مهندسی مکانیک شریف، (پاییز ۱۳۹۹)
دوره‌ی ۳-۳۶، شماره‌ی ۲، ص. ۳۱-۳۹

Original Article

مسیرهای بهینه ترکیبی (هوایی ـ دریایی) با استفاده از درخت پوشای کمینه و برنامه‌ریزی عدد صحیح

هدی مودب (کارشناس‌ارشد)
گروه مهندسی هوافضا، دانشکده‌ی علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران
سید محمدباقر ملائک (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف
امیررضا کوثری* (دانشیار)
گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

در این مطالعه روشی برای کمینه‌سازی هزینه‌ی شبکه‌ی مرکب حمل و نقلی ارائه می‌شود. کمینه‌سازی با اتکا بر هزینه‌ی عملیاتی مستقیم، «هزینه‌ی زمانی» و برای توری نمونه در محدوده‌ی جزایر خلیج فارس و با ترکیب هم‌زمان وسیله‌های آب پایه و هواپیما پیاده‌سازی شده و مسیرهای مختلف بهینه معرفی شده‌اند. بهینه‌سازی شبکه‌ی نهایی با استفاده از درخت پوشای کمینه و برنامه‌ریزی عدد صحیح با فرض هزینه‌های زمانی ۶ و ۸ دلار بر ساعت انجام پذیرفت. نتایج تخصیص هم‌زمان هواپیما و کشتی نشان‌گر آن است که استفاده از کشتی در مسافت‌های کم‌تر از ۳۰۰ کیلومتر با هزینه‌ی زمانی ۶ دلار بر ساعت و مسافت‌های کم‌تر از ۲۰۰ کیلومتر با ارزش زمانی ۸ دلار بر ساعت هزینه‌ی کم‌تری خواهد داشت. مقایسه‌ی دو روش بهینه‌سازی، بیان‌گر این است که طراحی شبکه‌ی گردشگری به روش برنامه‌ریزی عدد صحیح و طراحی شبکه‌ی هاب و اسپوک به روش درخت پوشای کمینه مقرون به صرفه است.

واژگان کلیدی: شبکه‌ی حمل و نقل هوایی، شبکه‌ی حمل و نقل دریایی، شبکه‌ی حمل و نقل ترکیبی، برنامه‌ریزی خطی، درخت پوشای کمینه.

h.moaddab@ut.ac.ir
malaek@sharif.edu
kosari_a@ut.ac.ir

۱. مقدمه

عبارت سیستم ـ سیستم، بیان‌گر سیستم بزرگی است که چندین سیستم مختلف در خود دارد، به‌طوری که هریک از این سیستم‌ها قادر به ارائه‌ی عملکردی مستقل از دیگری هستند. شبکه‌های پیچیده‌ی حمل و نقل چنین ویژگی‌هایی دارند. در بهینه‌سازی چنین شبکه‌هایی می توان هر زیربخش را به صورت سیستم مجزایی در نظر گرفت که باید شیوه‌یی برای تخمین تعداد مسافر، طراحی مسیر و تخصیص وسیله برای هر مسیر داشته باشد تا ترکیب این زیر بخش‌ها انتظار نهایی از شبکه‌ی حمل و نقل را برآورده کند.

شبکه‌ی گردشگری در یک منطقه، نحوه‌ی دسترسی و جابه‌جایی گردشگران، سهولت و هزینه‌ی دسترسی به نقاط، وسیله‌های محلی موجود از معیارهای مهم جذب گردشگر محسوب می‌شوند. با توجه به توسعه‌ی روزافزون صنعت حمل و نقل هوایی ـ آبی در گردشگری، کاهش هزینه و زمان به عنوان یکی از موضوعات رقابتی بین شرکت‌ها مطرح است. برای دست‌یابی به این هدف دو رویکرد مورد توجه قرار می‌گیرد: ۱. به خدمت گرفتن وسایل نقلیه‌ی ارزان‌تر و سریع‌تر؛ ۲. یافتن خطوط ارتباطی مقرون به صرفه. در این میان، جزایر جنوبی ایران با دارا بودن طبیعت منحصر به فرد، امکان تبدیل به قطب گردشگری کشور را دارند. این مطالعه نیز با هدف توسعه‌ی گردشگری در جزایر ایرانی خلیج‌فارس، به طراحی شبکه‌ی حمل و نقل گردشگری دریایی و هوایی با رویکرد سیستم ـ سیستم در این منطقه می‌پردازد.

در این مطالعه، شبکه‌ی حمل و نقل گردشگری بهینه با ترکیبی از وسیله‌های آبی و هوایی طراحی خواهد شد. پس از مشخص کردن جزایر (نقاط) موجود در شبکه و فواصل آنها، نمونه‌یی از وسیله‌های آبی و هوایی برای جابه‌جایی مسافرین انتخاب می‌شوند. با توجه به مشخص بودن عوامل دخیل در هزینه‌ی عملیاتی مستقیم (DOC) مربوط به هر وسیله و قابل محاسبه بودن آن، این هزینه برای پیش بردن مطالعه به کار گرفته می‌شود. طراحی شبکه با تعیین تعداد گردشگران آغاز می‌شود. سپس DOC مربوط به وسیله‌های پیشنهادی به منظور جابه‌جایی تمامی گردشگران، در هر مسیر به دست می‌آید. در مرحله‌ی بعد، تخصیص وسیله ی بهینه به مسیرهای مناسب چنان است که تمامی گردشگران با کم‌ترین هزینه‌ی عملیاتی جابه‌جا شوند. در نهایت، با روش‌های پیشنهادی، انتخاب مسیرهای بهینه انجام می‌گیرد، چنان که هزینه‌ی نهایی ناوگان کمینه شود. برای تخصیص هم‌زمان قایق و هواپیما به مسیرها و طراحی شبکه‌ی ترکیبی، نیاز به تعریف ضریبی تحت عنوان ارزش زمانی بود

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۹/۱۲، اصلاحیه ۱۳۹۸/۱۲/۲۲، پذیرش ۱۳۹۹/۳/۱۰.
DOI:10.24200/J40.2020.54727.1538

تا علی‌رغم تفاوت در سرعت حمل و نقلی، بتوان هر دو را به مسیرهای مختلف اختصاص داد.

۱.۱. مروری بر منابع

در سال ۲۰۰۴ مانه و کراسلی با استفاده از بهینه‌سازی چندگانه و رویکرد سیستم ـ سیستم، منابع مختلف را تخصیص دادند. آنها در سال ۲۰۰۷ با گسترش کار خود، به طراحی هواپیما و تخصیص هواپیما به فرودگاه‌های مختلف پرداختند.[۱و۲] در سال ۲۰۰۸، هو و دی پائولو با استفاده از نظریه‌ی شبکه‌های پیچیده و الگوریتم ژنتیک، مسیرهای شبکه‌ی خطوط هواپیمایی را مدل‌سازی کردند.[۳] ینگ طی مطالعه‌یی که در سال ۲۰۰۹ با روش ساختار تکاملی انجام داد به اهمیت عملکرد اجتماعی ـ اقتصادی فرودگاه‌ها در مدل مبدأ ـ مقصد ذاتی[1] پی برد.[۴] کراسلی و مانه در ادامه‌ی کارهای پیشین خود در سال ۲۰۱۲، هواپیما را با توجه به برنامه‌ریزی عملیاتی شبکه‌ی هوایی طراحی کردند. آنها با توجه به زمان حل طولانی برنامه‌ریزی غیرخطی ترکیبی، مسئله را به روش تجزیه‌ی مسئله حل کردند.[۵] در سال ۲۰۱۲ کوتیگاوا در تز دکتری خود، با عنوان رویکرد سیستم ـ سیستم، الگوریتم یادگیری ماشین و نظریه‌ی شبکه در پی توسعه ی مدل‌های تکاملی مسیرهای شبکه‌ی هوایی بود. همچنین، عملکرد مربوط به راندمان سفر، سوخت مصرفی و قدرت شبکه مورد بررسی قرار گرفت که نشان می‌داد قدرت شبکه با کاهش تعداد مسافر و راندمان بالای مصرف سوخت مرتبط خواهد بود.[۶]

