

مدل مکان‌یابی چندهدفه فرودگاه‌های مسافربری قطب با در نظر گرفتن رویکرد

رضایت مسافر

مهدی نصرالهی، دانشجوی دکترای راه و ترابری، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

علی عبدی کردانی (مسئول مکاتبات)، دانشیار، عضو هیئت علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

E-mail: aliabdi@eng.ikiu.ac.ir

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸

دریافت: ۱۴۰۰/۰۷/۰۵

چکیده

این مقاله یک مسأله دوهدفه میانی با تخصیص یگانه p قطب که در آن هزینه‌های کل حمل و نقل (اولویت شرکت‌های هوایی) و هزینه زمان متحمل شده به مسافران (ترجیح مشتری) بهینه می‌شود را ارائه می‌کند. در اکثر مقالات تمرکز بر هزینه‌های شرکت‌های هوایی است و شبکه بر اساس دیدگاه شرکت‌های هوایی طراحی می‌شود در حالی که مسافران به عنوان مصرف کننده نقش کلیدی در شبکه دارند. سطح خدمات‌رسانی ضعیف برای مسافران و نبود رضایت و راحتی برای آنها می‌تواند باعث شود که شرکت هوایی بازار رقابتی خود را از دست بدهد و شرکت هوایی را به تعطیلی بکشاند. یکی از مهم‌ترین معیارهای رضایت مسافر تأخیر می‌باشد که شامل تأخیر برنامه‌ریزی و تأخیر زمانی سفر است. این مدل شامل دو تابع هدف می‌باشد. تابع هدف اول هزینه‌های حمل و نقلی شرکت هوایی بسته به نوع خدمت ارائه شده (کوتاه برد، متوسط برد، بلند برد) کمینه می‌کند در حالی که تابع هدف دوم هزینه زمانی متحمل شده به مسافران بدلیل استفاده از شبکه قطب-اقمار را کمینه می‌نماید. برای محاسبه این هزینه اختلاف زمان مرتبط به مسیر مستقیم بعنوان سفر ایده‌آل و مسیر غیرقطب-قطب-غیرقطب در ارزش زمان سفر ضرب گردید. برای تست مدل مورد نظر از داده‌های واقعی سالنامه داده‌های آماری گردشگری استفاده شد. در این مقاله ما توانستیم جبهه پارتوی دقیق برای ۳۴ گره برای یک شبکه هوایی از کشورهای مختلف با محوریت قطب در کشور ایران را بیابیم. همچنین نتایج و تحلیل‌هایی از داده‌های خروجی مدل ارائه و بحث شده است.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی چند هدفه، برنامه‌ریزی ناوگان، طراحی شبکه قطب-اقمار، مسأله میانی p قطب

۱. مقدمه

می‌تواند صدمات جبران ناپذیری به این صنعت وارد کند. انگیزه اصلی شرکت‌های هوایی برای استفاده از سیستم قطب-اقمار توانایی‌شان برای بهره‌برداری کردن از اقتصاد چگالی^۴ و اقتصاد ناشی از وسعت^۵ می‌باشد. در این شکل‌بندی افزایش چگالی ترافیک باعث استفاده از هواپیماهای بزرگتر و کاهش هزینه واحد می‌شود. همچنین در این نوع شبکه به دلیل استفاده از اتصالات غیرمستقیم (اتصال به قطب) بجای اتصالات مستقیم نیاز به تعداد پروازهای کمتر، تعداد ناوگان کمتر و متعاقب آن خدمه پرواز و کارکنان کمتر می‌باشد (Wensveen, 2016). فرودگاه‌های قطب نیز امکان تمرکز سرویس‌های عملیاتی به هواپیماها (از قبیل عملیات تعمیر و نگهداری هواپیما، تسهیلات پذیرش و سرویس مدیریت زمینی) و در نتیجه استفاده از مزایای هزینه‌ای صرفه‌جویی به مقیاس و کاهش هزینه‌های اسکان را دارند. همچنین یافته‌ها نشان می‌دهد شبکه قطب و اقماریت توسعه و حوزه نفوذ برای شرکت هوایی افزایش می‌دهد بدین ترتیب که کافی است که یک گره جدید به یکی از قطب‌ها وصل شود تا بتواند از کل شبکه بهره‌مند گردد (Soylu&Katip, 2019).

هر شرکت هوایی پس از یک دوره خدمات با پروازهای مستقیم به مسافران به منظور توسعه و تثبیت خود در بازار انحصاری این صنعت برای کاهش هزینه‌های خود و افزایش حوزه نفوذ خود، به سمت استقرار قطب فرودگاهی مختص به خود روی خواهد آورد که یکی از مهم‌ترین تصمیمات استراتژیک شرکت هوایی محسوب می‌شود و تمامی برنامه‌ریزی‌های تاکتیکی و عملیاتی را تحت‌الشعاع قرار می‌دهد. در این پژوهش ما یک مساله با ظرفیت نامحدود تخصیص یگانه p قطب میانه دو هدفه با رویکرد شرکت هوایی-مسافر را ارائه می‌دهیم که در آن تابع هدف اول هزینه‌های حمل و نقلی کل را حداقل می‌کند؛ در حالی که تابع هدف دوم هزینه‌های ناشی از تأخیر مسافر را کمینه می‌نماید. در تابع هدف دوم از دو نوع تأخیر استفاده شده است تأخیر

مکان‌یابی قطب بخصوص در شبکه‌های حمل‌ونقلی از سه جنبه حیاتی و بااهمیت است جنبه اول کاهش تعداد اتصالات ساخته شده در سیستم در مقایسه با شبکه‌ای که همه اتصالات آن برقرار است زیرا در شبکه حمل‌ونقلی، ساخت اتصالات (زمینی، دریایی، هوایی) پرهزینه می‌باشد. جنبه دوم استفاده از اقتصاد به مقیاس^۱ در هزینه‌های انتقال جریان بین قطب‌ها و حتی بین گره‌های غیرقطب می‌باشد به دلیل اینکه قطب‌ها می‌توانند تجمیع جریان را انجام دهند که این جنبه مشوق اصلی در استفاده از سیستم قطب و اقماریت است (Farahani & Hekmatfar, 2009). جنبه سوم مدیریت منابع است یعنی در شبکه حمل‌ونقلی با سیستم قطب-اقمار نسبت به سیستم شبکه کاملاً متصل^۲ با منابع کمتر می‌توان گره‌های بیشتری را با بهره‌وری بالاتری خدمت‌رسانی نمود (Wensveen, 2016). در کنار این مزایا این سیستم معایب خاص خودش را نیز دارد که از آن می‌توان به زمان سفر طولانی برای کاربران به ویژه در مورد مسافران، ظرفیت مازاد تحمیل شده به قطب‌ها، حساسیت نسبت به پدیده ازدحام، ریسک بالای حوادث و متعاقب آن مختل شدن شبکه و نیاز به پلان B اشاره نمود (Zabihi&Gharakhani, 2018).

مکان‌یابی قطب به طور فراوان در حوزه‌های فرودگاهی و خطوط هوایی، خدمات‌رسانی اورژانس، خدمات پستی، مدیریت زنجیره تأمین، خدمات مخابراتی و شبکه‌های پیام‌رسان و سیستم‌های حمل و نقلی کاربرد دارد و مطالعات موردی واقعی بسیاری در این زمینه‌ها انجام شده است (Monemi et al., 2021) (Shang et al., 2021) (Atta&Sen, 2021).

مساله مکان‌یابی قطب^۳ در صنعت هوایی دارای ابعاد ویژه‌ای است. بازرطراحی سیستم حمل و نقل هوایی به شکل سیستم قطب-اقمار بر بازیگران اصلی آن (شرکت‌های هوایی و مسافران) تأثیر بسزایی دارد که عدم پرداختن و شناخت آن

مدل مکان‌یابی چندهدفه فرودگاه‌های مسافربری قطب با در نظر گرفتن رویکرد رضایت مسافر

نمودند. آنها در مدل سرویس‌های بدون توقف، با یک توقف و دو توقف را در نظر گرفتند (Yang & Chiu, 2016). اکتال و همکاران یک مدل مکان‌یابی قطب با اختصاص چندگانه سستی را با در نظر گرفتن عوامل اثرگذاری چون دسترسی باند فرودگاه و تداوم ترافیک حمل بار فرودگاه، برد هواپیما و هزینه سفر گسترش دادند (Oktal & Ozger, 2013). دسته دوم بر روی نحوه تعیین تقاضای مسافر و تغییرات ماتریس تقاضا بر مسأله مکان‌یابی قطب تمرکز دارد. کارمونا و همکاران یک مدل پویای اقتصادی برای برآورد تقاضا مسافر در صنعت هوایی ارائه کردند سپس آنها این مدل را برای حل مسأله مکان‌یابی قطب فرودگاهی شرکت هوایی به کار بردند (Carmona - Benítez et al., 2017). دسته سوم فضای رقابتی که شرکت‌های هوایی با آن مواجهند را در مسأله مکان‌یابی قطب وارد کرده است. ایسلت و همکاران یک مسأله مکان‌یابی رقابتی (بین دو شرکت هوایی) با در نظر گرفتن توابع مطلوبیت برای مسافران که شامل زمان پروازکردن و کرایه بلیط است را ارائه کردند (Eiselt & Marianov, 2009). در کنار این گروه‌بندی، مقالات و تحقیقاتی هستند که تنها از داده‌های هوایی مانند CAB (Civil Aeronautics Board) برای آزمایش شبکه قطب-اقمار استفاده کردند. (Ghaffarinasab & Kara, 2019) (Matos et al., 2018) (Dai et al., 2021).

