

تحلیل و ارزیابی طرح‌های توسعه‌ای فرودگاهی در ظرفیت جابه‌جایی

مسافر: اثر احداث باند و اپرون به روش شبیه‌سازی

(مطالعه موردی: فرودگاه امام خمینی (ره))

مقاله علمی - پژوهشی

علیرضا ماهپور*، استادیار، دانشکده عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a_mahpour@sbu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۵ - پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸

صفحه ۱۰-۱

چکیده

کارایی یک سیستم حمل‌ونقل عموماً برحسب قابلیت و توانایی آن در پردازش موثر واحد و عنصر جابه‌جا شده اندازه‌گیری می‌شود. عملکرد هر سیستم به عملکرد اجزای تشکیل‌دهنده آن بستگی دارد و ارزیابی هر یک از این اجزا برای تعیین قابلیت‌های کلی سیستم ضروری است. ارزیابی اجزا یک سیستم با تعیین و بررسی ظرفیت آن جز سنجیده می‌شود. باند و اپرون از اجزای مهم سیستم فرودگاهی هستند که تعیین ظرفیت دقیق آن‌ها مهم و قابل توجه است. در این مقاله ظرفیت باند و اپرون فرودگاه امام خمینی را در سال ۱۳۹۷ (سال پایه) محاسبه شده و برای سال طرح (افتتاح ترمینال باند دوم و ترمینال شماره ۲ فرودگاه) برای دو سناریوی با و بدون توقف شب محاسبه و ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت باند فرودگاه فقط برای فقط عملیات نشست ۳۴ هواپیما در ساعت، فقط عملیات برخاست ۴۱ هواپیما در ساعت و برای عملیات مختلط ۵۶ هواپیما در ساعت می‌باشد. ظرفیت اپرون نیز در سال پایه با سناریو توقف شب ۶۲ جایگاه و برای سناریو بدون توقف شب ۲۸ جایگاه می‌باشد که این مقادیر به ترتیب برای سال افق ۸۱ و ۵۷ جایگاه برای سناریوهای با و بدون توقف شب می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: توسعه زیرساخت، ظرفیت، باند، اپرون، فرودگاه امام‌خمینی (ره)

۱- مقدمه

تعیین نحوه‌ی عملکرد فرودگاه بررسی عملکرد اجزاء لازم و ضروری است (Gelhausen, 2011). ارزیابی اجزا یک سیستم با تعیین و بررسی ظرفیت آن جز سنجیده می‌شود. باند و اپرون از اجزای مهم سیستم فرودگاهی هستند که تعیین ظرفیت دقیق آن‌ها مهم و قابل توجه است (Janic, 2008). برنامه‌ریزی و مدیریت ظرفیت فرودگاه کاری بسیار چالش برانگیز است که نیاز به تطبیق ظرفیت (که گسترش آن نه آسان و نه ارزان) با رشد سریع تقاضا است (Tosic and Mirkovic, 2013) که هر از گاهی در ویژگی‌های خود دچار تغییر می‌شود. معمولاً سیستم باند به عنوان اصلی‌ترین پارامتر برنامه‌ریزی ظرفیت فرودگاه در نظر گرفته می‌شود (Mirković and Tošić, 2015) اما در برخی از مطالعات ظرفیت اپرون محدودکننده ظرفیت فرودگاه بوده است

سیستم‌های حمل‌ونقلی را می‌توان از جهات متعددی دسته‌بندی نمود. این سیستم‌ها بر اساس تسهیلاتی که برای اجزاء جریان فراهم می‌نمایند و اجزا به آن‌ها تکیه می‌کنند به پنج دسته‌ی ۱- جاده‌ای، ۲- ریلی، ۳- هوایی، ۴- آبی و ۵- لوله‌ای تقسیم می‌شوند. حمل‌ونقل هوایی به عنوان یک زیر سیستم مهم، دارای اجزاء مختلفی است که یکی از مهمترین این اجزا فرودگاه‌ها هستند. فرودگاه‌ها به عنوان یکی از ۴ رکن بازار حمل‌ونقل هوایی، نقشی حیاتی در توسعه اقتصادی، سیاسی و اجتماعی کشورها برعهده دارند (Horonjeff, et al., 2010). بررسی نحوه‌ی عملکرد فرودگاه‌ها و تعیین حدود مطلوب عملکرد آن‌ها برای جلب رضایت مشتریان و استفاده‌کنندگان سیستم حمل و نقل هوایی مساله‌ای مهم و غیر قابل انکار است. در این راستا و برای

محاسبه ظرفیت با استفاده از روش فضا- زمان

سطح کارایی و ظرفیت باند فرودگاه امام خمینی (ره) باید براساس آمار و اطلاعات مربوط به وضع موجود و برآوردهای صورت گرفته از تقاضای فرودگاه در سالهای دوره طرح تحلیل گردد. نتیجه به دست آمده از محاسبات، ظرفیتی است که فرودگاه بر مبنای برآوردهای صورت گرفته و برخی معیارهای حاصل از شرایط موجود، قابلیت پاسخگویی به آن را دارد. مهمترین عامل تاثیرگذار بر ظرفیت باند "فاصله بین عملیات پروازی هواپیماهای متوالی" است. این موضوع بستگی به قوانین ترافیک و ناوبری هوایی دارد که تا حدود زیادی تابع وضعیت آب و هوایی، تسهیلات ناوبری، برد، نوع و ترکیب هواپیماها می‌باشد. معیارهای تحلیل ظرفیت باند یک فرودگاه شامل موارد زیر می‌گردد.

الف- طول مسیر تقرب

طول مسیر تقرب برای فرودگاه‌های مختلف، متفاوت است و جهت تعیین آن باید به طرح تقرب باند استناد نمود. براساس طرح‌های تقرب باند فرودگاه بین المللی امام خمینی (ره)، این طول برای باند فرودگاه مورد مطالعه برابر با ۷ مایل در نظر گرفته می‌شود.

