زمان سازگار بود، ارائه کرد [۶]. همچنین، در سال ۱۹۵۷ طراحی اصلاح‌شده‌ای از باند دایره‌ای توسط سراچ تمپست^۷ ارائه شد. ارائه این طرح در پاسخ به این مشکل بود که با تحول آینده هواپیماهای جت که سرعت آن‌ها روزبه‌روز بیشتر می‌شد، باندهای مستقیم باید طولانی‌تر می‌شدند. در نتیجه، این مسئله مشکل اندازه فرودگاه‌های اصلی را به وجود می‌آورد. به همین خاطر هزینه زمین، ساخت و ساز و آماده‌سازی آن‌ها منجر به شکل‌گیری و توسعه مفهوم باند

5. Clement Adler
6. P.J. Backus
7. Sir H. Tempest

1. Single European Sky ATM Research (SESAR)
2. Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE)
3. Wake Vortex
4. Tail Wind

با این اوصاف، باندهای دایره‌ای عملیاتی هیچ‌گاه ساخته نشدند و هیچ‌گاه آزمایشی با هواپیماهای مسافربری صورت نگرفت. یکی از دلایل این موضوع هزینه باند و نیاز به فرآیند و تکنیک‌های نوین بود. در واقع هزینه ساخت این باندها به علت نیاز به شیب‌بندی دقیق، طول و عرض بیشتر معمولاً بالاست [۸-۶]. در قرن بیست و یکم به لطف فناوری‌های نوین و با در نظر گرفتن محدودیت‌های آینده برای فرودگاه‌ها، باید نگاه تازه‌ای به مفهوم باند بی‌انتهای داشت [۹-۱۰]. اخیراً محققان هلندی مفهوم جدیدی از باندهای بی‌انتهای را این بار برای فرودگاه‌های شهری براساس ایده‌ای از هنک هسلینک^۲ مهندس ارشد تحقیق و توسعه مرکز هوافضای هلند^۳ ارائه کرده‌اند [۱۱]. این موضوع انگیزه‌ای شد تا محققان به یک مدل جدید برای فرودگاه‌ها به صورت باند دایره‌ای فکر کنند. البته برای این مدل جدید احتمالاً مشکلاتی از جمله هزینه ساخت بالا، مشکلات اولیه در نشست و برخاست و طراحی هواپیماها وجود خواهد داشت [۶].

۳- ساختار و ویژگی‌های باند دوار (بی‌انتهای)

در این بخش ساختار و ویژگی‌های باند دوار (بی‌انتهای) تشریح خواهد شد.

۳-۱- جانمایی

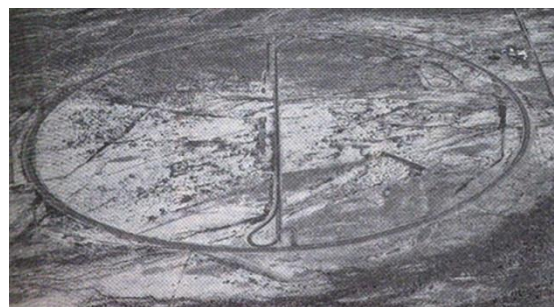
باندهای دوار (بی‌انتهای) یا باندهای ۳۶۰ درجه‌ای [۱۲]، باندهایی هستند که به شکل دایره طراحی می‌شوند و برای رده‌های مختلف فرودگاه با توجه به مدل‌های تقاضا (فرودگاه اقماری و فصلی)^۴ مناسب خواهند بود. هنک هسلینک به این نتیجه رسید که به‌کارگیری این ایده از لحاظ ایمنی مقرون به‌صرفه‌تر است، چراکه در باندهای مرسوم که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرد، محدودیت باد عرضی^۵ وجود دارد [۱۳].

$$V_c = V \sin \alpha \quad (1)$$

در معادله ۱، V سرعت باد و V_c سرعت باد عرضی است که بایستی مقدار سرعت باد عرضی برای هواپیماهای کوچک حدود ۱۵ و هواپیماهای بزرگ‌تر ۲۵ کیلومتر بر ساعت باشد. عامل تعیین‌کننده جهت نشست و برخاست هواپیما سرباد^۶ است (سرباد بادی است که جهت آن خلاف با جهت نشستن و

دایره‌ای شد. این باند قطری به‌اندازه ۹۱۴ متر، طولی برابر ۲،۸۷۰ متر داشت و مساحت چنین فرودگاهی ۰/۶۶ کیلومترمربع بود. این در حالی است که مساحت فرودگاه لندن در آن زمان ۱۲ کیلومترمربع بود. علاوه‌براین، به علت بی‌انتهای بودن باند حرکت روی آن می‌توانست طولانی‌تر باشد و هواپیماها می‌توانستند هر اندازه که برای رسیدن به سرعت برخاست یا توقف کامل نیاز داشتند به حرکت خود روی باند ادامه دهند [۶].

در ادامه تلاش‌های گذشته، نیروی دریایی آمریکا پروژه باند شیب‌دار را در دهه ۱۹۶۰ آزمایش کرد. در سال‌های ۱۹۶۴ و ۱۹۶۵ آزمایش‌هایی در آریزونا روی یک باند شیب‌دار صورت گرفت که در شکل‌های ۲ و ۳ نمایش داده شده است. این باند که توسط شرکت جنرال موتور ساخته شده بود، دارای محیطی به اندازه ۸،۰۴۷ متر، شعاع ۱،۲۸۱ متر، عرضی برابر ۱۳/۷ متر و دارای شیبی با زاویه تقریباً صفر درجه در داخل و ۲۲ درجه در خارج بود و اولین فرود را خلبان اسمیت^۱ با تجربه بیش از ۱۰،۰۰۰ ساعت پرواز با هواپیمای T-28C انجام داد. خلبان‌ها عنوان کردند که در ابتدا حین عملیات فرود با زاویه و سرعت مناسب مشکل داشتند. اما بعد از چند بار آزمایش، آن‌ها در این کار تخصص یافتند و پایداری جانبی استثنایی را گزارش کردند. همچنین، هواپیما به راحتی مسیر طبیعی متناسب با سرعتش را در باند پیدا می‌کرد و پایداری به شکلی بود که وزش باد دیگر عامل تعیین‌کننده‌ای نبود [۶].



شکل (۲): باند دایره‌ای جنرال موتور در آریزونا [۵].



شکل (۳): پرواز آزمایشی در باند دایره‌ای جنرال موتور، آریزونا [۶].

1. Smith

2. Henk Hesselink
3. Royal Netherlands Aerospace Centre
4. Hubs and Spoke
5. Cross Wind
6. Head Wind

۳-۲- ساختار بخش‌های مختلف باند دوار

به‌عنوان یک نمونه مدل‌سازی شده مطابق شکل ۵، عملاً باند فرودگاه محیط دایره‌ای است به شعاع داخلی ۱,۵۰۰ متر که قابلیت آن را دارد چند هواپیما در زمان مشخص روی باند نشست و برخاست کنند. این فرودگاه از لحاظ وسعت، به نسبت یک فرودگاه مرسوم فعلی با همان میزان شلوغی و ترافیک، فضای کمتری می‌طلبد و باندهای خزش^۲ نیز به تبع آن کاسته می‌شود و در نتیجه هزینه‌های ساخت باند خزش حداقل خواهد شد. عرض باند فرودگاه چیزی در حدود ۱۴۰ متر است. همچنین، تعداد پایانه‌های مجاز برای فرودگاه بین ۱ تا ۴ می‌باشد، به طوری که برای فرودگاه‌های محلی ۱ و فرودگاه‌های اقماری تا ۴ پایانه لازم است.