در سال ۲۰۱۴ ماروا‌ها و کوکولارس با رویکرد سیستم ـ سیستم، بهینه‌سازی توزیع شده و جست‌وجوی مستقیم به طراحی حمل و نقل هوایی پرداختند.[۷] یانسن و پرز در سال ۲۰۱۶ با هدف بیشینه‌سازی تابع سود به حل هم‌زمان اختصاص مسافر و هواپیما پرداختند. در این تحقیق، بر خلاف موارد پیشین، سه خانواده هواپیما مد نظر قرار گرفت که نتیجه‌ی آن پیکربندی بهینه‌ی خانواده‌ی هواپیما، شبکه‌ی بهینه و معرفی بهترین فرودگاه‌ها به عنوان هاب با در نظرگرفتن کم‌ترین هزینه برای مسافر و اپراتور بود.[۸] در سال ۲۰۱۶ کوکولارس و شمس‌الدین در ادامه‌ی کار پیشین، با الهام گرفتن از شبکه‌های زیستی به طراحی سیستم حمل و نقل هوایی پرداختند. مقایسه‌ی این کار با روش پیشین، ۳٫۷ درصد کاهش هزینه‌های عملیاتی را نشان می‌داد.[۹] در مطالعه‌ی من‌وو در سال ۲۰۱۶ شبکه‌ی حمل و نقل قایق‌های مسافربری به عنوان مثال مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله حاکی از آن بود که نبود اطلاعات کافی برای پیش‌بینی تعداد دقیق مسافر، باعث افزایش قابل توجه هزینه‌ی کلی شبکه می‌شود.[۱۰] یو در سال ۲۰۱۷ در مطالعه‌یی شبکه‌ی هوایی باربری را طراحی کرد.[۱۱] آنتونس و همکاران در سال ۲۰۱۸ روند تکامل شبکه‌ی هوایی جزایر آزورها را بررسی کردند. در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار اکسپرس و برنامه‌ریزی عدد صحیح، به طور هم‌زمان، هزینه‌ی عملیاتی، زمان سفر و انتظار مسافرین کاهش یافت.[۱۲] گوچمن و ارول در سال ۲۰۱۹، روش‌های حل دقیق و ابتکاری در شبکه‌ی حمل و نقل ترکیبی کالا را بررسی کردند و سپس، با اعمال روش دوگانه‌ی پیشنهادی روی داده‌های واقعی نشان دادند که این روش برای چنین مسائلی کارایی بهتری دارد. این روش از دو مرحله‌ی مختلف تشکیل شده است: ۱. بسته‌بندی کالا با استفاده از یادگیری ماشین و الگوریتم ژنتیک؛ ۲. بارگیری و انتقال با برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح به منظور کاهش هزینه‌های کلی.[۱۳] محمودی در سال ۲۰۱۹، با بررسی شبکه‌ی حمل و نقل شهری، معیارهای ارزیابی این شبکه‌ها را بر اساس عوامل اقتصادی، اجتماعی و محیطی بیان کرده است.[۱۴] میونگ و یو در سال ۲۰۲۰ ضمن طراحی شبکه‌ی حمل و نقل کالا نشان دادند که برای حل چنین مسائلی، استفاده از روش ابتکاری در مقایسه با روش برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح، به زمان کم‌تری نیاز دارد.[۱۵] در سال ۲۰۲۰، کاینه و همکاران به کمک روش‌های تصمیم‌گیری، ابزاری برای انتخاب مسیرهای هوایی بهینه ارائه کردند، به‌طوری که این ابزار قادر به معرفی مسیرهای جدید و جایگزین به منظور کنترل هزینه‌ها و افزایش دسترسی مسافرین است.[۱۶]

۲. رویکرد حل مسئله

در این بخش، مراحل حل طراحی شبکه‌ی حمل و نقلی برای جزایر جنوبی ایران ارائه می‌شود. از میان ۳۵ جزیره، ۷ جزیره مجهز به فرودگاه انتخاب شدند. برای شبکه‌یی با n نقطه، تعداد مسیرهای ممکن برابر $n(n-1)/2$ است، با توجه به ۷ نقطه‌ی انتخاب شده، ۲۱ مسیر بین تمامی نقاط وجود خواهد داشت. نام جزایر و فواصل میان آنها در جدول ۱ قابل مشاهده است.

با توجه به فاصله‌ی کم بین جزایر، هواپیماهای کوتاه برد مورد نیاز است؛ بنابراین هواپیمای ATR۷۲، Dornier۳۲۸ و به دلیل کاربرد فراوان‌شان انتخاب شد. همچنین، با توجه به مشابهت An۱۴۰ به نوع ایرانی آن، این هواپیما نیز جزء گزینه‌های انتخابی محسوب شد. در انتخاب قایق‌های مسافربری محدودیتی وجود نداشت؛ بنابراین ۸ قایق معرفی شد. اطلاعات مربوط به وسیله‌های انتخابی در جدول ۲ قابل مشاهده است.

در این مسئله فرض می‌شود یک شرکت مسافرتی، قصد برگزاری تور در جزایر

جدول ۱. جزایر انتخاب شده و فواصل بین آن‌ها.

	قشم	لاوان	کیش	ابوموسی	تنب بزرگ	سیری
لاوان	۳۷۵	۰	-	-	-	-
کیش	۲۲۰	۱۹۳	۰	-	-	-
ابوموسی	۲۰۰	۱۷۰	۱۲۵	۰	-	-
تنب بزرگ	۲۲٫۵	۳۹۶	۳۷۳	۵۳	۰	-
سیری	۲۰۵	۱۵۳	۱۲۹	۵۶	۷۱	۰
هندورابی	۳۳۱	۱۷۳	۲۸	۱۸۸	۱۶۵	۱۲۳

جدول ۲. مشخصات وسیله‌های مورد استفاده.

نام وسیله	سرعت (km/h)	ظرفیت مسافر
ATR۷۲	۵۱۰	۷۰
Dornier۳۲۸	۶۲۰	۳۳
BombardierQ۳۰۰	۵۳۲	۵۳
An۱۴۰	۴۶۰	۵۰
Mega Express Four	۲۵	۱۴۰۰
Nwe Camellia	۲۳	۵۲۰
Jetfoil	۵۰	۲۴۰
Waveshuttle	۵۰	۵۰
Sealounge ۴۰	۶۱	۲۰
JL۳۲۰۰B	۵۰	۱۲۰
hd ۱۵۸۰	۴۲	۴۳
Touring ۴۰	۴۰	۴۰

جنوب را دارد. به طوری که مسافرین تمامی ۷ جزیره را ملاقات کند. هدف اصلی شرکت کاهش هزینه‌هاست، بنابراین به‌منظور محاسبه ی هزینه های شبکه از DOC استفاده می‌شود. در ادامه به روابط مربوط به DOC هواپیما و قایق مسافربری اشاره خواهد شد.

