

تحلیل تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل هوایی (مطالعه موردی: پروازهای مسافری داخل ایران)

مقاله علمی - پژوهشی

شهرام کاظم نژاد واقفی، دانشجوی دکتری، دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

منصور مومنی*، استاد، دانشکده مدیریت دانشگاه تهران، ایران

سید محمد سید حسینی، استاد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت تهران، ایران

محمد رضا معتدل، استادیار دانشکده مدیریت، دانشگاه آزاد واحد مرکزی تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mmomeni@ut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۰

صفحه ۵۱۶-۴۹۹

چکیده

حمل‌ونقل هوایی به عنوان یکی از شیوه‌های رایج حمل‌ونقل مسافر و کالا محسوب می‌شود که به دلیل ویژگی‌های مثبتی همچون سرعت بالا، ایمنی و ظرفیت زیاد همواره مورد توجه مدیران و برنامه‌ریزان کشوری بوده است. تهدیدهای مختلفی کارایی این سیستم را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از این رو، در پژوهش حاضر به بررسی تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل هوایی پرداخته می‌شود. به طور کلی تهدیدها در دو دسته حوادث طبیعی (رخداد تصادفی) و حوادث خرابکارانه (رویداد برنامه‌ریزی شده و هدفمند) تقسیم می‌شوند. در این مطالعه از داده‌های پروازهای داخلی ایران به منظور تحلیل تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل هوایی استفاده می‌گردد و با توجه به اطلاعات موجود و در دسترس، تعداد پروازهای سرویس‌داده شده به عنوان شاخص کارایی شبکه پیشنهاد و برای تحلیل تاب‌آوری آن از روش نمودار شکست آبخاری استفاده می‌شود. نتایج بیان می‌کند در بدبینانه‌ترین حالت، کارایی شبکه با حذف سه فرودگاه به زیر ۱۰ درصد می‌رسد و نمودار شکست آبخاری افت کارایی آن از یک تابع هموگرافیت (R^2 برابر با ۹۹/۴ درصد) پیروی می‌نماید. همچنین در این پژوهش، حالت ایده‌آل افت کارایی شبکه نیز بررسی می‌گردد که نتایج بیانگر آن است در این حالت نمودار افت کارایی از یک تابع نمایی (R^2 برابر با ۹۹/۸ درصد) پیروی می‌نماید که در صورت حذف ۹۰ درصد فرودگاه‌ها کارایی شبکه بالای ۵۵ درصد می‌ماند. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته مشخص می‌گردد بزرگترین مشکل شبکه هوایی ایران، تمرکز بیش از حد پروازها در چند فرودگاه خاص و پرتقاضا است که در صورت بروز مشکل برای آن‌ها تاب‌آوری شبکه به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: تاب‌آوری، شبکه حمل‌ونقل هوایی، نمودار شکست آبخاری، تاب‌آوری شبکه فرودگاهی ایران، تحلیل شبکه فرودگاهی ایران

۱- مقدمه

ایمنی بسیار زیاد، همواره جایگاه ویژه‌ای در حمل‌ونقل و جا به جایی مسافران داشته است. با توجه به اهمیت ویژه این شیوه و قابلیت‌های منحصر به فرد آن، تحلیل و بررسی رفتار شبکه حمل‌ونقل هوایی تحت اثر حوادث طبیعی و همچنین حملات

برای جا به جایی‌های برون‌شهری و برون مرزی به طور کلی سه دسته مختلف حمل‌ونقل دریایی، هوایی و زمینی وجود دارد که هر کدام از آن‌ها نقاط ضعف و قوت خود را دارند. شیوه حمل‌ونقل هوایی با توجه به ظرفیت قابل ملاحظه، سرعت بالا و

عملکرد و برآورد تاب‌آوری شبکه فرودگاهی با استفاده از اطلاعات شبکه فرودگاه‌های استرالیا، به عنوان مطالعه موردی، ارائه شده است. در این مطالعه داده‌های واقعی ترافیک هوایی برای تمام پروازهای داخلی در فضای هوایی استرالیا در سال ۲۰۱۱ برای تشکیل شبکه استفاده شده است. سپس تاب‌آوری تحت سناریوهای خرابی مختلف ارزیابی و تحلیل می‌شود. تحلیل شبکه پیچیده نشان می‌دهد که می‌توان شبکه فرودگاهی استرالیا را به عنوان یک شبکه دنیای کوچک با توزیع مقیاس-آزاد دسته‌بندی کرد و ساختار آن مقاوم در برابر خرابی‌های تصادفی فرودگاه‌ها (مانند تعطیلی‌ها) و اختلالات تصادفی مسیرهای پرواز (مانند عدم دسترسی به مسیرهای هوایی به دلیل آب و هوای بد) است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که شبکه فرودگاهی استرالیا همچنان به هم متصل می‌ماند و زمان سفر افزایش کمی داشته و دسترسی‌پذیری کاهش می‌یابد و وقتی اکثر گره‌ها (فرودگاه‌ها) یا کمان‌ها (مسیرهای هوایی) به طور تصادفی حذف یا خارج از دسترس می‌شوند. در صورتی که خرابی هدفمند (تعطیلی هدفمند یک فرودگاه منزوی) رخ دهد، شبکه فرودگاهی استرالیا حساسیت بیشتری نسبت به خرابی گره‌ها، در سایر سناریوها نشان می‌دهد [Hossain et al., 2013].

در مطالعه‌ای دیگر لوزادا و همکاران با استفاده از ساختاری پیاپی شکل روشی جهت افزایش تاب‌آوری انواع شبکه‌های حمل و نقلی ارائه نمود که برای بررسی و ارزیابی روش پیشنهادی خود از اطلاعات شبکه فرودگاهی کل دنیا استفاده نمود. نتایج بیانگر آن بود که روش پیشنهادی می‌تواند تاب‌آوری کلی شبکه را ۳۰ درصد افزایش دهد [Louzada et al., 2013]. در مطالعه‌ای دیگر یک روش جدید ابتکاری جهت تعیین فرودگاه‌های بحرانی (فرودگاه‌هایی که در صورت حذف از شبکه بیشترین آسیب را به تاب‌آوری شبکه وارد می‌نمایند) ارائه نمودند [Lordan et al., 2014]. چان و آکوگلو در پژوهش خود روشی جدید جهت بهینه‌سازی تاب‌آوری انواع شبکه‌ها با استفاده از بازسازی مجدد کمان‌ها ارائه نمودند. نتایج نشانگر آن بود که روش پیشنهادی می‌تواند تاب‌آوری انواع شبکه‌های بررسی شده را تحت اثر انواع حالت‌های خرابی افزایش دهد [Chan and Akoglu, 2016]. در مطالعه‌ای دیگر روشی جهت تحلیل و بررسی شبکه‌های حمل و نقل هوایی ارائه نمودند. آن‌ها در مطالعه خود دو مدل برنامه مختلف تجاری برای شرکت‌ها شامل ۱- حمل با هزینه کم و ۲- حمل با

خرابکارانه موضوعی بسیار مهم است که می‌تواند کمک شایانی به مدیران و برنامه‌ریزان کشوری نماید تا بتوانند نقاط حساس و آسیب‌پذیر شبکه را شناسایی نمایند و طرح‌ها و برنامه‌هایشان به نحوی باشد که تحت اثر اتفاقات مختلف، این شبکه بتواند در سطح قابل قبولی سرویس‌دهی نماید. به طور کلی حوادث در دو دسته حوادث طبیعی و حوادث خرابکارانه قرار می‌گیرند. حوادث طبیعی شامل سیل، زلزله، طوفان، بدی آب و هوا، ریزگردها و حتی شیوع بیماری‌های همه‌گیر است. ماهیت این نوع حوادث، تصادفی است و در هر لحظه و هر مکانی، امکان وقوع آن‌ها وجود دارد. حوادث خرابکارانه شامل اقداماتی هوشمند و برنامه‌ریزی شده‌ای است که هدف آن‌ها وارد نمودن حداکثر آسیب به زیرساخت‌ها است.

تاب‌آوری شبکه موضوعی است که به تحلیل و بررسی شرایط یک شبکه تحت اثر اتفاقات مختلف پرداخته و میزان افت کارایی آن را بررسی می‌نماید. هر چه افت کارایی یک شبکه تحت اثر اتفاقات مختلف، کمتر باشد، تاب‌آوری شبکه بیشتر خواهد بود. با توجه به مطالب گفته شده و اهمیت ویژه حمل‌ونقل هوایی، در این پژوهش تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل هوایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از اطلاعات پروازهای مسافری داخل ایران که از شرکت فرودگاه‌ها و ناوبری هوایی اخذ گردیده، استفاده می‌گردد. در بخش دوم مقاله به تحلیل و بررسی پژوهش‌های مرتبط پیشین پرداخته خواهد شد و پس از آن در بخش سوم روش‌شناسی پژوهش جاری ارائه خواهد شد و بعد از آن به تحلیل و بررسی شبکه فرودگاهی ایران تحت اثر اتفاقات مختلف پرداخته می‌شود و در نهایت در بخش پایانی مقاله جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و پیشنهادها آورده شده است.