در این طرح مدل‌سازی شده ۱۸ نقطه دسترسی در محیط باند تعریف شده است و طول هر کمان چیزی در حدود ۵۲۴ متر است که این تعداد برای انجام عملیات پرواز، بهینه می‌باشد. علاوه بر این، سیستم باند خزش در این طرح شامل ۲ حلقه داخلی و خارجی به موازات هم و موازی باند اصلی می‌باشند (شکل ۶). باند خزش خارجی هم‌جهت با باند اصلی فرودگاه عملیاتی می‌شود و باند خزش داخلی خلاف جهت باند اصلی است. همچنین، باند خزش خارجی با باند اصلی در ۳۶ نقطه اتصال دارند که ۱۸ نقطه خروجی و ۱۸ نقطه ورودی است. حلقه خارجی، مابین حلقه داخلی و باند اصلی می‌باشد و خطوط واصل بین باند اصلی و حلقه خارجی دیده می‌شود که به صورت زاویه‌دار به باند متصل شده‌اند. شعاع حلقه داخلی ۱,۱۷۷/۵ متر و شعاع حلقه خارجی ۱,۲۷۵ متر است. همچنین، باندهای خزش سرعت بالا اتصال‌دهنده‌ها و رابط‌هایی هستند به طول ۳۱۸ متر که با زاویه ۴۵ درجه به باند اصلی متصل شده‌اند. دسته‌ای از باندهای خزش نیز وجود دارند که ساختمان‌های فرودگاه (ترمینال‌ها، توقفگاه‌ها^۳ و آشپانه‌ها^۴) را به حلقه داخلی متصل می‌سازند. این خطوط که باندهای همزاد (دوگانه) هستند، علاوه بر اتصال، فضای موردنیاز برای عملیات پوش بک^۵ و مانورها را نیز تأمین می‌کنند.

برای کاهش اثر نیروی گریز از مرکز توصیه می‌شود که پروفیل جانبی (عرضی) باند دایره‌ای از قسمت بیرونی به درونی به نحوی که در شکل ۷ نشان‌داده شده است، کاهش شیب را تجربه کند. در این حالت ممکن است اصطکاک جانبی بین تایر چرخ هواپیما و سطح باند وجود نداشته باشد [۱۶].

برخاستن هواپیما باشد) و مهم‌تر آن است که باند را طوری جانمایی کنیم که بیشتر مواقع سال (۹۵ درصد به بالا) باد عرضی کمتر از حد مجاز باشد [۱۳]. این در حالی است که در طراحی باندهای بی‌انتهای نشست و برخاست از نقاط مختلف امکان‌پذیر است. بنابراین، بسیاری از موانع از جمله باد عرضی و غیره که از مؤلفه‌های مؤثر بر جانمایی باند بوده‌اند، از قدرت اثرشان کاسته و یا صرف‌نظر می‌شوند [۱۳].

در طراحی باندهای بی‌انتهای تمامی ساختمان‌های فرودگاه شامل پایانه‌ها و آشپانه‌ها و غیره داخل پلان دایره‌ای جانمایی می‌شوند، این کار از آن جهت اهمیت دارد که اگر بخواهیم تمام ساختمان‌ها و تسهیلات فرودگاه از جمله ترمینال‌ها، برج مراقبت، آشپانه‌ها و غیره را به صورت متداول امروزی در پلان‌های مستطیلی جانمایی کنیم مساحت بسیار زیادی لازم است. به‌طور مثال، کارایی مدل فرودگاه با باند بی‌انتهای مساحت ۸۵۰ هکتار همانند کارایی فرودگاه به وسعت ۳,۲۵۷ هکتار با طراحی متداول امروزی است. برای درک بهتر، وسعت ۳,۲۵۷ هکتار معادل مساحت فرودگاه شارل دوگل پاریس^۱ است که در شکل ۴ نشان‌داده شده است [۱۴-۱۵].



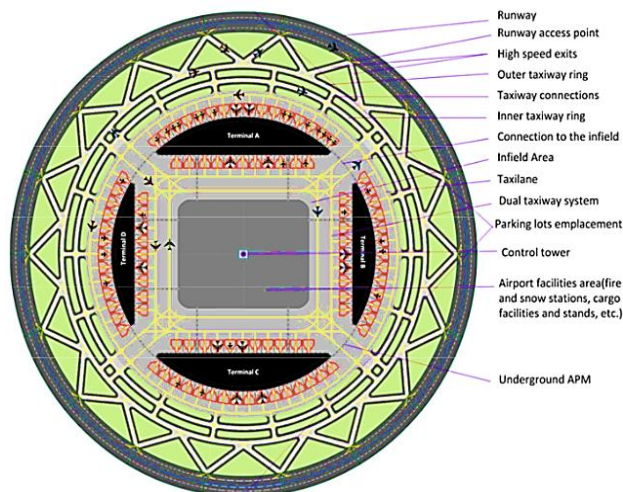
شکل (۴): پلان فرودگاه شارل دوگل پاریس.

همان‌طور که می‌دانیم، عوامل و فاکتورهایی از جمله جهت باد، سرعت باد و شرایط دید افقی از مؤلفه‌های مهم برای جانمایی و موقعیت‌سنجی یک فرودگاه است [۱۳]. وجود باد عرضی و محدودیت در دید افقی اگر از حد معینی بیشتر شود، ممکن است باعث تعطیلی موقت فرودگاه و در نتیجه نارضایتی و ضرر مالی شود. اما در باندهای بی‌انتهای نشست و برخاست هواپیما از هر نقطه که توصیه شود، امکان‌پذیر است. البته، کماکان عده‌ای از محققان ابهاماتی به رفع این مشکل‌ها دارند، ولی چون این طرح تنها در چارچوب مدل‌سازی بوده، اطلاعات دقیق‌تر از آزمایش‌ها و مدل‌سازی در دسترس نیست.

2. Taxiway
3. Apron
4. Hanger
5. Pushback

1. Paris Charles de Gaulle Airport

(علمی-ترویجی)
طرح باند بی انتها: افقی جدید در توسعه صنعت هوانوردی



شکل (۵): پلان باند دایره‌ای [۱۲].

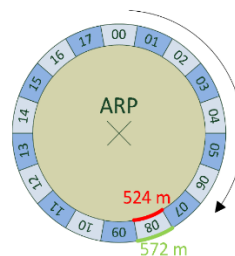
۴- اثرات طرح

بر اساس ارزیابی‌ها و مقایسه‌های صورت گرفته بین فرودگاهی با باند بی انتها و فرودگاه شارل دوگل پاریس مشخص شد که باند بی انتها ظرفیت انجام تعداد پرواز برابری را در باند کوتاه‌تری دارد و به همین دلیل سودمندتر و به صرفه‌تر می‌باشد.

