نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی
سال بیست و ششم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۳

شناسایی و اولویت بندی روش های روسازی سطوح پروازی فرودگاه های ایران با استفاده از تکنیک های تصمیم گیری چند معیاره (MCDM)

یوسفعلی شریفی*[۱]، عبدالعلی جلالی[۲] ، حمیدرضا ضرغامی[۳]
۱- کارشناس ارشد مهندسی هوافضا (ترافیک هوایی) دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری
۲- استادیار مهندسی هوافضا دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری
۳- استادیار مهندسی صنایع دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری
(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۳۰)

چکیده
در این پژوهش تلاش شده است که با نگاه چندجانبه بر موارد مهم و تاثیرگذار، ضمن رفع نواقص موجود، به تفکیک و گزینش روش های متنوع روسازی پرداخته شود. برای ر سیدن به این هدف، ابتدا تلاش می گردد با مروری بر مبانی و پی شینه پژوهش‌های به انجام ر سیده در این حوزه، معیارهای مؤثر سنجیده شود و سپس با برر سی مزایا و معایب این روش ها، گزینه ی منتخب ارائه گردد. این مو ضوع به دلیل ح صول منافع ایمنی، زیست محیطی و اقت صادی از اهمیت ویژه ای برخوردار ا ست، متا سفانه تا به امروز در انتخاب یک تکنیک جامع با ویژگی های چند معیاره برای ا ستفاده در اولویت بندی متد روسازی غفلت شده است. این مسأله به صورت ناخواسته هر فرودگاه را متحمل هزینه های هنگفتی می‌نماید. از آنجا که تبادل شاخص‌ها در اولویت بندی انواع رو سازی بر ا ساس ویژگی‌های خاص آنها یک م سئله چند معیاره غیرجبرانی ا ست، حل این م سائل با تحلیل تخ ص صی پارامترهای موثر و بکارگیری دانش تصمیم‌گیری چندمعیاره قابل انجام است، بر این اساس پس از شناسایی معیارها مبتنی بر مبانی نظری و نهایی‌سازی بر اساس نظرات خبرگان، برای وزن‌دهی به معیارها از تکنیک خبره‌سنجی (میانگین وزن ارائه شده توسط خبرگان پژوهش) و با توجه به شرایط مسأله از تکنیک الکتره برای اولویت‌بندی روش‌های روسازی (آلترناتیوهای تصمیم‌گیری) استفاده شده است. یافته های پژوهش نشان می دهد که ترتیب اولویت در این روسازی ها، عبارتند از آسفالت سنتی، ،آسفالت پلیمری، آسفالت ماستیکی بتن سنتی، آسفالت لاستیکی،آسفالت سبز، آسفالت متخلخل، بتن منعطف، بتن سبز، بتن اسفنجی که بر این مبنا پیشنهاد می گردد از نتایج حاصل برای انتخاب گزینه‌ی مناسب در فرودگاه های کشور استفاده شود.
واژه های کلیدی: *هوانوردی؛ سطوح پروازی؛ روسازی، تصمیم‌گیری چندشاخصه*

Identifying and prioritizing paving methods for the arodrome surfaces of Iranian airports using multi-criteria decision making (MCDM) techniques

Abstract
In this research, an attempt has been made to look at the important and influential issues from a multi-faceted perspective, while solving the existing deficiencies, to separate and select various methods of paving the flight surfaces. In order to achieve this goal, it is first tried to evaluate the effective criteria by reviewing the basics and background of the researches done in this field,and then by examining the advantages and disadvantages of these methods, the selected option is presented. this issue is of particular importance due to safety, environmental and economic benefits, the selection of a comprehensive technique with multi-criteria features for use in prioritizing the pavement method has been neglected. The findings of the research show that the order of priority in these pavements are traditional asphalt, polymer asphalt, mastic asphalt(SMA), traditional concrete, rubber asphalt, green asphalt, porous asphalt, flexible concrete, green concrete, and sponge concrete. It is suggested to use the results to choose a suitable option in the country's airports. At the end, practical and research suggestions for use in the practical and academic environment have been presented. As mentioned earlier, this research has been done for the first time in the country, and in addition to the method, it is also innovative in this respect.
Key words: *aviation, arodrome surfaces Pavement, multi-criteria decision making*

* یوسفعلی شریفی، تلفن: ۰۹۱۲۴۰۵۷۰۹۶، پست الکترونیک: almehr1234@gmail.com
این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس از آدرس https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمایید.

مقدمه

از دسامبر ۱۹۰۳ درست زمانی که دو مکانیک دوچرخه به نام‌های ارویل و ویلبر رایت جسارت انجام پرواز با هواپیمای موتوردار در باندهای شنی(تپه های شنی کیتی هاوک) را پیدا کردند تا اولین تاسیسات هوانوردی در میدان بادر در شهر آتلانتیک نیوجرسی، که در سال ۱۹۱۰ افتتاح شد و اولین باند فرود سنگفرش شده و فرودگاه مدرن جهان تا به امروز که علوم و فنون هوانوردی پیشرفتی حیرت انگیز را تجربه می کند. اهمیت پارامترهای مرتبط با ایمنی پروازها روز به روز نمایان تر و توجه به آنها جدی تر شده است [۱]. امروزه با گذشت حدود چند دهه و با افزایش تعداد هواپیماها، حجم ترافیک هوایی و بار ترافیکی در برخی مناطق چندین برابر شده است که اتخاذ استراتژی‌های مطلوب برای استفاده از این ظرفیت، با میزان کافی از زیرساخت‌ها و سطوح پروازی استاندارد همراه نمی باشد. بنابراین پیش‌بینی می شود که تاخیرهای مرتبط با هزینه چند میلیارد دلاری همچنان بر شرکت های هواپیمایی و مصرف‌کنندگان تأثیر منفی بگذارد. باندهای عملیاتی، یکی از منابع کمیاب و ابزار کلیدی محسوب می شوند که میزان قابل توجهی از ظرفیت هوانوردی را تحت شعاع قرار داده و جایی که ایمنی مهمترین دغدغه خلبانان و کنترلرها است. سلامت باند پروازی از مهمترین مواردی ست که باید به شدت مورد توجه قرار گیرد. اتخاذ تدابیر پیشگیرانه و منظم در یک فرودگاه، ایمنی را ارتقا می دهد و نیاز خلبانان را برای یک پرواز ایمن فراهم می نماید.

امروزه توجه به کیفیت زیرساخت های فرودگاهی، جزء حیاتی شبکه حمل و نقل هوایی است و به طور مستقیم به رقابت بین المللی یک کشور و جریان سرمایه گذاری خارجی کمک می کند. از پایانه‌ها، برج‌های کنترل و سطوح پروازی تا دستگاه های کمک ناوبری، سیستم‌های روشنایی و غیره، همگی به منظور یک برنامه‌ریزی منسجم، پویا و نوآورانه، استراتژی و رویکرد مثبت مدیران را توصیف خواهد کرد. چرا که برنامه های تردد و نظم پروازها را به صورت سالانه و با توجه به تاخیر، ایجاد سر و صدا و خطرات مرتبط با ایمنی بهینه می‌کند.

از طرفی بهینه سازی چند هدفه، تابعی از محدودیت ها، رویه‌های عملیاتی، ظرفیت باند و شرایط آب و هوایی در جریان امن و سریع ترافیک هوایی و محصول یک مجموعه منظم از تعامل بین افراد، هواپیماها، وسایل نقلیه و مسیرهای ایمن و پیشرفته می باشد که امروزه در سطح جهانی برای رسیدن به یک راه حل منطقی و قابل دسترس در مورد سطوح پروازی و ارتقاء آن به عنوان مسیر تردد زمینی هواپیماها اجرا شده است. از این رو در این پژوهش تلاش می شود با شناسایی انواع مختلفی از معیارها و گزینه های استاندارد در رو سازی سطوح پروازی، در نهایت با ارائه و پیاده‌سازی مدل تصمیم‌گیری چندشاخصه و انتخاب یک مورد متناسب با شرایط اقلیمی و ناوگان هوایی موجود، بسیاری از مشکلات مرتبط با ایمنی، آثار مخرب زیست محیطی و اقتصادی کاهش یابد.