ب- انواع هواپیماها با توجه به سرعت تقرب آنها

برای تعیین انواع هواپیماها با توجه به سرعت تقرب آنها، از آمار روز اوج (به لحاظ تعداد مسافر) استفاده شده است. در این روز (۹۷/۰۱/۰۶) ۱۴۶ عملیات نشست و ۱۴۳ عملیات برخاست انجام شده است که با تقریب خوبی می‌توان گفت که ۵۰ درصد عملیات یا نشست بوده یا برخاست. ساعت اوج برای روز اوج هم ساعت ۱۶:۲۵ تا ۱۷:۲۵ است. توالی پروازها در روز اوج به عنوان توالی محتمل، در نظر گرفته شده و ملاک تعیین سرعت تقرب و در نهایت ظرفیت باند می‌باشد. جدول ۱ توالی پروازها را نشان می‌دهد. سرعت‌های تقرب هواپیماهای X و Y به ترتیب برابر ۱۴۷ و ۱۶۵ مایل بر ساعت در نظر گرفته می‌شود. تعداد ناوگان X در ساعت اوج برای پروازهای ورودی برابر ۷ و تعداد ناوگان Y برابر ۵ می‌باشد.

پ- زمان اشغال باند توسط هواپیما

این بازه زمانی از لحظه برخورد چرخ هواپیما با سطح روسازی باند شروع و تا لحظه ورود آن به اولین خزش راه و خروج از باند به طول می‌انجامد. بیان دیگر زمان اشغال باند، زمان لازم برای طی شدن طول مورد نیاز جهت کاهش سرعت هواپیما به میزانی است که قادر به گردش به داخل خزش راه مورد نظر باشد. لازم به ذکر است مسافت مذکور به عواملی همچون نوع هواپیما، طول مبنای

(Mirković, 2011) و بنابراین توسعه باند و اپرون معمولاً در طرح‌های توسعه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. لذا برای ایجاد عملکرد کارآمد و افزایش ظرفیت یک تحلیل و ارزیابی دقیقی از طرح‌های توسعه‌ای فرودگاهی در ظرفیت جابه‌جایی مسافر فرودگاه وجود داشته باشد. در مقاله پیشرو، به سبب اهمیت تحلیل و ارزیابی اثر زیرساخت‌ها در ظرفیت کل فرودگاه، با رویکرد شبیه‌سازی (e.g. Wei, and Taobo, 2010; Bazargan, et al., 2002)، ابزاری برای تحلیل دقیق ظرفیت فرودگاه ارائه شده است. ساختار مقاله به این صورت است که بخش بعد متدولوژی پژوهش و در بخش سوم ویژگی‌های مطالعه مورد ارائه می‌شود. بخش چهارم به ارائه نتایج و تحلیل داده‌ها و بخش آخر نیز به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات می‌پردازد.

۲- روش‌شناسی پژوهش

عملکرد مطلوب و کارایی یک سیستم به نحوه‌ی عملکرد اجزای تشکیل‌دهنده‌ی آن بستگی دارد (Nömmik and Antov, 2020) و ارزیابی هر یک از این اجزا برای تعیین قابلیت‌های کلی سیستم ضروری است. برای ارزیابی یک جز ظرفیت آن جز تعیین و بررسی می‌شود. باند و اپرون از اجزای مهم سیستم فرودگاهی هستند که تعیین ظرفیت دقیق آن‌ها مهم و قابل توجه است (Majid, et al., 2021). برای تعیین ظرفیت این اجزا طبق استانداردهای سازمان هواپیمایی کشوری یا سازمان هوایی فدرال روش‌هایی معرفی شده‌اند. در این مقاله برای محاسبه‌ی ظرفیت باند از روش نمودار فضا- زمان و برای محاسبه‌ی ظرفیت اپرون برای سال پایه از روش شبیه‌سازی استفاده شده است.

محاسبه ظرفیت باند

رشد بی‌نظم تقاضا برای خدمات حمل‌ونقل هوایی، قابلیت و توانایی تامین تسهیلاتی را که به‌طور مناسبی جوابگوی این رشد باشد مختل کرده است. تعیین دقیق ظرفیت فرودگاه و اجزای سیستم هوانوردی برای جوابگویی و پردازش تقاضا مهم و غیر قابل انکار است (Tee and Zhong, 2018). واژه‌ی ظرفیت به معنی قابلیت پردازش تسهیلات خدماتی در طول دوره‌های زمانی تعیین شده است. باند فرودگاه از اجزای مهم سیستم فرودگاهی است که برای تعیین ظرفیت و تحلیل آن روش‌های مختلفی مطرح شده است از آن‌جمله می‌توان به استفاده از روش تئوری صف، مدل‌های احتمالی با و بدون خطا و روش فضا- زمان اشاره کرد (Lei, et, al., 2020). در این مقاله از روش شبیه‌سازی فضا- زمان استفاده شده است (e.g. Wei, G. and Taobo, 2010; Tee and Zhong, 2018).

حضور هواپیما روی باند فرودگاه بین‌المللی امام‌خمينی (ره) به طور متوسط حدود ۶۵ ثانيه است.
ت- مقررات جدایی ترافیک هوایی: زمان‌ها و قوانین لازم برای توالی عملیات مختلف به شرح جدول ۲ در نظر گرفته می‌شود.

هواپیما، درجه حرارت و ارتفاع فرودگاه از سطح دریا، وزن هواپیما، شیب مؤثر باند، جهت و سرعت باد در زمان فرود و نوع و موقعیت خزش‌راه‌ها وابسته است (Tascón and Olariaga, 2021). مطالعات میدانی و محاسبات نشان می‌دهد که زمان

جدول ۱. ترتیب توالی هواپیماها

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
Y	Y	X	X	X	X	X	Y	X	Y	X	Y

جدول ۲. قوانین توالی عملیات (Horonjeff, et al., 2010)

قواعد جدایی ترافیک هوایی	توالی عملیاتی
	نشست - برخاست
باند پرواز آزاد	برخاست - نشست
هواپیمای در حال نشست حداقل در فاصله ۲/۵ نایکامایی از آستانه‌باند	برخاست - برخاست
فاصله زمانی ۱۲۰ ثانيه	نشست - نشست
فواصل برحسب نایکامایی از ماتریس L	

در ماتریس زیر فواصل مورد نیاز برای جداسازی ترافیک در حالت توالی عملیات نشست-نشست آمده است.

$$L = \begin{matrix} \text{پیشرو} \\ X & Y \\ \text{دنباله‌رو: ماتریس L} \\ X & \begin{pmatrix} 6 & 5 \\ 7 & 5 \end{pmatrix} \\ Y & \end{matrix}$$