۴-۱- پارکینگ

مزایای این طرح عبارتند از:

- امکان استفاده هم‌زمان چندین هواپیما از باند،
- کاهش مسافت و زمان عملیات خزش هواپیما،
- پرواز حین وزش باد بدون در نظر گرفتن جهت آن،
- زمین مورد استفاده برای این فرودگاه نسبت به فرودگاه‌های مرسوم به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است. در شکل ۹ مقایسه سطح اشغال باند دایره‌ای با فرودگاه‌های فرانکفورت، پاریس، آمستردام و باراخاس مادرید شبیه‌سازی شده است [۱۷].
- ظرفیت باند مشابه یا بیشتر از یک فرودگاه معمولی با سه یا چهار باند است. یک فرودگاه با سه یا چهار باند در اروپا معمولاً با ظرفیت ۱۱۵ پرواز در ساعت کار می‌کند، در حالی که این باند بسته به تأخیرها و زیرساخت‌های موجود، ظرفیت ۱۱۰ تا ۱۴۶ پرواز در ساعت را نشان داده می‌دهد [۱۸].
- این باند می‌تواند مشکلات عمده‌ای را در فرودگاه‌ها از جمله تأخیر پرواز به دلیل شلوغی باندها و فرود هواپیماها به دلیل نبود فضای کافی را برطرف کند [۱۹]. ارزیابی اولیه باند دایره‌ای به طول ۱۰ کیلومتر تعداد ۱۰۹ پرواز با تأخیر ۳۹ ثانیه در حالت باد ضعیف را نشان می‌دهد. در حالی که



شکل (۶): بخش‌های باند بی انتها [۱۶-۱۲].

۳-۳- پارکینگ

هنگامی که هواپیما برای انجام عملیات برخاست شتاب می‌گیرد، از سطح صاف باند تا جایی که زاویه جانبی برای برخاستن مناسب شود، به‌طرف بخش بیرونی حرکت می‌کند همچنین ارتفاع باند باید طوری تنظیم شود که برای یک باند با شعاع داخلی ۱۵۰۰ متر و ۱۸ ورودی باند خزش، پارکینگ طبقاتی در زیر بخش بیرونی باند قرار گیرد تا سبب بهینه شدن استفاده از حجم باند و محیط داخلی آن شود. در این مورد شکل ۸ مدل شبیه‌سازی شده پارکینگ وسایل نقلیه زیر باند را نشان می‌دهد

۳-۴- دسترسی

دسترسی از محیط بیرون به تسهیلات داخل فرودگاه (ترمینال‌ها و غیره) برای کارمندان و متصدیان از طریق تونل‌های گذرنده از زیر باند می‌باشد. برای مسافران از طریق خط ویژه‌ای به نام انتقال خودکار افراد تعبیه شده که ترمینال اصلی داخل پلان دایره را به محوطه خارجی فرودگاه و همچنین پارکینگ متصل می‌کند. شکل ۸ خط ویژه مسافران را نشان می‌دهد [۱۵].

2. Paris Roissy Charles de Gaulle

1. Automated People Mover (APM)

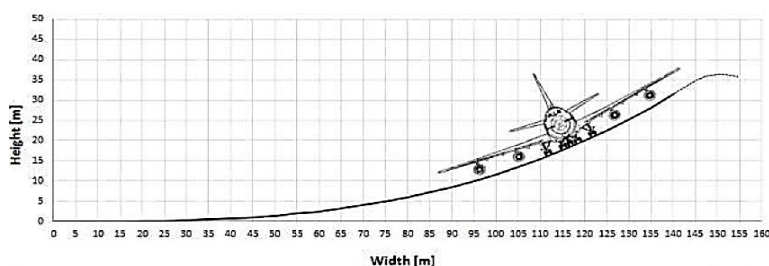
(علمی-ترویجی)
ایار پویان و علیرضا پورفیض

جدول (۱): مقدار تأخیر میانگین و تعداد پرواز در ساعت [۶].

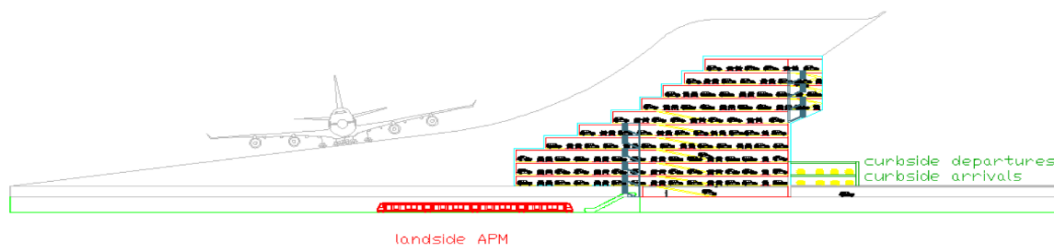
| میانگین تأخیر | بیشترین پروازهای در هر ساعت |
|---------------|-----------------------------|
| ۰۰:۰۰:۳۹ | ۱۰۹ |
| ۰۰:۰۱:۳۳ | ۱۱۸ |
| ۰۰:۰۴:۲۷ | ۱۲۹ |
| ۰۰:۱۹:۲۴ | ۱۳۷ |
| ۰۰:۳۸:۲۵ | ۱۴۰ |
| ۰۱:۰۶:۲۷ | ۱۵۱ |
| ۰۳:۰۹:۳۸ | ۲۶۱ |

برای باد شدید این تعداد به ۶۰ پرواز کاهش می‌یابد. جدول ۱ بیشترین میزان حرکت هواپیماها و میانگین زمان تأخیر آن‌ها را در باند دوار نشان می‌دهد [۶].

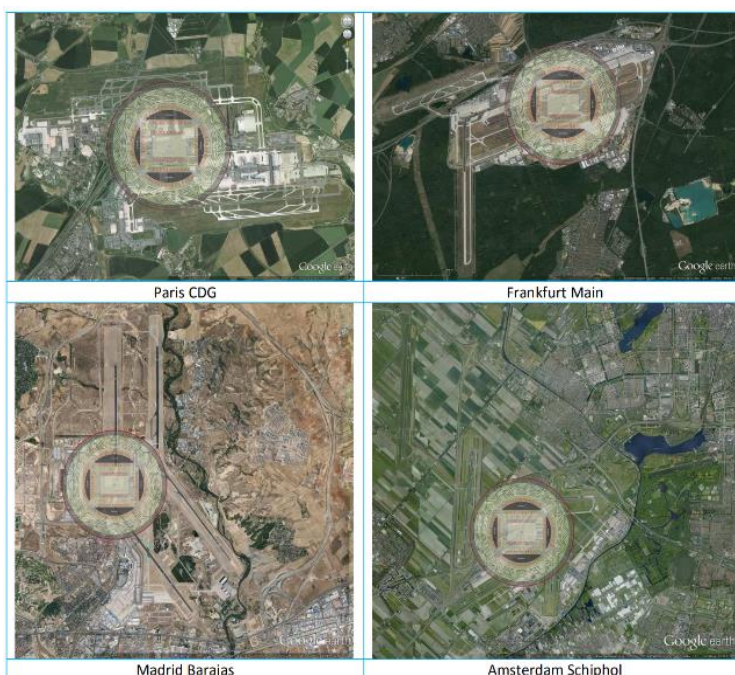
- باند دوار دارای ظرفیت پایدار ۸۰ پرواز در ساعت است،
- در زمان عملیات خزش کاهش ۴۰ تا ۹۵ درصد مشاهده شده است و
- منطقه تحت تأثیر سروصدا برای فرودگاه‌هایی با این باند کوچک‌تر است. در شکل ۱۰ کانتور صدا روی باندهای مرسوم و باند بی‌انتها شبیه‌سازی شده است که نشان دهنده تمرکز بیشتر کانتور صدا در باند دایره‌ای می‌باشد [۱۷ و ۲۰].