در ذیل رابطه‌یی برای تخمین هزینه‌ی عملیاتی مستقیم هواپیماهای تجاری بیان شده است. روش استفاده شده برگرفته از شرکت حمل و نقل هوایی آمریکا (آتا)[۲] است.[۱۷و۱۸] هزینه‌ی عملیاتی مستقیم هواپیما را می‌توان مطابق رابطه‌ی ۱ به پنج جزء تقسیم کرد:

$$DOC = DOC_{flt} + DOC_{maint} + DOC_{depr} + DOC_{\ln r} + DOC_{fin} \quad (۱)$$

که در آن: DOC_{flt} هزینه‌های پرواز، DOC_{maint} هزینه‌های تعمیر و نگهداری، DOC_{depr} هزینه‌ی استهلاک، $DOC_{\ln r}$ هزینه‌های مربوط به نشست و برخاست و بیمه و DOC_{fin} بهره‌ی تأمین هزینه‌هاست. (بهره‌ی تأمین هزینه، بخشی از درآمد است که به‌منظور تأمین هزینه‌هایی چون اجاره یا خرید هواپیما، قطعات یا عملیات اختصاص داده می‌شود.)

هزینه‌ی سفر و هزینه‌ی مستقل از زمان، دو بخش اصلی هزینه‌ی عملیاتی مستقیم برای کشتی محسوب می‌شود. عمده‌ی هزینه‌ی سفر مربوط به مصرف سوخت کشتی است. حقوق خدمه، بیمه، تعمیر و نگهداری و مواردی از این قبیل نیز اجزای هزینه‌های مستقل از زمان را تشکیل می‌دهند. با تخمین‌های انجام شده، هزینه‌ی عملیاتی مستقیم کشتی برای یک سال مطابق رابطه‌ی ۲ خواهد بود:[۱۹]

$$DOC = (f_{HFO}.W_{HFO_y} + f_{DO}.W_{DO_y} + f_{LO}.W_{LO_y} + c_{cr}.n_{cr} + ۰/۰۳.C_{sc})\frac{۱۰}{۹} \quad (۲)$$

که در آن f_{HFO}، f_{DO} و f_{LO} به ترتیب برابر نرخ مصرف سوخت سنگین، سوخت دیزل و روغن‌های روان‌کننده است. W_{HFO_y}، W_{DO_y} و W_{LO_y} و نیز به ترتیب وزن‌های این نرخ‌ها در طول یک سال، c_{cr} و n_{cr} دستمزد و تعداد خدمه و در نهایت C_{sc} قیمت کشتی است.[۲۰و۲۱]

اولین نیاز محاسبه‌ی هزینه‌ی عملیاتی وسیله‌ها، مشخص بودن تعداد مسافر است زیرا، به کمک این مقدار می‌توان تعداد وسیله‌های مورد نیاز و در نهایت هزینه‌ی نهایی کل شبکه را مشخص کرد. در این مطالعه، فرض می‌شود تعداد مسافرینی که قصد مسافرت به این شبکه ها را دارند، برابر با ۲۵۰ نفر باشد.

پس از مشخص شدن تعداد مسافر، تخصیص وسیله به هر مسیر صورت می‌گیرد. در این مرحله، ظرفیت وسیله‌های انتخابی باید چنان باشد که ضمن جابه‌جایی تمامی مسافران، کم‌ترین هزینه را به شرکت تحمیل کند. بدین منظور از روش برنامه‌ریزی ترکیبی عدد صحیح (MILP) [۳] و درخت پوشای کمینه (MST) [۴] برای حل استفاده می‌شود. در انتها، هزینه‌ی نهایی هر دو روش با یکدیگر مقایسه می‌شود.

۱.۲. طراحی شبکه با روش MILP

در این بخش با مشخص بودن هزینه‌ی هر مسیر، به دنبال انتخاب مسیرهایی هستیم که ۷ جزیره را به هم وصل کرده و مجموع هزینه‌ی آن نیز کمینه باشد. با توجه به این مسئله که تمامی جزایر باید در شبکه وجود داشته باشند، کم‌ترین تعداد مسیر برابر ۶ خواهد بود. در این مسئله تمامی مسیرها دوطرفه فرض می‌شود.

با معرفی اجمالی روش MILP و با مفروضات گفته شده در بخش پیشین، روابط حاکم بر طراحی شبکه را می‌توان چنین بیان کرد:[۲۲]

$$Objective: \quad \min \sum_{i=۱}^{p} \sum_{j=۱}^{q} x_{ij} \times COST_{ij} \quad \begin{matrix} p = ۱,۲,۳\ldots,۷ \\ q = ۱,۲,۳,\ldots,۷ \end{matrix} \quad (۳)$$

$$Subject\ to: \quad \sum_{i=۱}^{p}\sum_{j=۱}^{q} x_{ij} \geq (q-۱) \quad (۴)$$

$$۰ \leq x_{ij} \leq ۱ \quad (۵)$$

$$x_{ij} + x_{ji} = ۱ \quad (۶)$$

در رابطه‌ی ۳ شمارش‌گر i و j تعداد جزایر را بیان می‌کنند. x_{ig} نشان‌دهنده‌ی مسیر بین جزایر i و j است. در صورتی که این مسیر در حل استفاده شود، برابر ۱ و در صورت نبودن برابر صفر خواهد بود. $COST_{ij}$ نیز بیان‌گر هزینه‌ی نهایی هر مسیر با توجه به وسیله‌های اختصاص یافته است. این پارامتر برای حالتی که فقط هواپیما و قایق وجود دارند برابر DOC است.

رابطه‌ی ۴ کم‌ترین تعداد مسیر در شبکه را نشان می‌دهد، به‌گونه‌یی که جزیره به یکدیگر متصل شوند. رابطه‌ی ۵ نشان می‌دهد که هر مسیر نباید بیش از یک‌بار در حل در نظر گرفته شود. با توجه به دوطرفه بودن مسیرها، رابطه‌ی ۶ بیان می‌کند که اگر مسیر رفت در محاسبات لحاظ شده است، مسیر برگشت در نظر گرفته نشود.

۲.۲. استفاده از درخت پوشای کمینه در طراحی شبکه‌ی حمل و نقل

درخت پوشای یک نمودار، یکی از زیرمجموعه‌های نمودار کامل است به طوری که هیچ نمودار هم‌بندی نداشته و تمامی نقاط را در بر بگیرد. بنابراین، درخت پوشای کمینه‌ی یک نمودار وزنی را می‌توان درخت پوشایی در نظر گرفت که مجموع وزن کلیه‌ی یال‌ها کم‌ترین حالت را نسبت به تمامی درخت‌های پوشا داشته باشد.

الگوریتم‌های کروسکال، پریم و حریصانه معروف‌ترین رویکردها برای حل این روش هستند. در این مسئله از الگوریتم کروسکال استفاده می‌شود که ابتدا تمامی یال‌ها به ترتیب وزنی (کم‌تر به بیشتر) چیده می‌شود. سپس، یالی انتخاب می‌شود که با یال(های) پیشین ایجاد نمودار هم‌بند نکند. این روند تا انتخاب $V-۱$ یال (V تعداد تمامی یال‌هاست) ادامه می‌یابد.[۲۳و۲۴]