۲- پیشینه تحقیق

به طور کلی برای تحلیل و بررسی شبکه‌های فرودگاهی، از نظریه گراف استفاده می‌شود. به نحوی که در این حالت فرودگاه‌ها به عنوان گره‌های گراف شناخته شده و مسیرهای پروازی موجود بین فرودگاه‌ها به عنوان کمان‌های گراف شناخته می‌شود [Hossain et al., 2013]. نوع خرابی‌های که برای یک شبکه حمل و نقلی به طور کلی می‌تواند اتفاق بیفتد در دو دسته کلی قرار می‌گیرد که شامل ۱- حوادث طبیعی و ۲- حوادث خرابکارانه می‌شوند [Hossain et al., 2013]. در مقاله‌ای دیگر، یک رویکرد شبکه پیچیده برای اندازه‌گیری

هدف بیشینه کردن تاب‌آوری و کمینه کردن تعداد کمان‌های حذف شده از شبکه ارائه نمودند [Cai et al., 2020]. فراموندی و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی عدد صحیح برای تعیین نقاط حساس یک شبکه ارائه نمودند. تابع هدف آن‌ها دارای سه بخش شامل ۱- بیشینه کردن تعداد خوشه‌های غیر متصل، ۲- کمینه‌کردن اندازه بزرگ‌ترین خوشه متصل و ۳- کمینه کردن هزینه خرابکاری بود [Faramondi et al., 2018]. در یک مطالعه دیگر با استفاده از روش شبکه وزن‌دار تاب‌آوری شبکه فرودگاهی ناحیه جنوب شرق چین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آن‌ها حاکی از آن بود که شبکه پروازهای داخلی این ناحیه نسبت به شبکه پروازهای بین‌المللی آن تاب‌آوری بیشتری دارد [Qian and Zhang, 2022]. کوملز و همکاران در مطالعه خود روشی جدید جهت تحلیل و بررسی شکست آشکاری شبکه فرودگاهی ارائه نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که قوانین انتخاب فرودگاه‌های ورودی تأثیر بسزایی در کاهش تأثیر حوادث مؤثر بر فرودگاه‌های مرکزی دارد [Cumelles et al., 2021].

در مطالعه دیگری شبکه فرودگاهی کشور چین مورد بررسی قرار گرفت. به منظور برآورده‌کردن تقاضای مسافران برای افزایش کارایی سفر، ساختار شبکه فرودگاهی چین به شکل فزاینده‌ای پیچیده‌تر خواهد شد و به مراتب محیط عملیاتی آن نیز پیچیده‌تر شده است. بنابراین، اندازه‌گیری پایداری چنین شبکه فرودگاهی تحت تأثیر عوامل مختلف بسیار سخت خواهد بود. در این مقاله، یک روش تحلیل پایداری شبکه فرودگاهی بر اساس مدل شبکه پیچیده چندلایه‌ای زمانی با معرفی ویژگی زمانی ارائه شده است. ابتدا، ویژگی‌های ساختاری شبکه مانند درجه زمانی، مرکزیت نزدیکی زمانی و مرکزیت میانگین زمانی از گره‌های شبکه فرودگاهی ایجاد شده است و برای شاخص‌های ارزیابی، کارایی زمانی شبکه و زیرگراف متصل حداکثر زمانی در نظر گرفته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که نسبت به شبکه‌های استاتیک، استفاده از مدل شبکه زمانی چندلایه می‌تواند ویژگی‌های عملکرد شبکه را با دقت بیشتری توصیف کند [Gou et al., 2023 a].

در سال‌های اخیر بیماری همه‌گیر کووید ۱۹ و پروتکل‌های بهداشتی تجویز شده جهت کنترل روند انتشار این بیماری تأثیر بسیار زیادی بر حمل و نقل هوایی داشته است. در بسیاری از موارد پروازها لغو یا با رعایت محدودیت‌هایی انجام می‌گردید. از این‌رو پژوهش‌هایی جهت بررسی تاب‌آوری شبکه حمل و

سرویس کامل ارائه و مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج بیانگر آن است که حالت LCC تاب‌آوری بیشتری نسبت به حالت FSC دارد [Lordan et al., 2016]. سوریا و همکاران با استفاده از الگوریتم فراابتکاری ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید روشی جهت انتخاب فرودگاه‌های بحرانی ارائه نمودند که با استفاده از آن فرودگاه‌های حساس و بسیار تأثیر گذار در تاب‌آوری شبکه فرودگاهی شناخته می‌شوند [Soria et al., 2017]. سان و همکاران در مطالعه خود با استفاده از سه معیار ۱- بدون وزن، ۲- وزن‌های متناسب با فاصله و ۳- وزن‌های متناسب با تعداد مسافر به بررسی تاب‌آوری شبکه فرودگاهی دنیا پرداختند [Sun et al., 2017]. دو و همکاران در مطالعه خود شبکه فرودگاهی کشور چین را با استفاده از روش تجزیه k هسته مورد تحلیل و بررسی قرار دادند آن‌ها در مطالعه خود با استفاده از روش پیشنهادی فرودگاه‌های چین را در سه لایه ۱- لایه هسته، ۲- لایه پل و ۳- لایه سایر تقسیم‌بندی نمودند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که شبکه فرودگاهی چین در صورت حذف مسیرهای پر تقاضا یا فرودگاه‌ها با درجه پایین (درجه بر اساس تعداد مسیرهای سرویس‌داده شده توسط فرودگاه تعیین می‌گردد) همچنان از تاب‌آوری قابل ملاحظه‌ای برخوردار است [Du et al., 2016]. در مطالعه‌ای دیگر تاب‌آوری مسیرهای هوایی برای سه شرکت بزرگ دنیا (Star Alliance، oneworld و SkyTeam) مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت که بر اساس آن مشخص گردید که Star Alliance تاب‌آورترین شبکه را دارد و oneworld و SkyTeam رتبه‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند [Lordan et al., 2015]. ونگ و همکاران مدلی جهت ارزیابی تاب‌آوری شبکه فرودگاهی ارائه نمودند که در مطالعه آن‌ها حالت کاهش ظرفیت فرودگاه‌ها بر اثر حوادث به جای حذف شدن کامل فرودگاه‌ها مورد بررسی قرار گرفت [Wang et al., 2019]. تحلیل و بررسی شبکه فرودگاهی حمل بار با استفاده از نظریه گراف پیچیده توسط بومبلی و همکاران مطالعه گردید. آن‌ها در پژوهش خود استراتژی‌های مختلف خرابکاری در فرودگاه‌های قطب را بررسی نمودند [Bombelli et al., 2020].

کای و همکاران در مطالعه خود به یک پارادوکس در افزایش تاب‌آوری شبکه حمل و نقل هوایی اشاره نمودند. آن‌ها در مطالعه خود نشان‌دادند که با حذف برخی کمان‌ها از شبکه می‌توان تاب‌آوری شبکه را افزایش داد. به منظور تعیین این کمان‌ها آن‌ها در مطالعه خود یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با

۳- روش شناسی

یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین بخش‌های هر مطالعه، بخش روش‌شناسی آن است که در آن روش انجام پژوهش با تمامی جزئیات به نحوی ارائه می‌گردد که محققان بعدی بتوانند پژوهش جاری را تکرار و به نتایج مشابه برسند.

در این مطالعه هدف اصلی تحلیل تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل هوایی ایران است که برای نیل به این هدف از داده‌های پروازهای داخلی ایران که از شرکت فرودگاه‌ها و ناوبری هوایی ایران دریافت شده، استفاده می‌گردد. در گام اول پس از تمیز نمودن داده‌های دریافتی و تشکیل ماتریس تقاضای سفر هوایی، تحلیل‌های آماری اولیه انجام خواهد شد و سپس گراف معادل شبکه فرودگاهی کشور ترسیم می‌گردد که در آن گره‌ها معادل با فرودگاه‌های کشور و کمان‌ها نشان‌دهنده مسیرهای هوایی موجود خواهد بود. در پژوهش حاضر تاب‌آوری شبکه فرودگاهی با استفاده از نمودار شکست مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد. کلیات این روش بدین صورت است که ابتدا یک شاخص جهت ارزیابی شبکه مورد نظر تعیین می‌گردد. سپس فرودگاه‌ها با یک ترتیب مشخص یا تصادفی از شبکه فرودگاهی کشور یکی پس از دیگری حذف شده و پس از حذف هر فرودگاه مقدار شاخص ارزیابی محاسبه خواهد شد. در نهایت یک نمودار دو بعدی ترسیم می‌گردد که محور افقی آن سهم فرودگاه‌های حذف شده از کل فرودگاه‌ها و محور عمودی آن مقدار شاخص محاسبه شده است. در ادامه این بخش هر یک از این مراحل به تفصیل توضیح داده می‌شود. یکی از مهم‌ترین عناصر در تحلیل تاب‌آوری یک شبکه، شاخص ارزیابی شبکه در حالت‌های مختلف است. برای هر یک از انواع شبکه‌های حمل‌ونقلی در ادبیات تخصصی شاخص‌های مختلفی جهت ارزیابی پیشنهاد گردیده است. در این مطالعه پیشنهاد می‌گردد از تعداد پروازهای سرویس‌دهنده شده به عنوان شاخص ارزیابی استفاده گردد. با توجه به اطلاعاتی موجود دریافت شده از شرکت فرودگاه‌ها و ناوبری هوایی ایران، این شاخص می‌تواند به نوعی بیانگر تقاضای سفر بین مبدا-مقصد‌های مختلف باشد. هر چند برای اظهار نظر دقیق در خصوص تقاضای سفر هوایی باید از اطلاعات بلیت‌های صادر شده استفاده نمود اما شایان ذکر است با توجه به محدودیت‌های موجود، چنین اطلاعاتی در اختیار نویسندگان این مقاله قرار نگرفته است. از این‌رو تعداد پروازهای اختصاص داده شده بین مبدا-مقصد‌های مختلف به عنوان شاخصی جهت برآورد تقاضای سفر مورد استفاده قرار خواهد گرفت. در گام اول که تمامی فرودگاه‌ها در شبکه موجود و مشغول سرویس‌دهی هستند، متوسط تعداد پروازهای روزانه در یک روز عادی عددی

نقل هوایی صورت گرفته است [Li et al., 2021] [Ye et al., 2020] [Janic, 2022] [Gou et al., 2021].