ضرورت و اهمیت موضوع

با جستجو در پژوهش های متعدد هوانوردی، مقالات متنوعی یافت می شود، که هر کدام به صورت مجزا عوامل مهمی مانند، ایمنی، اقتصادی و زیست محیطی را به خود اختصاص داده اند. ولی رویکرد این مقاله از جهت اهمیت دادن همزمان به موارد موثری مانند: تاثیر جنس روسازی (بر تاخیر پروازها، افزایش حرارت محیط، کیفیت نشست و برخاست، میزان سرخوردگی هواپیما، پراکنش ریزدانه های خطرناک، کاهش نرخ سوخت، خطرات ناشی از یخ زدگی، ترمزگیری، تخریب با نشت سوخت، آستانه تحمل در مجاورت گرما و سرمای شدید، خطرات صیقلی شدن در مناطق ابتدایی باند پروازی، میزان تحمل فشار هنگام فرود هواپیما، مدیریت موثر جریان ترافیک هوایی و کاهش هیدروپلنینگ بسیار قابل تامل است.

تعاریف و پیشینه پژوهش

بر اساس مطالعات انجام شده در پژوهش های دنیا این نتیجه حاصل شد که اگرچه تنش های اعمال شده بر روسازی، توسط هواپیما بیشتراز هر وسیله‌ی نقلیه دیگر است، ولی ماهیت اصلی این روکش ها مانند جاده ها است. با این تفاوت که برخی پارامترهای مهم با تکنیک های خاص مهندسی تعیین می گردند.

در حالت کلی روسازی بزرگراه و فرودگاه شبیه یکدیگر هستند، هر دو از وسایل نقلیه لاستیکی در ابعاد و سرعت های متفاوت، بار فشاری دریافت می کنند. هر دو از موادی مانند بتن سیمانی، سنگدانه های سنگی و لایه های قیر ساخته شده اند و هر دو بر بستر طبیعی خاک قرار دارند. با این حال، تفاوت هایی

بین روسازی بزرگراه و فرودگاه وجود دارد. طوری که بارگیری فرودگاه در مقایسه با بارگیری بزرگراه بسیار زیاد است، فشار باد لاستیک هواپیما نیز بیشتر از فشار باد لاستیک در بزرگراه است، تاثیرات هواپیما هنگام فرود بسیار زیاد است، لذا برای اطمینان از طی شدن یک مسیر مستقیم با سرعت بسیار بالا در زمان فرود و برخاستن، سطوح باند باید با درصد بالایی از همواری و مقاومت ساخته شوند، لغزش هواپیما در سرعت های بسیار بالا به شدت ایمنی را به خطر می اندازد و این مساله نیاز به توجه زیادی خواهد داشت. ضخامت رویه های سطوح در فرودگاه عموماً بیشتر از بزرگراه ها هستند و به فرمولاسیون و مصالح بهتری نیاز دارند، زیرا میزان بارگیری و فشار تایر هواپیما بسیار بیشتراست.

با این حال عوامل مؤثر و مهمی در روسازی یک فرودگاه در نظر گرفته می شوند از قبیل محاسبه‌ی حجم ترافیک موجود یا به عبارتی میزان نشست و برخاست هواپیماها در یک بازه‌ی مشخص، استحکام و پایداری کافی، یا به عبارتی مقاومت های تنشی و لغزشی بالا برای تحمل وزن و جلوگیری از سرخوردن هواپیماها، تمرکز ترافیک در نواحی معین از سطوح پروازی یا سطوحی با یک روکش مصنوعی مقاوم برای باندها، تاکسی وی ها و پارکینگ که با اطمینان از عملکرد در مفید ترین زمان ممکن و با کمترین آسیب استفاده می گردد.

همچنین مشخصات خاک بستر،شرایط آب و هوایی و جوی منطقه، مقاومت در برابر نشت انواع سوخت، در نظرگرفتن اصطحکاک استاندارد و زهکشی مناسب، عدم نیاز به مراقبت و نگهداری زیاد، طول عمر، هزینه‌ی تولید مواد و احداث، میزان فراوانی مصالح و تجهیزات مورد نیاز[۲-۳-۴] .

در ادامه به مروری بر پژوهش‌های مرتبط داخلی و خارجی پرداخته می‌شود.

پیشینه‌ی پژوهش

با توجه به اهمیت موضوعات مرتبط با سطوح پروازی و ابعاد وابسته به آن، در حوزه‌ی هوانوردی مطالعات متعددی در ایران انجام شده است. ولیکن در این خصوص پژوهش‌های اندکی به ثبت رسیده است.

بر اساس پژوهش های به عمل آمده در حوزه‌ی مهندسی عمران(راه سازی)، همچنین یافتن مواد و روش های متنوع و کارآمد در سطوح جاده ای، اهمیت بررسی، اولویت بندی و انتخاب بهترین گزینه های موجود و امکان استفاده‌ی مفید از آنها در سطوح مختلف پروازی جهت بالا بردن بهره وری و تامین منافع ایمنی، زیست محیطی و اقتصادی، به صورت خاص، پژوهشی انجام و یا گزارش نشده است. لذا در این بخش جهت بررسی و پی بردن به میزان اهمیت مطالب مطرح شده به معرفی عناوین و تعداد محدودی از مقالات و پژوهش های مرتبط در داخل کشور پرداخته شده است.

افسردلیرو قربانی (۱۳۹۸)[۵] در یک مطالعه موردی تحت پژوهشی با عنوان مدیریت تعمیر و نگهداری سطوح پروازی مطالعه موردی فرودگاه بین المللی حضرت امام خمینی (ره) به این نتیجه رسیدند که حمل ونقل و جابه جایی کالا و مسافر در هر کشور، یکی از اجزای کلیدی توسعه اقتصادی-اجتماعی آن به شمار می رود و بخش عمده ای از بودجه‌ی ملی را به خود اختصاص می دهد. با توجه به سرعت بالای حمل ونقل هوایی در جابه جایی کالا و مسافر و تاثیر آن بر توسعه اقتصادی، در برنامه ریزی حمل ونقل کشور بسیار مورد توجه بوده و همواره از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. پروژه های ساخت به ویژه فرودگاه امام خمینی به دلیل اهمیت زیاد در عمران و آبادی همواره مورد توجه مدیران بوده است. متاسفانه عدم توجه به موضوع نگهداری و تعمیرات، مشکلات زیادی در اینگونه از پروژه ها بوجود آمده است. این پژوهش در پی آن است عوامل مهم در نگهداری و تعمیرات این پروژه را شناسایی و اولویت بندی کند که در این راستا از روش تحلیل کیفی و کمی سلسله مراتبی AHP استفاده کرده است. از نتایج این پژوهش میتوان به تعداد پروازها، اجرای عملیات لاستیک زدایی، نوع هواپیما، باند جایگزین و وجود تاریخچه تعمیرات اشاره کرد.