از سال ۲۰۰۸ که کاستا و همکاران ایده مدل‌های مکان‌یابی چندهدفه ارائه نمودند تحقیقات بسیاری در این حوزه با دو یا سه تابع هدف انجام شد و سعی گردید مدل مکان‌یابی قطب ارتقاء یابد (da Graça Costa et al., 2008). نقطه مشترک در اکثر مقالات، تابع هدف اول آن‌ها می‌باشد که عموماً کمینه‌سازی کل هزینه است ولی در تابع هدف دوم به مسأله مکان‌یابی قطب از منظرهای مختلف نگریسته شده است. مقالات را بر اساس شاخصه مطلوبیت سفر می‌توان به چهار گروه کلی دسته‌بندی نمود. در گروه اول به شاخص‌های زمانی

برنامه‌ریزی و تأخیر ناشی از اختلاف زمانی استفاده از سیستم قطب نسبت به پرواز مستقیم به عنوان ایده‌آل‌ترین حالت سفر. این مدل در واقع یک رویکرد تعادل را در توابع هدف خود پی می‌گیرد که در آن بطور همزمان هم دیدگاه سیستم در نظر گرفته شده است و هم دیدگاه کاربر. زیرا بهینه‌ترین شبکه قطب و اقمار اگر نتواند سطح خدمات‌رسانی قابل قبولی را به مشتری ارائه دهد و رضایت مسافر را جلب کند نمی‌تواند سهمی از بازار را به خود اختصاص دهد و در نتیجه منجر به تعطیل شدن شرکت هوایی می‌شود. بنابراین در در واقعیت می‌بایست عملکرد شبکه (ترجیحات شرکت‌های هوایی) و رضایت مشتری (راحتی مسافر) با هم در نظر گرفته شود همچنین این یک امر حیاتی است که مدل مکان‌یابی قطب به عنوان یک تصمیم استراتژیک با سایر رویکردهای برنامه‌ریزی شرکت هوایی سازگار باشد. یکی از این رویکردها، برنامه‌ریزی ناوگان می‌باشد که می‌تواند در کاهش هزینه‌ها نقش مهمی را ایفا کند. یک شرکت هوایی به دلیل سرمایه‌گذاری کلان در این صنعت نمی‌تواند بدون در نظر گرفتن ناوگان موجود و قیمت ناوگان مورد نظر برای خریداری اقدام به انتخاب قطب و طراحی شبکه قطب-اقمار نماید. در این مدل این تصمیمات متوالی به طور همزمان بهینه می‌گردد به جای اینکه به طور سستی، به طور جداگانه و پشت سر هم گرفته شود و باعث بروز مشکل گردد.

۲. ادبیات پژوهش

مسائل مکان‌یابی قطب در صنعت هوایی را با توجه به سه المان اصلی در شبکه قطب-اقمار (فرودگاه قطب، مسافر و شرکت هوایی) می‌توان به سه دسته اساسی تقسیم‌بندی نمود.

دسته اول به مسایلی می‌پردازد که فرودگاه قطب پس از بازطراحی شبکه به شکل قطب-اقمار با آن مواجه است مانند ظرفیت محدود قطب، ازدحام و اختلال در قطب. یانگ و همکاران یک مدل طراحی شبکه تصادفی دو مرحله‌ای را با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و اثرات ازدحام قطب ارائه

مربوط به شاخصه مطلوبیت سفر (دسته اول) در تحقیقات اخیر می‌پردازد.

۳. بیان مساله و فرمول‌بندی مدل

این مقاله یک مدل توسعه یافته دوهدفه را برای یک مسأله میانه مکان‌یابی با در نظر گرفتن رضایت مسافران را ارائه می‌کند. در این شبکه جریان مسافر برای هر گره (فرودگاه) مبدأ/مقصد توسط فرودگاه قطب که ظرفیت آن نامحدود می‌باشد سرویس‌دهی می‌شود. برخی از فرودگاه‌ها می‌تواند بعنوان قطب انتخاب شود و تعداد قطب‌های کل شبکه (p) برابر یک می‌باشد همچنین گره‌های غیر قطب می‌تواند تنها به یک گره‌های قطب اتصال یابد. در این مدل تابع هدف اول، هزینه‌های شرکت هوایی شامل هزینه‌های حمل و نقلی و هزینه‌های خرید هواپیما را کمینه می‌کند و تابع هدف دوم هزینه‌های متحمل شده به مسافر به دلیل تأخیر برنامه ریزی و تأخیر استفاده از شبکه قطب و اقمار را کمینه می‌نماید.

پرداخته می‌شود که به فراخور دید نویسنده به بحث در مواردی چون کمینه‌سازی تأخیرات ازدحام، زمان سرویس، زمان طی شده بین هر مبدأ-مقصد، زمان تأخیر و ... می‌پردازد. در گروه دوم، تابع هدف دارای شاخص‌های زیست محیطی است و به مباحث محیط زیستی در این حوزه مانند هزینه آلاینده‌گی، آلودگی صوتی، مصرف انرژی، گازهای گلخانه‌ای منتشرشده و ... می‌پردازد. گروه سوم به شاخص‌های اقتصادی و سرمایه‌گذاری می‌پردازد. این شاخص‌ها مانند تابع هدف اول از جنس هزینه می‌باشد ولی برخلاف آن، بر روی سایر هزینه‌های مکان‌یابی قطب چون هزینه استقرار تسهیلات قطب، کمینه‌سازی بیشینه هزینه، بیشینه‌سازی سود حمل‌ونقلی و .. متمرکز شده است. در بخش چهارم توابع هدف متفاوت چون ریسک سرمایه‌گذاری، اثرات اجتماعی قرار می‌گیرد. جدول (۱) تنها به بررسی منابع مختلف مدل‌های مکان‌یابی چندهدفه

جدول ۱. مرور مقالات مدل مکان‌یابی چند هدفه با ذکر توابع هدف

	مزایا	تعریف تابع هدف	نویسندگان
	از زمان سرویس را بعنوان یکی از شاخص‌های مطلوبیت استفاده شده است.	Min (SUM cost) Min (MAX service time)	(Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam et al. 2011) da Graça Costa, Captivo et al. (2008)
	بر روی قطب‌ها که در سیستم قطب-اقمار در معرض ازدحام است متمرکز می‌شود.	Min (SUM cost), Min (processing time of flow entering the hub)	da Graça Costa, Captivo et al. (2008)
Part A	سعی می‌کند تأخیرات بیش از حد را کاهش دهد	Min (SUM cost) Min (MAX Congestion delays)	(Köksalan and Soylyu 2010)
	از زمان سرویس بعنوان یکی از شاخص‌های مطلوبیت استفاده شده است.	Min(Service time), Min (Max Service time)	(Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam et al. 2011)
	زمان سفرهای نامعقول و بیش از حد را کاهش می‌دهد.	Min (SUM cost), Min (MAX transportation time between each pair of O-D)	(Mohammadi, Tavakkoli-Moghaddam et al. 2016) (Mirzaei and Bashiri 2010) (Rahimi, Tavakkoli-Moghaddam et al. 2016)

مدل مکان‌یابی چندهدفه فرودگاه‌های مسافربری قطب با در نظر گرفتن رویکرد رضایت مسافر

تعریف تابع هدف	مزایا	نویسندگان
Min (SUM transportation and installation costs), Min (weighted sum of waiting, tardiness, and earliness times)	زمان تأخیر، زودرسی و حتی دیررسی را به عنوان امتیاز منفی در مدل اعمال می‌کند.	(Ghodratnama, Tavakkoli-Moghaddam et al. 2015)
Min (the total cost) Min (congestion costs)	کل تأخیر در قطب‌ها را به واحد مالی تبدیل می‌کند.	(Ghodratnama, Tavakkoli-Moghaddam et al. 2015)
Min (total cost) Min (total transportation time including transportation time, operation time at hub nodes and transportation time).	همه زمان‌های سپری شده هم در قطب‌ها و هم در لینک‌ها را با هم در نظر می‌گیرد.	(Tavakkoli-Moghaddam and Sedehzadeh 2014)
Min (current investment costs) Min (Maxtransportationtime between each origin-destination pair)	به هزینه‌های سرمایه‌گذاری که جز هزینه‌های کلان در سیستم قطب-اقمار است تمرکز دارد.	(Mohammadi, Jolai et al. 2013)
Min (total transportation cost) Min (total waiting time)	زمان معطلی در قطب‌ها را در نظر می‌گیرد.	(Geramianfar, Pakzad et al. 2013)

قبل از معرفی مدل، یک توضیح از مجموعه‌ها، اندیس‌ها، پارامترهای ورودی و متغیرهای تصمیم مربوط به مدل ارائه می‌گردد.

۳-۱ تعاریف فرمول ریاضی مدل

• مجموعه‌ها/اندیس‌ها/پارامترهای ورودی

i, j, k	اندیس گره‌های شبکه
s	اندیس سرویس مسیری که متصل شده به قطب
l	اندیس ضریب بار مرتبط با سرویس مسیر
N	مجموعه گره‌های شبکه
N_1	مجموعه گره‌های با پتانسیل قطب شدن
S	مجموعه سرویس‌های مسیر متصل به قطب (سرویس کوتاه $d=1$ ، سرویس متوسط $d=2$ و سرویس بلند $d=3$)
L	مجموعه ضریب بار سرویس مسیر مرتبط (ماکسیمم ظرفیت سرویس $SL=1$ ، ظرفیت نیمه سرویس $SL=2$ ، کمینه ظرفیت سرویس $SL=3$)
ρ_l	ضریب بار سرویس S
h_{ij}	جریان تقاضا از مبدأ i به مقصد j (مسافر)
C_{ij}^s	هزینه پرواز از گره i به گره j با سرویس S

CP^s	هزینه خرید هواپیما سرویس S
q^s	حداکثر ظرفیت هواپیما سرویس S
δ_{ij}^a	یک پارامتر باینری ورودی، در حالتی که پرواز از گره i به گره j از نوع a است برابر یک می‌باشد (کوتاه $a=1$ ، متوسط $a=2$ ، بلند $a=3$)
VOT_{ij}	ارزش زمان سفر مسافرانی که تمایل به سفر از گره i به گره j دارند
t_{ij}	زمان سفر از گره i به گره j
F_{ij}	یک فرکانس مطلوب از گره i به گره j به منظور اینکه فرکانس مورد نظر رقابتی باشد
γ^s	بیشینه ساعت پروازی که یک هواپیما با s می‌تواند انجام دهد
n^s	تعداد هواپیماهایی که شرکت هوایی تحت مالکیت دارد
M	یک عدد مثبت بزرگ، کمترین مقدار برای این پارامتر در مدل دو برابر تعداد گره‌ها می‌باشد