۳-برآورد ظرفیت اپرون

توقفگاه هواپیما محوطه‌ای از بخش هوایی است که برای ایستادن هواپیما به منظور سوار و پیاده کردن مسافر و بارگیری و تخلیه بار و نیز برای تعمیرات و سوخت‌گیری و پارک هواپیما اختصاص دارد. توقفگاه هواپیما بسته به نوع استفاده، دارای دو عملکرد اصلی می‌باشد (Mirkovic and Tosic, 2014)؛ نگهداری و تعمیراتی. ظرفیت محوطه توقفگاه عبارت است از حداکثر تعداد هواپیماهایی که می‌توانند به وسیله‌ی تعداد ثابتی از جایگاه‌های توقف در طول فاصله زمانی مشخصی که تقاضای پیوسته‌ای برای دریافت خدمات وجود دارد، خدمت‌رسانی شوند. به منظور برآورد مناسب تعداد و مساحت توقفگاه از آمار یک هفته‌ای ورود و خروج هواپیماها (Mirkovic, et al., 2017) به محوطه‌ی اپرون فرودگاه بین‌المللی امام‌خمينی (ره) و همچنین استعمال زمان برنامه‌ای شرکت‌های هوایی استفاده می‌شود تا با استفاده از آن میانگین زمان توقف هرکدام از هواپیماهای طرح را در محوطه

توقفگاه هواپیما محوطه‌ای از بخش هوایی است که برای ایستادن هواپیما به منظور سوار و پیاده کردن مسافر و بارگیری و تخلیه بار و نیز برای تعمیرات و سوخت‌گیری و پارک هواپیما اختصاص دارد. توقفگاه هواپیما بسته به نوع استفاده، دارای دو عملکرد اصلی می‌باشد (Mirkovic and Tosic, 2014)؛ نگهداری و تعمیراتی. ظرفیت محوطه توقفگاه عبارت است از حداکثر تعداد هواپیماهایی که می‌توانند به وسیله‌ی تعداد ثابتی از جایگاه‌های توقف در طول فاصله زمانی مشخصی که تقاضای پیوسته‌ای برای دریافت خدمات وجود دارد، خدمت‌رسانی شوند. به منظور برآورد مناسب تعداد و مساحت توقفگاه از آمار یک هفته‌ای ورود و خروج هواپیماها (Mirkovic, et al., 2017) به محوطه‌ی اپرون فرودگاه بین‌المللی امام‌خمينی (ره) و همچنین استعمال زمان برنامه‌ای شرکت‌های هوایی استفاده می‌شود تا با استفاده از آن میانگین زمان توقف هرکدام از هواپیماهای طرح را در محوطه

دو عملیات نشست تکمیل گردیده است. انجام محاسبات، ملزم به رعایت دو شرط زیر است:

- هوایمای در حال ورود برای نشست، حداقل در فاصله ۲,۵ ناتیکالمایلی آستانه باند پرواز باشد.

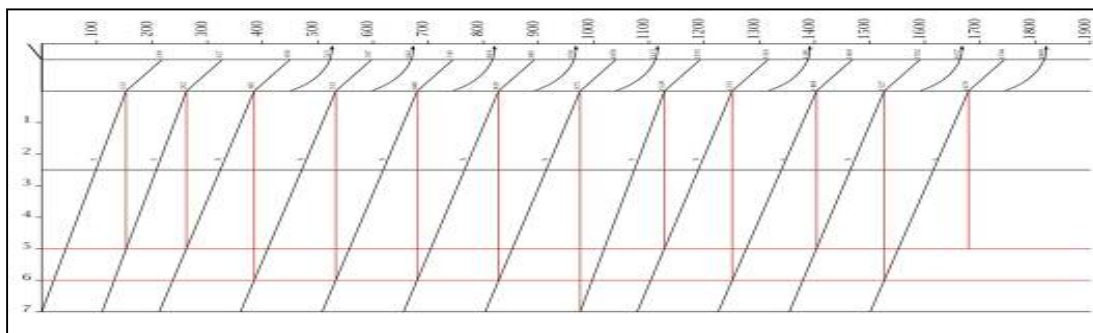
- حداقل ۱۲۰ ثانیه از زمان اجازه برخاست آخرین عملیات خروجی گذشته باشد.

در این نمودار خطوط عمودی نقاطی را نشان می‌دهند که در آنها مقررات جدایی لازم الاجرا است و شماره‌های داخل پرانتز، زمانی را نشان می‌دهند که هر هوایما در نقطه مشخص شده قرار دارد. در شرایطی که هوایمای نوع Y به دنبال هوایما نوع X حرکت کند، چون سرعت آن کمتر است، این دو هوایما در زمانی که هوایمای دنباله‌رو از فراز دروازه ورودی عبور می‌کند، نزدیک‌ترین فاصله را دارند. در صورتی که عملیات تمامی هوایماها مطابق برنامه زمان‌بندی انجام شود، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مشخص می‌شود که زمان لازم برای انجام عملیات ۱۲ هوایمای ورودی یاد شده، ۱۸۰۹ ثانیه می‌باشد. بازه زمانی لازم برای خدمت‌رسانی به این ۱۲ هوایما در آستانه باند پرواز، برابر با $1544 = 1053 - 1697$ ثانیه است.

اطلاعات پایه انجام این محاسبات حجم ساعت اوج است و ظرفیت اپرون فرودگاه باید با ظرفیت باند پرواز هم‌خوانی داشته باشد. زمان اشغال جایگاه‌ها به عواملی همچون ابعاد و اندازه هوایما و نوع عملیات آنها بستگی دارد و شامل زمان پردازش مسافر و بار، خدمت‌رسانی و آماده شدن برای پرواز می‌باشد.