با رفع شدن شیوع ویروس کووید-۱۹، صنعت هوانوردی وارد دوره احیای سریعی شده است. برای تجزیه و تحلیل انعطاف‌پذیری شبکه‌های فرودگاهی پس از شیوع بیماری در طول فرآیند احیا، در مقاله‌ای یک روش مدل‌سازی ارزیابی جامع تاب‌آوری را با استفاده از شبکه‌های فرودگاهی چین، اروپا و آمریکا به عنوان مطالعات موردی بررسی نموده است. تأثیر ویروس کووید-۱۹ بر شبکه‌های هوایی پس از جمع‌آوری مدل‌های این شبکه‌ها با استفاده از داده‌های ترافیک هوای واقعی تجزیه و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که شیوع بیماری به هر سه شبکه بررسی شده، آسیب رسانده است، اگرچه آسیب‌های وارده به ساختار شبکه‌های اروپا و آمریکا شدیدتر از آسیب در چین است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که چین، به عنوان شبکه فرودگاه با کمترین تغییر عملکرد شبکه، سطح پایدارتر تاب‌آوری را دارد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که سطوح مختلف سختگیرانه سیاست در اقدامات پیشگیرانه و کنترل در طول شیوع بر نرخ بازگشت شبکه تأثیر مستقیم داشت [Gou et al., 2023 b]. بر اساس پژوهش‌های پیشین صورت گرفته می‌توان گفت هر یک محققین با توجه به اطلاعاتی که در دسترس داشتند از جنبه‌های مختلفی تاب‌آوری شبکه حمل و نقل هوایی را مورد بررسی قرار دادند که اکثر آن‌ها از لحاظ توپولوژی شبکه فرودگاهی را مورد بررسی قرار دادند. یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی کارایی شبکه حمل و نقل هوایی تعداد پروازهای سرویس‌دهنده شده توسط شبکه است که در سال‌های گذشته کمتر مورد توجه محققان بوده اما در سال‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش سعی بر آن است تا تاب‌آوری شبکه حمل و نقل هوایی ایران با استفاده از این شاخص پیشنهادی مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش همچنین علاوه بر بررسی بدبینانه‌ترین حالت خرابی شبکه، حالت خرابی تصادفی و همچنین خوشبینانه‌ترین حالت خرابی هم مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد و نتایج این سه حالت به یک دیگر مقایسه خواهد شد که این مورد نیز در پژوهش‌های پیشین چندان مورد توجه محققان نبوده است. همچنین با توجه به شاخص پیشنهادی ارزیابی تاب‌آوری شبکه هوایی، الگوریتمی جهت یافتن بدبینانه‌ترین حالت خرابی شبکه پیشنهاد می‌گردد.

$$\alpha = \frac{e-n+1}{2n-5} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{e}{n} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{e}{3(n-2)} \quad (3)$$

ثابت و مشخص است. پس از حذف یک فرودگاه از شبکه، تمامی پروازهایی که از مبدأ آن انجام می شد یا به آن ختم می گردید، از ماتریس تقاضای سفر حذف و ماتریس به روز رسانی می گردد و سپس مقدار کل پروازهای سرویس داده شده در حالت جدید محاسبه می گردد. حذف فرودگاهها و به روزرسانی ماتریس تا زمانی ادامه خواهد داشت که دیگر هیچ فرودگاهی در شبکه باقی نماند.

برای انتخاب فرودگاهها از شبکه فرودگاهی در این پژوهش از سه روش مختلف زیر استفاده می گردد.

حذف تصادفی: در این حالت فرودگاهها به صورت تصادفی انتخاب شده و از شبکه فرودگاهی حذف می گردند. در تمامی مطالعات پیشین این حالت را شبیه به زمانی دانسته اند که یک حادثه طبیعی همانند بدی آب و هوا، بارش برف و باران، وجود ریزگردها، سیل، زلزله اتفاق می افتد؛ زیرا در هر زمان و مکانی امکان رخ دادن چنین اتفاقاتی وجود دارد.

حذف با هدف بیشترین افت شاخص ارزیابی: در این حالت سعی می گردد فرودگاهی از شبکه حذف گردد که بیشترین میزان تاثیر را در افت شاخص ارزیابی دارد. در واقع می توان گفت این حالت بدترین حالتی است که برای شبکه می تواند اتفاق بیفتد. به بیان دیگر می توان گفت این حالت در شرایط حمله خرابکارانه به منظور آسیب رساندن به زیرساختها اتفاق می افتد.

حذف با هدف کمترین افت شاخص ارزیابی: این حالت یک حالت ایده آل است که در پژوهشهای پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته و در این مطالعه بررسی می گردد. در واقع در این حالت هدف آن است که ایده آلترین وضعیت شبکه با حذف فرودگاهها مورد بررسی قرار گیرد. به عنوان مثال می توان گفت چنانچه در این حالت با حذف ۱۰ درصد فرودگاهها، مقدار شاخص ارزیابی برابر با ۸۰ درصد باشد، هیچ حالت دیگری وجود نخواهد داشت که ۱۰ درصد از فرودگاهها حذف گردد و مقدار شاخص ارزیابی از ۸۰ درصد بیشتر باشد. به بیان دیگر می توان گفت این شاخص در مثال گفته شده، بیان می کند چنانچه ۱۰ درصد فرودگاهها حذف گردد، شاخص ارزیابی حداقل ۲۰ درصد افت نموده و به مقدار ۸۰ درصد می رسد.

برای ارزیابی وضعیت توپولوژی شبکه در وضع موجود از سه شاخص دسترسی حلقه (α)، پیچیدگی شبکه (β) و اتصال شبکه (γ) مطابق با روابط (۱) تا (۳) استفاده می شود [Mahdavi et al., 2021]. در این روابط n تعداد گرهها (فرودگاهها) و e تعداد کمانها (مسیرهای هوایی) است.

۴- تحلیل و بررسی نتایج

در این مطالعه به منظور تحلیل تاب آوری شبکه حمل و نقل هوایی کشور، از اطلاعات دریافت شده از شرکت فرودگاهها و ناوبری هوایی ایران استفاده می گردد.

در این مطالعه اطلاعات ۱۴۸ مسیر پروازی (e) برای ۶۰ فرودگاه (n) مورد بررسی قرار گرفته است که بر این اساس مقادیر شاخصهای ارزیابی توپولوژی به صورت جدول ۱ خواهد بود. تعداد فرودگاههای تجاری آمریکا برابر با ۱۲۸۲ فرودگاه و تعداد مسیرهای پروازی آن بیش از ۵۰۰۰ پرواز است [Gou et al., 2023 b]. مقادیر این شاخصها هر چه بیشتر باشد بهتر خواهد بود. از مقایسه این نتایج مشخص می گردد، به نسبت شبکه هوایی داخلی آمریکا، وضعیت شبکه ایران چندان مطلوب نیست و مقادیر این سه شاخص برای ایران حدوداً بین ۳۵ تا ۴۷ درصد نسبت به آمریکا کمتر است.

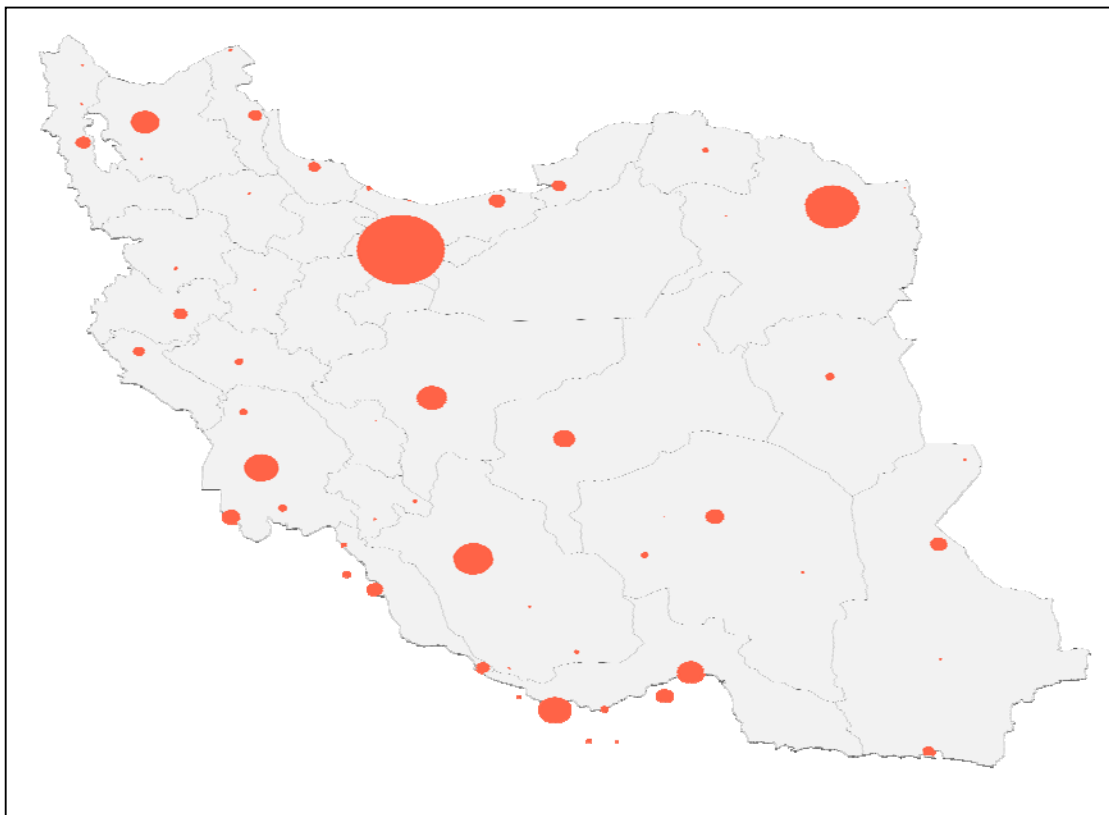
نمونه اطلاعات اخذ شده برای متوسط تعداد پروازهای روزانه در جدول ۲ آورده شده است. لازم به ذکر است بعضی پروازها بین برخی مبدأ-مقصدها به صورت روزانه انجام می گردد و برخی هر چند روز یک بار پرواز خواهند داشت. به بیان ساده تر چنانچه یک پرواز هر سه روز یکبار انجام گردد، مقدار روزانه آن برابر با ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است. بر اساس این اطلاعات مشخص می گردد در یک روز عادی به طور متوسط ۳۲۸/۸۴ پرواز بین مبدأ-مقصدهای مختلف انجام می گردد. بر اساس اطلاعات جمع آوری شده مشخص می گردد که ۳۵/۹ درصد کل پروازهای مسافری ایران یا از مبدأ تهران یا به مقصد تهران تهران است. از این حیث شهر مشهد با ۱۳/۶ درصد و شیراز با ۷/۳۳ درصد در رتبه های دوم و سوم قرار می گیرند و شهرهای اهواز (۵/۵۴ درصد)، کیش (۴/۷۵ درصد) و اصفهان (۴/۲۵ درصد) در رتبه های بعدی خواهند بود. بر مقایسه بهتر سهم پروازهای هر فرودگاه از کل پروازهای مسافری ایران، در شکل ۲ این سهمها به تصویر کشیده شده اند.