طاهرخانی (۱۳۹۸)[۶] در مورد بررسی تاثیر هواپیماهای سنگین بر روی ترک های انعکاسی روسازی مرکب فرودگاه ها با استفاده از روش المان محدود تعمیم یافته در این پژوهش می نویسد که تاثیر مشخصات بارهای دو نوع از هواپیماهای سنگین مسافری بر روی پتانسیل رشد ترک انعکاسی در روسازی مرکب فرودگاه ها مورد مطالعه قرار گرفته است. دو نوع هواپیما شامل بوئینگ ۷۴۷ و ایرباسA380 ، که از سنگین ترین هواپیماهای مسافربری موجود هستند مورد استفاده قرار گرفته اند. محورهای این هواپیماها در موقعیت های مختلفی از محل درز طولی و ترک موجود در لایه آسفالتی قرار گرفته اند و ضرایب شدت تنش ها و کرنش کششی در نوک ترک موجود در لایه آسفالتی محاسبه شده و مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته اند. تحلیل ها با مدلسازی المان محدود سه بعدی تعمیم یافته درنرم افزار آباکوس انجام گردید. لایه آسفالتی به صورت ویسکوالاستیک خطی در نظر گرفته شده و سایر لایه ها و بستر، الاستیک خطی در نظر گرفته شده اند. نتایج نشان می دهند که مقدار ضریب شدت تنش بحرانی مود (۱) هواپیمای بوئینگ از هواپیمای ایرباس بزرگتر است و مقادیر ضریب شدت تنش بحرانی مود (۲) و (۳) هواپیمای ایرباس از هواپیمای بوئینگ بزرگتر هستند. همچنین نتایج بیانگر این است که با حرکت محورها در راستای طولی ترک مقدار کرنش کششی بحرانی روند کاهشی داشته و مقدار آن نسبت به بارگذاری در مرکز به ترتیب در هواپیمای ایرباس تا ۴۲/۸۷ درصد و در هواپیمای بوئینگ تا ۲۳/۸۹ درصد کاهش می یابد. با حرکت محورها در راستای عرضی ترک مقدار کرنش کششی بحرانی روند افزایشی داشته که به ترتیب در هواپیما ایرباس تا ۲۶/۷۳ درصد و در هواپیمای بوئینگ تا ۱۷/۹۳ درصد افزایش می یابد.

راشدی و همکاران(۱۳۹۶)[۷] در خصوص بررسی عددی بهسازی و کاهش ترک های روسازی باند فرودگاه با استفاده از ژئوگرید منتشر شده در پنجمین کنگره بین المللی عمران ، معماری و توسعه شهری،مقاله ای ارائه دادند که بر اساس آن نتایج زیر حاصل گردید، که در روسازی انعطاف پذیر باند فرودگاه ها تحت تنش های پیوسته ناشی از بار دینامیکی مکرر هواپیما و شرایط محیطی و آب و هوایی قرار دارند که باعث خستگی و اعوجاج روسازی راه می شود. استفاده از ژیوگریدها باعث بهبود عملکرد، افزایش ظرفیت باربری، کاهش ترک و آسیب در لایه های مختلف روسازی باند فرودگاه می شود. در این پژوهش به بررسی رفتار روسازی انعطاف پذیر قبل و بعد از مسلح شدن با ژئوگرید در دو حالت، یکی هنگام فرود هواپیما و دیگری بعد از نشستن هواپیما پرداخته شده است. برای این کار با استفاده از نرم افزار ABAQUS مدل سه بعدی از روسازی باند فرودگاه انجام شده است و حداکثر کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و حداکثر کرنش فشاری روی بستر قبل و بعد از مسلح شدن با ژئوگرید مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج به دست آمده با قرار گرفتن ژئوگرید در وسط لایه اساس دیده می شود که هم کرنش کششی زیر لایه آسفالتی و هم کرنش فشاری روی بستر کاهش پیدا می کند ولی این میزان کاهش، هنگام فرود که بار ضربه ای ناشی از وزن هواپیما به مراتب بیشتر از هنگام خزش است که فقط وزن در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار تغییر مکان ها در لایه روسازی نیز بعد گذاشتن ژئوگرید کاهش پیدا می کند، با این تفاوت که این میزان کاهش، هنگام فرود هواپیما بیشتر است. این نتایج نشان می دهند که وجود ژئوگرید باعث کاهش کرنش و تغییر مکان در لایه های روسازی، مخصوصا در هنگام فرود هواپیما می شود که این باعث کاهش ترک و افزایش عمر روسازی باند فرودگاه می شود.

علیرغم پژوهش های محدود داخلی، پژوهش‌های متنوعی در حوزه هوانوردی و موارد مرتبط در پیشینه‌های خارجی موجود است. تاکنون بالغ بر۳۱۰۰۰ مقاله با سرچ کلید واژه‌ی Runway pavement construction در دیتابیس‌های علمی گوگل اسکالر حاصل شد. اگر سایر ابعاد و جنبه‌های مختلف با سرچ و کلیدواژه‌های دقیق‌تری را نیز درنظر بگیریم، به نظر می‌رسد حجم بسیار انبوهی از مقالات و پژوهش‌ها با عناوین

متنوع حاصل خواهند شد، که طبیعتا فرصت بررسی آن را نه تنها در این پژوهش، بلکه در هیچ پژوهش ممکن نیست. لذا در ادامه صرفاً به ذکر تعداد اندکی از مرتبط‌ترین پژوهش‌های انجام شده در حوزه این مقاله پرداخته خواهد شد.

سامی علی (۲۰۲۲) [۸] در مقاله ای تحت عنوان ارزیابی عملکرد روسازی باند انعطاف پذیر بهبود یافته تحت بار هواپیما به این نتایج دست یافتند که وجود یک باند ایمن برای فرود هواپیما ضروری است. به دلیل جابجایی هواپیماها، این مناطق حساس تحت بارهای دینامیکی زیادی قرار می گیرند که می تواند باعث آسیب و به خطر افتادن ایمنی شود. این مقاله استفاده از لایه‌های مبتنی بر سیمان بهبود یافته را برای افزایش عملکرد روسازی‌های باندهای انعطاف‌پذیر پیشنهاد می‌کند. عملکرد چنین روسازی های مقاوم سازی شده تحت بارهای استاتیک و متحرک با مطالعه تجربی و شبیه سازی های عددی سه بعدی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که لایه‌های مبتنی بر سیمان بهبود یافته می‌توانند به طور قابل‌توجهی آسیب های تنشی سطح باند فرودگاه را تحت بارهای استاتیکی و متحرک سنگین کاهش دهند و از آنجا که تحت تاثیر بارهای سنگین، لایه‌های مبتنی بر سیمان پیشنهادی می‌توانند تنش‌های عمودی را در منطقه اطراف خاک توزیع کنند، تغییر شکل‌های سطح را به میزان قابل توجهی کاهش داده و از شکست جلوگیری کنند. یافته های این پژوهش به طراحی بهبود یافته روسازی های باند که منجر به افزایش ایمنی و کاهش شکست می شود کمک می کند.

لئو چائوجیا (۲۰۲۲) [۹] در پژوهشی با عنوان بررسی عددی ویژگی‌های پارامتر حرارتی لایه چسبنده مورد استفاده برای باند فرودگاه منطقه همیشه منجمد شمال شرق چین به نتایج قابل توجهی دست یافتند که پارامترهای حرارتی یک لایه چسبنده‌ی خاص برای توزیع دمای محیط و پایداری فونداسیون باند در مناطق دائما منجمد اهمیت زیادی دارد. این مقاله اثرات اختلاف سالانه دما، دمای میانگین سالانه و سایر عوامل را بر روی ضخامت این لایه چسبنده با دامنه دما و دمای میانگین سالانه زمین و موارد دیگر بررسی می‌کند. پارامترهای حرارتی این لایه چسبنده را با استفاده از میدان دمای بستر و داده‌های تجربی تجزیه و تحلیل شد و نتایج حاکی از آن است که اثرات اختلاف سالانه دما و میانگین تابش ماهانه کل خورشیدی جدی ترین تاثیرات را بر روی این لایه خواهند داشت.

روش عددی برای تعیین پارامترهای لایه چسبنده بر اساس شرایط مختلف با رگرسیون چندگانه ایجاد شد. میدان‌های دمایی سه نوع بستر به‌دست‌آمده با استفاده از میدان دمای بستر و داده‌های تجربی با نتایج محاسبات عددی برای راستی‌آزمایی مقایسه شد و نتایج با همخوانی نزدیکی داشتند، که نشان می‌دهد روش پیشنهادی برای محاسبه پارامترهای لایه چسبنده معقول است. و به طور موثری نتایج پژوهش، حوزه کاربرد تئوری لایه چسبنده را گسترش می‌دهد و مرجعی برای مطالعه ساخت باند فرودگاه در منطقه همیشه منجمد شمال شرقی چین فراهم می‌کند.