• متغیرهای تصمیم

X_k	متغیر باینری، اگر گره k قطب باشد $X_k = 1$ و گرنه $X_k = 0$
Z_{ik}^{ls}	تعداد پروازهای انجام شده با سرویس s با ضریب بار l از گره غیرقطبی i به گره قطب k
Z'_{kj}^{ls}	تعداد پروازهای انجام شده با سرویس s با ضریب بار l از گره قطبی k به گره غیرقطب j
f_{ij}	فرکانس از گره مبدأ i به گره مقصد j
SD_{ij}	تأخیر برنامه‌ریزی بین گره مبدأ i به گره مقصد j
n^s	تعداد هواپیماهایی که شرکت هوایی برای سرویس s نیاز دارد
n_{new}^s	تعداد هواپیماهایی که شرکت هوایی برای سرویس s می‌بایست خریداری کند

۳-۲ فرمول ریاضی مدل

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} C_{ik}^s Z_{ik}^{ls} q^s + \sum_{k \in N} \sum_{j \in N} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} C_{kj}^s Z'_{kj}^{ls} q^s + \sum_{s \in S} n_{new}^s CP^s \quad (1)$$

$$\text{Min} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, i \neq j} \sum_{k \in N_1} ((t_{ik} + t_{kj}) - t_{ij}) X_k VOT_{ij} h_{ij} + \sum_{i \in N} \sum_{k \in N} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} SD_{ij} X_k VOT_{ij} h_{ij} \quad (2)$$

Subject to

$$\sum_{k \in N_1} X_k = 1 \quad (3)$$

$$Z_{ik}^{ls} \leq M \times X_k \quad \forall i \in N, \forall k \in N_1, \forall s \in S, \forall l \in L \quad (4)$$

$$Z'_{kj}^{ls} \leq M \times X_k \quad \forall i \in N, \forall k \in N_1, \forall s \in S, \forall l \in L \quad (5)$$

$$\sum_{k \in N_1} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} \rho_l Z_{ik}^{ls} q^s = \sum_i h_{ij} \quad \forall i \in N \quad (6)$$

$$\sum_{k \in N_1} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} \rho_l Z'_{kj}^{ls} q^s = \sum_i h_{ij} \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{s \in (S^1 \cup S^2)} Z_{ik}^{ls} \delta_{ik}^3 = 0 \quad \forall i \in N, k \in N_1 \quad (8)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{s \in (s^1 \cup s^2)} z_{ik}^{ls} \delta_{ik}^3 = 0 \quad \forall j \in N, k \in N_1 \quad (9)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{s \in S^1} z_{ik}^{ls} \delta_{ik}^2 = 0 \quad \forall i \in N, k \in N_1 \quad (10)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{s \in S^1} z_{ik}^{ls} \delta_{ik}^2 = 0 \quad \forall j \in N, k \in N_1 \quad (11)$$

$$f^{ij} \leq \sum_{k \in N_1} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} z_{ik}^{ls} \quad \forall i, j \in N \quad (12)$$

$$f^{ij} \leq \sum_{k \in N_1} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} z_{ik}^{ls} \quad \forall i, j \in N \quad (13)$$

$$f^{ij} \geq \sum_{k \in N_1} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} z_{ik}^{ls} - \frac{\sum_{j'} h_{ij'}}{q^1 p^4} (1 - d_{ij}) \quad \forall i, j \in N \quad (14)$$

$$f^{ij} \geq \sum_{k \in N_1} \sum_{s \in S} \sum_{l \in L} z_{kj}^{ls} - \frac{\sum_{j'} h_{ij'}}{q^1 p^4} (1 - d'_{ij}) \quad \forall i, j \in N \quad (15)$$

$$d_{ij} + d'_{ij} = 1 \quad \forall i, j \in N \quad (16)$$

$$f^{ij} \geq F_{ij} \quad \forall i, j \in N \quad (17)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{l \in L} \sum_{k \in N_1} z_{ik}^{ls} t_{ik} + \sum_{i \in N} \sum_{l \in L} \sum_{k \in N_1} z_{kj}^{ls} t_{kj} = n^s \gamma^s \quad \forall s \in S \quad (18)$$

$$n^s - n^{s'} = n_{new}^s \quad \forall s \in S \quad (19)$$

$$n^s \geq n_{new}^s \quad \forall s \in S \quad (20)$$

$$SD_{ij} = -122f^{ij} + 1340 \quad \text{if } f^{ij} \leq 12 \quad (21)$$

$$SD_{ij} = -0.57f^{ij} + 81 \quad \text{if } f^{ij} > 12 \quad (22)$$

$$X_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in N_1 \quad (23)$$

$$z_{ik}^{ls}, z_{ik}^{ls}, f^{ij}, SD_{ij}, n_{new}^s, n_{new}^s \geq 0 \quad \forall i, j, k \in N, s \in S, i \neq j, \quad (24)$$

محدود می‌کند که فقط و فقط یک قطب در شبکه انتخاب گردد. معادله (۴) و (۵) اجبار می‌کند که تنها در صورتی گره i و j به گره قطبی k اختصاص بیابند که گره k به عنوان قطب شناخته شده باشد. معادله (۶) و (۷) اطمینان می‌یابد که تمامی جریان تقاضا از گره مبدأ i به گره مقصد j در شبکه برقرار است. معادله (۸) و (۹) یک محدودیت بُرد را ارائه می‌کند که اجازه نمی‌دهد که هیچ پرواز با هواپیما کوتاه بُرد و متوسط بُرد برای مسافت‌های با بُرد بلند از گره غیرقطبی به گره قطب و یا بالعکس انجام شود همچنین معادله (۱۰) و (۱۱) یک محدودیت بُرد را ارائه می‌کند که اجازه نمی‌دهد که هیچ پرواز با هواپیما کوتاه بُرد برای مسافت‌های با برد متوسط از گره

معادله (۱) اولین تابع هدف مسأله می‌باشد که هزینه‌های شرکت هوایی در شبکه قطب-اقمارا در سه بخش کمینه می‌کند. اولین و دومین بخش مرتبط با هزینه‌های عملیاتی شرکت هوایی برای فراهم نمودن سرویس حمل و نقلی برای جریان تقاضا به واسطه گره قطب می‌باشد. سومین بخش مربوط به هزینه‌های خرید ناوگان نو برای شرکت هوایی می‌باشد. معادله (۲) دومین تابع هدف مسأله است که هزینه زمانی مسافران را کمینه می‌کند که شامل دو بخش است. بخش اول اختلاف زمان سفر مستقیم و زمان سفر از طریق قطب و بخش دوم زمان انتظار مسافران برای دریافت سرویس از مبدأ گره i به مقصد گره j از طریق گره قطب k است. معادله (۳)

اول و دوم مدل می‌باشد که به نوعی مرز پایین و بالا تابع محسوب میشوند. (Mausser, 2006)

۴. تعریف پارامترهای مدل

مدل دو هدفه پیشنهاد شده برای حل نیاز به داده‌ها و اطلاعاتی در حوزه صنعت هوایی و داده‌های مرتبط با مطالعه موردی خود دارد در این بخش به اختصار به معرفی و نحوه جمع‌آوری این داده‌ها با توجه به مطالعات پیشین پرداخته می‌شود.

۴-۱ حداکثر بُرد اسمی هواپیما

حداکثر بُرد اسمی بیشینه فاصله نشست و برخاست یک هواپیما می‌باشد در حالتی که با حداکثر تعداد مسافر و بار همراهش پرواز می‌کند (ضریب بار ۱۰۰ درصد). این مسافت حداکثر بُرد یک هواپیما نیست بلکه با کاهش یا افزایش بار مفید هواپیما می‌تواند تغییر کند. بُرد بیشینه اسمی برای هواپیماهای مختلف، متنوع می‌باشد. (Ashford et al., 2011) هواپیماها براساس بُرد بیشینه به گروه‌هایی مانند کوتاه بُرد، متوسط بُرد، کوتاه/متوسط بُرد، بلند بُرد، و مافوق بلند بُرد دسته‌بندی می‌شود. این پژوهش هواپیماهایی با بُرد کمتر از ۲۰۰۰ کیلومتر را کوتاه بُرد، از ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ کیلومتر را متوسط بُرد و بین ۵۰۰۰ و ۸۰۰۰ کیلومتر بلندبُرد در نظر می‌گیرد.

۴-۲ متوسط زمان پرواز هواپیما

فاز کروز یک مرحله از پرواز پس از برخاستن و قبل از نشست هواپیما می‌باشد. برای هواپیماهای مسافربری فاز کروز عمده یک پرواز را در بر می‌گیرد و عملکرد بهینه هواپیما نیز در سرعت کروز اتفاق می‌افتد. برای تعیین میانگین زمان پروازی، مسافت بین هر مبدأ/مقصد بر سرعت کروز هواپیما تقسیم می‌گردد. با توجه به بررسی انجام شده سرعت کروز برای هواپیما مختلف تفاوت چندانی نمی‌کند بنابراین سرعت کروز برای هواپیما بلند بُرد، متوسط بُرد و کوتاه بُرد برابر ۸۰۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته می‌شود.

غیرقطبی به گره قطب و یا بالعکس انجام شود. معادله (۱۲)، (۱۳)، (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) حداقل فرکانس بین دو مسیر برای ارتباط i و j را محاسبه می‌کند (از گره غیرقطب به گره قطب و گره قطب به گره غیر قطب). معادله (۱۷) یک محدودیت فرکانس است که مجبور می‌کند که فرکانس بین هر گره مبدأ و گره مقصد یک فرکانس قابل قبول، رقابتی و مطلوب باشد. معادله (۱۸) تعداد هواپیماهای بلندبُرد، متوسط بُرد و کوتاه بُرد برای کل شبکه را محاسبه می‌کند. معادله (۱۹) و (۲۰) تعداد هواپیماهای بلندبُرد، متوسط بُرد و کوتاه بُرد برای کل شبکه را که باید خریداری شود را محاسبه می‌کند. معادله (۲۱) و (۲۲) تأخیر برنامه‌ریزی بین گره i و گره j را با استفاده از فرکانس محاسبه شده در مدل بصورت یک معادله خطی در واحد ساعت برآورد می‌کند. معادله (۲۳) نوع متغیرهای تصمیم که باید باینری و معادله (۲۴) متغیرهای تصمیم مثبت را تعریف می‌کند.