شکل (۷): تغییرات ارتفاع در مقطع عرضی باند دایره‌ای [۶ و ۱۶].



شکل (۸): محل پارک وسایل نقلیه زیر باند [۱۷].



شکل (۹): شبیه‌سازی باند دایره‌ای بر روی باندهای مرسوم [۶].



Figure 27 INM noise contours for the Endless Runway

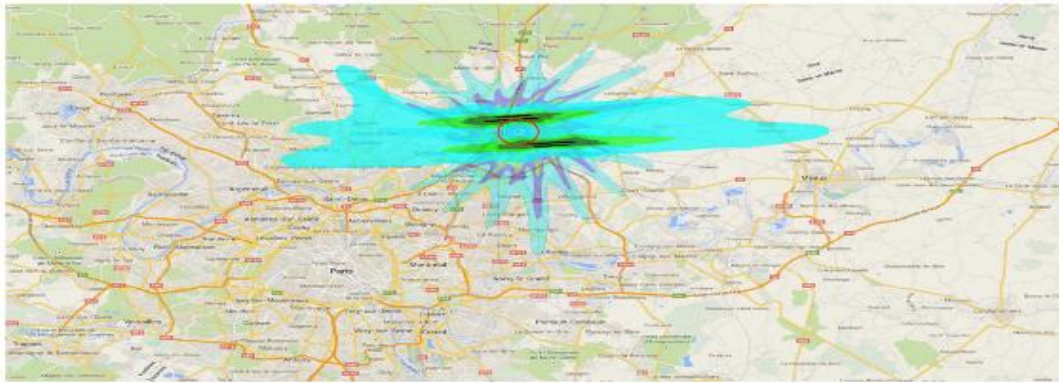


Figure 28 Noise contours comparison between the Endless Runway and Paris Charles de Gaulle airport

شکل (۱۰): شبیه‌سازی کانتور صدا، باند مرسوم (پایین) و باند بی انتها (بالا) [۱۷].

۵- محاسبات و ویژگی‌های فنی و اجرایی طرح

در این بخش محاسبات و ویژگی‌های فنی و اجرایی طرح تشریح خواهد شد.

۵-۱- دو سناریو برای سرعت باد با شدت متفاوت

اگر سرعت باد بیش از ۲۰ نات باشد، خلبان که تصمیم به فرود هواپیما می‌گیرد، یک باد متقاطع را تجربه می‌کند که قابل قبول نیست. بنابراین در شرایط باد شدید خلبان مجبور است از بخش‌هایی که دارای باد عرضی زیاد می‌باشد، از فرود اجتناب کند. از این رو، فقط قسمت محدودی از باند فرودگاه قابل استفاده می‌شود. بخش‌هایی که سرعت باد متقاطع بالای ۲۰ نات دارند برای نشست و برخاست بسته می‌شوند. جریان‌های ترافیکی باید به سمت نقاط عملیاتی نشست و برخاست هدایت شوند. شکل ۱۱ بخش‌های محدود شده باند را که در اثر باد شدید بسته می‌شوند نشان می‌دهد. در صورت تغییر جهت باد شدید بخش‌های باز با توجه به جهت باد، بسته و بخش‌های دیگر باز می‌شوند.

۴-۲- چالش‌های طرح

چالش‌های این طرح عبارتند از:

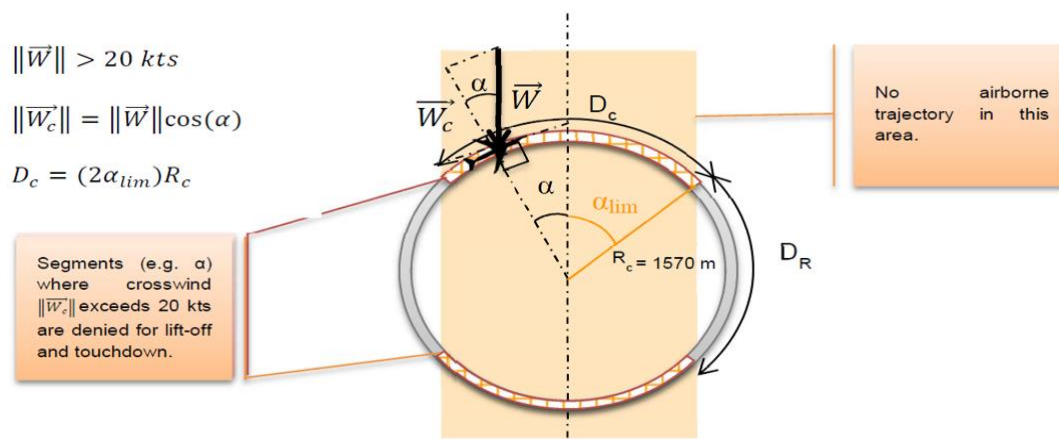
- حجم کار خلبان برای عملیات پروازی بخصوص در وضعیت فرود بیشتر است،
- آموزش فعلی برای خلبان‌ها و کنترل‌کننده‌های مراقبت پرواز برای عملکرد باند مدور کافی نیست و
- بارهای سازه‌ای اضافی که ممکن است در طی عملیات از باند به هواپیما تحمیل شود.

۴-۳- معایب طرح

معایب این طرح عبارتند از:

- هزینه ساخت باند بیشتر است، تجزیه و تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد که هزینه‌های ساخت این فرودگاه به‌طور معمول ۱۱۰ تا ۱۶۰ درصد هزینه یک فرودگاه معمولی است و
- توسعه فرودگاه دشوار خواهد بود. بدین معنی که برخلاف فرودگاه‌های امروزی، این باند را نمی‌توان به خارج گسترش داد. همچنین، برخلاف فرودگاه‌های امروزی، شعاع باند ثابت است بنابراین قابل گسترش نیست و فضای موجود برای زیرساخت‌های داخل آن محدود است [۶].

(علمی-ترویجی)
ایار پویان و علیرضا پورفیض



شکل (۱۱): قسمت محدود شده باند به دلیل وجود باد شدید متقاطع [۶].

به عنوان یکی از عوامل اساسی محاسبه ابعاد TMA باند دایره‌ای به شمار می‌رود. زاویه استاندارد ۳ درجه است. پس می‌توان فاصله نهایی برای نزدیک شدن به باند که با $final_{dist}$ نشان داده شده است که طبق معادله ۲ محاسبه کرد [۸ و ۲۱].

$$final_{dist} = \frac{3000 \text{ ft}}{\tan(3^\circ)} \quad (2)$$

نقاط نشست و برخاست برای همه بخش‌ها به فاصله ۱۰۰ متر از لبه داخلی باند تعریف شده است. این موضوع متناظر با فاصله ۱,۶۰۰ متری ($rwby_radius$) از نقطه مرجع فرودگاه است که در این حالت می‌توان شعاع TMA را با استفاده از معادله ۳ محاسبه کرد [۱۰].