جدول ۱. شاخص‌های ارزیابی توپولوژی شبکه هوایی ایران

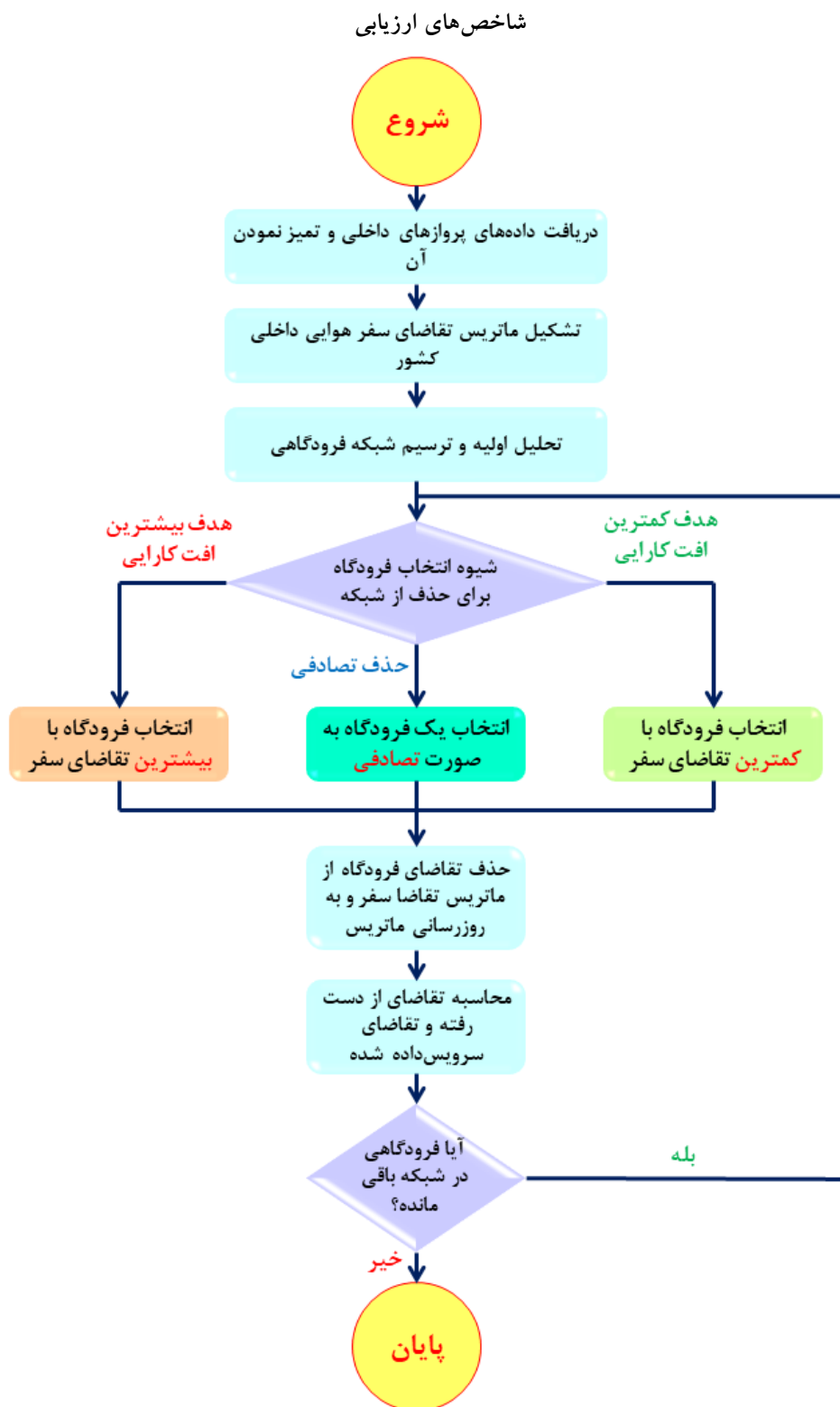
اختلاف نسبی (%)	مقدار		شاخص
	آمریکا	ایران	
-۴۶/۷۳	۱/۴۵۳	۰/۷۷۴	دسترسی حلقه (α)
-۳۶/۷۴	۳/۹۰۰	۲/۴۶۷	پیچیدگی شبکه (β)
-۳۴/۶۴	۱/۳۰۲	۰/۸۵۱	اتصال شبکه (γ)

جدول ۲. نمونه اطلاعات پروازهای داخلی سال ۱۴۰۱ اخذ شده از شرکت فرودگاه‌های ایران

ردیف	مبدا	مقصد	متوسط تعداد پرواز روزانه
۱	تهران	مشهد	۴۰/۱۴
۲	تهران	اصفهان	۶/۶۱
۳	تهران	قشم	۶/۱۶
...
۱۴۸	خارک	بوشهر	۰/۲۰



شکل ۱. سهم فرودگاه‌های ایران از پروازهای مسافری داخلی

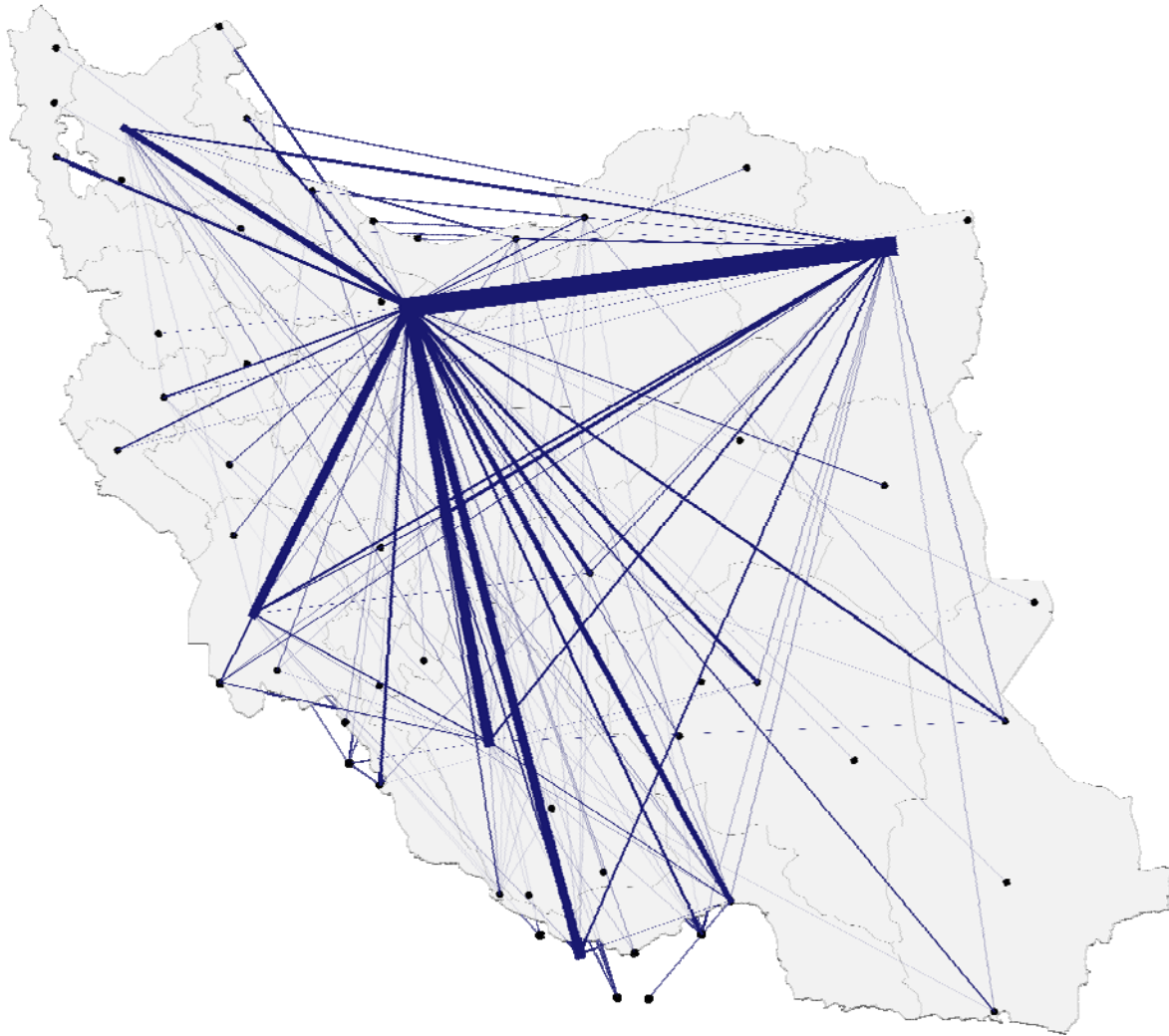


توپولو

شکل ۱. نمودار جریان پیشنهادی مطالعه جهت بررسی تاب‌آوری شبکه فرودگاهی ایران مطابق با روش شکست آبخاری سال ۱۴۰۱ اخذ شده از شرکت فرودگاه‌های ایران

است. مسیر تهران - شیراز با اختصاص ۳/۶۳ درصد و مسیر تهران - اهواز با اختصاص ۳/۱۵ درصد و مسیر تهران - کیش با اختصاص ۳/۰۵ درصد از کل پروازهای کشور در رتبه‌های دوم تا چهارم پر تقاضاترین مسیرها قرار خواهند گرفت. همان‌طور که از شکل ۳ نیز مشخص می‌گردد، پر تقاضاترین مسیرها یا از مبدا تهران یا به مقصد تهران است به نحوی که تقریباً از تمامی فرودگاه‌های ایران به مقصد تهران پروازهایی وجود دارد.