در این پژوهش برای حل مسأله دوهدفه از روش مجموع وزن‌دار نرمال شده استفاده شده است در این روش دو تابع هدف با هم ترکیب شده و تابع هدف جدید به صورت معادله (۲۵) بهینه می‌گردد.

$$\begin{aligned} \min & \\ = & w_1 \frac{Obj_1 - Obj_{1ideal}}{Obj_{1nadir} - Obj_{1ideal}} \\ & + w_2 \frac{Obj_2 - Obj_{2ideal}}{Obj_{2nadir} - Obj_{2ideal}} \end{aligned} \quad (25)$$

در این تابع هدف تکی w_1, w_2 ضرایب وزنی که بین ۰ تا ۱ متغیر و Obj_1, Obj_2 توابع هدف مدل می‌باشند. در حالت ایده آل، وزن هر تابع هدف بر اساس دانش ذاتی مسئله توسط تصمیم‌ساز تعیین می‌شود. با این حال، از آنجا که توابع هدف می‌توانند جنبه‌های مختلفی داشته باشند، نرمال‌سازی اهداف برای به دست آوردن یک راه حل بهینه برای مدل مورد نظر مطابق با وزن‌های تعیین شده با گام ۰،۱ انجام می‌شود. $Obj_{2nadir}, Obj_{2ideal}$ نقاط اوج بالا و پایین تابع هدف

۳-۴ حداکثر ساعات پرواز هواپیما در سال

عواملی چون زمان برگشت، کنترل نگهداری (کنترل‌های A,B,C,D)، وضعیت آب و هوایی و تعداد خلبان‌های شرکت هوایی باعث می‌شود که در پروازهای هواپیما وقفه اتفاق بیافتد و ساعت پروازی عملی هواپیما در سال محدود گردد. میانگین زمان برگشت با توجه به اندازه هواپیما بین ۳۰-۶۰ دقیقه می‌باشد (Van Landeghem and Beuselinck, 2002). کنترل نگهداری و کنترل A در هر ۶۵ ساعت پروازی اتفاق می‌افتد، کنترل B در هر ۳۰۰ تا ۶۰۰ ساعت پروازی عمل می‌کند و کنترل C و D بصورت سالانه انجام می‌شود (Sriram and Haghani, 2003). بر همین اساس میانگین ساعت پروازی برای هواپیماهای بلند بُرد، متوسط بُرد و کوتاه بُرد ۴۸۰۰، ۵۴۰۰ و ۵۰۰۰ ساعت در سال در نظر گرفته شده است.

۴-۴ حداکثر ظرفیت صندلی هواپیما

یکی از مهمترین مشخصه‌های هواپیما بیشینه ظرفیت صندلی می‌باشد که بین انواع مختلف هواپیماها (بلند بُرد، متوسط بُرد و کوتاه بُرد) همچنین مدل‌های متفاوت یک خانواده هواپیما متنوع است. در این پژوهش میانگین بیشینه ظرفیت نشستن هواپیما در هر گروه بُرد پروازی (بلند بُرد، متوسط بُرد و کوتاه بُرد) بعنوان ظرفیت شناخته می‌شود و برابر است با ۳۰۰، ۱۵۰ و ۸۰ صندلی (Pels, 2008).

۵-۴ هزینه عملیاتی هواپیما برای هر کیلومتر

هزینه‌های عملیاتی بطور مستقیم و غیر مستقیم از طول مسیر، استفاده هواپیما، سایز ناوگان و هزینه‌های خدمه و دیگر موضوعات تأثیر می‌پذیرد. بعلاوه، مشخصات طراحی هواپیما مانند سایز ناوگان، سرعت هواپیما، سن هواپیما و خدمه می‌تواند بر ساختار هزینه‌ای شرکت هوایی اثرگذار باشد (Mark Camilleri, 2018). در این پژوهش، حداقل هزینه عملیاتی به ازای هر صندلی کیلومتر برای هواپیماهای بلند بُرد،

متوسط بُرد و کوتاه بُرد برابر با ۴، ۸ و ۱۰ دلار در نظر گرفته شده است.

۴-۶ فرکانس رقابتی

برای اینکه یک شرکت هوایی به جذب مسافر در یک بازار جدید اقدام نماید می‌بایست فرکانس مطلوب و رقابتی نسبت به سایر شرکت‌های هوایی ارائه دهد. این فرکانس برای هر مبدأ/مقصد براساس سطح سرویس‌دهی رقبا و سیاست شرکت هوایی برای آن مسیر پروازی می‌تواند متفاوت باشد. این پژوهش برای ساده‌سازی از یک حداقل فرکانس استفاده کرده است این فرکانس، حداقل فرکانس ممکن برای جابجایی مسافر برای یک مسیر پروازی با استفاده از هواپیما بلند بُرد با ظرفیت کامل می‌باشد.

۴-۷ ارزش زمان مسافران

پارامتر ارزش زمان سفر قابلیت تبدیل زمان سفر به واحدهای پولی را فراهم می‌کند در این پژوهش برای تعیین ارزش زمان مسافران از روش تولید-محور^۷ استفاده می‌شود این روش بیان می‌کند که کاهش زمان سفر سبب افزایش فرصت و زمان در تولید کالا می‌شود و در نتیجه سبب رشد تولید کالا در یک کشور می‌شود. در این روش ارزش زمان سفر وابسته به تولید ناخالص در هر ساعت است. با این استدلال در محاسبه ارزش زمان سفر یک ساعت، می‌توان تولید ناخالص داخلی را بر تعداد ساعت کار سالیانه یک فرد که در تولید نقش دارند تقسیم کرد و ارزش زمان را بدست آورد (tarski, 1989). رابطه (۲۶) شکل ریاضی این روش را نشان می‌دهد.

$$VOT_{P-M} = \frac{GDP}{A \times P} \quad (26)$$

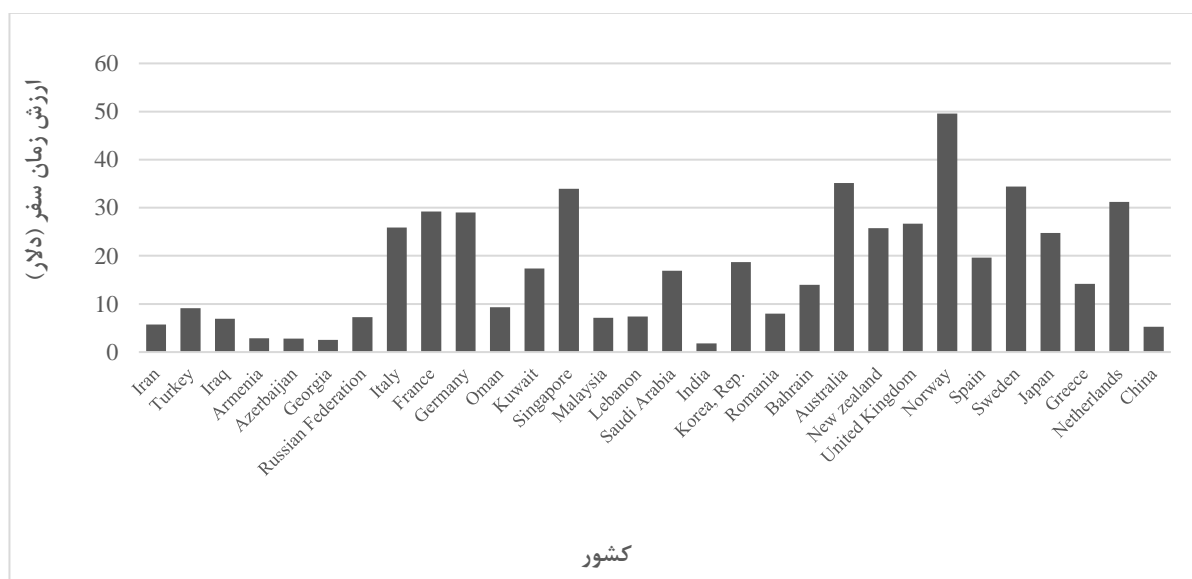
در این رابطه GDP تولید ناخالص داخلی، A متوسط تعداد ساعات کاری سالیانه شاغلین، P متوسط تعداد افراد شاغل و اثرگذار در فرآیند تولید می‌باشد. در این پژوهش از داده‌های بانک جهانی برای پارامترهای GDP و P استفاده شده است و متوسط تعداد ساعات کاری سالیانه ۲۹۲۰ ساعت در نظر گرفته

ترازنامه‌های شرکت‌های هوایی برای ۱۰ تا ۱۵ سال از طریق هزینه‌های استهلاک و همچنین بدهی‌های بلند و هزینه‌های سود اثر گذارد. در این تحقیق برای تعیین قیمت هواپیما بُرد بلند، متوسط بُرد و کوتاه بُرد از میانگین قیمت نو آن در کارخانه سازنده (کارخانه هواپیماسازی ایرباس و بوئینگ) استفاده شده است (List prices of Boeing and Airbus Aircraft, 2018).

شده است. شکل (۱) ارزش زمان سفر کشورهای مورد نظر را نشان می‌دهد.

۴-۸ میانگین هزینه خرید سالیانه هواپیما

تعیین ترکیب هواپیماهای به خدمت گرفته شده از لحاظ بُرد توسط شرکت هوایی و برنامه‌ریزی ناوگان آن یکی از تصمیمات بلند مدت و استراتژیک شرکت هوایی است که می‌تواند برای دهه‌ها بر عملکرد شبکه تأثیر گذارد. این سرمایه‌گذاری‌ها برای خرید هواپیما حتی می‌تواند بر



شکل ۱. ارزش زمان سفر کشورهای تحت پوشش شبکه قطب-اقمار

تاکسی‌وی، فضای گیت و محدودیت‌های باند فرودگاه مواجه نیست. همچنین شرکت هوایی قصد دارد از ناوگان موجود نیز در شبکه قطب استفاده کند و با انجام برنامه‌ریزی ناوگان، برآوردی از خرید ناوگان جدید با توجه بازار مورد نظر خود داشته باشد. از سوی دیگر با توجه به اینکه بعنوان یک شرکت هوایی جدید ورود می‌بایست با سایر شرکت‌های هوایی رقابت کند یک حداقل فرکانس (فرکانس رقابتی) را برای پروازها در نظر می‌گیرد و از سوی دیگر برای بالابردن سطح رضایت‌مندی و آسایش مسافران قصد دارد کمترین تأخیر را به آنها تحمیل نماید. بر این اساس برای مدل فوق، اطلاعات مورد نیاز به شرح زیر ارائه شده است.