۴- نتایج

ظرفیت جایگاه توقف هوایما (اپرون) و باند از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در تعیین ظرفیت فرودگاه هستند. ظرفیت فرودگاه نیز در احتمال انتخاب فرودگاه توسط مسافران تعیین‌کننده است (Cetek, et al., 2014). با توجه به اطلاعات ارائه شده و با در نظر گرفتن تقدم هوایماهای در حال نشست به هوایماهایی که قصد برخاست دارند، و با فرض توالی برخاست مشابه نشست و همچنین با در نظر گرفتن هوایمای در حال نشست در محل دروازه ورودی (در زمان صفر)، نمودار فضا زمان مطابق شکل ۱ برای خدمت‌رسانی به این هوایماها ترسیم می‌شود. لازم به ذکر است ابتدا نمودار برای عملیات نشست ترسیم شده و سپس نمودار برای تعیین امکان انجام عملیات برخاست در فواصل زمانی بین هر



شکل ۱. منحنی فضا- زمان برای باند فرودگاه امام خمینی (ره)

عملیات نشست ۰/۶۳ است. به این ترتیب، ظرفیت خدمت‌رسانی به عملیات مختلط ۴۱ هوایما در ساعت خواهد بود. این تعداد پرواز زمانی صادق است که شامل ۲۵ نشست و ۱۶ برخاست باشد و در واقع نمی‌توان سهم نشست و برخاست را مساوی در نظر گرفت. همچنین ظرفیت باند پرواز در ارایه خدمات منحصر به عملیات برخاست برابر ۳۰ هوایما در ساعت است. ظرفیت یکی باند به صورت انواع مختلف عملیات پرواز به صورت ذیل می‌باشد.

-ظرفیت باند برای عملیات مختلط: ۴۱ هوایما در ساعت

در این بازه ۱۱ جفت عملیات نشست رخ می‌دهد، بنابراین، متوسط زمان بین هر دو عملیات ورودی، برای هر عملیات نشست برابر با ۱۴۰ ثانیه است. لذا ظرفیت باند پرواز برای خدمات رسانی به عملیات نشست ۲۵ هوایما در ساعت می‌باشد. به‌طور کلی زمان خدمات‌رسانی به تمامی عملیات نشست و برخاست ۱۸۰۹ ثانیه اندازه‌گیری شده است. همچنین مشاهده می‌شود که در ۷ حالت، عملیات برخاست را می‌توان بین یک جفت عملیات نشست جای داد. بنابراین، احتمال گنجاندن یک عملیات برخاست بین ۱۱ جفت

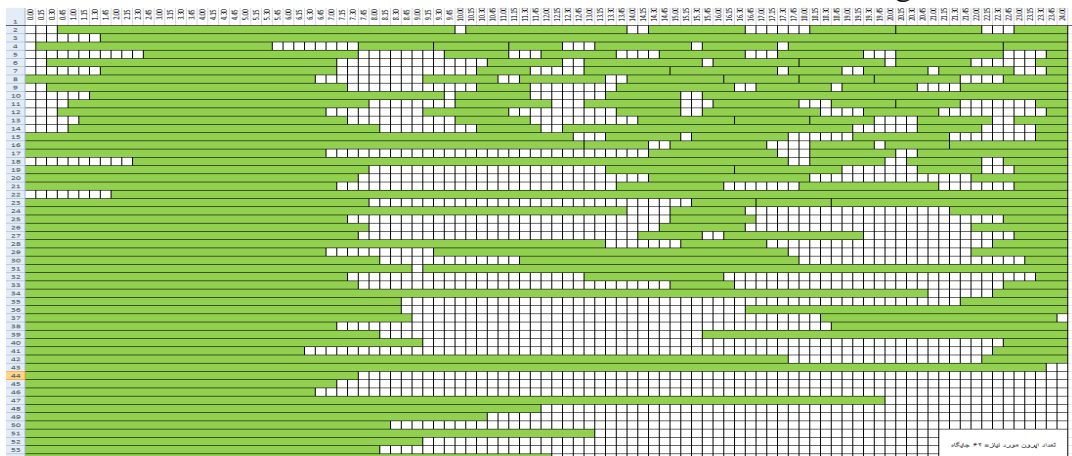
-ظرفیت باند فقط برای عملیات نشست: ۲۵ هوایما در ساعت

-ظرفیت باند فقط برای عملیات برخاست: ۳۰ هوایما در ساعت

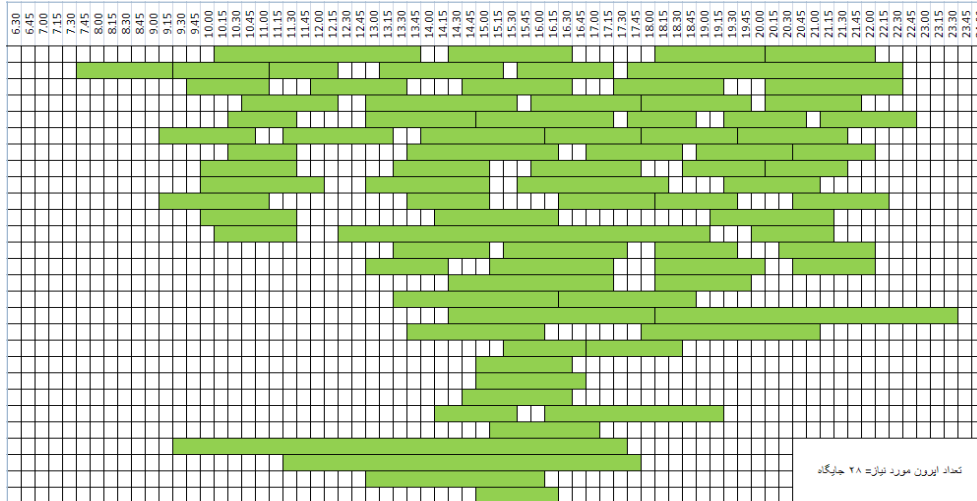
با فرض ساخت باند شماره ۲ موازی به موازات باند شماره ۱ نیاز است تا ظرفیت عملیات در ۲ باند مورد بررسی قرار گیرد. مورد