بر اساس اطلاعات دریافت شده، گراف معادل شبکه فرودگاهی کشور ترسیم می‌شود که در شکل ۳ نتیجه آن به تصویر کشیده شده است. در گراف نشان داده شده، گره‌ها نماد فرودگاه‌های ایران، کمان‌ها (یال‌ها) گراف نشان‌دهنده مسیرهای پرواری موجود و ضخامت کمان‌ها نشان‌دهنده متوسط تعداد پروازهای روزانه است. بر اساس این اطلاعات مشخص می‌گردد که بیشترین تقاضای سفر هوایی معادل با ۶/۴۸ درصد کل پروازهای کشور بین شهرهای تهران و مشهد در حال انجام



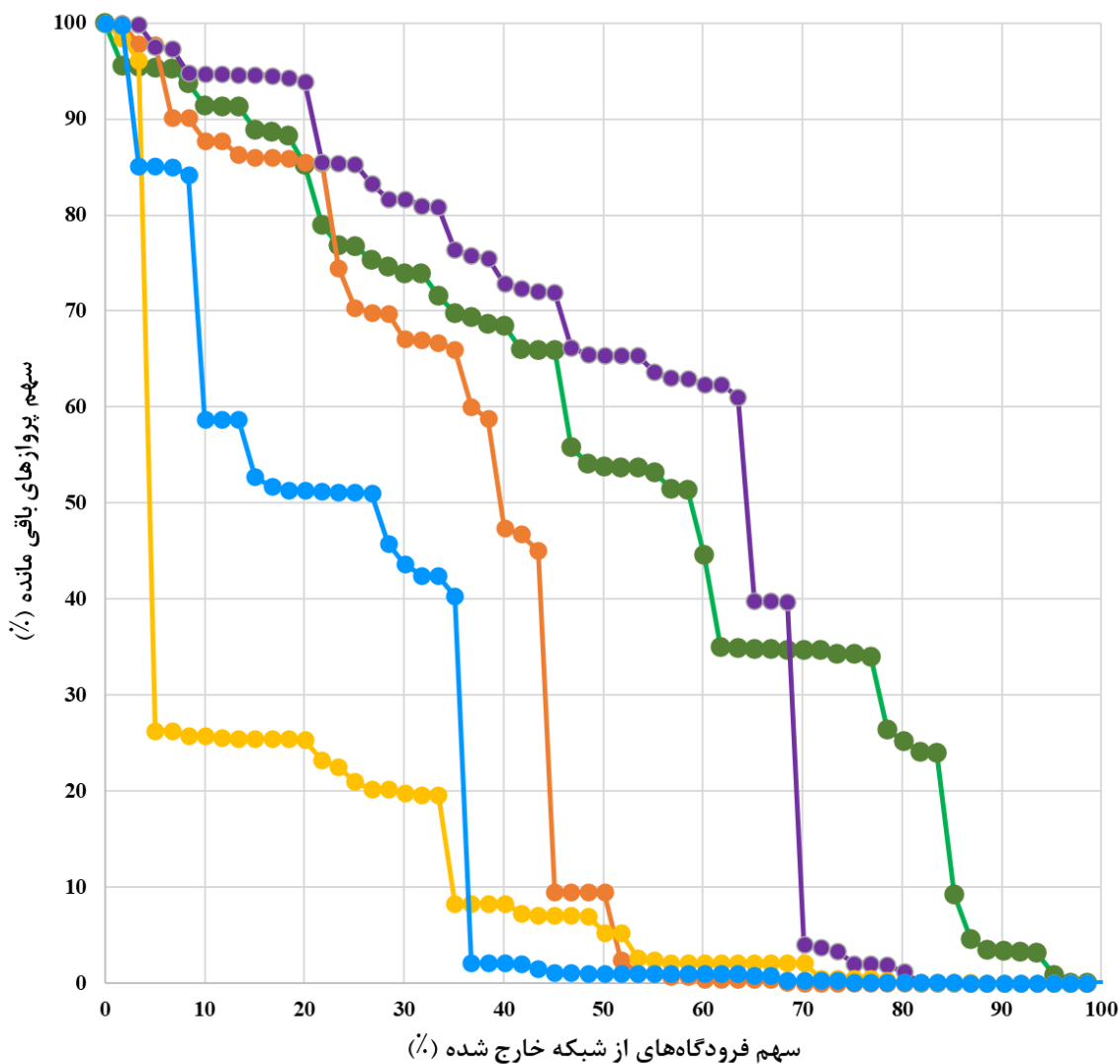
شکل ۲. گراف معادل پروازهای داخلی شبکه فرودگاهی ایران

حوادث طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در هر لحظه امکان دارید یک یا تعدادی از فرودگاه‌ها از شبکه فرودگاهی خارج شده و قادر به سرویس‌دهی نباشند. از آنجا اطلاعات ۶۰

در شکل ۴ نمودار شکست برای پنج حالت حذف تصادفی فرودگاه‌ها به صورت نمونه ترسیم شده است. همان‌طور که در بخش روش‌شناسی نیز اشاره گردیده، روش حذف تصادفی برای

بخش از آن هر یک از دیاگرام‌ها می‌توانند نسبت به سایرین حالت بهتر (کمترین افت کارایی) یا حالتی بحرانی‌تر (بیشترین میزان افت کارایی) را داشته باشند.

فرودگاه مختلف برای ترسیم شبکه فرودگاهی پروازهای داخلی ایران از شرکت فرودگاه‌ها و ناوبری هوایی اخذ گردیده است، در کل ۶۰! حالت مختلف برای ترسیم نمودار شکست آبشاری وجود دارد که بررسی تمامی این حالت‌ها تقریباً امری غیر ممکن است. از مقایسه این دیاگرام می‌توان دریافت که در هر



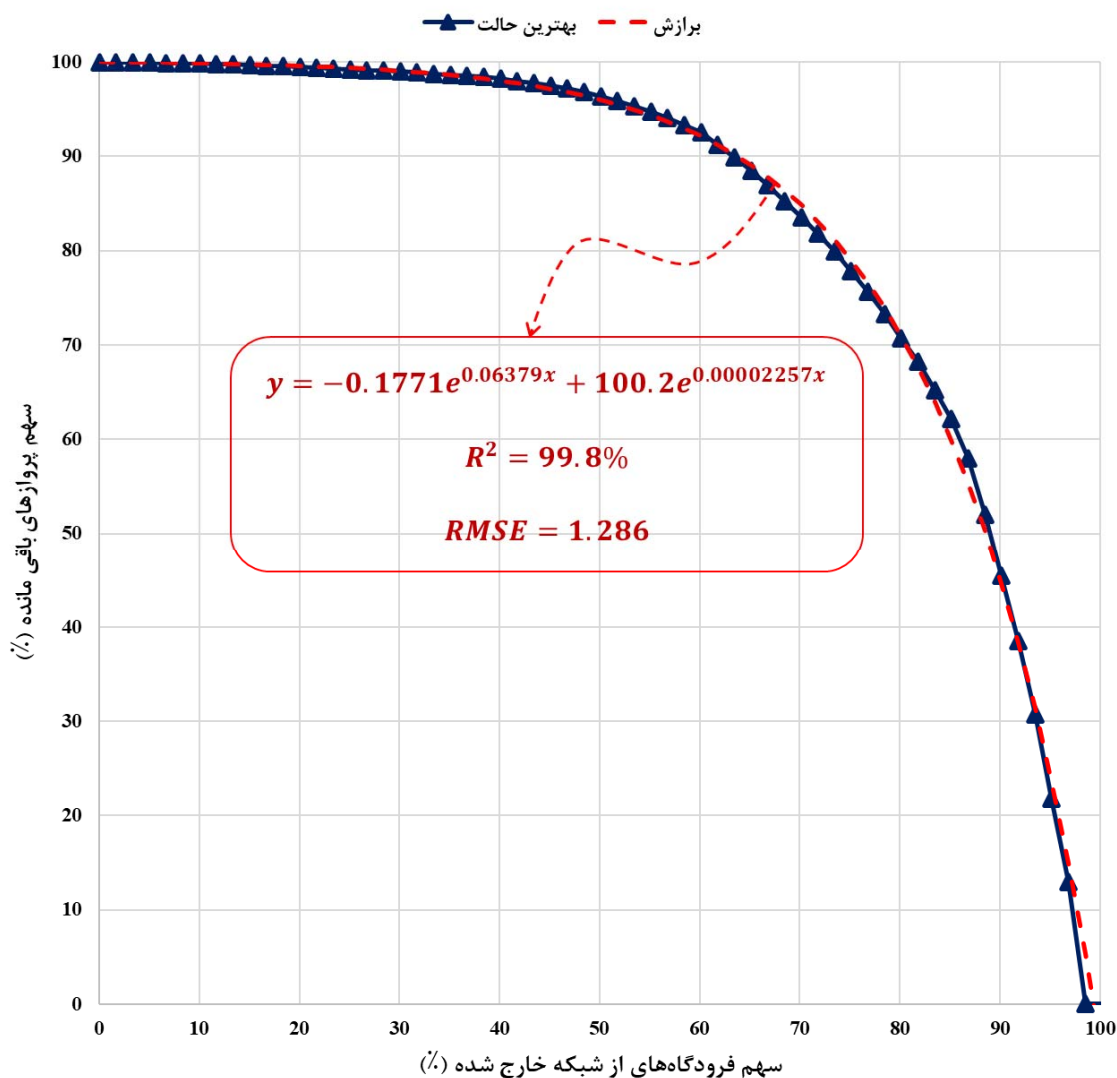
شکل ۳. نمودارهای شکست برای حالت حذف تصادفی فرودگاه‌ها در ۵ حالت مختلف

سهم پروازهای سرویس داده شده از کل پروازها در شرایط عادی، کمترین میزان افت را داشته باشد. بر اساس نمودار ترسیم شده در شکل ۵ مشخص می‌گردد، چنانچه ۶۰ درصد از فرودگاه‌های کشور از شبکه فرودگاهی حذف گردند و قادر به سرویس‌دهی نباشند، در ایده‌آل‌ترین شرایط کمتر از ۱۰ درصد از پروازها حذف خواهند شد و سهم پروازهای باقی مانده که

همان‌طور که گفته شد، تعداد ۶۰! حالت مختلف می‌توان برای نمودارهای شکست آبشاری ترسیم نمود. در این مطالعه به دو حالت از این ۶۰! حالت مختلف توجه ویژه‌ای می‌گردد. حالت اول بررسی شرایط ایده‌آل یا رویایی شبکه فرودگاهی کشور است که در حالت فرودگاه‌ها به نحوی حذف می‌گردند. که مقدار شاخص ارزیابی سهم پروازهای باقی مانده یا همان

است. بر اساس این نمودار می‌توان گفت در ایده‌آل‌ترین حالت تاب‌آوری شبکه برای آنکه سهم پروازهای سرویس‌داده شده به کمتر از ۵۰ درصد پروازهای حالت عادی برسد باید، حدود ۹۰ درصد از فرودگاه‌های کشور از شبکه فرودگاهی خارج شده و قادر به سرویس‌دهی نباشند.