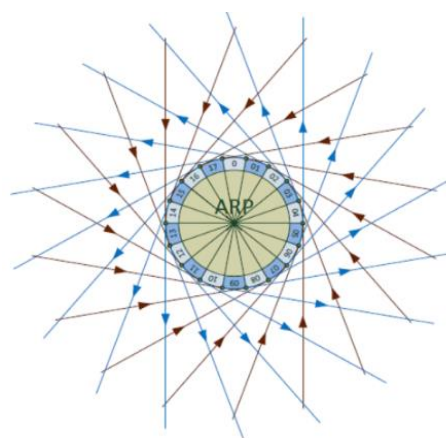
$$TMA_{radius} = \sqrt{final_{dist}^2 + rwby_radius^2} \quad (3)$$

بر اساس این محاسبات، TMA در این باند، یک ناحیه مدور در اطراف مرکز فرودگاه با شعاع ۱۷۵۲۱ m یا ۹/۴۶ N.M است که در شکل ۱۳ این ناحیه نشان داده شده است. برای برخاست یک زاویه میانگین ۵ درجه تعریف می‌شود. با توجه به این موضوع، ارتفاع خروجی در TMA را می‌توان بار دیگر با استفاده از معادله ۴ محاسبه نمود.

$$dep_{height} = final_{dist} \times \tan(5^\circ) = 5008 \text{ ft} \quad (4)$$

به طور خلاصه، TMA دارای کمترین ابعاد جانبی در اطراف نقطه مرجع فرودگاه و به صورت عمودی از ارتفاع فرودگاه تا ارتفاع ۵۰۰۰ فوت است. شکل ۱۳ این ابعاد را نشان می‌دهد. همچنین، در شکل ۱۴ مسیرهای ورودی و خروجی به صورت شماتیک قابل مشاهده است. هواپیماها در TMA به صورت عمودی و یا افقی از هم جدا می‌شوند. برای جدایی قائم فاصله باید ۱,۰۰۰ فوت و برای جدایی افقی باید ۱/۵ N.M باشد [۱۹-۲۱].

در شرایط سرعت کم باد، هواپیما می‌تواند به روشی انعطاف‌پذیر عمل کند. زیرا تمام بخش‌ها برای پرواز و فرود در دسترس هستند، شکل ۱۲ هجده قسمت (۱۷-۰۰) باند را نشان می‌دهد. همچنین، مسیرها و نقاط آغاز و پایان در مرز هر یک از بخش‌ها مشخص شده است. با تغییر جهت باد در بخشی که سرعت زیر ۲۰ نات است، مسیر باند در کل باند دایره‌ای بدون وقفه به کار خود ادامه می‌دهد.



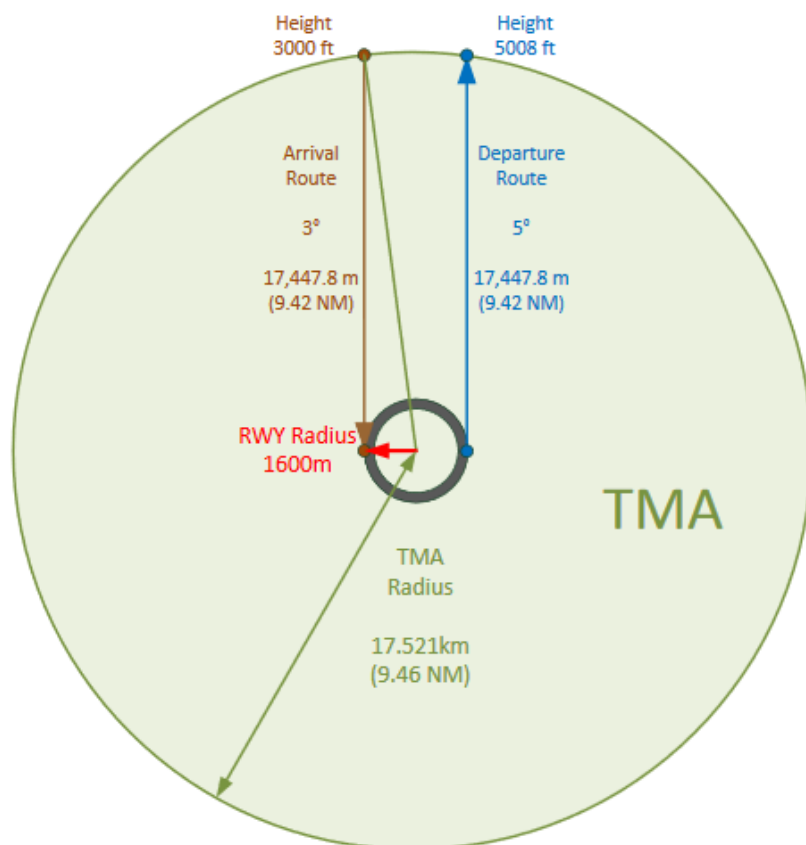
شکل (۱۲): قطعات باند برای عملیات پروازی در حالت باد با سرعت کم [۶ و ۱۷].

۵-۲- طراحی منطقه مانور ترمینال

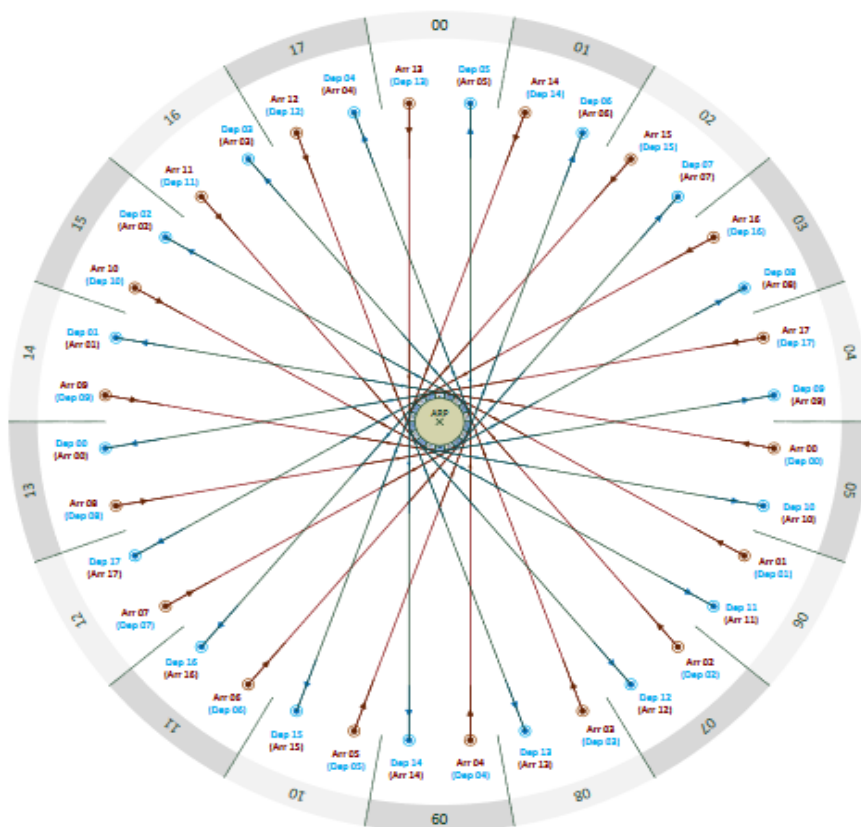
منطقه مانور ترمینال^۱ یک منطقه کنترل شده در اطراف فرودگاه‌های شلوغ است که ترافیک ورودی و خروجی به فرودگاه در آن ناحیه هماهنگ می‌شود. علاوه بر این، محدوده‌های TMA استاندارد نشده‌اند و از کشوری به کشور دیگر متفاوت هستند. ارتفاع ۳,۰۰۰ فوتی برای فرود یک هواپیمای ورودی که از سیستم ابزار فرود^۲ استفاده می‌کند،