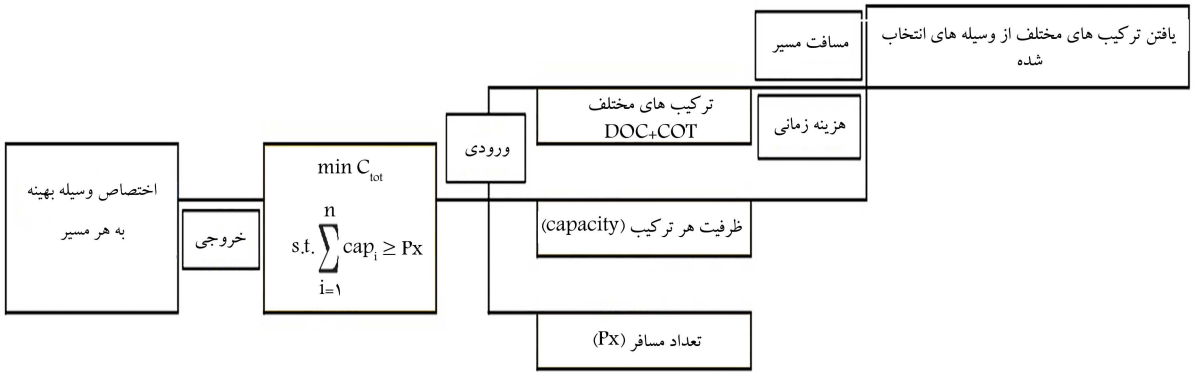
در این مسئله نیز با داشتن الگوریتم MST، فواصل جزایر، DOC نهایی ـ برای حالت‌های هواپیما و قایق ـ و هزینه‌ی کلی ـ برای حالت ترکیب هر دو وسیله ـ مربوط به هر مسیر برای تعداد مشخص مسافر، می‌توان MST را به منظور طراحی مسیرهای بهینه‌ی شبکه با هدف کم‌ترین هزینه‌ی عملیاتی رسم کرد.

۳.۲. معرفی ضریب ارزش زمانی

با توجه به متفاوت بودن دینامیک هواپیما و قایق، ترکیب هم‌زمان این دو نامتعارف محسوب می‌شود. در نتیجه، باید روشی بر پایه‌ی هزینه بیان کرد تا مقایسه‌ی این

جدول ۳. ارزش زمان برای انواع سفرهای بین شهری در کشورهای اروپایی.[۲۱]

	فرانسه	ایل دوفرانس	انگلیس	هلند	سوئد
کاری	۱۷/۵	۲۲/۳	نامشخص	۲۱	نامشخص
سفر از حومه	۱۰	۱۲/۶	۶-۱۱	۱۰	۸/۳
سایر موارد	۶/۸	۸/۷	۵/۵-۱۰	۷	۵/۷



شکل ۱. الگوریتم تخصیص هم‌زمان هواپیما و کشتی به مسیرهای مختلف.

دو وسیله منطقی باشد. برای جبران این تفاوت و همسان‌سازی آنها، ضریبی تحت عنوان «ارزش زمان» (VOT) [۵] یا هزینه‌ی زمان در نظرگرفته شد.[۲۵]

«ارزش زمان» یکی از کلیدی‌ترین پارامترها در اقتصاد حمل و نقل محسوب می‌شود و تحقیقات عملی و نظری بسیاری برای تخمین آن انجام شده تا از آن در تحلیل هزینه‌ها و مدل‌سازی ترافیک استفاده شود. این پارامتر را می‌توان هزینه‌یی در نظرگرفت که مسافرین برای ذخیره کردن زمان می‌پردازند. به عنوان مثال، اگر فردی برای رسیدن به مقصد، دوگزینه‌ی اتوبوس به قیمت ۱۰ دلار و قطار سریع السیر به قیمت ۳۰ دلار داشته و زمان سفر هریک به ترتیب برابر ۴ و ۶ ساعت است. در صورتی که فرد سفر با قطار را انتخاب کند، هزینه‌ی زمان آن برابر ۱۰ دلار بر ساعت خواهد بود زیرا، ۲۰ دلار برای ذخیره‌ی دو ساعت زمین پرداخت کرده است.[۲۶و۲۷] یکی از مهم‌ترین مطالعات در این زمینه به تحلیل داده‌های حاصل از ارزش‌گذاری زمان در فرانسه پرداخته است. بر این اساس، ارزش زمان درکشورهای مختلف و در سفرهای مختلف متفاوت است.

مطابق جدول ۳، ارزش زمان در اروپا برای سفرهای توریستی (سایر موارد) از ۵/۵ تا ۱۰ دلار بر ساعت متغیر است. در این مطالعه، مقدار ۶ دلار بر ساعت در نظرگرفته شده که مربوط به سال ۲۰۱۴ است. همچنین، عدد ۸ دلار بر ساعت نیز در محاسبات لحاظ شد تا شبکه‌ی طراحی شده‌ی نهایی با یکدیگر مقایسه شوند.

هر مسافر در وسیله‌ی حمل و نقلی، به صورت غیرمستقیم هزینه‌ی زمان را پرداخت می‌کند. به منظور در نظرگرفتن هر دو وسیله، زمان سفر به هزینه تبدیل شده و با هزینه‌ی کل جمع شد. مقایسه‌ی نهایی با توجه به هزینه‌ی کل هر دو وسیله انجام شد.

$$COT = VOT \times Cap_i \qquad (۷)$$

$$C_{tot} = COT_i + DOC_i \qquad (۸)$$

در رابطه‌ی ۷ و ۸، COT مربوط به هزینه‌ی زمانی است که هر مسافر پرداخت می‌کند، VOT ارزش زمان بوده که مطابق جدول ۳ است. Cap_i و C_{tot} به ترتیب برابر تعداد مسافر و هزینه‌ی نهایی وسیله‌ی i خواهد بود. اکنون با در دست داشتن هزینه‌ی نهایی برای تمام وسیله‌های آبی و هوایی، مراحل تخصیص وسیله همانند دو بخش قبل خواهد بود. شکل ۱ الگوریتم کلی این مرحله را نشان می‌دهد.

با در دست داشتن روابط مربوط به محاسبه‌ی DOC برای هر وسیله، ارزش زمانی و فاصله‌ی هر مسیر، روابط حاکم بر تخصیص وسیله به هر مسیر با استفاده از روش $MILP$ عبارت خواهد بود از:[۲۲]

$$Objective: \quad \min \sum_{n=1}^{p} \sum_{i=1}^{q} n_i \times (DOC_i + t_i \times VOT \times seat_i) \quad \begin{matrix} p = 1,2,3,\ldots,13 \\ q = 1,2,3,\ldots,12 \end{matrix} \qquad (۹)$$

$$Subject\ to: \quad \sum_{n=1}^{p} \sum_{i=1}^{q} n_i \times seat_i \geq pax \qquad (۱۰)$$

$$n_i \geq 0 \qquad (۱۱)$$

در رابطه‌ی ۹ نماد i نمایانگر نوع وسیله است. با توجه به ۴ نوع هواپیما و ۸ نوع قایق موجود، j از ۱ تا ۱۲ تغییر خواهد کرد. n تعداد مربوط به هر وسیله است. با توجه به تعداد ۲۵۰ گردشگر و ظرفیت کم‌ترین وسیله از میان هواپیماها و قایق‌های انتخاب شده مربوط به $SeaLounge$ برابر ۲۰ نفر است. بنابراین بیشترین تعداد وسیله‌ی مورد نیاز برای جابه‌جایی مسافرین q برابر ۱۳ خواهد بود.

همان‌طورکه در رابطه‌ی ۱۰ مشاهده می‌شود، seat مربوط به ظرفیت وسیله و pax تعداد گردشگر (۲۵۰ نفر) خواهد بود. مجموع تعداد ظرفیت وسیله‌های اختصاص یافته نباید کم‌تر از تعداد گردشگران باشد. VOT و t_i به ترتیب ارزش زمانی فرض شده و زمان سفر خواهد بود. چنان‌که پیش‌تر نیز اشاره شد چون هزینه‌ی زمان را تمامی افراد می‌پردازند، این هزینه در تعداد مسافرین ضرب خواهد شد.