زمانی مذکور و وضعیت عملیاتی شرکت‌های هوایی در فرودگاه، نمودار زمان‌بندی ایپرون در روز طرح طراحی می‌شود. ضمناً واضح است که هیچ جایگاهی نمی‌تواند در ۱۰۰ درصد زمان‌ها اشغال باشد چرا که بین خروج و ورود هواپیماها وقفه کوتاهی ایجاد می‌شود و می‌بایست زمان حداقلی برای فاصله زمانی بین عملیات ورود و خروج هواپیماهای استفاده‌کننده از یک محل توقف مد نظر قرار گیرد. برای این منظور باید نمودار عملیات نشست و نمودار توزیع فراوانی نسبی مدت زمان توقف در ایپرون با استفاده از اطلاعات سال پایه رسم شوند. محاسبات انجام شده نشان می‌دهد که در روز مذکور در سناریو با توقف شب (هواپیماها اجازه توقف در ایپرون چه از روز قبل و چه برای روز بعد را دارند) ۶۲ جایگاه لازم است و اگر سناریو بدون توقف شب اجرا شود (بدین ترتیب که هواپیما برای توقف در شب باید ایپرون را ترک و در پارکینگ طولانی مدت شب را توقف داشته باشند) ۲۸ جایگاه لازم است. مشاهده می‌شود که در سناریو بدون توقف شب ظرفیت مورد نیاز حدود ۴۵ درصد ظرفیت با توقف شب است. شکل ۲ و ۳ نمودار اشغال ایپرون را برای دو سناریو نشان می‌دهند. برای تعیین تعداد ایپرون مورد نیاز در روز طرح سال افتتاح فاز ۲ فرودگاه امام خمینی، برنامه هفتگی پروازهای فرودگاه امام خمینی (ره) برای سال طرح بر اساس شبیه‌سازی انجام می‌شود. برای این منظور باید ابتدا نمودار عملیات نشست و نمودار توزیع فراوانی نسبی مدت زمان توقف در ایپرون با استفاده از اطلاعات سال پایه رسم شوند. اشکال ۴ و ۵ این نمودارها را نشان می‌دهد. شکل ۴ فراوانی نسبی پروازهای ورودی است که در ساعت مورد نظر یا بعد از آن رخ داده است. به طور مثال اگر از عدد ۰.۵ در محور قائم خطی افقی به نمودار رسم کنیم، حدوداً عدد ۱۴/۵ به دست می‌آید که نشان‌دهنده این است که ۵۰ درصد نشست‌ها بعد از ساعت ۱۴:۳۰ رخ داده است.

منابع نشان می‌دهد که ظرفیت دو باند موازی نسبت به حالت تک باند، ضریب افزایشی ۳۶ درصدی خواهد داشت (e.g. Xiong, et al., 2017; Sun and Liu, 2019) که در این صورت: -ظرفیت باند فقط برای عملیات نشست: ۳۴ هواپیما در ساعت -ظرفیت باند فقط برای عملیات برخاست: ۴۱ هواپیما در ساعت -ظرفیت باند برای عملیات مختلط: ۵۶ هواپیما در ساعت تاکید به این موضوع ضروری است که محاسبات انجام شده بدون در نظر گرفتن تأخیرات و با فرض برنامه‌ریزی صحیح و استفاده کامل از باند فرودگاه امام خمینی (ره) است. با توجه به محاسبات انجام شده با در نظر گرفتن عملیات مختلط برای هر دو باند ظرفیت نهایی پذیرش مسافر با در نظر گرفتن عملیات ساعت اوج برابر با ظرفیت باند و همچنین در نظر گرفتن تأخیرها در طول سال، ظرفیت سالانه مسافر داخلی مجموعه باندهای فرودگاه امام خمینی (ره) برابر ۲۱ میلیون مسافر خواهد بود. تعیین تعداد جایگاه‌های مورد نیاز با توجه به دو سناریو با توقف شب و بدون توقف شب برای دو دوره زمانی سال پایه و سال افتتاح ترمینال ۲ فرودگاه امام (ره) انجام شده است (e.g. Cai, et al., 2018). برای سال پایه از اطلاعات و آمارهای توقف در روزهای ۹۷/۰۱/۰۵، ۹۷/۰۱/۰۶ و ۹۷/۰۱/۰۷ استفاده شده است. بدین ترتیب که یک سری از هواپیماها روز ۹۷/۰۱/۰۵ به فرودگاه امام خمینی (ره) آمده و در آنجا توقف کرده‌اند که این مدت توقف تا روز ۹۷/۰۱/۰۶ به طول انجامیده است. برخی از هواپیماها هم روز ۹۷/۰۱/۰۶ آمده و بعد از توقفی در همان روز فرودگاه را ترک نموده‌اند و برخی نیز در روز ۹۷/۰۱/۰۶ آمده و تا روز بعد نیز توقف داشته‌اند. برای سال طرح (زمان افتتاح ترمینال ۲ فرودگاه امام (ره)) با بهره‌گیری از برنامه‌های پروازی شبیه‌سازی شده در زمان طرح و براساس برنامه هفتگی حال حاضر فرودگاه، محاسبات انجام شده است. یعنی ابتدا برنامه پروازی روز طرح پیش‌بینی شده و سپس براساس برنامه



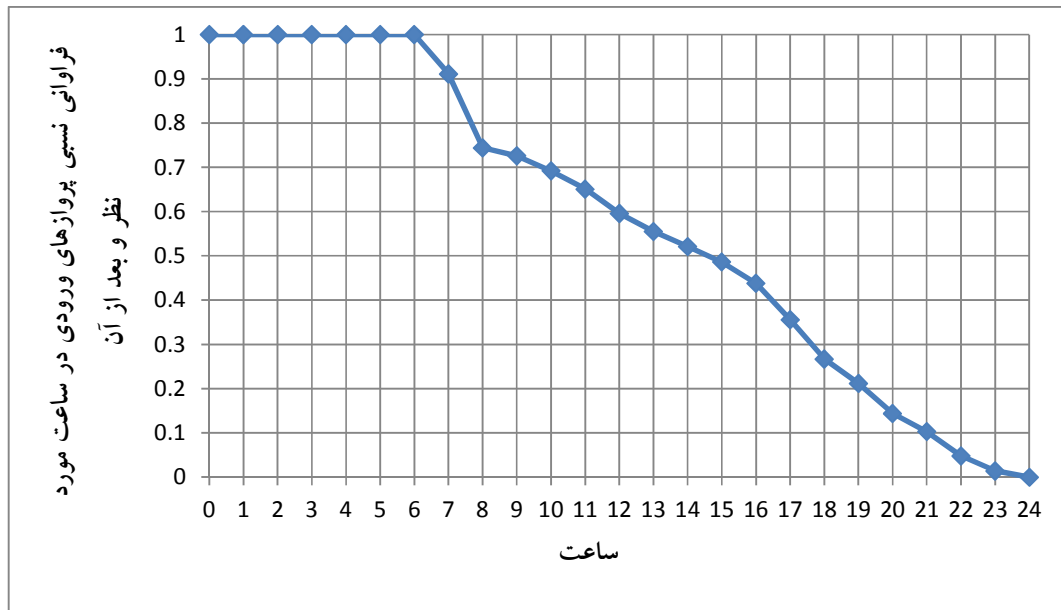
شکل ۲. نمودار اشغال جایگاه ایپرون - سال پایه (با توقف شب)