توسط شبکه جدید سرویس‌دهی می‌شوند بیش از ۹۰ درصد پروازهای شرایط عادی خواهد بود. رفتار این نمودار شکست آبخاری، با یک مدل شامل دو عبارت نمایی تقریب زده شده است که پارامترهای آن در سطح معناداری ۹۵ درصد معنادار بوده و مقدار ضریب نکویی برازش آن برابر با ۹۹/۸ درصد



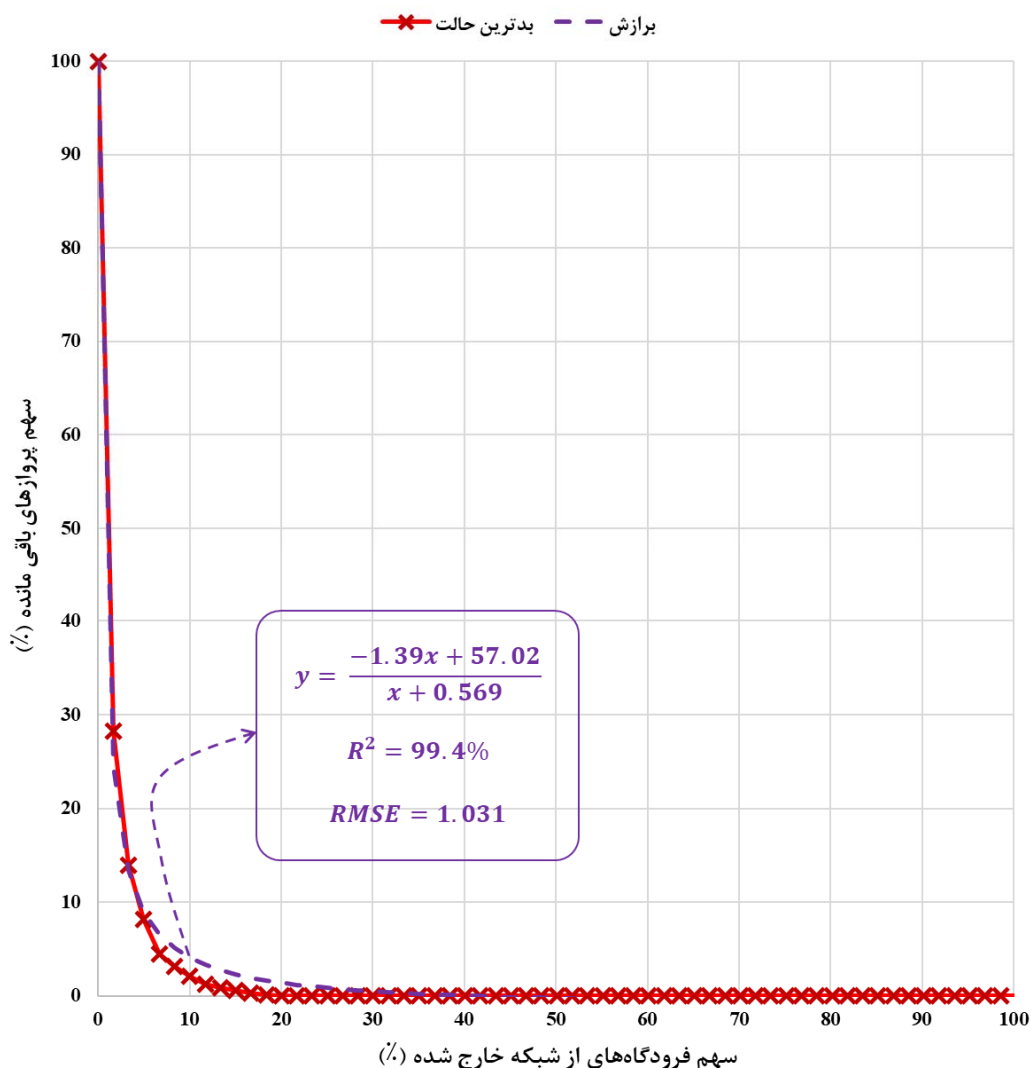
شکل ۴. نمودار شکست آبخاری و تاب‌آوری شبکه فرودگاهی ایران در ایده‌آل‌ترین حالت ممکن

۳۰ درصد شرایط عادی خواهد بود. نتایج حاکی از آن است که چنانچه ۳ فرودگاه از شبکه فرودگاهی حذف گردد، تقاضای پوشش داده شده بیش از ۹۰ درصد کاهش یافته و شبکه باقی مانده تنها قادر خواهد بود به کمتر از ۱۰ درصد پروازهای شرایط عادی سرویس‌دهی نماید. همان‌طور که از شکل نمودار

در شکل ۶ نتایج نمودار شکست آبخاری برای بحرانی‌ترین حالت تاب‌آوری شبکه فرودگاهی ایران ترسیم شده است. بر اساس نتایج آن مشخص می‌گردد چنانچه فقط و فقط یک فرودگاه خاص از شبکه فرودگاهی ایران حذف گردد، تعداد پروازهایی که شبکه باقی مانده سرویس‌دهی می‌نمایند، کمتر از

پارامترهای آن در سطح معناداری ۹۵ قرار دارند. در نهایت می‌توان گفت تمامی حالت‌های تصادفی شرایطی بهتر از این حالت بحرانی را خواهند داشت و بیشترین میزان افت کارایی شبکه (تعداد پروازهای باقی مانده) متعلق به این حالت است.

نیز مشخص است، رفتار آن بسیار شبیه به نمودارهای هموگرافیک است، از این رو برای یک نمودار هموگرافیک با معادله نشان داده شده در شکل ۶ به نتایج برازش گردیده است که ضریب نکویی براش آن برابر با ۹۹/۴ درصد است و تمامی



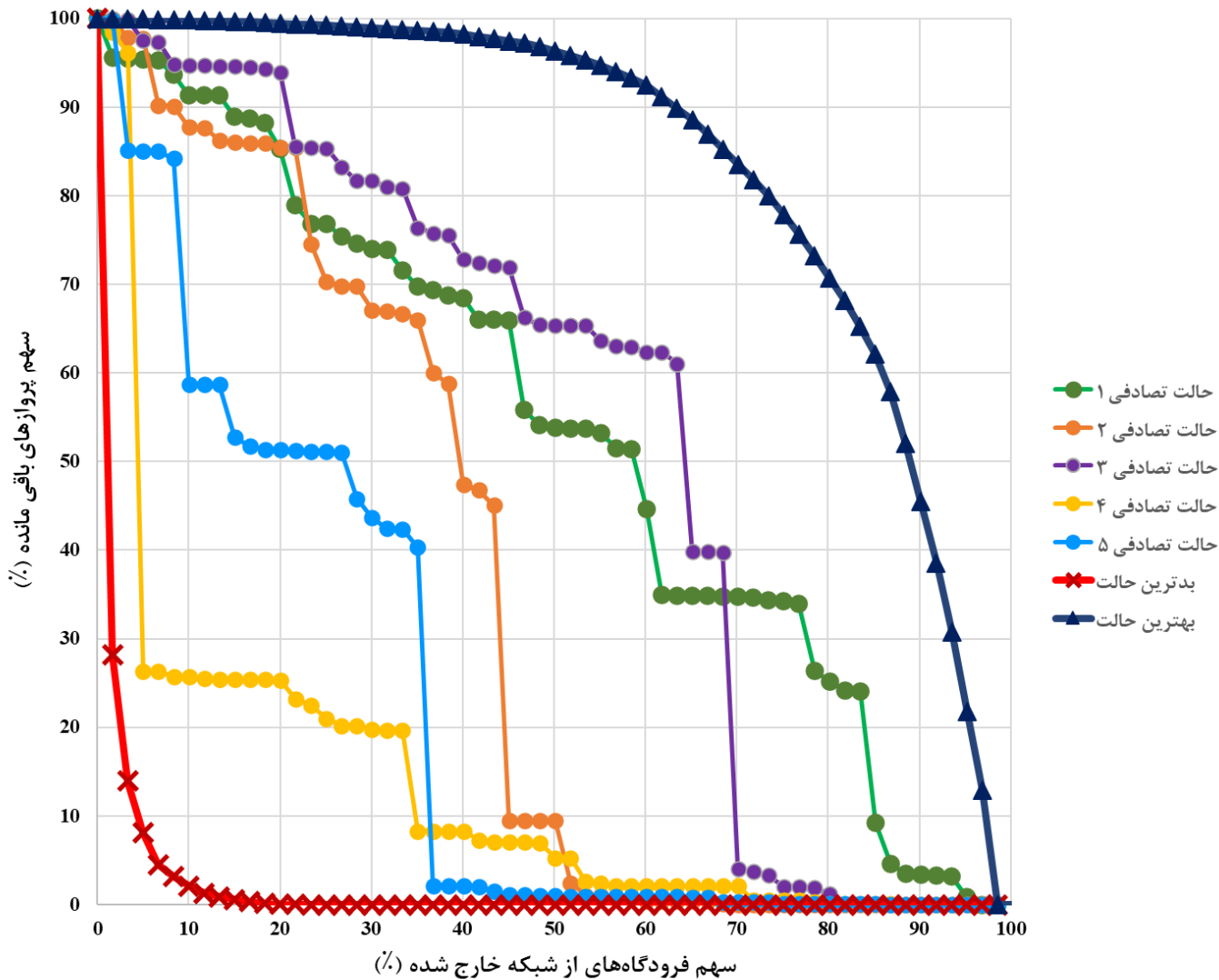
شکل ۵. نمودار شکست آبخاری و تاب‌آوری شبکه فرودگاهی ایران در بحرانی‌ترین حالت ممکن