۴.۲. استفاده از جعبه‌ی بهینه‌سازی Matlab

همان‌طورکه در بخش‌های پیش بیان شد، حل مسئله به دو روش برنامه‌ریزی عدد صحیح و درخت پوشای کمینه انجام گرفته است. بدین منظور از نرم‌افزار Matlab

جدول ۴. تعداد بهینه وسیله‌ی اختصاص یافته به هر مسیر با ارزش زمانی ۶ دلار بر ساعت.

مسیر	مسافت (km)	ATR۷۲	Q۳۰۰	WS	HD	T۴۰	مجموع ظرفیت
قشم ـ لاوان	۳۷۵	۳	ـ	ـ	ـ	۱	۲۵۰
قشم ـ کیش	۲۲۰	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
قشم ـ ابوموسی	۲۰۰	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
قشم ـ تنب‌بزرگ	۲۲٫۵	ـ	۱	۱	۱	۱	۲۵۰
قشم ـ سیری	۲۰۵	ـ	۲	ـ	ـ	۴	۲۶۰
قشم ـ هندورابی	۳۳۱	۳	ـ	ـ	ـ	۱	۲۵۰
لاوان ـ کیش	۱۹۳	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
لاوان ـ ابوموسی	۱۷۰	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
لاوان ـ تنب‌بزرگ	۳۹۶	۳	ـ	ـ	ـ	۱	۲۵۰
لاوان ـ سیری	۱۵۲	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
لاوان ـ هندورابی	۱۷۳	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
کیش ـ ابوموسی	۱۲۷	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
کیش ـ تنب‌بزرگ	۳۷۲	۳	ـ	ـ	ـ	۱	۲۵۰
کیش ـ سیری	۱۲۶	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
کیش ـ هندورابی	۲۸	ـ	۱	۱	۱	۱	۲۵۰
ابوموسی ـ بزرگ	۵۳	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
ابو ـ سیری	۵۶	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
ابو ـ هندورابی	۱۸۸	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
بزرگ ـ سیری	۷۰	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
بزرگ ـ هندورابی	۱۶۵	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰
سیری ـ هندورابی	۱۲۳	ـ	۲	۱	ـ	۱	۲۶۰

و جعبه‌ی مربوط به بهینه‌سازی استفاده شده است. اگر حالت کلی برنامه‌ریزی عدد صحیح را به صورت رابطه‌ی ۱۰ در نظر بگیریم:

$$\begin{aligned} &Objective: \\ &\quad \min_x f^T x \\ &Subject: \\ &\quad Ax \le b, \\ &\quad Aeq.x = beq \\ &\quad lb \le x \le ub \end{aligned} \qquad (۱۲)$$

بنابراین، برای حل مسئله‌ی برنامه‌ریزی عدد صحیح در Matlab از رابطه‌ی ۱۱ می‌توان استفاده کرد:

$$\begin{aligned} &[x, f\min] = \\ &\text{int } linprog(f, \text{int } con, A, b, Aeq, beq, lb, ub) \end{aligned} \qquad (۱۳)$$

که در آن f تابع هدف است و int con نشان می‌دهد که کدام یک از متغیرها عدد صحیح هستند، A ضرایب قیود نامساوی، b مقدار سمت راست قیود نامساوری، Aeq ضرایب قیود مساوی، beq مقدار سمت راست قیود مساوی، lb حد بالا و در نهایت ub حد پایین معادله خواهد بود.

علاوه بر این، برای به دست آوردن درخت پوشای کمینه، از رابطه‌ی ۱۲ در نرم‌افزار Matlab می‌توان استفاده کرد:

$$\begin{aligned} &[Tree, pred] = \\ &graphminspantree \\ &(UG, R, 'Weights', ..., 'Method', ...) \end{aligned} \qquad (۱۴)$$

که در آن، UG نمودار غیرجهت‌دار، R تعداد نقاط، $Weights$ وزن یال‌ها، $Method$ الگوریتم حل انتخابی است که در این مسئله، نمودار شامل نقاط (جزایر) و تمامی مسیرهای میان آن‌ها (یال) است که وزن هر یال با هزینه‌ی عملیاتی مستقیم وسیله‌های اختصاص یافته به هر مسیر محاسبه می‌شود، همچنین، الگوریتم حریصانه انتخاب شد.

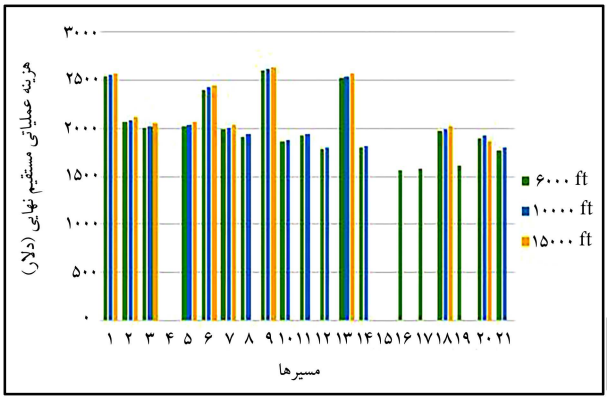
۳. تفسیر و تحلیل نتایج

نتایج و تحلیل‌های محاسبه‌ی DOC برای دو حالت ارزش زمانی برای مسیرهای مختلف، ارائه‌ی وسیله‌هایی با کارکرد بهینه در مسیر و در نهایت طراحی مسیرهای بهینه با هدف کمینه‌سازی هزینه‌ی نهایی شبکه ارائه می‌شود.

با استفاده از روابط مربوط به محاسبه‌ی DOC برای هواپیما و قایق و معرفی دو مقدار ارزش زمانی، ترکیب‌هایی با کم‌ترین هزینه به منظور جابه‌جایی ۲۵۰ مسافر انتخاب شدند که در جدول‌های ۴ و ۵ تعداد وسیله‌ی اختصاص یافته به هر مسیر قابل مشاهده است. با توجه به کوتاه بودن مسیرها، محاسبات برای هواپیماها در سه ارتفاع پروازی مختلف (۶ هزار پا، ۹ هزار پا و ۱۲ هزارپا) در نظرگرفته شد. با توجه

جدول ۵. تعداد بهینه وسیله‌ی اختصاص یافته به هر مسیر با ارزش زمانی ۸ دلار بر ساعت.

مسیر	مسافت (km)	ATR۷۲	Q۳۰۰	WS	HD	T۴۰	مجموع ظرفیت
قشم ـ لاوان	۳۷۵	۳	۱	ـ	ـ	ـ	۲۶۶
قشم ـ کیش	۲۲۰	۳	ـ	۱	ـ	ـ	۲۶۰
قشم ـ ابوموسی	۲۰۰	۳	ـ	۳	ـ	ـ	۲۶۰
قشم ـ تنب‌بزرگ	۲۲٫۵	ـ	ـ	۱	۱	۴	۲۵۰
قشم ـ سیری	۲۰۵	۳	ـ	۱	ـ	ـ	۲۶۰
قشم ـ هندورابی	۳۳۱	۳	۱	ـ	ـ	ـ	۲۶۶
لاوان ـ کیش	۱۹۳	۳	ـ	۱	ـ	ـ	۲۶۰
لاوان ـ ابوموسی	۱۷۰	۳	ـ	۱	ـ	ـ	۲۶۰
لاوان ـ تنب‌بزرگ	۳۹۶	۳	۱	ـ	ـ	ـ	۲۶۶
لاوان ـ سیری	۱۵۲	۳	ـ	۱	ـ	ـ	۲۶۰
لاوان ـ هندورابی	۱۷۳	۳	ـ	۱	ـ	ـ	۲۶۰
کیش ـ ابوموسی	۱۲۷	۳	ـ	۱	ـ	ـ	۲۶۰
کیش ـ تنب‌بزرگ	۳۷۲	۳	۱	ـ	ـ	ـ	۲۶۶
کیش ـ سیری	۱۲۶	۳	ـ	۱	ـ	ـ	۲۶۰
کیش ـ هندورابی	۲۸	ـ	ـ	۱	۱	۴	۲۵۰
ابوموسی ـ بزرگ	۵۳	ـ	ـ	۱	۱	۴	۲۵۰
ابو ـ سیری	۵۶	ـ	ـ	۱	۱	۴	۲۵۰
ابو ـ هندورابی	۱۸۸	۳	ـ	۱	ـ	ـ	۲۶۰
بزرگ ـ سیری	۷۰	ـ	ـ	۱	۱	۴	۲۵۰
بزرگ ـ هندورابی	۱۶۵	۳	ـ	۱	ـ	ـ	۲۶۰
سیری ـ هندورابی	۱۲۳	۳	ـ	۱	ـ	ـ	۲۶۰