1. Terminal Maneuvering Area (TMA)
2. Instrument Landing System (ILS)

(علمی-ترویجی)
طرح باند بی انتها: افقی جدید در توسعه صنعت هوانوردی



شکل (۱۳): ابعاد TMA [۱۷ و ۱۹].



شکل (۱۴): ساختار مسیرهای ورود و خروج TMA [۱۷ و ۱۹].

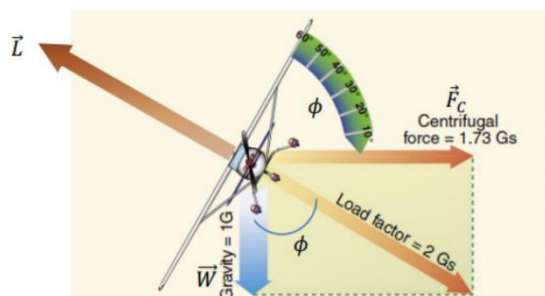
۵-۳- فاکتور بار طی عمل چرخش

با در نظر گرفتن شکل ۱۵، نیروی گریز از مرکز (F_c) و وزن (W) را می‌توان برآیند گرفت. همچنین نیروی لیفت^۲ باید در جهت مخالف و برابر برآیند آن دو نیرو باشد. فاکتور بار^۳ که با n نمایش داده شده است را می‌توان با توجه به معادلات ۵ و ۶ محاسبه کرد که L نیروی لیفت و W وزن هواپیما است.

$$n = L/W \quad (۵)$$

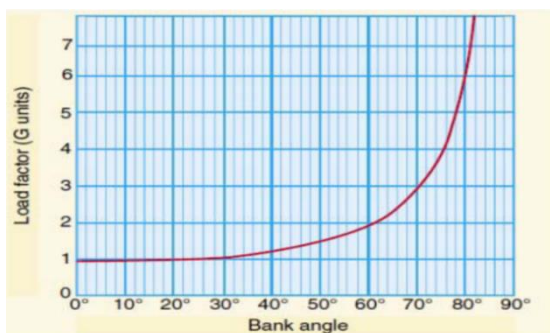
$$n = \frac{1}{\cos \theta} \quad (۶)$$

$$\cos \theta = \frac{W}{L} \quad (۷)$$



شکل (۱۵): بار وارده به هواپیما حین چرخش [۱۲].

در طراحی هواپیماهای امروزی ضریب بار در محدوده‌ای بین $1/52 -$ تا $3/8 +$ گرانس متغیر است؛ از تجزیه و تحلیل‌ها نتیجه می‌شود که در زاویه بیش از ۴۵ درجه، فاکتور بار به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که در شکل ۱۶ و جدول ۲ به وضوح قابل مشاهده است [۱۲ و ۲۰].



شکل (۱۶): نمودار فاکتور بار به زاویه شیب [۱۲].

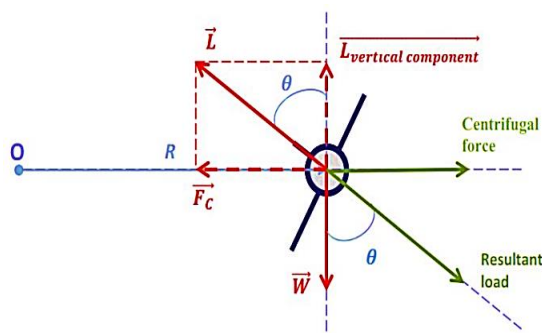
1. Centrifugal Force
2. Lift
3. Load factor

جدول (۱): بارهای وارده به هواپیما حین چرخش [۱۲].

| افزایش نیروی لیفت | ضریب بار | زاویه شیب |
|-------------------|----------|-----------|
| ۰٪ | 1g | 0° |
| ۱۵٪ | 1.15g | 30° |
| ۴۰٪ | 1.4g | 45° |
| ۱۰۰٪ | 2g | 60° |
| ∞ | ∞ | 90° |

در این مقاله، در دو حالت به بررسی نیروها پرداخته شده است که حالت اول در آسمان و حالت دوم بر روی باند دایره‌ای می‌باشد [۱۲].

حالت (۱): نیروی‌ها وارد به هواپیما در یک چرخش متعادل اعمال شده است؛ که در شکل ۱۷ نیروها به‌طور کامل قابل مشاهده است.



شکل (۱۷): نیروی وارد به هواپیما در یک چرخش متعادل جانبی [۱۲].

در طول چرخش جانبی متعادل، نیروهای وارد شده به هواپیما به شرح زیر است.

$$W = L \cos \theta \text{ and } F_c = L \sin \theta \quad (۸)$$

$$\tan \theta = \frac{F_c}{W} = \frac{ma_c}{mg}$$

شتاب گریز از مرکز هواپیما را می‌توان با توجه به معادله ۹ محاسبه کرد:

$$a_c = \frac{V^2}{R} \quad (۹)$$

اکنون نیروی گریز از مرکز (F_c) با توجه به معادله ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$F_c = ma_c = \frac{mV^2}{R} \quad (۱۰)$$

R بخشی است که شعاع دایره‌ای ایجاد شده است. با قرار دادن مقدار F_c در معادله ۸، $\tan \theta$ با توجه به معادله ۱۱ محاسبه خواهد شد.

$$\Rightarrow W = N \cos \theta - F \sin \theta \quad (۱۶)$$

$$\Rightarrow mg + F \sin \theta = N \cos \theta$$

از معادلات ۱۶ و ۱۷ استفاده کرده و این دو معادله رو بر هم تقسیم می‌کنیم. همچنین، $F = \mu N$ داریم ($\mu =$ ضریب اصطکاک):

$$N \sin \theta = \frac{mV^2}{R} - F \cos \theta$$

$$N \cos \theta = mg + F \sin \theta \quad (۱۸)$$

$$\Rightarrow \tan \theta = \frac{V^2 - \mu Rg}{Rg + \mu V^2}$$

$$\Rightarrow \theta = \tan^{-1} \left(\frac{V^2 - \mu Rg}{Rg + \mu V^2} \right)$$

از معادله ۱۸ حداکثر سرعت تایرها را می‌توان به شکل معادله ۱۹ استخراج کرد. همچنین مسیر منحنی شکل حاصل شده را با موفقیت به دست بیاوریم.

$$V = \sqrt{Rg \left(\frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \right)} \quad (۱۹)$$

در صورتی که مقدار μ بسیار ناچیز باشد، $\tan \theta$ به صورت معادله ۲۰ محاسبه می‌شود.

$$\tan \theta = \frac{V^2}{Rg} \quad (۲۰)$$

۴-۵- فاصله بال هواپیما تا سطح باند

برای ارزیابی عملیات نشست و برخاست در این باند، هواپیمای بوئینگ ۷۴۷ مورد آزمایش قرار گرفته است. این ارزیابی با تجهیزات شبیه‌سازی ۶ درجه آزادی انجام شده است. در این مواقع، باید از فاصله بال هواپیما و موتور از کف باند اطمینان حاصل نمود. یک نمای گرافیکی در شکل ۱۹ نشان داده شده است [۶-۷].