شرف الخدر (۲۰۲۱) [۱۰] در پژوهشی با محتوای معیارهای ارزیابی پایدار برای انتخاب مصالح باند فرودگاه با یک رویکرد سلسله مراتبی تحلیلی فازی به نتایج قابل توجهی دست پیدا کردند که که روسازی فرودگاه بسیار متفاوت تر از دیگر زیرساخت های حمل و نقل است. چرا که به واسطه‌ی حیاتی بودن شدیدا بر محیط زیست و اقتصاد تأثیر می گذارد. بنابراین، انتخاب مطمئن در مصالح ساختمانی گام بسیار مهمی است. هدف اصلی این مقاله توسعه مجموعه‌ای از معیارهای ارزیابی پایدار برای کمک به اعضای تیم طراحی در انتخاب بین دو ماده ی مختلف هنگام ساخت یک باند جدید در فرودگاه بین‌المللی کویت با مصالح پیشنهادی آسفالت و بتن بود و بر این اساس مجموعه ای از ۲۴ زیرمعیار ایجاد شد و سه معیار اصلی پدید آمد: فنی، زیست محیطی و اجتماعی، اقتصادی.

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی برای تعیین وزن و اندازه‌گیری اهمیت نسبی این معیارها و انتخاب جایگزین‌های مواد به کار گرفته شد. فرآیند اولویت بندی معیارها بر اساس نظرسنجی از ۱۰۰ پاسخ بود.

روش پژوهش

با توجه به اینکه این پژوهش در جستجوی بررسی و شناسایی معیارهای تاثیرگذار (جدول۱) و اولویت‌بندی و انتخاب بهترین روش موجود برای رویه در سطوح پروازی بر اساس خواص انحصاری آنها است، ابتدا به شناخت انواع آسیب های محیطی و فشارهای ناشی از وزن هواپیماها و غیره بر سطوح پروازی پرداخته خواهد شد (طبق تعاریف جدول۱۲) و سپس با مطالعه در اسناد رسمی و معتبر ایکائو و اخذ نظرات خبرگان حوزه‌ی عمران و هوانوردی، به گزینه ای برتر بر اساس تعاریف (جداول۱۱و۱۳) برای رفع عیوب روسازی و بکارگیری بهینه‌ی این روکش ها بر اساس نیاز یک سطح فرودگاهی وکاربری خاص با اولویت ایمنی، زیست محیطی و اقتصادی پرداخته می شود.

بنابراین از آنجا که نتایج حاصل از پژوهش برای حل مسئله اولویت‌بندی بهترین گزینه برای رویه در سطوح پروازی، قابل اجرا بوده و به متولیان حوزه‌ی هوانوردی در تصمیم‌گیری اثربخش جهت بالا بردن کاربری و عواید قابل تامل در باندهای فرود هواپیما، تاکسی وی ها و مناطق حساس فرودگاهی کمک شایانی می‌نماید، از این پژوهش میتوان به لحاظ کاربردی در تمامی فرودگاه های کشور استفاده نمود .

پژوهش حاضر از نقطه نظر شیوه اجرا، یک پژوهش میدانی است و با توجه به اینکه تحلیل داده‌های پژوهش با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری‌چند معیاره (روش وزن دهی از طریق خبره سنجی (ELECTRE) انجام می‌گردد و متغیرها مشاهده، اندازه‌گیری، توصیف و مقایسه می‌شوند لذا روش پژوهش از حیث روش اجرا، توصیفی- تحلیلی است.

جدول۱- معیارهای موثر در تعیین و اولویت بندی گزینه ها

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
هزینه‌ی تولید	طول عمر	میزان نیاز به تعمیر و	آسیب زیست محیطی	مقاومت فشاری	انعطاف	فراوانی مصالح	میزان تجربه در ساخت	میزان فراوانی تجهیزات	بازیافت مصالح	مقاومت حرارتی	بازسازی سریع	مقاومت لغزشی

جدول۲- گزینه های مورد نظر پژوهش

گزینه‌ی ۱	گزینه‌ی ۲	گزینه‌ی ۳	گزینه‌ی ۴	گزینه‌ی ۵
آسفالت سنتی (Traditional asphalt)	آسفالت متخلخل (Porous asphalt)	آسفالت لاستیکی (Rubber asphalt)	آسفالت ماستیکی (Mastic asphalt-SMA)	آسفالت سبز (Green asphalt)
گزینه‌ی ۶	گزینه‌ی ۷	گزینه‌ی ۸	گزینه‌ی ۹	گزینه‌ی ۱۰
آسفالت پلیمری (Polymer asphalt)	بتن سنتی (Concrete)	بتن اسفنجی (Porous concrete)	بتن منعطف (Flexible concrete-ECC)	بتن سبز (Economic concrete)

روش گردآوری داده ها

در تحقیق حاضر از دو شیوه کتابخانه‌ای و میدانی برای گردآوری اطلاعات استفاده شده است. جهت گردآوری اطلاعات در این پژوهش ابتدا، از روش اسنادی استفاده شده است. به منظور بررسی و کسب اطلاعات هر چه بیشتر جهت شناخت دقیق‌تر موضوع مورد پژوهش و استفاده از یافته‌های تحقیقات انجام شده در این زمینه، به بررسی و مطالعه مستندات ایکائو، FAA، مهندسی عمران و مقالات منتشر شده خارجی و ایرانی، نشریات فارسی و انگلیسی پرداخته شده است. سپس، برای جمع آوری داده‌های پژوهش از پرسشنامه ای استفاده شده است.

روش و ابزار تحلیل داده‌ها

پس از گردآوری داده‌ها برای تعیین اولویت گزینه ها و تعیین وزن معیارها از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شد.. برای تعیین وزن معیارهای گزینش شده از بین معیارهای شناسایی شده در پیشینه پژوهش از تکنیک های دانش کارشناسان خبره استفاده می‌شود. همچنین با توجه به ماهیت غیرجبرانی معیارها، برای اولویت‌بندی گزینه‌ها (انواع روسازی مورد مطالعه) از نرم افزار ELECTRE SOLVER استفاده خواهد شد. به منظور تحلیل آماری داده‌ها از نرم‌افزار EXCEL و در ادامه به تشریح تصمیم گیری چند معیاره، اجزا و فرایند آن پرداخته شده و سپس به ذکر جزئیات تکنیک ELECTRE پرداخته می‌شود.

روند دستیابی به نتایج و اولویت بندی تکنیک ها

به طور کلی از موارد بسیار پراهمیت در انتخاب یک تکنیک کارآمد، تمام عیار و ایمن برای روسازی سطوح پروازی، درنظر گرفتن نیازهای عمومی و تخصصی مجموعه ی هوانوردی آن کشور است. با نگاهی به مبانی نظری در این پژوهش و با استناد به مجموعه پژوهش های انجام شده در دنیا به وضوح می توان دریافت، عدم توجه به (نیازهای استاندارد و حذف موارد غیر ضروری) یا به عبارتی انتخاب بهینه ترین گزینه در روسازی، با توجه به نیازها و پتانسیل مجموعه‌ی هوانوردی یک کشور خطرات جبران‌ناپذیری را رقم خواهد زد.

لذا تعدادی از معیارهای گزینش یک الگوی ساختار یافته از روسازی سطوح پروازی و مبتنی بر مبانی نظری و پژوهش‌های منتخب پیشین انتخاب و ارائه شد. در انتها و پس از مشورت با تعداد۱۰ نفر از خبرگان هوانوردی و مهندسین مقاطع ارشد و دکترای عمران(راه و ترابری) فعال در حوزه‌ی زیرساخت های فرودگاه های کشور، تعداد ۱۳ معیار برتر به عنوان شاخص‌های مطلوب در اولویت‌بندی تکنیک های برتر جهت روسازی در نظر گرفته شد. با توجه به محدودیت های موجود در ادامه تصمیم بر این شد که عوامل قابل ملاحظه در مورد تعداد ۱۰ مدل از انواع روسازی پرکاربرد و منتخب (با محوریت اصلی در این پژوهش) اندازه‌گیری شود که این مهم با همکاری تعدادی از متخصصان حوزه‌ی هوانوردی فرودگاه مهرآباد تهران انجام شد و داده‌های مرتبط استخراج گردید.