بخش‌های قبلی آورده شده است تا با استفاده از آن معادله خط‌ها برای تحلیل تاب‌آوری دیگر نیازی به ترسیم این دیاگرام‌ها با شرایط توضیح داده شده در بخش روش‌شناسی نباشد. یکی از مهم‌ترین دلایل افت بیش از اندازه کارایی شبکه (سهم پروازهای باقی مانده) تمرکز پروازها در یک شهر است. از این‌رو پیشنهاد مهم و اصلی نویسندگان مقاله این است که ذی‌نفعان صنعت حمل‌ونقل هوایی کشور در مطالعات آتی با

برای مقایسه بهتر تمامی حالت‌های بررسی شده در بخش‌های قبل در کنار یک دیگر در شکل ۷ ترسیم شده‌اند. همان‌طور که مشخص است نمودار سورمه‌ای رنگ ایده‌آل‌ترین حالت ممکن و نمودار قرمز رنگ بحرانی‌ترین حالت ممکن برای تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل هوایی ایران است. می‌توان گفت تمامی ۶۰! حالت دیگر بین این دو خط قرار خواهند گرفت که برای راحتی کار معادله خط برازش شده آن‌ها در

وجود ندارد را بررسی نموده، تا شاید بتوان با ایجاد این مسیرها تمرکززدایی از فرودگاه‌های خاص صورت گرفته و شرایط تاب آوری شبکه فرودگاهی کشور بهبود یابد.

بررسی ماتریس تقاضای سفر کل ایران، شرایط و محدودیت‌های موجود امکان ایجاد مسیرهای پروازی مستقیم بین مبدأ-مقصد‌های جدید که در حال حاضر در شبکه فرودگاهی



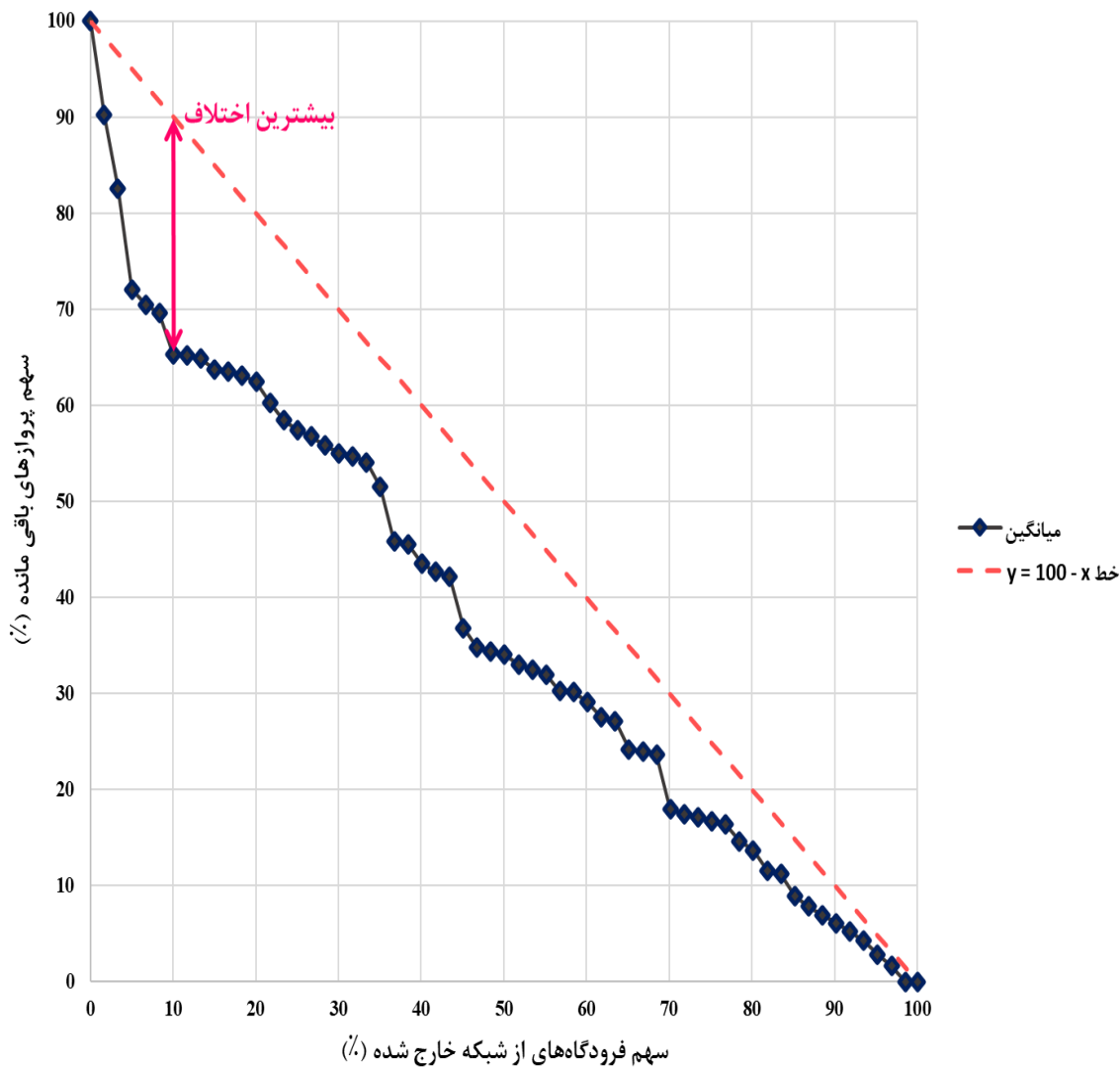
شکل ۶. مقایسه نمودارهای شکست آبخاری تصادفی با حالت‌های بدبینانه و خوشبینانه شبکه حمل و نقل هوایی ایران

شایان ذکر است در این حالت فرضی و ایده‌آل تمامی نمودارهای شکست آبخاری (حالت‌های حذف تصادفی و همچنین حالت بدبینانه و خوشبینانه) روی این خط قرار می‌گیرند. مطابق با نتایج شکل ۷ مشخص می‌گردد نمودار امید ریاضی شبکه فرودگاهی ایران در تمامی نقاط زیر این نمودار قرار گرفته و فاصله عمودی آن از خط ایده‌آل ترسیم شده (اختلاف افت کارایی شبکه در دو حالت) در کمترین حالت به جز نقطه شروع و پایان برابر با ۱/۵ و در بیشترین حالت برابر با

در شکل ۸ امید ریاضی تمامی نمودارهای شکست نشان داده شده در شکل ۷ آورده شده است. در این شکل خط $y=100-x$ نیز ترسیم شده است. این خط به نوعی بیانگر نمودار شکست آبخاری در یک شبکه فرضی است که تقاضای سفر تمامی فرودگاه‌های آن با یک دیگر برابر است. در چنین شبکه فرضی چنانچه به عنوان مثال ۱۰ درصد فرودگاه‌ها از شبکه حذف شوند، ۱۰ درصد پروازها حذف شده و در کل در شبکه باقی مانده ۹۰ درصد پروازها سرویس‌دهی می‌شوند.

نماید. یعنی به عبارت دیگر می‌توان گفت در این حالت ۹۰ درصد فرودگاه‌های باقی مانده می‌توانند ۶۵ درصد کل تعداد پروازهای حالت عادی را پوشش دهند.

۲۴/۷ است. بر اساس نمودار امید ریاضی شکست آبخاری شبکه، می‌توان به طور کلی انتظار داشت با حذف ۱۰ درصد از فرودگاه‌های کشور تعداد پروازهای سرویس داده شده توسط شبکه باقی مانده نسبت به حالت اولیه حدود ۳۵ درصد افت



شکل ۷. نمودار امید ریاضی نمودارهای شکست شبکه حمل و نقل هوایی ایران

۵- نتیجه گیری

شیوه و همچنین تحدیدها و حوادث طبیعی که می‌تواند در میزان کارایی آن تحت تاثیر باشد، تحلیل و بررسی تاب‌آوری این شبکه بسیار پر اهمیت است. از این‌رو در پژوهش جاری به تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل هوایی ایران پرداخته شد. بدین جهت از اطلاعات پروازهای مسافری داخلی کشور که شرکت فرودگاه‌ها و ناوبری هوایی ایران

امروزه برای جا به جایی بار و مسافر در سطح برون شهری و برون‌مرزی سه حالت کلی حمل‌ونقل دریایی، هوایی و زمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. حمل‌ونقل هوایی با توجه به ظرفیت و سرعت زیاد و همچنین ایمنی قابل توجه همواره مورد توجه مدیران و مختصان فعال در زمینه حمل‌ونقل بوده است. با توجه به جایگاه ویژه این

فرودگاه‌ها، می‌توان انتظار داشت، شاخص کارایی شبکه ۳۵ درصد افت نماید.

از مقایسه نتایج شاخص‌های ارزیابی توپولوژی شبکه هوایی مشخص می‌گردد، شبکه هوایی ایران به نسبت شبکه هوایی داخلی آمریکا، وضعیت چندان مطلوب نیست و مقادیر سه شاخص دسترسی حلقه (α)، پیچیدگی (β) و اتصال شبکه (γ) برای ایران، حدوداً بین ۳۵ تا ۴۷ درصد نسبت به آمریکا کمتر است. تعداد حالت‌های مختلف نمودار شکست آبخاری بسیار زیاد است و دو نمودار بیشترین و کمترین میزان افت کارایی در واقع حد پایین و حد بالای این نمودارها است. بر اساس تحلیل نتایج تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل هوایی ایران مشخص می‌گردد تمرکز بیش از حد پروازها در چند فرودگاه باعث گردیده شبکه بسیار آسیب پذیر باشد و با حذف چند فرودگاه خاص و پرتردد عملاً شاخص پیشنهادی کارایی شبکه (تعداد پروازهای سرویس داده شده)، به نزدیک صفر برسد.