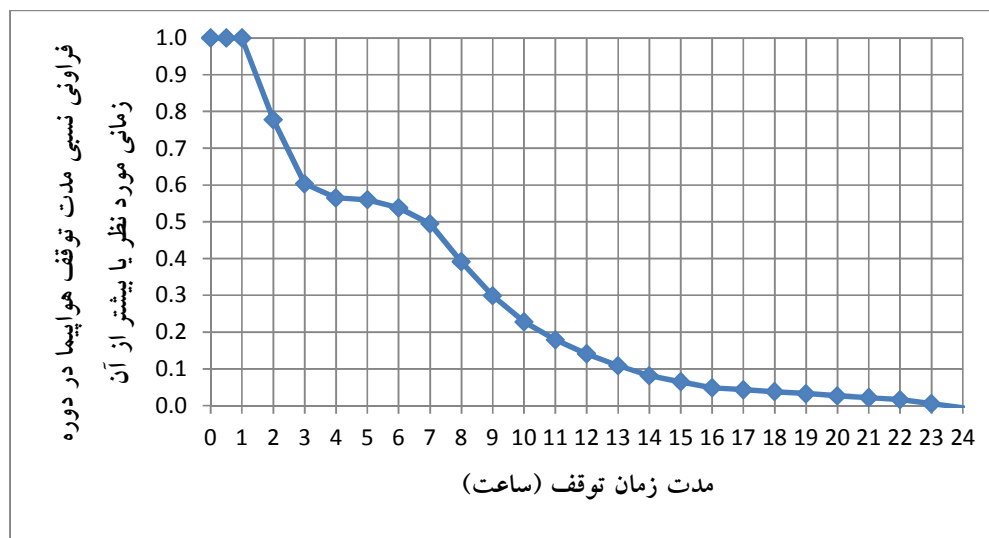
شکل ۳. نمودار اشغال جایگاه ایپرون- سال پایه (بدون توقف شب)

باید توزیع احتمالات زمان ورود هواپیما به جایگاه و زمان اشغال آن را در هر بازه زمانی بدست آورده و سپس توزیع تناوبی مذکور را برای بدست آوردن تابع توزیع احتمالی تجمعی، تلفیق و جمع بندی نمود. برای سادگی انجام این شبیه سازی، زمان های ورود را به دوره های ۱ ساعته و زمان های اشغال را به دوره های ۱۵ دقیقه ای تبدیل می شود. سپس توزیع تناوبی برنامه زمانی پروازها از طریق محاسبه تعداد پروازهای انجام شده در هر فاصله زمانی ۱ ساعته، از ساعت ۰۰:۰۰ بامداد تا ۲۳:۵۹ شب بعد به دست می آید.

شکل ۵ نیز توزیع فراوانی نسبی مدت توقف هواپیما در ایپرون را نشان می دهد. این نمودار نیز بیان کننده این است که به عنوان مثال ۵۰ درصد جایگاه های ایپرون توقیفی بیش از ۷ ساعت داشته اند که مدت توقیفی طولانی است. پیش بینی های انجام شده درباره پروازها نشان می دهد که در روز اوج سال تعداد ۲۰۴ عملیات نشست انجام خواهد شد. بنابراین، باید در این مورد شبیه سازی صورت گیرد و فرض بر این خواهد بود که برنامه زمان بندی پروازهای شبیه سازی شده از برنامه زمانی پروازهای فعلی تبعیت کند. ابتدا



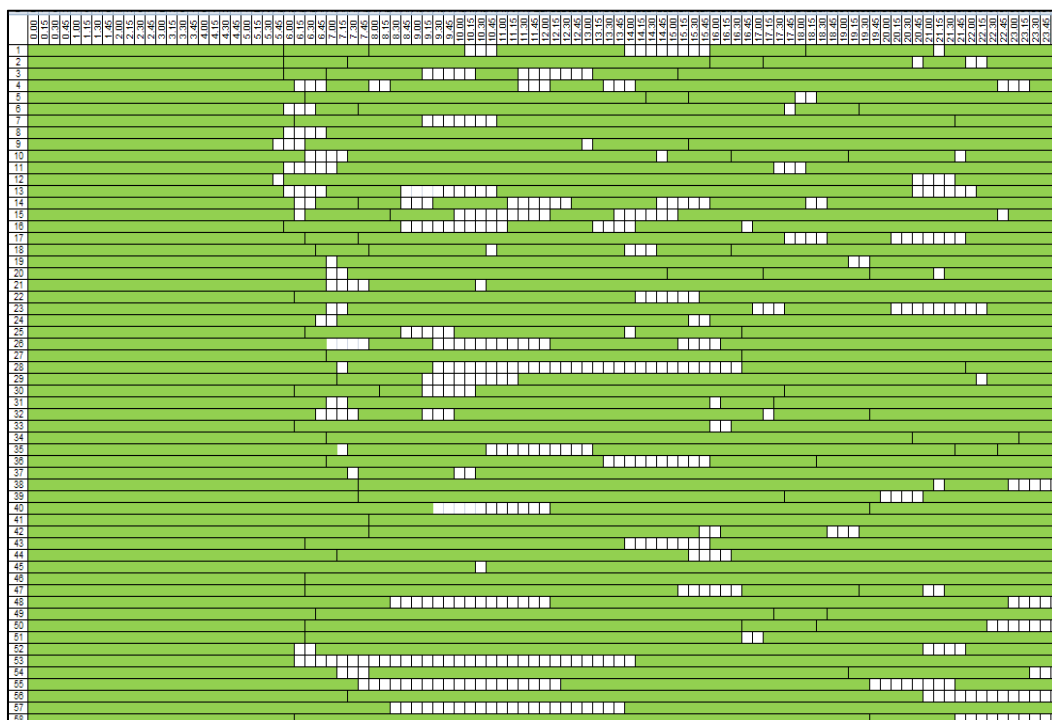
شکل ۴. نمودار فراوانی نسبی پروازهای ورودی در ساعت مورد نظر و بعد از آن