مراحل روش الکتره (ELECTRE) و نتایج استخراج شده از تحلیل داده‌ها:

گام اول: ایجاد ماتریس تصمیم‌گیری

جدول۳ نشان‌دهنده ماتریس تصمیم‌گیری و وضعیت هر یک از گزینه‌های قابل ورود است. لازم به ذکر است که سه مورد از معیارها از جنس هزینه (منفی) و دیگر معیارها از جنس سود (مثبت) می‌باشند.

با توجه به تعداد معیارها و تعداد گزینه ها و مقادیر ارزیابی شده گزینه ها برای معیارهای مختلف، ماتریس تصمیم به صورت زیر تشکیل می شود.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \qquad (۱)$$

که در آن x_{ij} عملکرد گزینه i ام در رابطه با معیار j ام می باشد.

همچنین در این جدول وزن معیارها نیز قرار داده شده است.

جدول۳- ماتریس تصمیم گیری

ماتریس تصمیم	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	نوع	وزن شاخص
C1	6.35	6.3	7.5	7.75	5.5	8.8	7.3	7.5	8.35	6.3	منفی	0.072
C2	5.8	5.45	6.2	7.35	6.0	8.4	8.4	6.5	8.6	7.25	مثبت	0.105
C3	7.8	7.6	6.7	6.45	7.8	5.7	4.8	6.4	4.85	6.6	منفی	0.088
C4	7.7	6.2	6	6.4	4	6.7	6.4	6	5.6	4.8	منفی	0.052
C5	6.83	6.27	6.6	7.3	6.5	8.2	8.8	6.4	8.5	7.4	مثبت	0.076
C6	7.7	6.8	8.3	8.05	8	9.0	3.6	4.2	8.2	4.4	مثبت	0.041
C7	9	7.1	7.3	7.7	7.8	6.7	9	7.6	5.65	7.7	مثبت	0.083
C8	9.65	5.3	5.4	6.1	5.1	6.7	8.3	5.1	4.3	4.3	مثبت	0.102
C9	9.3	7.6	6.8	7.4	6.1	7.2	7.9	6.2	4.6	5.55	مثبت	0.093
C10	7.1	5.3	7	5.95	8.4	7.1	5.5	4.8	5.2	7.75	مثبت	0.051
C11	5.65	5.95	7	7.15	6.6	8.0	7.5	7.7	7.9	7.15	مثبت	0.054
C12	8.2	6.1	7.4	6.4	7.5	7.6	4.1	3.8	3.8	4	مثبت	0.097
C13	7.5	8.3	7	7.9	7.6	8.7	5.9	5.8	6.75	6	مثبت	0.085

گام دوم: نرمالسازی یا بی مقیاس کردن ماتریس

جدول۴ نشان دهنده ماتریس نرمال شده است از دیدگاه سطر $\mathbf{i}$ اُم است که در این مرحله سعی می شود معیارها با ابعاد مختلف به معیارهایی بدون بعد تبدیل شوند برای بی مقیاس کردن از رابطه (۲) استفاده می شود:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \qquad (۲)$$

جدول۴- ماتریس نرمال شده

ماتریس بی مقیاس	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
C1	0.28	0.28	0.33	0.34	0.24	0.38	0.32	0.33	0.37	0.28
C2	0.26	0.24	0.28	0.33	0.27	0.38	0.37	0.29	0.38	0.32
C3	0.38	0.37	0.32	0.31	0.38	0.28	0.23	0.31	0.29	0.32
C4	0.40	0.32	0.31	0.33	0.21	0.35	0.33	0.31	0.29	0.25
C5	0.29	0.27	0.29	0.31	0.28	0.35	0.38	0.28	0.37	0.32
C6	0.34	0.30	0.37	0.36	0.36	0.40	0.16	0.19	0.37	0.20
C7	0.37	0.29	0.30	0.32	0.33	0.28	0.37	0.32	0.23	0.32
C8	0.49	0.27	0.28	0.31	0.26	0.34	0.42	0.26	0.22	0.22
C9	0.42	0.34	0.31	0.34	0.28	0.33	0.36	0.28	0.21	0.25
C10	0.34	0.26	0.34	0.29	0.41	0.34	0.27	0.23	0.25	0.38
C11	0.25	0.26	0.31	0.32	0.29	0.36	0.33	0.34	0.35	0.32
C12	0.42	0.31	0.38	0.33	0.39	0.39	0.21	0.20	0.20	0.21
C13	0.33	0.36	0.31	0.35	0.33	0.38	0.26	0.25	0.30	0.26

گام سوم: وزن دهی به ماتریس نرمال شده

در این مرحله با توجه به ضرایب اهمیت معیارهای مختلف در تصمیم گیری، بردار ضریب اهمیت معیارها تعیین می شود وزن معیارها از طریق خبره سنجی تعیین شد.

که از ضرب اسکالر وزن معیارها در ماتریس تصمیم بی مقیاس شده به دست می آید.

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \qquad \begin{matrix} j \\ = 1,2,\dots,n; i \\ = 1,2,\dots,m \end{matrix} \qquad (۳)$$

جدول۵ نشان‌دهنده مقدارحاصلضرب اسکالر وزن معیارها در ماتریس تصمیم بی‌مقیاس‌شده برای هر یک از گزینه‌ها است.

جدول۵- ماتریس وزن دار شده

ماتریس وزن	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13
A1	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03	0.05	0.04	0.02	0.01	0.04	0.03
A2	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03	0.03
A3	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03
A4	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.03	0.03
A5	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03
A6	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03
A7	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.01	0.03	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02
A8	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02
A9	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03
A10	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

گام چهارم: تشکیل مجموعه هماهنگی

ماتریس هماهنگی یک ماتریس مربعی است که ابعاد آن تعداد گزینه ها می باشد. هر یک از درایه های این ماتریس، شاخص توافق بین دو گزینه نامیده می شود. مقدار این شاخص، از جمع وزن معیارهایی که در مجموعه موافق وجود دارند، به دست می آید. به عبارت دیگر برای محاسبه شاخص توافق (C_{ke}) باید گزینه k و گزینه e مقایسه شده و مقدار آن از جمع وزن معیارهایی که گزینه k نسبت به گزینه e ترجیح دارد، به دست می آید. به زبان ریاضی، شاخص توافق از رابطه(۴) محاسبه می شود.

$$C_{ke} = \sum_{j \epsilon S_{ke}} W_j \qquad (۴)$$

شاخص توافق، بیانگر میزان برتری گزینه k بر گزینه e بوده و مقدار آن از صفر تا یک تغییر می کند

جدول۶ نشان‌دهنده ماتریس هماهنگ است.

جدول۶- ماتریس هماهنگی یا توافق

ماتریس هماهنگی	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	-	0.65	0.66	0.50	0.54	0.50	0.62	0.70	0.58	0.50
A2	0.35	-	0.25	0.30	0.37	0.30	0.35	0.54	0.58	0.49
A3	0.34	0.75	-	0.31	0.56	0.21	0.33	0.67	0.62	0.42
A4	0.50	0.70	0.69	-	0.64	0.30	0.33	0.82	0.58	0.75
A5	0.46	0.63	0.44	0.36	-	0.26	0.40	0.56	0.64	0.68
A6	0.55	0.70	0.79	0.70	0.74	-	0.43	0.79	0.61	0.74
A7	0.46	0.65	0.67	0.73	0.60	0.57	-	0.85	0.66	0.70
A8	0.30	0.46	0.45	0.27	0.44	0.21	0.15	-	0.45	0.34
A9	0.42	0.42	0.38	0.42	0.36	0.39	0.34	0.65	-	0.55
A10	0.50	0.58	0.58	0.39	0.32	0.26	0.30	0.66	0.55	-

گام پنجم: تشکیل مجموعه ناهماهنگی

ماتریس مخالف یک ماتریس مربعی می باشد که بعد آن تعداد گزینه ها می باشد. هر یک از درایه های این ماتریس، شاخص عدم توافق (مخالفت) بین دو گزینه نامیده می شود. مقدار این شاخص از رابطه (۵) بدست می آید.

$$d_{ke} = \frac{\max_{j \epsilon D_{ke}} |v_{kj} - v_{ej}|}{\max_{j \epsilon J} |v_{kj} - v_{ej}|} \qquad (۵)$$

جدول**۷** نشان دهنده میزان عدم توافق گزینه ها را نشان می دهد.