یکی از مهم‌ترین مسائل در موضوع تاب‌آوری شبکه، بحث برگشت پذیری به حالت اولیه است که پس از وقوع حادثه در یک شبکه و افت کارایی، آن شبکه با چه شرایطی، طی چه مدت زمانی و به چه نحوی به حالت اولیه باز می‌گردد. از این رو پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی برگشت پذیری به حالت اولیه مورد مطالعه محققان قرار گیرد. معمولاً در حین وقوع یک حادثه برای یک فرودگاه، بخش از پروازهای آن که قابل به انتقال به فرودگاهی دیگر در نزدیکی آن است، به فرودگاه جایگزین منتقل می‌گردد. از آنجا چنین اطلاعاتی در اختیار نویسندگان مقاله نبوده است، پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آتی این موضوع مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در این مطالعه، مشخص می‌گردد یکی از مهم‌ترین عواملی که تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل هوایی ایران را تحت تاثیر خود قرار داده است، تمرکز بسیار زیاد پروازها در چند فرودگاه خاص است. از این رو پیشنهاد کاربردی نویسندگان مقاله این است که مدیران و برنامه‌ریزان این حوزه با بررسی تقاضای سفر کل ایران، پتانسیل‌ها و محدودیت‌های موجود، طراحی شبکه را به نحوی انجام اصلاح نمایند که تا حد امکان تمرکززدایی صورت گیرد و در نتیجه تاب‌آوری شبکه شرایط بهتری پیدا نماید.

دریافت گردید، استفاده شده است. برای بررسی تاب‌آوری شبکه، از روش شکست آبخاری استفاده گردید. شایان ذکر است پس از حذف هر فرودگاه، پروازهای ورودی و خروجی آن (تقاضای آن) از شبکه ماتریس تقاضای سفر هوایی حذف و ماتریس به روزرسانی می‌گردد. به منظور محاسبه کارایی شبکه حمل‌ونقل هوایی در شرایط مختلف، با توجه به اطلاعات موجود در اختیار نویسندگان این مقاله، پیشنهاد گردید از تعداد پروازهای سرویس‌داده شده توسط شبکه استفاده گردد. تحلیل تاب‌آوری شبکه حمل‌ونقل هوایی در سه حالت مختلف به شرح زیر بررسی گردید:

حالت تصادفی: در این حالت فرودگاه‌ها به صورت تصادفی از شبکه فرودگاهی حذف می‌شوند. این حالت به نوعی نشان‌دهنده وقوع حوادث طبیعی همانند سیل، زلزله، طوفان، ریزگردها و بدی آب و هوا است که در هر لحظه و هر مکانی احتمال وقوع آن‌ها وجود دارد.

حالت بیشترین افت کارایی: در این حالت فرودگاه‌ها به ترتیبی از شبکه فرودگاهی حذف می‌شوند که شبکه حمل‌ونقل هوایی بیشترین میزان افت کارایی را داشته باشد. این حالت به نوعی نشان‌دهنده وقوع حملات خرابکارانه است. بر اساس نتایج ارائه شده در مقاله مشخص می‌گردد، نمودار افت کارایی شبکه حمل‌ونقل هوایی ایران در چنین شرایطی از یک تابع هموگرافیت پیروی می‌کند. نتایج بیانگر آن است که با حذف ۳ فرودگاه، کارایی شبکه به کمتر از ۱۰ درصد می‌رسد.

حالت کمترین افت کارایی (ایده‌آل): در این واقع این حالت یک حالت فرضی بوده که در آن ایده‌آل‌ترین شرایط با حذف فرودگاه‌ها و افت کارایی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این حالت در پژوهش‌های پیشین کمتر مورد توجه محققان بوده است که در این مطالعه به آن پرداخته شده است. بر اساس نتایج مطالعه مشخص می‌گردد در این حالت نمودار شکست آبخاری شبکه از یک رابطه نمایی پیروی می‌نماید و با حذف حدود ۹۰ درصد از فرودگاه‌ها همچنان میزان کارایی شبکه بر اساس شاخص تعریف شده بیش از ۴۵ درصد خواهد بود.

نمودار امیدریاضی حالت‌های مختلف شکست آبخاری: برای محاسبه و بدست آوردن این حالت میانگین شاخص کارایی شبکه در تمامی حالت‌های قبل محاسبه شده و نمودار آن ترسیم می‌گردد. بر اساس آن می‌توان گفت با حذف ۱۰ درصد از

۶-مراجع

- Guo, J., Zhu, X., Liu, C., & Ge, S. (2021). Resilience modeling method of airport network affected by global public health events. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-13.
- Hossain, M., Alam, S., Rees, T., & Abbass, H. (2013). Australian airport network robustness analysis: a complex network approach. *In Proceeding of the 36th Australasian Transport Research Forum*, Brisbane, Australia.
- Janić, M. (2022). Analysis and modelling of airport resilience, robustness, and vulnerability: impact of COVID-19 pandemic disease. *The Aeronautical Journal*, 2022, 1-30.
- Li, S., Zhou, Y., Kundu, T., & Zhang, F. (2021). Impact of entry restriction policies on international air transport connectivity during COVID-19 pandemic. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 152, 102411.
- Lordan, O., Sallan, J. M., Escorihuela, N., & Gonzalez-Prieto, D. (2016). Robustness of airline route networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 445, 18-26.
- Lordan, O., Sallan, J. M., Simo, P., & Gonzalez-Prieto, D. (2014). Robustness of the air transport network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 68, 155-163.
- Lordan, O., Sallan, J. M., Simo, P., & Gonzalez-Prieto, D. (2015). Robustness of airline alliance route networks. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 22(1-3), 587-595.
- Louzada, V. H., Daolio, F., Herrmann, H. J., & Tomassini, M. (2013). Smart rewiring for network robustness. *Journal of Complex networks*, 1(2), 150-159.
- Bombelli, A., Santos, B. F., & Tavasszy, L. (2020). Analysis of the air cargo transport network using a complex network theory perspective. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 138, 101959.
- Cai, Q., Alam, S., & Duong, V. (2020). On robustness paradox in air traffic networks. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 7(4), 3087-3099.
- Chan, H., & Akoglu, L. (2016). Optimizing network robustness by edge rewiring: a general framework. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 30(5), 1395-1425.
- Cumelles, J., Lordan, O., & Sallan, J. M. (2021). Cascading failures in airport networks. *Journal of Air Transport Management*, 92, 102026.
- Du, W. B., Zhou, X. L., Lordan, O., Wang, Z., Zhao, C., & Zhu, Y. B. (2016). Analysis of the Chinese Airline Network as multi-layer networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 108-116.
- Faramondi, L., Setola, R., Panzieri, S., Pascucci, F., & Oliva, G. (2018). Finding critical nodes in infrastructure networks. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 20, 3-15.
- Guo, J., Li, H., & Yang, Z. (2023, a). Robustness Analysis for China's Airport Network Based on Multi-Layer Temporal Complex Network Model. *In International Conference on Transportation and Development*, 14-24.
- Guo, J., Yang, Z., Zhong, Q., Sun, X., & Wang, Y. (2023, b). A novel resilience analysis methodology for airport networks system from the perspective of different epidemic prevention and control policy responses. *PLoS One*, 18(2), e0281950.

- Sun, X., Gollnick, V., & Wandelt, S. (2017). Robustness analysis metrics for worldwide airport network: A comprehensive study. *Chinese Journal of Aeronautics*, 30(2), 500-512.
- Wang, Y., Zhan, J., Xinhua, X. U., Lishuai, L. I., Ping, C. H. E. N., & Hansen, M. (2019). Measuring the resilience of an airport network. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32(12), 2694-2705.
- Ye, J., Ji, P., & Barthelemy, M. (2020). Scenarios for a post-COVID-19 world airline network. *arXiv preprint arXiv:2007.02109*.
- Mahdavi, A. R., Mamdoohi, A., & Allahviranloo, M. (2021). Topology evaluation of Tehran subway network utilizing a bi-level mixed index for subway networks ranking. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(12), 3003-3014.
- Qian, B., & Zhang, N. (2022). Topology and Robustness of Weighted Air Transport Networks in Multi-Airport Region. *Sustainability*, 14(11), 6832.
- Soria, M., Lordan, O., & SALLAN, J. M. (2017). Heuristics of node selection criteria to assess robustness of world airport network. *Chinese Journal of Aeronautics*, 30(4), 1473-1480.

Evaluation Analysis of the Resilience of the Air Transportation Network

(Case Study: Domestic Passenger Flights in Iran)

*Shahram Kazemnezhad Vaghefi, Ph.D., Student, Management Faculty, Islamic Azad
University Science and Research branch, Tehran, Iran.*

Mansour Momeni, Professor, Management Faculty, Tehran University, Tehran, Iran.

*Seyed Mohammad Seyed Hossieni, Professor, Faculty of Industrial Engineering,
Science and Industry University, Tehran, Iran.*

*Mohammadreza Motadel, Assistant Professor, Management Faculty, Islamic Azad University,
Central Unit, Tehran, Iran.*

E-mail: mmomeni@ut.ac.ir

Received: August 2024- Accepted: December 2024

ABSTRACT

Air transportation has always been of interest to national managers and planners due to its positive features, including high speed, safety, and large capacity. However, various threats affect the efficiency of this system. In this research, the resilience of the air transportation network is examined. Threats are divided into two categories: natural events and sabotage events. In this study, data from domestic flights in Iran were used to analyze the resilience of the air transportation network. For this purpose, the number of serviced flights was considered as an indicator of network performance, and the cascade failure diagram method was used to analyze resilience. The results show that in the most pessimistic scenario, with the removal of three airports, network performance drops below 10%, as indicated by the cascade failure diagram. Additionally, the ideal scenario of network performance decline was examined, and the results show that in this scenario, with the removal of 90% of airports, network performance remains above 45%. Based on the conducted analysis, the biggest problem in Iran's air network is the excessive concentration of flights in a few specific and high-demand airports, which greatly affects network resilience in case of any issues occurring for them.

Keywords: Resilience, Air Transportation Network, Cascade Failure Diagram, Iran Airport Network Resilience, Analysis of The Iranian Airport Network