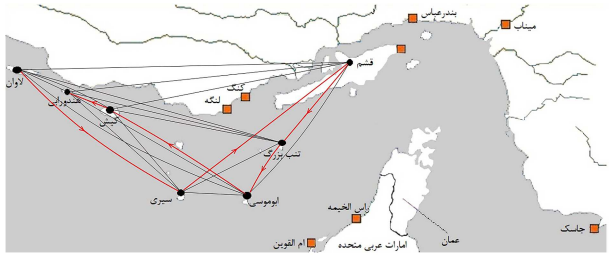
شکل ۲. هزینه‌ی عملیاتی مستقیم برای هواپیمای ATR۷۲ در سه ارتفاع پروازی مختلف برای مسیرهای موجود.

به نتایج به دست آمده (شکل ۲)، ارتفاع ۶ هزار پا برای محاسبات نهایی انتخاب شد تا مسیرهای بیشتری قادر به عملیات باشد.

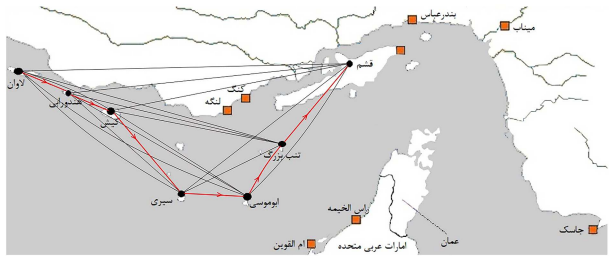
چنان که در جدول ۴ نیز قابل مشاهده است، علی‌رغم افزودن ارزش زمانی ۶ دلار بر ساعت، به دلیل پایین بودن DOC قایق‌های مسافربری نسبت به هواپیما، همچنان برای اکثر مسیرها و مسافت‌ها استفاده از کشتی پیشنهاد می‌شود. تنها در مسیرهایی که مسافت بالای ۳۰۰ کیلومتر است، با توجه به زمان طولانی سفر، ضریب ارزش زمانی تأثیر بیشتری داشته و بنابراین، هواپیما نیز جزء گزینه‌های جابه‌جایی مسافرین خواهد بود. در این میان، قایق‌های مسافربری با ظرفیت کم‌تر، به صرفه است و برای جابه‌جایی مسافرین استفاده می‌شود. به عنوان مثال، قایق $Jetfoil$ علی‌رغم داشتن سرعت بالاتر، با توجه به داشتن DOC بالاتر به دلیل مصرف سوخت زیاد در میان گزینه‌های وسیله پیشنهاد نشده است.

با مقایسه‌ی دو جدول ۴ و ۵ مربوط به وسیله‌های اختصاص یافته با فرض ارزش زمانی ۶ و ۸ دلار بر ساعت، می‌توان به تغییرات آن پی برد. در جدول ۵ با رسیدن مسافت به بیش از ۱۰۰ کیلومتر، مدت زمان سفر افزایش می‌یابد. بنابراین هواپیما نیز در مسافت‌های بالاتر از این جزئی از وسیله‌های پیشنهادی دیده می‌شود. اما با توجه به این که در مسیرهای کوتاه‌تر مدت زمان سفر طولانی نیست، ضریب ارزش زمانی تأثیر چندانی ندارد، و بنابراین قایق‌ها اصلی‌ترین گزینه‌های جابه‌جایی مسافرین خواهند بود.

قایق‌ها برخلاف هواپیماها در مسیرهای کوتاه دریایی نیز قادر به سفر هستند. مشکل اساسی قایق‌ها در سفر، سرعت کم است که این مسئله باعث کاهش راحتی مسافرین می‌شود. اما چنان که ملاحظه می‌شود، هزینه‌ی عملیاتی مستقیم قایق‌ها



شکل ۳. مسیرهای بهینه‌ی (رنگ قرمز) شبکه‌ی حمل و نقل ترکیبی به روش MILP با ارزش زمانی ۶ دلار بر ساعت، به ترتیب لاوان، سیری، قشم، تنب‌بزرگ، ابوموسی،کیش، هندورابی.



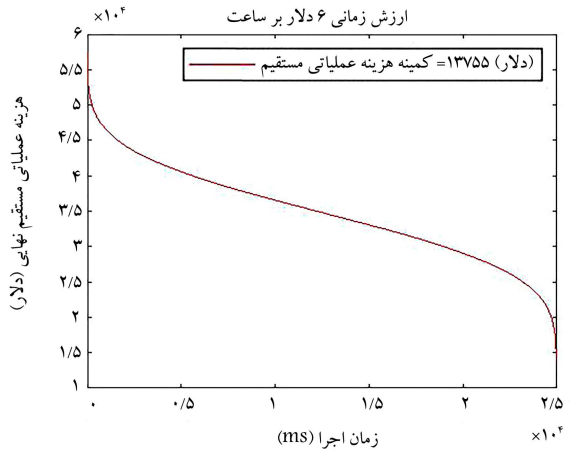
شکل ۴. مسیرهای بهینه‌ی (رنگ قرمز) شبکه‌ی حمل و نقل ترکیبی به روش MILP با ارزش زمانی ۸ دلار بر ساعت، به ترتیب لاوان، هندورابی، کیش، سیری، ابوموسی، تنب‌بزرگ، قشم.

در مقایسه با هواپیما بسیار کم‌تر خواهد بود. به عنوان مثال، برای مسیر قشم ـ لاوان، هزینه‌ی عملیاتی مستقیم قایق $Waveshuttle$ با ظرفیت ۵۰ نفر مسافر کم‌تر از ۵۰۰ دلار خواهد بود، این در حالی است که هزینه‌ی عملیاتی مستقیم هواپیمای Q۳۰۰ با ظرفیت مشابه، برای همین مسیر برابر ۲۵۰۰ دلار خواهد بود. این اختلاف هزینه که حتی در مقایسه با کشتی‌های بزرگ نیز دیده می‌شود، ممکن است ناشی از تفاوت در تکنولوژی ساخت، قیمت اولیه، تفاوت در تعداد و دستمزد کارکنان و ... باشد. به‌عنوان مثال، هزینه‌ی عملیاتی برای کشتی new camelia در مسیر قشم ـ لاوان برابر ۵۶۰۰ دلار است. در نگاه اول، این مقدار بسیار بالاتر از هزینه‌ی ۴ هواپیمای دیگر است، اما تعداد مسافر جابه‌جا شده توسط این کشتی ۵۰۰ نفر بوده که سهم هر مسافر بدون در نظر گرفتن هزینه‌های دیگر در حدود ۱۰ دلار خواهد بود، این مقدار برای مسافر هواپیما ۵۰ دلار است و این هزینه‌یی است که مسافرین هواپیما برای زمان و راحتی خود می‌پردازند.