جدول۷- ماتریس ناهماهنگی یا عدم توافق

ماتریس نا	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	-	0.18	0.21	0.40	0.43	0.82	0.62	0.25	0.48	0.29
A2	1	-	1	1	1	1	1	0.4	1	0.8
A3	1	0.7	-	1	1	1	0.9	0.0	0.6	0.2
A4	1	0.5	0.9	-	1	1	1	0.1	0.5	0.3
A5	1	0.8	0.7	0.8	-	1	0.9	0.3	0.6	0.3
A6	1	0.5	0.3	0.5	0.9	-	0.4	0.2	0.2	0.4
A7	1	0.6	1	0.9	1	1	-	0.0	0.4	0.2
A8	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1
A9	1	0.8	1	1	1	1	1	0.6	-	0.9
A10	1	1	1	1	1	1	1	0.60	1	-

گام ششم: تشکیل ماتریس بولینی هماهنگی

در مرحله ششم نحوه محاسبه شاخص توافق (C_{ke}) بیان شد، هم اکنون در این مرحله یک مقدار معین برای شاخص توافق مشخص می شود که آن را آستانه موافقت می نامند و با $\bar{C}$ نشان داده می شود. آستانه موافقت از میانگین گیری شاخص های توافق (درایه های ماتریس توافق) به دست می آید. به زبان ریاضی مقدار آستانه موافقت از رابطه(۶) محاسبه می شود.

$$\bar{c} = \sum_{k=1}^{m}\sum_{e=1}^{m}\frac{C_{ke}}{m(m-1)} \qquad (۶)$$

ماتریس چیرگی موافق (F) با توجه به مقدار آستانه موافقت تشکیل می‌شود. اگر C_{ke} بزرگتر از $\bar{C}$ باشد، برتری گزینه k بر گزینه e قابل قبول است در غیر اینصورت گزینه k بر گزینه e برتری ندارد لذا درایه‌های ماتریس چیرگی موافق از رابطه (۷) تعیین می‌شود.

$$f_{ke} = \begin{cases} 1 & c_{ke} \geq \bar{c} \\ 0 & c_{ke} \leq \bar{c} \end{cases} \qquad (۷)$$

جدول۸ نشان‌دهنده ماتریس بولینی هماهنگی یا چیرگی توافق است.

جدول۸- ماتریس بولینی هماهنگی یا چیرگی توافق

ماتریس بولینی	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	-	1	1	0	1	0	1	1	1	0
A2	0	-	0	0	0	0	0	1	1	0
A3	0	1	-	0	1	0	0	1	1	0
A4	0	1	1	-	1	0	0	1	1	1
A5	0	1	0	0	-	0	0	1	1	1
A6	1	1	1	1	1	-	0	1	1	1
A7	0	1	1	1	1	1	-	1	1	1
A8	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0
A9	0	0	0	0	0	0	0	1	-	1
A10	0	1	1	0	0	0	0	1	1	-

گام هفتم: تشکیل ماتریس بولینی ناهماهنگی

ماتریس چیرگی مخالف (G) مانند ماتریس چیرگی موافق تشکیل می شود. بدین منظور ابتدا باید مقدار آستانه مخالفت ($\bar{d}$) از میانگین گیری شاخص های مخالفت (درایه های ماتریس مخالف) محاسبه شود. به زبان ریاضی مقدار آستانه مخالفت از رابطه (۸) محاسبه می شود.

$$\bar{d} = \sum_{k=1}^{m}\sum_{e=1}^{m}\frac{d_{ke}}{m(m-1)} \qquad (۸)$$

همان گونه که در مرحله هفتم بیان شد، مقدار شاخص مخالفت (d_{ke}) هر چه کمتر باشد بهتر است. زیرا میزان مخالفت (عدم توافق) برتری گزینه k بر گزینه e را بیان می کند. چنانچه d_{ke}از ($\bar{d}$) بزرگتر باشد میزان مخالفت زیاد بوده و نمی توان از آن صرفنظر کرد بنابراین درایه های ماتریس چیرگی مخالف (G) با رابطه(۹) محاسبه می شود.

$$g_{ke} = \begin{cases} 1 & d_{ke} \le \bar{d} \\ 0 & d_{ke} \ge d \end{cases} \qquad (۹)$$

هر عضو ماتریس G نیز نشان گر رابطه چیرگی مابین گزینه ها می باشد. جدول۹ نشان‌دهنده ماتریس بولینی ناهماهنگی است.

جدول۹- ماتریس بولینی ناهماهنگی یا چیرگی مخالف

ماتریس بولینی ناهماهنگی	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	-	1	1	1	1	0	1	1	1	1
A2	0	-	0	0	0	0	0	1	0	0
A3	0	1	-	0	0	0	0	1	1	1
A4	0	1	0	-	0	0	0	1	1	1
A5	0	0	1	0	-	0	0	1	1	1
A6	0	1	1	1	0	-	1	1	1	1
A7	0	1	0	0	0	0	-	1	1	1
A8	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0
A9	0	0	0	0	0	0	0	1	-	0
A10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-

گام هشتم: تشکیل ماتریس چیرگی نهایی

ماتریس چیرگی نهایی از ضرب تک تک درایه های ماتریس چیرگی موافق (F) در ماتریس چیرگی مخالف (G) حاصل می شود.

$$h_{ke} = f_{ke} \cdot g_{ke} \qquad (۱۰)$$

جدول۱۰- ماتریس چیرگی نهایی

ماتریس چیرگی	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	-	1	1	0	1	0	1	1	1	0
A2	0	-	0	0	0	0	0	1	0	0
A3	0	1	-	0	0	0	0	1	1	0
A4	0	1	0	-	0	0	0	1	1	1
A5	0	0	0	0	-	0	0	1	1	1
A6	0	1	1	1	0	-	0	1	1	1
A7	0	1	0	0	0	0	-	1	1	1
A8	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0
A9	0	0	0	0	0	0	0	1	-	0
A10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	-

گام آخر: محاسبه تعداد چیرگی

ماتریس چیرگی نهایی (H) ترجیحات جزئی گزینه ها را بیان می کند. به طور مثال، اگر مقدار hke برابر یک باشد بدین معناست که برتری گزینه k بر گزینه e در هر دوحالت موافق و مخالف قابل قبول است (یعنی برتری آن از حد آستانه موافقت بیشتر بوده و مخالفت و یا ضعف آن نیز از حد آستانه مخالفت کمتر است) ولیکن هنوز گزینه k شانس مسلط شدن توسط گزینه های دیگر را

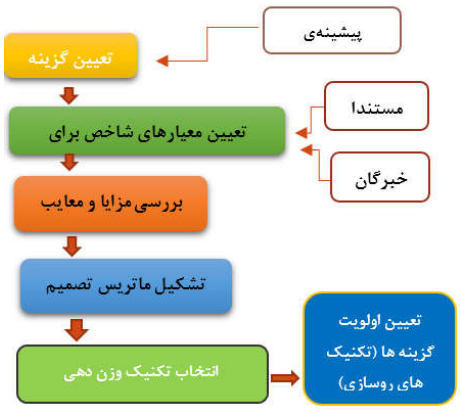
دارد. گزینه ای باید انتخاب شود که بیشتر از آن مغلوب شود، چیرگی داشته باشد و از این نظر می توان گزینه ها را رتبه بندی کرد.جدول۱۱ نشان‌دهنده تعداد چیرگی هر گزینه و اولویت بندی روسازی های مورد مطالعه وانتخاب گزینه‌ی برتر است.

جدول۱۱- چیرگی نهایی و اولویت بندی گزینه ها

تعداد چیرگی	گزینه ها	اولویت ها
۶	گزینه۱	اولویت ۱
۶	گزینه۶	اولویت ۱
۴	گزینه۴	اولویت ۳
۴	گزینه۷	اولویت ۳
۳	گزینه۳	اولویت ۵
۳	گزینه۵	اولویت ۵
۱	گزینه۲	اولویت ۷
۱	گزینه۹	اولویت ۷
۱	گزینه۱۰	اولویت ۷
۰	گزینه۸	اولویت ۱۰

نمودار مقایسه‌ی گزینه های بدست آمده بر اساس اوزان دستی توسط نرم افزارالکتره در شکل۱ آورده شده است.