تحقیقات و شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که هواپیماهای امروزی می‌توانند روی باندهای دایره‌ای شکل، عملیات نشست و برخاست را انجام دهند. اما احتمال برخورد هواپیما با باند فرود وجود دارد و نمی‌توان از این احتمال هرچند کوچک به راحتی چشم‌پوشی کرد و باید منتظر نسل جدیدی از هواپیماها بود. البته طرح‌های مفهومی از هواپیماهای نسل بعد نشان از آن دارد که این هواپیماها نسبت عرض به ارتفاع بیشتری خواهند داشت و این موضوع مشکلات و پیچیدگی‌های جدیدی را به دنبال خواهد داشت [۲۲-۲۳].

$$\tan \theta = \frac{mV^2}{R} = \frac{V^2}{Rg} \quad (۱۱)$$

L یا نیروی لیفت را می‌توان با تعادل آیرودینامیکی محاسبه کرد.

$$L = \frac{C_L \rho V^2 S}{2} \quad (۱۲)$$

در معادله ۱۲، ρ چگالی هوا، V سرعت واقعی هواپیما، C_L ضریب مقدار لیفت و S مساحت سطح بال معرفی شده است. با توجه به وزن، زاویه را با توجه به معادله ۱۳ می‌توان محاسبه کرد.

$$W = L \cos \theta \Rightarrow$$

$$W = \frac{C_L \rho V^2 S}{2} \cos \theta \Rightarrow \quad (۱۳)$$

$$\cos \theta = \frac{W}{kV^2} \quad (\text{where } k = \frac{C_L \rho S}{2})$$

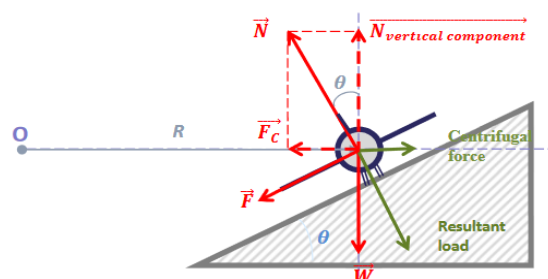
با ترکیب معادلات ۱۱ و ۱۳ می‌توان زاویه θ را با توجه به معادله ۱۴ محاسبه نمود.

$$\sin \theta = \tan \theta \cdot \cos \theta \Rightarrow$$

$$\sin \theta = \frac{V^2}{gR} \cdot \frac{W}{kV^2} = \frac{W}{gRk} \Rightarrow \quad (۱۴)$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{W}{gRk}$$

حالت (۲): نیروها بر روی زمین با توجه به اصطکاک اعمال شده‌اند؛ که در شکل ۱۸ نیروها به وضوح قابل مشاهده‌اند. نیروی گریز از مرکز باید با اصطکاک جانبی ایجاد شده توسط لاستیک‌ها و همچنین نیروهای باند مقابله کند.

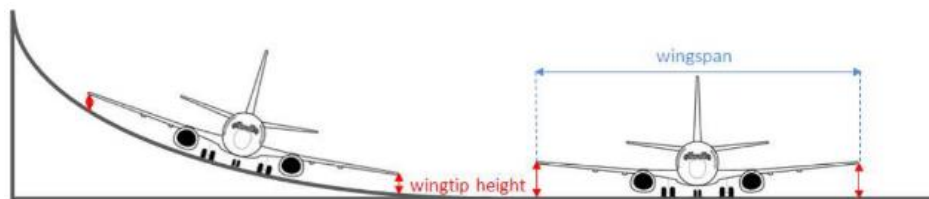


شکل (۱۸): نیروهای وارد به هواپیما روی باند دایره‌ای [۱۲].

با توجه به شکل ۱۸، نیروی وزن W و اصطکاک ایجاد شده روی زمین F است. از شکل ۱۸ می‌توان به راحتی محاسبه کرد [۱۲ و ۲۵]:

$$F_c = N \sin \theta + F \cos \theta \quad (۱۵)$$

$$\Rightarrow \frac{mV^2}{R} - F \cos \theta = N \sin \theta$$



شکل (۱۹): فاصله بال هواپیما تا سطح باند [۶].

مکان دقیق نشست هواپیما در بهترین حالت ممکن، کمک شایانی می‌کند.

اصلاح قوانین و ایجاد آیین‌نامه‌های جدید:

قوانین و استانداردها باید با باندهای جدید دایره‌ای شکل به‌روز شوند، البته تا جایی که ممکن بود سعی شده است در طراحی این باند قوانین و استانداردهای فعلی رعایت شوند. ولی باید تغییراتی در آیین‌نامه‌ها به دلیل شکل خاص و متفاوت این باندها در نظر گرفته شود.

استفاده از تجهیزات جدید با دقت بالاتر: یکی

از مهم‌ترین فاکتورها برای عملیاتی کردن باند بی‌انتهای، احتیاج به راهنما برای برج مراقبت و خلبان است. از طرفی وسایل جهت‌یابی رادیویی مثل ILS، کمک‌های دیداری و علامت-گذاری باند، دیگر به‌تنهایی راهگشا نیستند و باید از دیگر فناوری‌ها و مفاهیم جدید استفاده شود. همچنین فرود در چنین فرودگاهی نیازمند جهت‌یابی و راهنمایی بسیار دقیقی است. چراکه جهت هواپیما هنگام فرود باید هم عمودی در راستای محور Y و هم‌افقی در راستای محور X با دقت بسیار زیادی تنظیم شود. فناوری‌های جدید جهت‌یابی، مثل سیستم ناوبری ماهواره‌ای و همچنین سیستم‌های تقویت زمینی، رسیدن به چنین دقتی را امکان‌پذیر می‌کند. GBAS یک ایستگاه مرجع در نزدیکی فرودگاه است که خطاها و اشتباهات GPS سیستم را محاسبه کرده و مقدار صحیح آن را به هواپیما منتقل می‌کند.