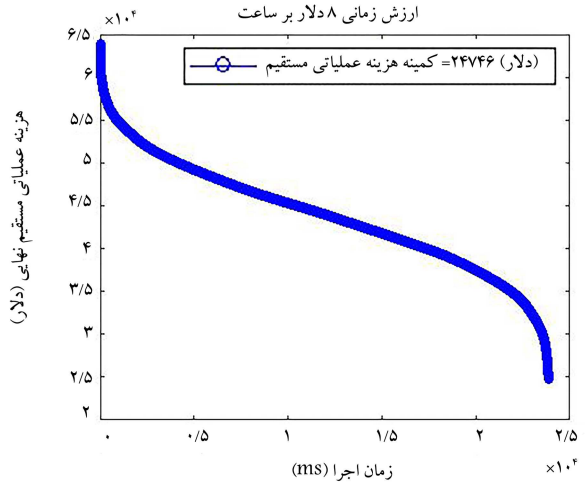
نتایج حاصل از مقایسه‌ی دو جدول ۴ و ۵ نشان می‌دهد که این روش به ارزش زمانی هر منطقه و زمان جابه‌جایی (سرعت وسیله) بسیار حساس است و با تغییر هریک، ممکن است شبکه‌ی نهایی نیز تغییر کند. با این فرض، ممکن است با وسیله‌ها و مسیرهای مشابه، شبکه‌یی که در کشوری طراحی می‌شود، به دلیل اختلاف در ارزش زمانی، متفاوت با شبکه‌ی مشابه در کشور دیگر باشد.

پس از اختصاص وسیله به هر مسیر، شبکه‌یی باید طراحی شود که کم‌ترین هزینه‌ی نهایی را داشته باشد؛ بدین ترتیب مسافرین نیز هزینه‌ی کم‌تری متقبل خواهند شد و سود شرکت نیز افزایش می‌یابد.

در شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب می‌توان شبکه‌ی طراحی شده برای جابه‌جایی ۲۵۰ مسافر را با ارزش زمانی ۶ و ۸ دلار بر ساعت به روش برنامه‌ریزی عدد صحیح مشاهده کرد. شبکه‌ی نهایی برای مسئله‌ی ۶ دلار بر ساعت از لاوان آغاز شده و به ترتیب پس از عبور از سیری، قشم، تنب‌بزرگ، ابوموسی و کیش، در نهایت در هندورابی به پایان می‌رسد. با رجوع به این مسیرها در جدول ۴ می‌توان دریافت،



نمودار ۱. تغییرات هزینه‌ی نهایی شبکه با گذر زمان اجرای برنامه برای هزینه‌ی زمانی ۶ دلار بر ثانیه.

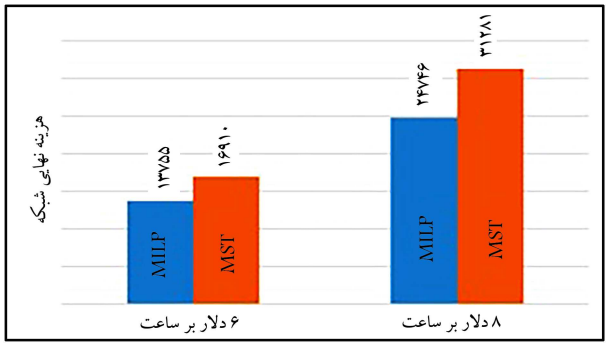


نمودار ۲. مقایسه‌ی هزینه‌های نهایی شبکه‌ی گردشگری با استفاده از دو روش MILP و روش MST.

علی‌رغم وجود هواپیما در وسیله‌های اختصاص یافته به مسافت بالای ۳۰۰ کیلومتر اما، این مسیرها جزء شبکه نبوده و وسیله‌ی اختصاص یافته‌ی بهینه در این شبکه ترکیبی از قایق خواهد بود.

با افزایش ارزش زمانی به ۸ دلار بر ساعت، نوع شبکه از لحاظ مسیر و وسیله‌های اختصاص یافته به هر مسیر تغییر می‌یابد. با توجه به شکل ۴ نقاط سفر به این ترتیب خواهد بود: لاوان، هندورابی، کیش، سیری، ابوموسی، تنب بزرگ و قشم. کم‌ترین مسافت در این سفر ۲۲٫۵ کیلومتر بوده که برای جابه‌جایی مسافرین از سه نوع قایق استفاده شده است، بیشترین مسافت نیز برابر ۱۷۳ کیلومتر است که بهینه‌ترین حالت استفاده از ۳ هواپیمای ATR۷۲ و یک قایق ۴۰ Touring است (مراجعه به جدول ۵). به دلیل بالا رفتن هزینه‌ی زمانی، استفاده از هواپیما به علت سرعت بالاتر و در نتیجه زمان سفر کم‌تر، در این شبکه هزینه‌ی نهایی کم‌تری خواهد.

در نمودارهای ۱ و ۲ می‌توان مقادیر مختلف و تغییرات تابع هزینه را در زمان اجرای الگوریتم مشاهده کرد. همانطور که در رابطه‌ی ۳ مشاهده می‌شود، در برنامه با تغییر هر مسیر، هزینه‌ی شبکه نیز تغییر می‌کند که این تغییرات در نمودار نیز قابل مشاهده است. تغییرات ناگهانی در انتهای نمودار مربوط به همگرایی به شبکه‌ی



نمودار ۳. مقایسه‌ی هزینه‌های نهایی شبکه گردشگری با استفاده از دو روش MILP و روش MST.

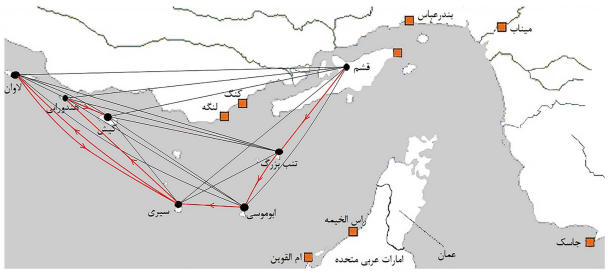
نمودار ۴. مقایسه‌ی هزینه‌های نهایی شبکه‌ی هاب ـ اسپوک با استفاده از دو روش MILP و روش MST.

بهینه است. این نمودار نشان‌گر سرعت حل و هم‌گرایی بالای این روش بوده و می‌توان بدون هزینه‌ی زیادی برنامه‌ریزی را تغییر داد و علاوه بر این، می‌توان به دلیل کاربرد بالای این الگوریتم در طراحی شبکه‌های حمل و نقلی پی برد.

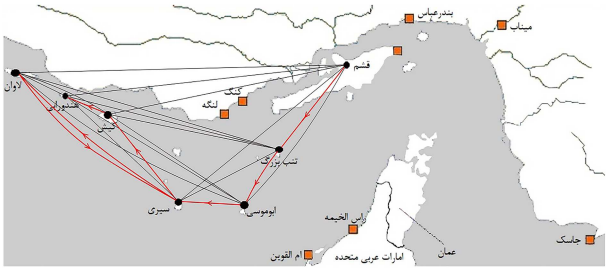
۱.۳. مقایسه‌ی نتایج حاصل از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح و درخت پوشای کمینه

در بخش پیشین تنها از روش MILP برای طراحی شبکه‌ی گردشگری استفاده شد؛ در این شبکه مسافرین از نقطه‌یی سفر خود را آغاز کرده و بدون بازگشت به جایگاه پیشین، به نقاط دیگر سفر می‌کنند. در این بخش، روش درخت پوشای کمینه نیز به کار گرفته شد تا نتایج مربوط به هزینه‌ی کل شبکه در هر دو حالت مورد بررسی قرار گیرد. در این بخش نیز از ضریب زمانی ۶ و ۸ دلار بر ساعت استفاده می‌شود تا هم‌زمان هر دو وسیله را بتوان به مسیرها اختصاص داد. نتایج حاصل از طراحی نهایی شبکه و هزینه‌ی نهایی در نمودارهای ۳ و ۴، و شکل‌های ۵ و ۶ قابل مشاهده است.