شکل۱- نمودار مقایسه ی گزینه ها



شکل۲- مراحل انجام پژوهش و اولویت گزینه‌ی منتخب

جدول۱۲- تعریف معیارها

معیارها	مفاهیم
آسیب زیست محیطی	شامل هرگونه آسیب هنگام تهیه و تولید مصالح سنگدانه ای، مراحل ساخت و بهره برداری اعم از مصرف سوخت های فسیلی، تجهیزات و ادوات مستهلک همچنین اثرات گرمایشی مواد روسازی بعد از ساخت
بازیافت مصالح	شامل دارا بودن قابلیت کندن، شخم زدن، تراشیدن و خرد کردن لایه های روسازی جهت استفاده‌ی در پروسه‌ی مجدد اختلاط مواد
هزینه تولید	شامل تمامی هزینه ها در مراحل استخراج، بارگیری، حمل و اختلاط مواد روسازی
فراوانی مصالح	به عبارتی میزان دسترسی به مصالح بکار رفته در مخلوط روسازی اعم از ماسه، قیر، سیمان، مواد بازیافتی، مواد پلیمری و.....
میزان تجربه در ساخت	میزان اطلاع از دانش روز دنیا و تجربه‌ی مهندسین بومی در فرایند تولید مصالح و احداث زیر ساخت های فرودگاهی
فراوانی تجهیزات	اعم از میزان دسترسی به تجهیزات و ادوات پیشرفته‌ی روسازی
مقاومت حرارتی	مقدار مقاومت مواد روسازی در مواجهه با حرارت های بالا و عدم تغییر حالت و آسیب
انعطاف	میزان انعطاف پذیری، راحتی و نرمی فرود و حرکت بر روی سطوح پروازی
مقاومت فشاری	شامل میزان تحمل انواع فشارهای عمود بر سطح روسازی به هنگام نشست و برخاست اعم از ضربه های شدید، وزن هواپیما، بار و مسافرین
مقاومت لغزشی	مقدار اصطکاکی که سطح روسازی در شرایط مختلف آب و هوایی برای چرخ های هواپیما ایجاد و مانع سرخوردگی می شود
طول عمر	طول عمر یا دوره بهره‌برداری، مدت زمانی است که روسازی اولیه بدون نیاز به روکش با کیفیت قابل قبول دوام آورد.
میزان نیاز به تعمیر و نگهداری	شامل هرگونه اقدام پیشگیرانه قبل و حین چرخه‌ی عمر روسازی
بازسازی سریع	میزان سرعت عوامل و تجهیزات تعمیر و نگهداری در مرمت روسازی هنگام مواجه شدن با آسیب های ناگهانی و کاهش زمان بسته شدن فرودگاه

جدول۱۳- انواع روسازی مورد پژوهش

آسفالت سنتی (Traditional asphalt)	سفالت سنتی یا همان بتن آسفالتی است که در مواردی مانند روسازی جاده ها و باند فرودگاه ها و باراندازها، پایانه ها، و پارکینگ ها مورد استفاده قرار می گیرد.. فراوانی مواد اولیه، سهولت تولید، قابلیت فرم گرفتن و در نتیجه سهولت استفاده و تعمیر این ماده را به مصالح ساختمانی ایده آل تبدیل کرده است. در گروه مخلوط های آسفالت گرم، بتن آسفالتی ممتازترین، مقاوم‌ترین و بادوام‌ترین نوع آن است که از اختلاط مصالح سنگی مرغوب و شکسته با دانه‌بندی منظم و پیوسته و قیر خالص، ضمن اعمال کنترل و نظارت دقیق در کلیه مراحل تولید به دست می‌آید..
آسفالت متخلخل (Porous asphalt)	درآسفالت متخلخل قسمت اعظم ترکیبات را سنگ دانه های نسبتا درشت شکسته تشکیل می دهد که به همراه آن مقدار کمی ماسه و گرد سنگ وجود دارد. دراین نوع آسفالت مقدار کمی قیر (حدود ٪۴) برای پوشش مصالح بکار میرود و مخلوط طوری طراحی میشود که حدود ٪۲۲ فضای خالی داشته باشد و نتیجتاً فضاهای خالی این نوع آسفالت زیاد است . وقتی این نوع آسفالت در رویه راه استفاده شود، جریان آب می تواند از میان خلل و فرج آن عبور کرده و زهکش گردد
آسفالت لاستیکی (Rubber asphalt)	افزایش مقاومت در برابر شیار شدگی، افزایش مقاومت در برابر خستگی، افزایش مقاومت در برابر ترک های ناشی از انقباض، افزایش چسبندگی قیر و افزایش دوام از جمله مواردی است که با اصلاح قیر به وسیله پودر لاستیک و مواد پلیمری ازخواص این نوع آسفالت است
آسفالت ماستیکی (Mastic asphalt-SMA	ایده اصلی تولید آسفالت با استخوان بندی سنگدانه ای، بر اساس اتصال سنگدانه بر سنگدانه است. در واقع در این نوع آسفالت با تغییر در دانه بندی آسفالت، سهم بخش درشت دانه آسفالت را افزایش داده و نتیجه توانایی آسفالت در تحمل بارهای وارده به راه افزایش می یابد.
آسفالت سبز (Green asphalt)	در آسفالت سبز پیشنهادی، از زباله های پلاستیکی شهری به عنوان پلیمر اصلاح کننده قیر و آسفالت استفاده می شود که هزینه اولیه آن نسبت به پلیمرهای اصلاح کننده قیر کمتر از $\frac{1}{5}$ خواهد بود و می تواند نقش مؤثری در افزایش مقاومت آسفالت به خصوص در مناطق گرمسیر داشته باشد. در این تکنولوژی، مواد پلاستیکی با درصد مشخص به قیر و آسفالت اضافه شده و باعث افزایش مقاومت آسفالت می شوند.
آسفالت پلیمری (Polymer asphalt)	استفاده از آن سبب افزایش سختی روسازی می شود و مقاومت روسازی را در برابر ترک خوردگی افزایش می دهد. آسفالت اپوکسی مخلوطی از اپوکسی و آسفالت با ساختار متراکم است که می‌توانند جایگزین مناسبی برای پایداری در دمای بالا، چسبندگی عالی و عملکرد مکانیکی مصالح روسازی باشند.
بتن سنتی (Concrete)	بتن سنتی، نوعی از روکش است که معمولاً برای روسازی جاده‌ها، پارکینگ‌ها، فرودگاه‌ها و همچنین هسته مرکزی سدهای خاکی از آن استفاده می‌شود این ماده ی چسبنده عموما حاصل فعل و انفعال سیمان های هیدرولیکی و آب می‌باشد. بتن ممکن است از انواع مختلف سیمان و نیز پوزولان ها، سرباره کوره ها، مواد مضاف، گوگرد، مواد افزودنی بتن، پلیمر های بتن، الیاف بتن و غیره تهیه شود.
بتن اسفنجی (Porous concrete)	بتنی است که از اختلاط سنگدانه های درشت یعنی شن، آب و سیمان و مقدار کمی ماسه تولید می گردد که می توان حتی ماسه را به طور کلی حذف کرد. این نوع بتن در مقایسه