۵. مطالعه موردی

برای آزمودن مدل دو هدفه پیشنهاد شده از داده‌های واقعی استفاده شده است هدف این مدل انتخاب یک قطب بین‌المللی و انجام برنامه‌ریزی ناوگان برای پروازهای بین‌المللی یک شرکت‌هوایی از میان فرودگاه دارای پتانسیل قطب شدن در ایران است. در واقع یک شرکت هوایی ایرانی که خدمات مسافربری مبدا/مقصد را ارائه می‌دهد با توجه به موقعیت جغرافیایی منطقه خاورمیانه قصد دارد جهت گسترش حوزه نفوذ و سهم بازار مسافر به سیستم قطب-اقمار روی آورد و در این راستا، شرکت هوایی تنها می‌تواند فرودگاه‌هایی را بعنوان قطب انتخاب نماید که با محدودیت‌هایی مانند طول

2017) برداشت گردید سپس رشد تولید ناخالص ۳۴ کشورهای مورد نظر پیش‌بینی شد و از میانگین رشد ناخالص کشورهای مبدأ و مقصد بعنوان معیار رشد تقاضای سفر در سال‌های آینده استفاده گردید. لازم به ذکر است برخی از درایه‌های این ماتریس بدلیل فواصل کم این کشورها و در نتیجه تعداد کم سفرهای هوایی مسافران صرف نظر شد. در این پژوهش پایتخت کشورها بعنوان مبدأ و مقصد سفر در نظر گرفته شد ولی برای کشور ایران که قبل از انتخاب قطب هنوز مبدأ و مقصد سفر مشخص نیست به این صورت عمل شد که ماتریس جریان تقاضا هر بار با فرض قطب بودن یکی از فرودگاه‌های کاندید تشکیل شد و مدل براساس این داده‌ها حل گردید سپس با تحلیل جبهه فرانت فرودگاه‌های کاندید، پاسخ غالب تعیین شد. در شکل (۲) نقشه شماتیک کشورهای تحت پوشش در شبکه قطب-اقمار در نمایش می‌دهد همچنین در ضمیمه (A) لیست فرودگاه‌های کشورهای مورد نظر در مطالعه موردی آورده شده است.

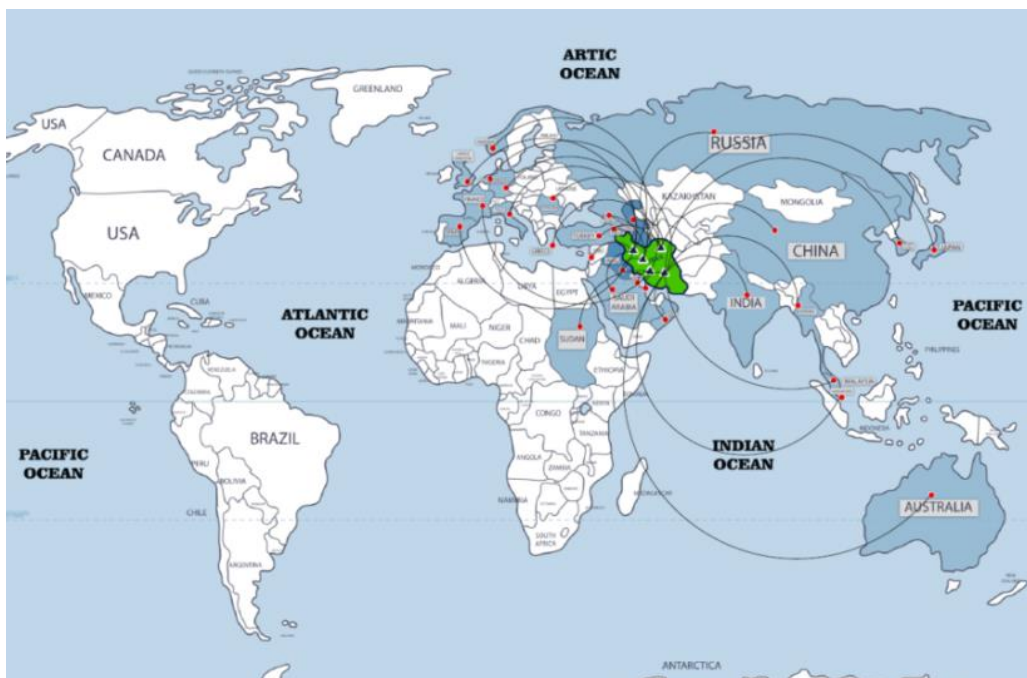
۱-۵ بازیگر مدل و تنوع و بُرد ناوگان شرکت

هوایی

در این پژوهش دو بازیگر شرکت هوایی (تابع هدف اول) و مسافران (تابع هدف دوم) در نظر گرفته شده است. در این مطالعه موردی از میان شرکت‌های هوایی، ایران ایر بعنوان بازیگر شرکت هوایی برگزیده شده است. این شرکت هوایی که یکی از قدیمی‌ترین شرکت‌های هوایی خاورمیانه است در حال حاضر دارای ۱۳ هواپیمای کوتاه بُرد، ۱۷ هواپیمای متوسط بُرد و ۳ هواپیمای بلند بُرد می‌باشد. (Iran Air, 2020).

۲-۵ ماتریس جریان مبدأ-مقصد

برای آزمایش مدل مورد نظر ماتریس جریان مسافر مبدأ/مقصد برای ۳۴ کشور آماده گردید معیار انتخاب این کشورها، مقدار جریان مسافر قابل توجه به/از ایران می‌باشد. عبارت دیگر اولویت اول شرکت هوایی پوشش دادن سفرهای بدون توقف از مبدأ یا به مقصد ایران می‌باشد. این ماتریس تقاضا برای سه مقطع زمانی ۲۰۲۰، ۲۰۲۵ و ۲۰۳۰ آماده شد. برای این منظور داده‌های جریان مسافر از سالنامه توریسم (UNWT O,)



شکل ۲. نقشه شماتیک کشورهای تحت پوشش در شبکه قطب-اقمار

۶. تحلیل داده‌ها

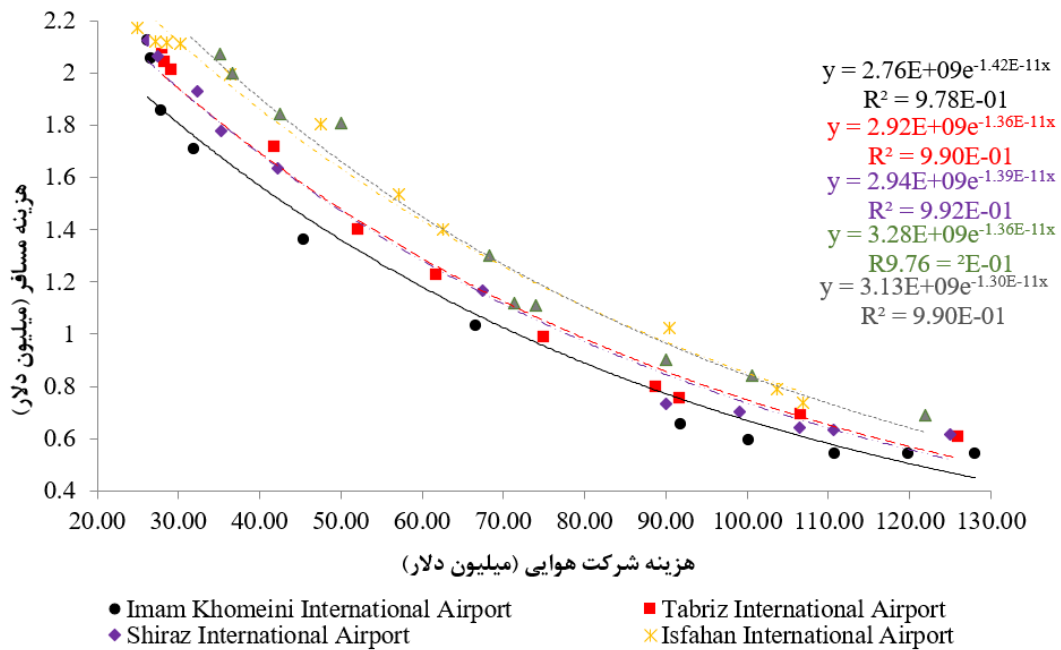
با حل کردن مدل مورد نظر، برای دوره زمانی ۲۰۲۰ فرودگاه بین‌المللی امام خمینی به عنوان فرودگاه قطب مدل معرفی گردید. ولی برای بررسی دقیق‌تر و همچنین انجام تحلیل حساسیت، مکان قطب و همچنین ضرایب وزنی به صورت ثابت در نظر گرفته شد و مدل حل گردید. ۱۱ سناریو برای سیستم وزن‌دهی برای ضرایب وزنی مختلف W_1 از ۰ تا ۱ با گام‌های ۰٫۱ و ۰٫۵ سناریو برای مکان فرودگاه قطب (۵ فرودگاه کاندید) انجام شد که در مجموع ۵۵ سناریو در نظر گرفته شد. نتایج خروجی حل ۵۵ حالت در شکل (۳) آورده شده است. همانطور که در شکل مشخص است جبهه پارتو فرودگاه شیراز و فرودگاه تبریز تقریباً یکسان هستند که می‌تواند به عنوان جایگزین اول فرودگاه قطب در نظر گرفته شود و همچنین جبهه پارتو فرودگاه اصفهان و فرودگاه مشهد مشابه می‌باشند که می‌تواند به عنوان جایگزین دوم مد نظر قرار گیرد. برای جبهه پارتو امام خمینی نیز چندین تابع خطی برآورد شده است که براساس آن که چه درصدی از هزینه‌های مسافر (تابع هدف دوم) کاهش بیابد برای افزایش درصدی در مقدار هزینه‌های شرکت هوایی (Z_1^*). شرایط زیر تابع چند قطعه‌ای برای جبهه پارتو را ارائه می‌کند.