استفاده از سیستم‌های شبیه‌سازی: یکی از

راه‌هایی که به خلبان‌ها هنگام نشست و برخاست در یک باند دایره‌ای شکل کمک می‌کند، استفاده از سیستم‌های شبیه‌سازی است. خوشبختانه این سیستم‌ها هم‌اکنون نیز در دسترس هستند و در آینده با پیشرفت بیشتر فناوری، می‌توان از آن‌ها به‌عنوان یکی از راه‌های اصلی کمک به خلبان‌ها نام برد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این مقاله به بررسی یک مفهوم جدید و مبتکرانه برای طراحی و سازوکار عملیات پروازی یک فرودگاه با باند بی‌انتهای پرداخته شده است. بر اساس تجارب قبلی طرح اولیه پیشنهادی یک مسیر دایره‌ای شکل شب‌ب‌دار است همچنین برنامه‌ریزی‌هایی صورت گرفته است تا بتوان در سال‌های آتی با شبیه‌سازی مدل ترافیک هوایی و مدیریت آن نتایج ارزنده‌ای در زمینه پیشرفت و بهبود نظریه باندهای بی‌انتهای به دست آورد. طول شعاع داخلی در نظر گرفته شده این باندها $1/5$ کیلومتر است که طولی معادل ۳ باند معمولی است. همچنین فضای قابل‌توجهی در وسط فرودگاه برای احداث ترمینال‌ها، ورودی‌ها، باندهای خزش و دیگر امکانات موردنیاز، فراهم شده است.

با توجه به اینکه عملیات نشست و برخاست هواپیما هم‌زمان هم به‌صورت ساعت‌گرد و هم پادساعت‌گرد انجام می‌پذیرد، فرآیند مدیریت ترافیک هوایی نیازمند یک سیستم خودکار پیشرفته و مدرن است، تا بتواند فرآیند نشست و برخاست هواپیماها را در بهترین حالت با در نظر گرفتن شرایط ترافیکی و هوایی فرودگاه، محاسبه و کنترل کند.

وضعیت عملکردی باند بی‌انتهای نشان داد که طراحی عملی در شرایط تئوری است، اگرچه برخی از جنبه‌های آن نیاز به مطالعه بیشتر دارد. می‌توان مزیت اصلی این نوع باند را فشردگی و کاهش مسیرهای زمینی و هوایی اشغال شده دانست. اما این مزایا باید در کنار هزینه بالای ساخت، کمبود انعطاف در زیرساخت‌های درونی و امکان‌پذیر نبودن استفاده از برخی پیکربندی‌های هواپیما در آینده، سنجیده شوند. با توجه به مباحثی که مطرح شد، پیشنهادهایی مانند هوشمندسازی، اصلاح قوانین و آیین‌نامه‌های جدید، استفاده از تجهیزات دقیق و سیستم‌های شبیه‌سازی می‌تواند گامی جهت بهبود این طرح باشد، که در ادامه به بررسی آنها می‌پردازیم:

هوشمندسازی سیستم‌ها: اکثر چالش‌های فنی که

برای عملیاتی کردن باند بی‌انتهای وجود دارد از قبل موردبررسی قرار گرفته‌اند. هوشمندتر کردن هواپیماها و تجهیزات زمینی به برنامه‌ریزی برای بخش‌های مختلف باند و مشخص کردن

1. Air Traffic Control (ATC)
2. Ground Base Augmentation System (GBAS)

۶- مراجع

- [1] *Flightpath 2050, Europe's Vision for Aviation Report of the High Level Group on Aviation Research*, EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Research and Innovation, Directorate General for Mobility and Transport, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2011.
- [2] *Aeronautics and Air Transport: Beyond Vision 2020 (Towards 2050)*, Background Document, Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (CARE), 2010.
- [3] Mirkovic, B., Tomic, V., Peter, K., and Höhenberger, M., "Airport Apron Roundabout - Operational Concept and Capacity Evaluation", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 80, pp. 439-453, 2017.
- [4] Roosts for City Airplane: Would This Circular Track Solve the Landing Problem, *Popular Science*, June 1919.
- [5] Navy Tests Design for Airport with Circular, Banked Runway, *The Milwaukee Journal*, Dec 1965.
- [6] Hesselink, H., *D5.2 Assessment of the Endless Runway*, Version 1.0, January 2014.
- [7] Conrey J.S., *Airport Design*, US Patent 3157374, Nov. 1964.
- [8] Woldemar A., *Closed Track Airport with Straight Runways for Instrument Landing and Take-off*, US Patent 3333796, August 1967.
- [9] Loth, S., Hesselink, H., Verbeek, R., and Dupeyrat, M., "Innovative Airport and ATM Concept (Operating an Endless Runway)", *The International Conference of the European Aerospace Societies (CEAS 2013)*, Linköping, Sweden, 2013.
- [10] <https://www.aerosociety.com/news/would-circular-runways-drive-pilots-round-the-bend/>.
- [11] Mauro, D., Bruna, F., Giovanni, G., Laura, M., and Vittorio, N., "The Evaluation of Runway Surface Properties: a New Approach", *Procedia - Social and Behavioral Sciences.*, Vol. 53, pp. 1192-1201, 2012.
- [12] Dash, S.S., Singh, D., Mohanty, N.P., and Swagatika, S., "A Survey on Passenger-centric, Cost-effective Airport Design via End-less Runway", *Conference on Communication and Signal Processing*, India, 2019.
- [13] Horonjeff, R., McKelvey, F.X., Sproule, W.J., and Young, S.B., *Planning and Design of Airports*, *Chem. Eng. Sci.*, McGraw-Hill Education, New York, USA, 2010.
- [14] Chakraborty, I., Comer, A.M., and Dewey, J.M., "A Simulation-Based Aircraft-Centric Assessment of the Circular/Endless Runway Concept", *AIAA SciTech Forum*, Orlando, FL, USA, 2020.
- [15] Milbredt, O., Castro, A., Ayazkhani, A., and Christ, T., "Passenger-centric Airport Management via New Terminal Interior Design Concepts", *Transportation Research Procedia*, Vol. 27, pp. 1235-1241, 2017.
- [16] Baral, P.R., Silwal, N., Aryal, G., Shakya, R., and Pokharel, S., Badu, K.D., "Research Article Revised Concept of Nijgadh International Airport Using Endless Runway", *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, Vol. 9, pp. 8-13, 2021.
- [17] Dupeyrat, M., Aubry, S., Hesselink, H., Loth, S., and Remiro, A., "Evaluation of Operations on an Airport with a Circular Runway", *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2014)*, Saint Petersburg, Russia, 2014.
- [18] Hristoski, I. and Dimovski, T., "Modelling Framework for Performance Analysis of Circular Runway Airport Traffic: A Petri Net Approach", *29th ICEST*, Sozopol, Bulgaria, 2018.
- [19] Hesselink, H.H., *D1.3 The Endless Runway Concept: High-level Overview*, Version 2.0, December 2012.
- [20] Loth, S., Hesselink, H., Verbeek, R., and Dupeyrat, M., *D4.2 The Endless Runway ATM Operational Concept*, Version 1.0, June 2013.
- [21] Agarwal, M., Agarwal, A., Gopal, K., and Sachet, P., "Airport with a Circular Runway in India", *International Journal of Advance Research, ideas and Innovations' in technology*, Vol. 4, pp. 919-922, 2012.
- [22] Greitzer, E.M. and Slater, H.N., *N+3 Aircraft Concept Designs and Trade Studies*, Final Report, The MIT, Aurora Flight Sciences, and Pratt&Whitney Team, 2010.
- [23] Lamiscarre, B., Hermetz, J., Le Tallec, C., Brunet, M., Joulia, A., and Chaboud, T., *ATS 2050 Phase 1: Research Paths for a Viable Air Transport System in 2050*, ONERA, France 2010.