	با بتن معمولی آب نسبتاً کمتری دارد و همان گونه که بیان شد، ۱ ساعت بعد از اختلاط بتن آب آن تبخیر می شود. به طور کلی بتن اسفنجی دارای ۱۵ الی ۲۲ درصد فضای خالی می باشد که باعث می شود بتواند آب را از خود عبور دهد.
بتن منعطف (Flexible concrete-ECC)	بتن انعطاف پذیر نوعی بتن مسلح است که از بتن عادی ۴۰ درصد سبک‌تر و در برابر ترک خوردن ۵۰۰ بار مقاوم‌تر است. عملکرد این بتن جدید به دلیل وجود الیاف نازکی است که ۲ درصد حجم ملات بتن را تشکیل می‌دهد. بتن انعطاف پذیر از موادی ساخته شده که برای ایجاد حداکثر انعطاف‌پذیری طراحی شده است. بتن انعطاف پذیر که کامپوزیت سیمانی مهندسی نامیده شده، به دلیل عمر طولانی‌تر در دراز مدت از بتن معمولی ارزان‌تر است.
بتن سبز (Economic concrete)	ضایعات بتنی مانند سرباره، بتن بازیافتی، خاکستر بادی، رشته های قوطی آلومینیومی، زباله های نیروگاه، شیشه زباله، گل های قرمز، خاک رس سوخته، خاک اره، خاکستر احتراق و ماسه ریخته گری از مواد تشکیل دهنده بتن سبز هستندو این بتن علاوه بر مزایای بیشمار سازگار با محیط بوده و بسیار مقرون بصرفه است

جمع بندی و نتیجه گیری

بررسی‌های پژوهشگر در منابع و اسناد علمی معتبر در حوزه‌ی هوانوردی نشان می دهد، شناسایی و رفع اشکالات مرتبط با استفاده از متریال نامناسب در سطوح حساس فرودگاهی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

گزینش روش های موجود جهت بکارگیری در بهسازی سطوح پروازی و توجه به تمامی معیارهای پراهمیت و استاندارد در مناطق پرخطری مانند باند فرود، تاکسی وی، و رمپ های پروازی و بر اساس نیازهای یک فرودگاه خاص و ناوگان هوایی آن در شرایط اقلیمی متفاوت، علاوه بر جلوگیری و جبران ضررهای اقتصادی، ایمنی پروازها را نیز تامین خواهد کرد.

بنابراین از آنجا که تشخیص یک تکنیک خاص و محاسبه‌ی پارامترهای مثبت و منفی آن جهت حصول منافع متعدد و یک خروجی دقیق در تامین نیازهای ایمنی، زیست محیطی و اقتصادی به روش سنتی و حدس و گمان میسر نبود تصمیم بر این شد که از تکنیک‌های توسعه‌یافته در علم تصمیم‌گیری چندمعیاره و زیرشاخه تصمیم‌گیری چندشاخصه استفاده گردد. از این رو پس از تعیین شاخص های مطلوب، برای وزن‌دهی به معیارها از روش پرسشنامه ای و کارشناسان خبره استفاده شد و از آنجا که وضعیت تبادل شاخص‌ها در اولویت بندی انواع روسازی بر اساس ویژگی‌های خاص آنها یک مسئله چند معیاره غیر جبرانی است، حل این مسائل با تحلیل تخصصی پارامترهای موثر و بکارگیری دانش تصمیم‌گیری چندمعیاره قابل انجام است، بر این مبنا پس از شناسایی معیارها مبتنی بر مبانی نظری و نهایی‌سازی بر اساس نظرات خبرگان، برای وزن‌دهی به معیارها از تکنیک خبره‌سنجی (میانگین وزن ارائه شده توسط خبرگان پژوهش) و با توجه به شرایط مسأله از تکنیک الکتره[1]برای اولویت‌بندی روش‌های روسازی (آلترناتیوهای تصمیم‌گیری) استفاده شده است. یافته های پژوهش نشان می دهد که ترتیب اولویت در این روسازی ها، عبارتند از آسفالت سنتی، آسفالت پلیمری، آسفالت ماستیکی(SMA)، بتن سنتی، آسفالت لاستیکی، آسفالت سبز، آسفالت متخلخل، بتن منعطف(ECC)، بتن سبز، بتن اسفنجی که بر این مبنا پیشنهاد می گردد از نتایج حاصل برای انتخاب گزینه‌ی مناسب در فرودگاه های کشور استفاده شود.

پیشنهادات

با توجه به مجموعه مطالعات انجام شده پیشنهاد می‌گردد :

- استفاده از اولویت‌های بدست آمده به منظور بهینه‌سازی و روسازی سطوح پروازی در فرودگاه‌های کشور
- تمامی حوزه های مرتبط با هوانوردی بسته به نیاز هر فرودگاه، با عنایت به اهمیت تعیین اولویت در مدل های مختلف روسازی و به جهت لزوم اعمال پارامترها و معیارهای تاکید شده، از روش ارائه شده در این پژوهش استفاده نمایند.
- متولیان صنعت هوانوردی کشور بیش از پیش به معیارهای مرتبط با هر فرودگاه توجه نموده و در صورت عدم نیاز موجه از صرف هزینه های اضافی بپرهیزند.
- پیشنهاد می‌شود در حوزه های هوانوردی کارگروه هایی به کشف معیارهای استاندارد در هر فرودگاه بسته به ناوگان، اقلیم و موارد مهم دیگر بپردازند .
- علاوه بر اهمیت تمام پارامترهای قابل بررسی و مهم در هوانوردی میزان توجه به بکارگیری این پژوهش و بررسی انواع متریال و تکنیک های روسازی جهت کاهش خطرات و افزایش مزایای مرتبط به شدت مورد بررسی قرار گیرد.

با توجه به محدودیت‌های پژوهش حاضر پیشنهاد می‌شود که پژوهشگران آتی به مطالعات زیر بپردازند:

- تعیین، تشخیص، مقایسه و رتبه بندی معیارهای مرتبط با هر تکنیک در روسازی های متفاوت
- استفاده عملی از الگوی ارائه شده در این پژوهش و ارائه نتایج و گزارش به متولیان صنعت هوانوردی کشور
- استفاده از روش های دیگر شاخص های چند معیاره برای بدست آوردن نتایج جدید
- وزن‌دهی به شاخص‌ها و امکان‌سنجی استفاده از سایر روش‌ها مانند AHP، آنتروپی و تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه بر حسب نیاز در گزینه های خاص دیگر روسازی
- تبیین و تعریف یک الگوی استاندارد بر اساس پژوهش ها و محاسبات دقیق تر، با استفاده از تجربیات محققان و پژوهشگران مهندسی عمران و هوانوردی در داخل و خارج کشور
- انجام (بازتکرار) روند پژوهش جاری به تفکیک برای موارد خاص (ویژه فرودگاه‌ها با کاربری خاص) و متناسب با ناوگان هوایی

منابع و مراجع

[1]. T., Kingsley Troupe , J, Tejido , " The Wright Brothers' First Flight: A Fly on the Wall History Kindle Edition February 1, 2017 ," [E-book] Available: Amazon e-book.
[2]. [2]. B. Nolen, " *Airport Engineering, Design, & Construction*," faa.gov.com, para. 2, Jan. 31, 2001.
[3]. ICAO,"*Aneex14-Aerodrome*," Eighth Edition, July 2018, pp. 1-354.
[4]. ICAO,"*advisory_circular*," 10oct 2014, pp. 1-52
[5]. Afsar Delir and Ghorbani, flight surface maintenance management - a case study of Hazrat Imam Khomeini International Airport, 2018
[6]. Taherkhani and Safari, "investigating the effect of heavy aircraft on the reflective cracks of the composite pavement of airports using the generalized finite element method," 2018 (inPershian)
[7]. Rashidi, Jashanani, Turkzadeh, "Numerical investigation of improvement and reduction of airport runway pavement cracks using geogrid, 5th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development, Tehran," 2016 (inPershian)
[8]. Saima Ali, Xuemei Liu, Sabrina Fawzia & David Thambiratnam, "Performance evaluation of improved flexible runway Pavement under aircraft loads," 2022
[9]. Liu ,Chaojia and Chong, Xiaolei and Qi ,Chunxiang and Yao, Zhihua and Wei, Yazhi and Zhang, jichao and Li, Yao, Numerical Investigation of Thermal Parameter Characteristics of the Airfield Runway Adherent Layer in Northeast China Permafrost http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4021880
[10]. Akheder, S., AlKandari, D. and AlYatama, "Sustainable assessment criteria for airport runway material selection: a fuzzy analytical hierarchy approach," 2021