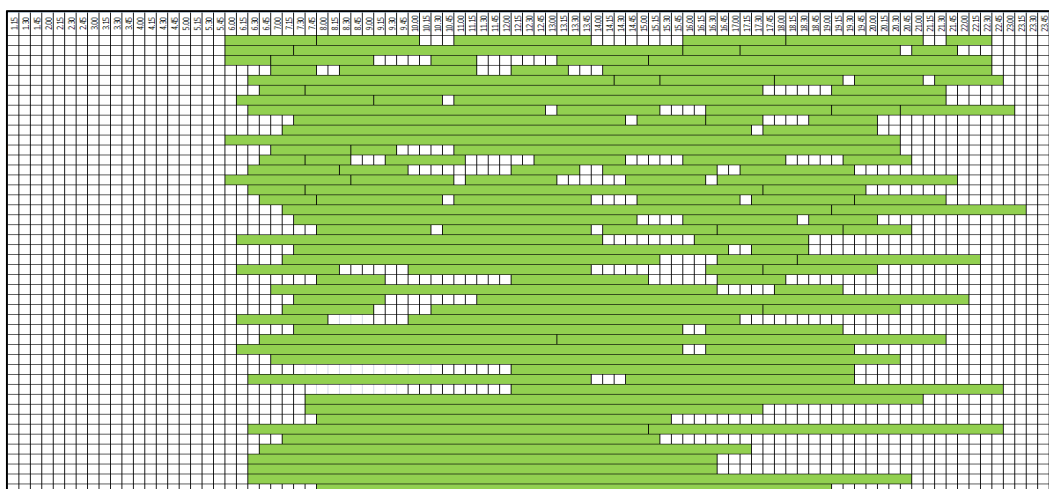
شکل ۵. نمودار توزیع فراوانی نسبی مدت توقف هواپیما در ایپرون

عملیات شبیه‌سازی شده سال طرح است. محاسبات برای دو سناریو با و بدون توقف شب انجام گردیده است. محاسبات نشان می‌دهد که در سناریو با توقف شب ۸۱ جایگاه و در سناریو بدون توقف شب ۵۷ جایگاه لازم است. اشکال ۶ و ۷ نمودار اشغال جایگاه ایپرون سال طرح برای دو سناریو را نشان می‌دهند.

برای شبیه‌سازی زمان ورود و زمان اشغال جایگاه توسط یک هواپیما، باید از جدولی از اعداد و ارقام تصادفی استفاده نمود، در این صورت دو مجموعه اعداد تصادفی به دست می‌آیند (Wei, and Taobo, 2010) که یکی نشان دهنده زمان ورود هواپیما و دیگری نشان دهنده زمان اشغال محل توقف برای هر یک از ۲۰۴



شکل ۶. نمودار اشغال جایگاه ایپرون- سال طرح (با توقف شب)



شکل ۷. نمودار اشغال جایگاه ایپرون- سال طرح (بدون توقف شب)

گرفته شود و لزوماً توسعه ایپرون‌های استاندارد معطوف به جایگاه‌های فعال نگردد. در صورتی‌که تعداد جایگاه‌های استاندارد مبنای ظرفیت سالانه ایپرون قرار گرفته و فرض شود که توقف شبانه نیز در این جایگاه‌ها صورت گیرد، تعداد جایگاه مورد نظر پاسخگوی ۱۰ میلیون مسافر سالانه خواهد بود. این موضوع با توجه به آمارهای توقف هواپیماها در فرودگاه امام خمینی (ره) به وضوح مشخص است چرا که در بسیاری از شب‌های سال توقف هواپیماها در نقاطی غیر از جایگاه‌های استاندارد انجام می‌شود.

خلاصه نتایج برآورد شده برای تعداد جایگاه مورد نیاز هواپیما در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به اینکه مبنای محاسبه روز اوج مسافری در نظر گرفته شده است، لزوماً، اعداد محاسبه شده حداکثر تعداد جایگاه مورد نیاز نمی‌باشند. اما در هر حال نتایج نشان می‌دهد نیاز به ایپرون بیشتر در فرودگاه امام خمینی (ره) وجود دارد. البته بخشی از جایگاه مورد نیاز به منظور توقف شبانه هواپیماها مورد نیاز است که با مدیریت آنها و توسعه پارکینگ‌های طولانی مدت می‌توان تا حدود زیادی از بار ترافیکی ایپرون‌ها کاست. این موضوع در طراحی جایگاه‌ها با توجه به زمین در دسترس فرودگاه امام خمینی (ره) در بخش هوایی بایستی در نظر

جدول ۴. تعداد جایگاه مورد نیاز برای سال پایه و سال طرح (سال افتتاح فاز ۲ فرودگاه امام‌خمينی)

سال پایه		سال طرح	
با توقف شب	بدون توقف شب	با توقف شب	بدون توقف شب
۶۲	۲۸	۸۱	۵۷

۵- نتیجه گیری

باند ظرفیت نهایی پذیرش مسافر با در نظر گرفتن عملیات ساعت اوج برابر با ظرفیت باند و همچنین در نظر گرفتن تأخیرها در طول سال، ظرفیت سالانه مسافر داخلی مجموعه باندهای فرودگاه امام خمینی (ره) برابر ۲۱ میلیون مسافر خواهد بود. ظرفیت ایپرون نیز در سال پایه با سناریو توقف شب ۶۲ جایگاه و برای سناریو بدون توقف شب ۲۸ جایگاه می‌باشد که این مقادیر به ترتیب برای سال افق ۸۱ و ۵۷ جایگاه برای سناریوهای با و بدون توقف شب می‌باشند در صورتی‌که تعداد جایگاه‌های استاندارد مبنای ظرفیت سالانه ایپرون قرار گرفته و فرض شود که توقف شبانه نیز در این جایگاه‌ها صورت گیرد، تعداد جایگاه مورد نظر پاسخگوی ۱۵ میلیون مسافر سالانه خواهد بود. این موضوع با توجه به آمارهای

کارایی یک سیستم حمل‌ونقل عموماً برحسب قابلیت و توانایی آن در پردازش موثر واحد و عنصر جابه‌جا شده اندازه‌گیری می‌شود. عملکرد هر سیستم به عملکرد اجزای تشکیل‌دهنده آن بستگی دارد و ارزیابی هر یک از این اجزا برای تعیین قابلیت‌های کلی سیستم ضروری است. در این مقاله ظرفیت باند و ایپرون فرودگاه امام خمینی (ره) را در سال ۱۳۹۷ (سال پایه) و سال طرح محاسبه و ارزیابی کرد. نتایج نشان می‌دهد که نتایج نشان می‌دهد که ظرفیت باند فرودگاه فقط برای فقط عملیات نشست ۳۴ هواپیما در ساعت، فقط عملیات برخاست ۴۱ هواپیما در ساعت و برای عملیات مختلط ۵۶ هواپیما در ساعت می‌باشد. با توجه به محاسبات انجام شده با در نظر گرفتن عملیات مختلط برای هر دو

بود که کمتر از میزان پیش‌بینی مسافر است ولی با توسعه پارکینگ‌های طولانی مدت می‌توان تا حدود زیادی از بار ترافیکی اپرون‌ها کاست. در این‌جا از مدیران و مسئولان فرودگاه امام خمینی (ره) تهران که با در اختیار گذاشتن اطلاعات لازم، امکان انجام این پژوهش را فراهم آوردند، صمیمانه سپاس‌گزاری می‌شود.