$$\frac{\partial Z_1}{\partial Z_2} = \begin{cases} -0.152 (R^2 = 1.00) & \text{if } 00.0\% \leq \frac{\Delta Z_1}{Z_1^*} \leq 06.8\% \\ -0.026 (R^2 = 1.00) & \text{if } 06.8\% \leq \frac{\Delta Z_1}{Z_1^*} \leq 73.5\% \\ -0.015 (R^2 = 1.00) & \text{if } 73.5\% \leq \frac{\Delta Z_1}{Z_1^*} \leq 251\% \\ -0.005 (R^2 = 1.00) & \text{if } 251\% \leq \frac{\Delta Z_1}{Z_1^*} \leq 324\% \\ -00.00 (R^2 = 1.00) & \text{if } 324\% \leq \frac{\Delta Z_1}{Z_1^*} \leq 390\% \end{cases}$$

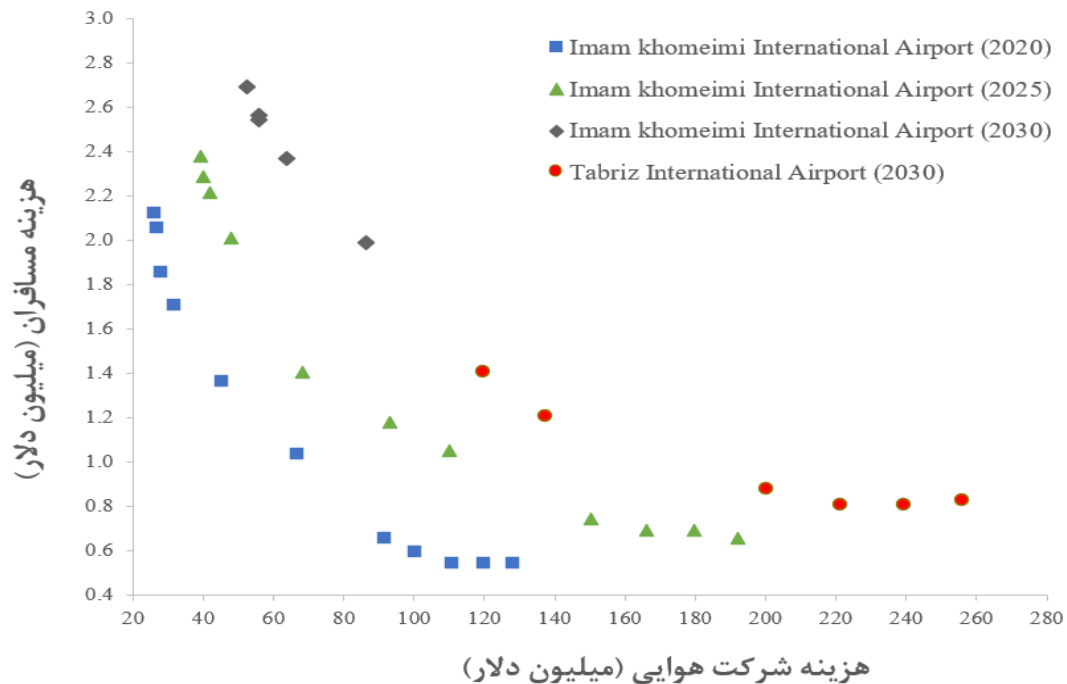
همانطور که نتایج نشان می‌دهند حرکت بیشتر از ۶٫۸ درصدی از حل بهینه برای هزینه‌های شرکت هوایی یک افزایش چشمگیری را در تابع هدف اول در پی خواهد داشت. بنابراین فاصله مطلوب از حل بهینه برای هزینه‌های شرکت هوایی باید بین صفر تا ۶٫۸ درصد باشد. این فاصله، هزینه‌های متحمل شده به مسافر را حدوداً ۱۵ درصد افزایش می‌دهد.

شکل (۴) جبهه فرانت مدل پیشنهاد شده برای وزن‌های مختلف توابع هدف سیستم و برای سه دوره زمانی ۲۰۲۰، ۲۰۲۵ و ۲۰۳۰ را نشان می‌دهد با توجه به جبهه فرانت برای دو دوره ۲۰۲۰ و ۲۰۲۵ فرودگاه بین‌المللی امام خمینی تهران به عنوان فرودگاه قطب انتخاب گردید ولی در دوره ۵ ساله سوم برای برخی از وزن‌ها فرودگاه تهران و برای برخی دیگر از وزن‌ها فرودگاه تبریز به عنوان فرودگاه قطب تعیین شد. در چنین شرایطی شرکت هوایی با یک چالش مهم روبروست که بین انتخاب بهینه‌ترین گزینه در شرایط کنونی و آینده کدام را انتخاب کند. این تصمیم استراتژیک می‌تواند به سیاست‌های کلی شرکت هوایی و بررسی سود و زیان کوتاه مدت و بلند مدت هر انتخاب بستگی داشته باشد. به عنوان مثال انتخاب فرودگاه تبریز در شرایط فعلی می‌تواند آینده‌نگری مناسبی را برای سال‌های آینده باشد ولی از سوی دیگر در دوره ۱۰ ساله اول شرکت هوایی نمی‌تواند هزینه‌های خود را در بهینه‌ترین حالت ممکن نگه دارد که در واقع نوعی ضرر است ولی انتخاب تهران برای شرکت هوایی منطقی‌تر به نظر می‌رسد زیرا شرکت هوایی ترجیح می‌دهد برای حالتی که تابع هدف اول اولویت بیشتری دارد (تابع هدف مرتبط با شرکت هوایی) برنامه‌ریزی کند که در این موارد در هر سه دوره ۵ ساله فرودگاه بین‌المللی امام خمینی تهران انتخاب برتر است.

مدل مکان‌یابی چندهدفه فرودگاه‌های مسافری قطب با در نظر گرفتن رویکرد رضایت مسافر



شکل ۳. مقایسه جبهه پارتو برای فرودگاه‌های مختلف انتخاب شده بعنوان فرودگاه قطب



شکل ۴. جبهه فرانت برای سه دوره زمانی ۲۰۲۰، ۲۰۲۵، ۲۰۳۰

نشان می‌دهد. با توجه به این شکل با کاهش وزن تابع هدف اول (هزینه‌های شرکت هوایی)، تعداد کل هواپیماهای کوتاه برد، متوسط برد و بلند برد افزایش می‌یابد. بنابراین اگر شرکت

شکل (۵) تعداد هواپیماهای مورد نیاز (کوتاه برد، متوسط برد و بلند برد) در حالت انتخاب فرودگاه امام خمینی (ره) به عنوان قطب در دوره زمانی ۲۰۲۰ برای درصدهای وزنی مختلف را

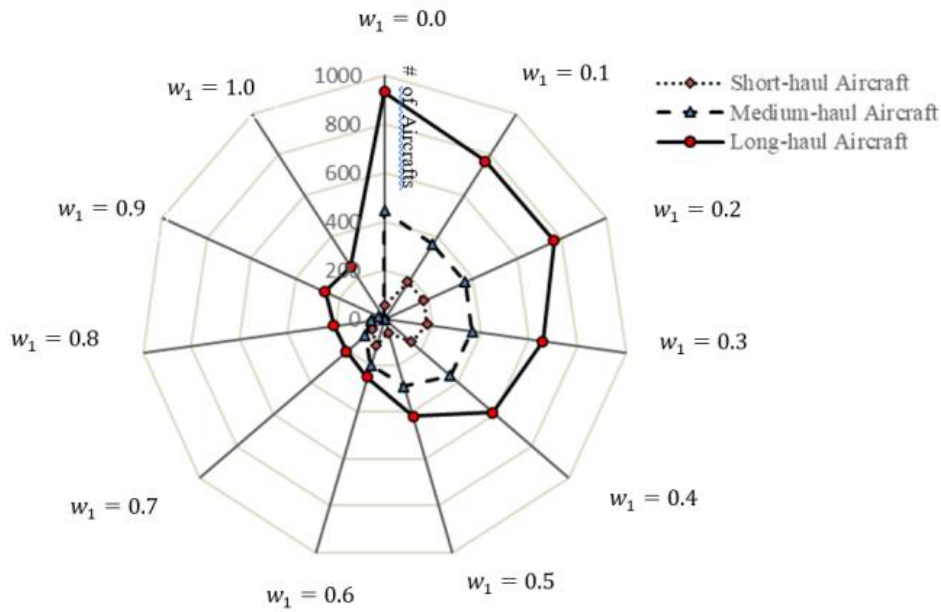
یا باید بلا استفاده بماند و یا می‌بایست در مسیرهای ناسازگار (مسیرهای کوتاه بُرد و متوسط بُرد) بکار گرفته شود که هر دو این راهکارها ضرر هنگفتی را به شرکت هوایی وارد می‌کند. حال یک شرکت هوایی با آگاهی از تعداد ناوگان مورد نیاز در سال‌های آتی می‌تواند تصمیم‌گیری درستی داشته باشد مثلاً می‌تواند برای سال ۲۰۲۵ تنها ۴۶ هواپیما بلند بُرد تدارک ببیند و برای کمبود ناوگان بلند بُرد یا هواپیما اجاره نماید یا از شرکت‌های هوایی دیگر کمک بگیرد و بدین ترتیب برنامه‌ریزی ناوگان را برای افق‌های زمانی بلند مدت بهینه نماید.

به منظور بررسی مدل از منظر میزان ظرفیت صندلی استفاده شده ناوگان در ضرایب وزنی مختلف، پارامتر متوسط ضریب بار تعریف گردید. این پارامتر در واقع یک میانگین وزنی از ظرفیت صندلی کل ناوگان استفاده شده (کوتاه بُرد، متوسط بُرد و بلند بُرد) می‌باشد. در صورتی که همه ناوگان با ظرفیت کامل (بدون صندلی خالی) به پرواز در آیند این ضریب عدد یک خواهد بود و با کاهش ظرفیت مورد استفاده هواپیما (افزایش صندلی خالی در پروازها) این عدد به سمت صفر میل خواهد کرد. همان‌طور که در شکل (۹) مشخص است با افزایش ضریب وزنی از صفر به سمت عدد ۱، (افزایش اولویت شرکت هوایی و کاهش اولویت مسافر) متوسط ضریب بار از ۰٫۲ به سمت ۱ میل می‌نماید. در واقع با افزایش ضریب وزنی (افزایش اولویت شرکت هوایی) بیشترین منفعت شرکت هوایی در این است که همه هواپیماهای خود را با ظرفیت کامل به پرواز در آورد که منجر به تأخیر برای مسافر خواهد شد و بالعکس با کاهش ضریب وزنی (افزایش اولویت مسافر) هواپیما با ظرفیت نیمه پر خدمت‌رسانی خواهند کرد که در حالت اوج اولویت مسافر و نادیده گرفتن هزینه‌های شرکت هوایی (ضریب وزنی صفر) به طور میانگین هواپیما تنها با ۲۰ درصد ظرفیت پرواز می‌کند.

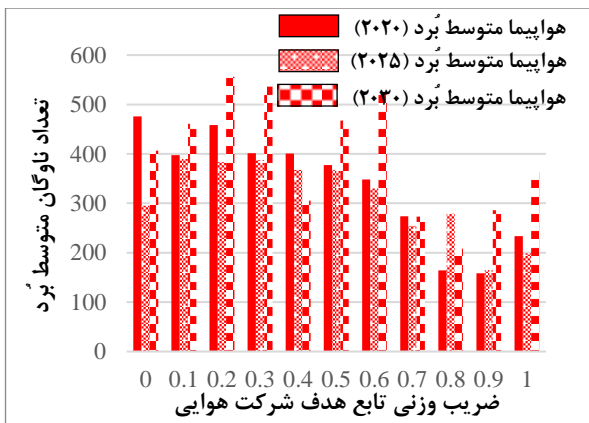
هوایی تصمیم به کاهش هزینه‌های مسافر بگیرد می‌بایست تعداد هواپیماهای ناوگانش را افزایش دهد. که این افزایش تعداد هواپیما برای هواپیماهای متوسط بُرد و بلند بُرد بیشتر صدق می‌کند.

اشکال (۶،۷،۸) برنامه‌ریزی ناوگان برای ۳ دوره زمانی و به ازای ضرایب وزن‌دهی متفاوت تابع هدف سیستم را نشان می‌دهد. اینکه شرکت هوایی بتواند کل ماتریس جایجایی مسافر در حضور رقبا به خود اختصاص بدهد امری محال است بنابراین با توجه به شرایط می‌تواند روی درصدی از این ماتریس تمرکز نماید و به همان نسبت نیز برنامه‌ریزی ناوگان را انجام دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل (۸) با افزایش ضریب وزن تابع هدف سیستم (تابع هدف شرکت هوایی) تعداد هواپیما بلند بُرد کاهش چشمگیری دیده می‌شود دلیل این امر قیمت هنگفت خرید یک هواپیما بلند بُرد نسبت به هواپیماهای متوسط بُرد (۱ به ۳) و کوتاه بُرد (۱ به ۱۵) است که به اولویت اول مدل تبدیل شده است. ولی در نمودارهای کوتاه بُرد و متوسط بُرد ارتباط معناداری در کاهش تعداد ناوگان دیده نمی‌شود. نکته حائز اهمیت تعداد ناوگان مورد نیاز در هر دوره زمانی است. خرید هواپیما یکی از گران‌ترین سرمایه‌گذاری‌ها برای شرکت‌های هوایی می‌باشد و شرکت هوایی سعی می‌کند بیشترین بهره را از ناوگان خریداری شده‌اش برای سال‌های متممادی ببرد. بنابراین نباید برنامه‌ریزی ناوگان بطوری باشد هواپیما خریداری برای سال‌های آینده بلا استفاده بماند. برای مثال تعداد هواپیما بلند بُرد برای وزن ۰٫۹ برای سال‌های ۲۰۳۰، ۲۰۲۵، ۲۰۲۰ به ترتیب ۱۷۸، ۲۶۰ و ۲۲۴ هواپیما می‌باشد. شرکت هوایی برای سال ۲۰۲۰ اقدام به خرید ۱۷۸ ناوگان بلند بُرد خواهد کرد و می‌داند برای سال ۲۰۲۵ با توجه به تقاضای پیش‌بینی شده آینده ۸۲ هواپیما بلند بُرد به ناوگان اضافه نماید. ولی در سال ۲۰۳۰ تنها نیاز به ۲۲۴ هواپیما بلند بُرد است و این بدان معناست که ۳۶ هواپیما خریداری شده

مدل مکان‌یابی چندهدفه فرودگاه‌های مسافربری قطب با در نظر گرفتن رویکرد رضایت مسافر

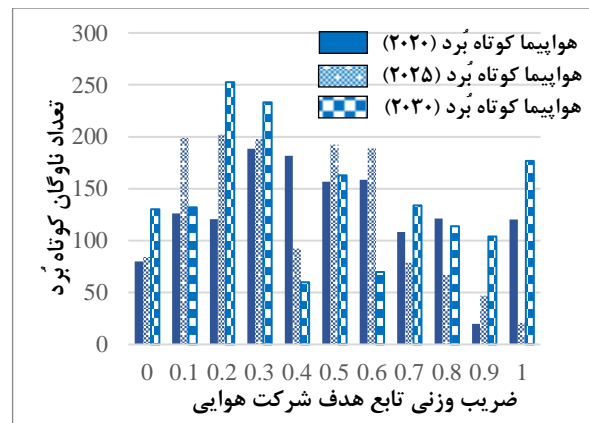


شکل ۵. تعداد هواپیماهای مورد نیاز (کوتاه برد، متوسط برد، بلند برد) برای ضرایب وزنی مختلف برای فرودگاه امام خمینی (ره)



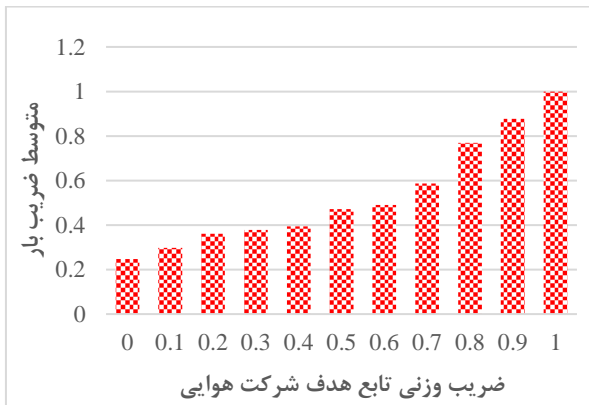
شکل ۷. تعداد هواپیماهای متوسط برد برای ضرایب وزنی مختلف تابع هدف سیستم

هدف سیستم



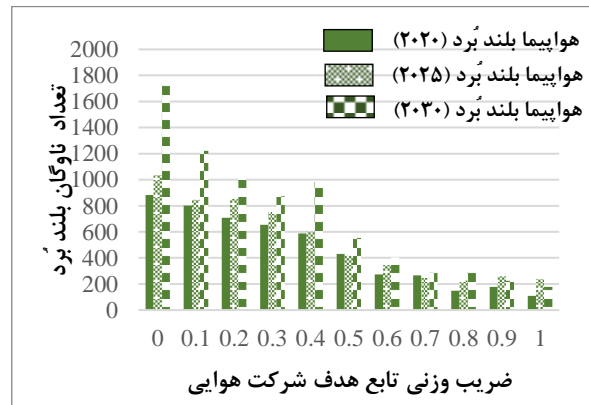
شکل ۶. تعداد هواپیماهای کوتاه برد برای ضرایب وزنی مختلف تابع هدف سیستم

هدف سیستم



شکل ۹. متوسط ضریب بار برای ضرایب وزنی مختلف تابع هدف سیستم

سیستم



شکل ۸. تعداد هواپیماهای بلند برد برای ضرایب وزنی مختلف تابع هدف سیستم

هدف سیستم

network design. Omega, 40(6), 927-939.

– Ashford, N.J., Mumayiz, S. & Wright, P.H. (2011). Airport engineering: planning, design, and development of 21st century airports: John Wiley & Sons.

– Atta, S. & Sen, G. (2021). A new variant of the p-hub location problem with a ring backbone network for content placement in VoD services. Computers & Industrial Engineering, 159, 107432.

– Bazargan, M. (2016). Airline operations and scheduling: Routledge.

– Carmona-Benítez, R.B., Nieto, M.R. & Miranda, D. (2017). An Econometric Dynamic Model to estimate passenger demand for air transport industry. Transportation Research Procedia, 25, 17-29.

– da Graça Costa, M., Captivo, M.E. & Clímaco, J. (2008). Capacitated single allocation hub location problem—A bi-criteria approach. Computers & Operations Research, 35(11), 3671-3695.

– Dai, W., Wandelt, S., Zhang, J. & Sun, X. (2021). Capacitated Air/Rail Hub Location Problem With Uncertainty: A Model, Efficient Solution Algorithm, and Case Study. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.

– Davari, S., Zarandi, M.F. & Turksen, I. (2013). The incomplete hub-covering location problem considering imprecise location of demands. Scientia Iranica, 20(3), 983-991.

– Eiselt, H.A. & Marianov, V. (2009). A conditional p-hub location problem with attraction functions. Computers & Operations Research, 36(12), 3128-3135.

– Annals of operations research, 86, 141-159.