توقف هواپیماها در فرودگاه امام خمینی (ره) به وضوح مشخص است چرا که در بسیاری از شب‌های سال توقف هواپیماها در نقاطی غیر از جایگاه‌های استاندارد انجام می‌شود. در صورتی که تعداد جایگاه‌های استاندارد مبنای ظرفیت سالانه اپرون قرار گرفته و فرض شود که توقف شبانه نیز در این جایگاه‌ها صورت گیرد، تعداد جایگاه مورد نظر پاسخگوی ۱۰ میلیون مسافر سالانه خواهد

۶-مراجع

- Mirkovic, B. and Tomic, V., (2014), "Airport apron capacity: estimation, representation, and flexibility", *Journal of Advanced Transportation*, 48(2), pp.97-118.
- Mirković, B. and Tošić, V., 2015. Functional relationship between the runway system and apron/gate area under different demand characteristics. *Transportation Research Procedia*, 10, pp.891-899.
- Mirković, B., Tošić, V., Kanzler, P. and Höhenberger, M., (2017), "Airport apron roundabout-Operational concept and capacity evaluation", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 80, pp.439-453.
- Nõmmik, A. and Antov, D., (2020), "European Regional Airport: Factors Influencing Efficiency", *Transport and Telecommunication Journal*, 21(3), pp.211-220.
- Sun, H.Y. and Liu, Y.X., (2019), "Research on Long Parallel Runway Capacity in Different Operation Modes", *Aeronautical Computing Technique*, pp. 5.
- Tascón, D.C. and Olariaga, O.D., (2021), "Air traffic forecast and its impact on runway capacity A System Dynamics approach", *Journal of Air Transport Management*, 90, pp.1019-1046.
- Tee, Y.Y. and Zhong, Z.W., (2018), "Modelling and simulation studies of the runway capacity of Changi Airport", *The Aeronautical Journal*, 122(1253), pp.1022-1037.
- Tomic, V.S.T. and Mirkovic, B.M., (2013), "Airport apron capacity: estimation, representation, and flexibility", *Journal of Advanced Transportation*, 48, pp.97-118.
- Wei, G. and Taobo, W., (2010), "Notice of Retraction: A Simulation Study on airport capacity and the factors", In 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, Vol. 8, pp. 390-393, IEEE.
- Xiong, L.I., Chen, X.Q. and Wei, D.X., 2017. Simulation Analysis of Airport Parallel Runway Capacity under Different Operating Modes. *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*, (ese).
- Bazargan, M., Fleming, K. and Subramanian, P., (2002), "A simulation study to investigate runway capacity using TAAM, In Proceedings of the Winter Simulation Conference", Vol. 2, pp. 1235-1243.
- Cai, K., Li, W., Ju, F. and Zhu, X., (2018), "A scenario-based optimization approach to robust estimation of airport apron capacity", In 2018 Integrated Communications, Navigation, Surveillance Conference (ICNS), pp. 3A1-1. IEEE.
- Cetek, C., Cinar, E., Aybek, F. and Cavcar, A., (2014), "Capacity and delay analysis for airport manoeuvring areas using simulation", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*.
- Gelhausen M. C., (2011), "Modelling the effects of capacity constraints on air travelers", *airport choice, Journal of Air Transport Management*, 17, pp.116- 119
- Horonjeff R, Mckelevy F X, Sproule W. J. and Young S B., (2010), "Planning and design of airports", 5th edition, McGraw Hill.
- Janic M., (2008), "Modelling the capacity of closely-spaced parallel runways using innovative approach procedures *Transportation Research Part C*", 16, pp.704- 730.
- Lei, J., Chong, X., Chen, D., Chen, Z. and Chen, Q., (2020), "A review of airport runway capacity evaluation model", In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 780, No. 7, pp.7-19.
- Majid, S.A., Larasati, E.R., Rizaldy, W., Setiawan, E.B., Pahala, Y., Agusinta, L., Ricardianto, P. and Hernawan, M.A., (2021), "The Capacity of Runway of Ngurah Rai International Airport Bali Based on The Doratask Method", *Journal of Contemporary Issues in Business and Government*, 27(1), pp.2022-2039.
- Mirkovic B., (2011), "Airport Apron Capacity Estimation – Model Enhancement, *Procedia Social and Behavioral Sciences* 20, pp.1108-1117.

Analysis and Evaluation of Airport Development Plans in Airport Capacity: The Effect of Runway and Apron Construction by Simulation Method (Case Study: Imam Khomeini Airport)

*Alireza Mahpour, Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental
Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.*

E-mail: a_mahpour@sbu.ac.ir

Received: September 2021- Accepted: May 2022

ABSTRACT

The efficiency of a transportation system is generally measured in terms of its ability to efficiently process the unit and the displaced element. The performance of any system depends on the performance of its components, and an evaluation of each of these components is necessary to determine the overall capabilities of the system. The evaluation of the components of a system is measured by determining and examining its capacity. The runway and apron are important components of the airport system, the exact capacity of which is important and significant. In this article, the runway and apron capacity of Imam Khomeini Airport in 1397 (base year) has been calculated and evaluated and evaluated for the project year (opening of the second runway terminal and terminal No. 2 of the airport) for two scenarios with and without night stop. The results show that the runway capacity is only for the landing operation of 34 aircraft per hour, only the take-off operation of 41 aircraft per hour and for the combined operation of 56 aircraft per hour. The capacity of the apron is 62 places in the base year with the night stop scenario and 28 places for the non-stop night scenario, which are 81 places for the horizon year and 57 places for the night and no night scenarios, respectively.

Keywords: Development Plans, Capacity, Runway, Apron, Imam Khomeini Airport