فصلنامه مهندسی حمل و نقل / سال هفدهم / شماره دوم (۶۷) / زمستان ۱۴۰۴

۷. نتیجه گیری

این مطالعه یک مسأله چند هدفه تک اختصاصی را ارائه می‌کند. اولین تابع کل هزینه عملیاتی و خرید ناوگان (مرتبط با شرکت هوایی) و دومین تابع هدف تأخیر برنامه ریزی و تأخیر سفر (مرتبط به راحتی مسافر بعنوان استفاده کننده از شبکه) را بهینه می‌نماید. در این پژوهش پس از مکان‌یابی قطب و تخصیص گره‌های غیرقطب به قطب، نوع هواپیما (کوتاه بُرد، متوسط بُرد و بلند بُرد) و ضریب بار هواپیما برای مسیرهای پروازی مشخص می‌گردد و برنامه‌ریزی ناوگان برای سه دوره زمانی برای شبکه انجام می‌شود. براساس نتایج حاصل از حل مدل برای مطالعه موردی ایران، فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) به عنوان اولویت اول برای کوتاه مدت و فرودگاه تبریز و فرودگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) به عنوان اولویت دوم برای دوره بلند مدت به عنوان قطب انتخاب گردید. همچنین با افزایش ضریب وزن تابع هدف سیستم (تابع هدف شرکت هوایی) در تعداد هواپیما بلند بُرد نسبت به هواپیماهای متوسط بُرد و کوتاه بُرد کاهش چشمگیری دیده شد و متوسط ضریب بار به سمت یک (پرواز با ظرفیت کامل) متمایل گردید.

۸. پی‌نوشت‌ها

1. Economic of Scale
2. Full connected
3. Hub Location Problem
4. Economic of Density
5. Economic of Scope
6. Nadir and Utopia points
7. Production-based Method

۹. مراجع

– A320 Family Aircrafts (2020). Key figures <<https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family/a318.html>> (accessed October 20, 2020).

– Alumur, S.A., Kara, B.Y. & Karasan, O.E. (2012). Multimodal hub location and hub

183-202.

- Hu, L., Zhu, J.X., Wang, Y. & Lee, L.H. (2018). Joint design of fleet size, hub locations, and hub capacities for third-party logistics networks with road congestion constraints. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 118, 568-588.
- Köksalan, M. & Soylu, B. (2010). Bicriteria p-hub location problems and evolutionary algorithms. *INFORMS Journal on Computing*, 22(4), 528-542.
- Matos, T., Maia, F. & Gamboa, D. (2018). Improving traditional dual ascent algorithm for the uncapacitated multiple allocation hub location problem: a RAMP approach. In: *International Conference on Machine Learning, Optimization, and Data Science* (pp. 243-253): Springer.
- Mausser, H. (2006). Normalization and other topics in multi-objective optimization. In: *Proceedings of the Fields-MITACS Industrial Problems Workshop* (pp. 89-101).
- Mirzaei, M. & Bashiri, M. (2010). Multiple objective multiple allocation hub location problem. In: *Computers and Industrial Engineering (CIE), 2010 40th International Conference on* (pp. 1-4): IEEE.
- Mohammadi, M., Jolai, F. & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). Solving a new stochastic multi-mode p-hub covering location problem considering risk by a novel multi-objective algorithm. *Applied Mathematical Modelling*, 37(24), 10053-10073.
- Mohammadi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. & Rostami, R. (2011). A multi-objective imperialist competitive algorithm for a capacitated hub covering location problem.
- Farahani, R.Z., Hekmatfar, M., Arabani, A.B. & Nikbakhsh, E. (2013). Hub location problems: A review of models, classification, solution techniques, and applications. *Computers & Industrial Engineering*, 64(4), 1096-1109.
- Iran Air. (2020), Iran Air Fleet <<http://www.IranAir.com/portal/home/?2689/Iran-Air-Fleet>> (accessed October 20, 2020).
- Ghaffarinasab, N. (2020). A tabu search heuristic for the bi-objective star hub location problem. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 1-13.
- Ghaffarinasab, N. & Kara, B.Y. (2019). Benders decomposition algorithms for two variants of the single allocation hub location problem. *Networks and Spatial Economics*, 19(1), 83-108.
- Ghodratinama, A., Tavakkoli-Moghaddam, R. & Azaron, A. (2015). Robust and fuzzy goal programming optimization approaches for a novel multi-objective hub location-allocation problem: A supply chain overview. *Applied Soft Computing*, 37, 255-276.
- Ghodratinama, A., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kalami-Heris, S.M. & Nagy, G. (2015). Solving a novel multi-objective uncapacitated hub location problem by five meta-heuristics. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 28(6), 2457-2469.
- Hamid, M., Bastan, M., Hamid, M. & Sheikhhahmadi, F. (2019). Solving a stochastic multi-objective and multi-period hub location problem considering economic aspects by meta-heuristics: application in public transportation. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 60(3),

Science, 17(4), 380-410

– Serper, E.Z. & Alumur, S.A. (2016). The design of capacitated intermodal hub networks with different vehicle types. *Transportation Research Part B: Methodological*, 86, 51-65.

– Soylu, B. & Katip, H. (2019). A multiobjective hub-airport location problem for an airline network design. *European Journal of Operational Research*, 277(2), 412-425.

– Sriram, C. & Haghani, A. (2003). An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(1), 29-48.

– Tarski I. (1989), “The value of travel time in transportation”, Prentice Hall Ltd. 169-191

– Tavakkoli-Moghaddam, R. & Sedehzadeh, S. (2014). A multi-objective imperialist competitive algorithm to solve a new multi-modal tree hub location problem. In: *Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC), 2014 Sixth World Congress on* (pp. 202-207): IEEE.

– Teymourian, E., Sadeghi, A. & Taghipourian, F. (2011). A dynamic virtual hub location problem in airline networks-formulation and metaheuristic solution approaches. In: *First International Technology Management Conference* (pp. 1061-1068): IEEE.

– UNWTO. (2020), *Yearbook of Tourism Statistics Data 2011-2015, 2017 edition* <<https://statistics.unwto.org/content/yearbook-tourism-statistics>> (accessed October 20, 2020).

– Van Landeghem, H. & Beuselinck, A. (2002). Reducing passenger boarding time in

International Journal of Industrial Engineering Computations, 2(3), 671-688.

– Mohammadi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Siadat, A. & Rahimi, Y. (2016). A game-based meta-heuristic for a fuzzy bi-objective reliable hub location problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 50, 1-19.

– Mohri, S.S., Karimi, H., Kordani, A.A. & Nasrollahi, M. (2018). Airline hub-and-spoke network design based on airport capacity envelope curve: a practical view. *Computers & Industrial Engineering*, 125, 375-393.

– Monemi, R.N., Gelareh, S., Nagih, A., Maculan, N. & Danach, K. (2021). Multi-period hub location problem with serial demands: A case study of humanitarian aids distribution in Lebanon. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 149, 102201

– Oktal, H. & Ozger, A. (2013). Hub location in air cargo transportation: A case study. *Journal of Air Transport Management*, 27, 1-4.

– Pels, E. (2008). Airline network competition: Full-service airlines, low-cost airlines and long-haul markets. *Research in transportation economics*, 24(1), 68-74.

– Rahimi, Y., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mohammadi, M. & Sadeghi, M. (2016). Multi-objective hub network design under uncertainty considering congestion: An M/M/c/K queue system. *Applied Mathematical Modelling*, 40(5-6), 4179-4198.

– Shang, X., Yang, K., Jia, B. & Gao, Z. (2021). The stochastic multi-modal hub location problem with direct link strategy and multiple capacity levels for cargo delivery systems. *Transportmetrica A: Transport*

airplanes: A simulation based approach. *European Journal of Operational Research*, 142(2), 294-308.

– Wang, Y., Zhu, J. & Sun, H. (2016). A decomposition approach to determining fleet size and structure with network flow effects and demand uncertainty. *Journal of Advanced Transportation*, 50(7), 1447-1469.

– Wei, W. & Hansen, M. (2006). An aggregate demand model for air passenger traffic in the hub-and-spoke network. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40(10), 841-851.

– Wen, Y.-H. & Hsu, C.-I. (2006). Interactive multiobjective programming in airline network design for international airline code-share alliance. *European Journal of Operational Research*, 174(1), 404-426.

– Wensveen, J. (2016). *Air transportation: A management perspective*: Routledge.

– Yang, T.-H. & Chiu, T.-Y. (2016). Airline hub-and-spoke system design under stochastic demand and hub congestion. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(2), 69-76.

– Zabihi, A. & Gharakhani, M. (2018). A literature survey of HUB location problems and methods with emphasis on the marine transportations. *Uncertain Supply Chain Management*, 6(1), 91-116.

مشخصات فرودگاه‌های موجود در شبکه پروازی بین‌المللی ایران

ID	Airport's Name	IATA airport code	Country	ID	Airport's Name	IATA airport code	Country
1	Imam Khomeini International Airport	IKA	Iran	18	Kuala Lumpur International Airport	KUL	Malaysia
2	Isfahan International Airport	IFN	Iran	19	Beirut-Rafic Hariri International Airport	BEY	Lebanon
3	Mashhad International Airport	MHD	Iran	20	King Abdulaziz International Airport	JED	Saudi Arabia
4	Tabriz International Airport	TBZ	Iran	21	Indira Gandhi International Airport	DEL	India
5	Shiraz International Airport	SYZ	Iran	22	Incheon International Airport	ICN	South Korea
6	Ankara Esenboga Airport	ESB	Turkey	23	Bucharest International Airport	OTP	Romania
7	Baghdad International Airport	SDA	Iraq	24	Bahrain International Airport	BAH	Bahrain
8	Zvartnots International Airport	EVN	Armenia	25	Canberra Airport	CBR	Australia
9	Heydar Aliyev International Airport	GYD	Azerbaijan	26	Auckland Airport	AKL	
10	Tbilisi International Airport	TBS	Georgia	27	Heathrow Airport	LHR	The UK
11	Sheremetyevo International Airport	SVO	Russia	28	Oslo Gardermoen Airport	OSL	Norway
12	Leonardo da Vinci–Fiumicino Airport	FCO	Italy	29	Adolfo Suárez Madrid–Barajas Airport	MAD	Spain
13	Charles de Gaulle Airport	CDG	France	30	Stockholm Arlanda Airport	ARN	Sweden
14	Berlin Brandenburg Airport	BER	Germany	31	Tokyo Haneda International Airport	HND	Japan
15	Muscat International Airport	MCT	Oman	32	Athens International Airport	ATH	Greece
16	Kuwait International Airport	KWI	Kuwait	33	Amsterdam Airport Schiphol	AMS	Netherlands
17	Singapore Changi Airport	SIN	Singapore	34	Beijing Capital International Airport	PEK	China