با مقایسه‌ی هزینه‌ی نهایی دو روش MILP و MST دو نمودارهای ذیل روش MILP با داشتن هزینه‌ی نهایی کم‌تر، روشی به صرفه برای طراحی شبکه‌ی گردشگری محسوب می‌شود، زیرا در روش MST هزینه‌ی یال‌هایی که به هاب (جزیره‌ی سیری) ختم می‌شوند باید دوبار محسوب شود. این مسیر تکراری دلیل هزینه‌ی بالاتر این نوع روش نسبت به روش MILP در شبکه‌ی گردشگری است.



شکل ۵. مسیرهای بهینه‌ی (رنگ قرمز) شبکه‌ی حمل و نقل ترکیبی به روش MST برای جابه‌جایی ۲۵۰ گردشگر با ارزش زمان ۶ دلار بر ساعت؛ مسیرها به ترتیب: قشم، تنب‌بزرگ، ابوموسی، سیری، لاوان، سیری، هندورابی، کیش.



شکل ۶. مسیرهای بهینه‌ی (رنگ قرمز) شبکه‌ی حمل و نقل ترکیبی به روش MST برای جابه‌جایی ۲۵۰ گردشگر با ارزش زمان ۸ دلار بر ساعت؛ مسیرها به ترتیب: قشم، تنب‌بزرگ، ابوموسی، سیری، لاوان، سیری، هندورابی، کیش.

اما، برای طراحی شبکه‌های هاب ـ اسپوک روش توصیه می‌شود زیرا، طرح شبکه در روش MST برای هر دو مورد گردشگری و هاب و اسپوک یکسان است. بنابراین در مقایسه با هزینه‌ی نهایی با روش MST هزینه‌ی نهایی بالایی دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه طراحی شبکه‌ی هوایی و دریایی برای جزایر خلیج فارس با تعریف ضریب ارزش زمانی ارائه شد. این شبکه شامل مسیرها و ترکیب بهینه‌یی از وسیله‌های دریایی و هوایی برای جابه‌جایی تمامی تعداد گردشگران مفروض بود. با فرضیات و ساده‌سازی صورت گرفته، روش MILP و MST در طراحی شبکه‌ی حمل و نقلی مورد بررسی قرار گرفت، تا هزینه‌ی نهایی ناوگان کمینه شود. با توجه به متغیر بودن ارزش زمانی برای نوع سفر در کشورهای مختلف، بازه مربوط به کشورهای اروپایی فرض شد. به منظور بهبود روند این مطالعه مواردی چون برنامه‌ریزی زمانی کارکنان و سفر، استفاده از قایق پرنده در محاسبات جهت استفاده در جزایری که مجهز به فرودگاه نیستند و تخمین دقیق تعداد مسافرین و گردشگران می تواند در کارهای آینده مد نظر قرار گیرند تا نتایج حاصله نزدیک تر به واقعیت بازار حمل و نقل شود.

علی‌رغم محدودیت‌های ذکر شده، مدل ارائه شده، مقایسه‌ی هم‌زمان دو وسیله با دینامیک متفاوت با استفاده از ارزش زمانی در طراحی شبکه‌ی حمل و نقلی را نشان داده و مسیری جهت بهبود این نوع شبکه‌های ترکیبی فراهم کرده است. این نوع شبکه‌ها، علاوه بر شبکه‌ی حمل و نقل مسافر، برای جابه‌جایی بار نیز پرکاربرد خواهد بود، زیرا، حمل و نقل بار غالبا توسط چند وسیله انجام می‌گیرد.

پانوشت‌ها

1. intrinsic origin - destination
2. air transportation association of america
3. mixed integer linear programming (MILP)
4. minimum spanning tree (MST)
5. value of time

منابع (References)

1. Crossley, W., Mane, M. and Nusawardhana. "Variable resource allocation using multidisciplinary optimization: initial investigationsfor system of systems", *10th AIAA/ISSMO Mulidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, New York (2004).
2. Mane, M., Crossley, W.A. and Nusawardhana. "System of systems inspired aircraft sizing and airline resource allocation via decomposition", *Journal of Aircraft*, **44**(4), pp. 1222-1235 (2007).
3. Hu, X.B. and Di Paolo, E. "A genetic algorithm based on complex networks theory for the management of airline route networks", *Studies in Computational Intelligence (SCI)*, Springer, **129**, pp. 505-545 (2008).
4. Yang, E. "A design methodology for evolutionary air transportation Networks", PhD Thesis, Georgia Institute of Technology (2009).
5. Mane, M. and Crossley, W. "Allocation and design of aircraft for on-demand air transportation with uncertain operations", *Journal of Aircraft*, **49**, pp. 141-158 (2012).
6. Kotegawa, T. "Anayzing the evolutionary mechanism of the air transportation system of system using network theory and machine learning Algorithms", PhD Thesis, Purdue University, USA (2012).
7. Marwaha, G. and Kokkolaras, M. "System of system approach to air transportation design using nested optimization and direct search", *Journal of multiDiscipline optimization*, **51**, pp. 885-901 Springer, (2014).
8. Jansen, P.W. and Perez, R.E. "Integrated design and optimization of aircraft families and air transport network", *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, USA (2016).
9. Chamseddine, I.M. and Kokkolaras, M. "Bio-inspired heuristic for necoupling network configuration in air transportation system of systems design optimization", *ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences*, USA (2016).
10. Manwo, N. and Lo, H. "Robust models for transportation service network design", *Transportation Research, Part B 94*, pp. 378-386 (2016).
11. Yu, S., Yang, Z. and Yu B. "Air express network design based on express path choices -Chinese case study", *Journal of Air Transport Management*, **61**, pp. 73-80 (2017).
12. Antunes, A.P. Santos, M.G., Pita, J.P. and et al. "Study on the evolution of the air transport network of the Azores", *Transportation Research Journal, Part A*, **118**, pp. 837-851 (2018).
13. Gocmen, E. and Erol, R. "Transportation problems for intermodal networks: mathematical models, exact and heuristic algorithms, and machine learning", *International Journal of Expert Systems with Applications*, **135**, pp. 374-387, (2019).
14. Mahmoudi, R., Shetab-Boushehri, S.N., Hejazi, S.R. and et al. "Determining the relative importance of sustainability evaluation criteria of urban transportation network", *Journal of Sustainable Cities and Society*, **47**, (2019).
15. Myung, Y.S. and Yu, Y.M. "Freight transportation network model with bundling option", *Journal of Transportation Research, Part E*, **133** (2020).
16. Keine, A., Granberg, T.A., Polishchuk, V. and et al. "Decision support for an optimal choice of subsidised routes in air transportation", *Journal of Air Transport Management*, **82** (2020).
17. Ali, R. and Al-Shamma, O. "A Comparative study of cost estimation used for preliminary aircraft design", *Journal of Researches in Engineering: B*, **14** (2014).
18. Roskam, J., *Airplane Design: Part VIII*, Darcorporation; 2nd Edition, (2003).
19. Papanikolaou, A. "Ship design: methodologies of preliminary design", Springer (2014).
20. Barrass, C.B. "Ship design and performance for masters and mates", Elsevier, UK (2004).
21. Roh, M.L. and Lee K.Y. "Computational ship design", Springer Series on Naval Architecture (2014).
22. Oki, E. "Linear programming and algorithms for communication Networks", CRC Press, USA (2013).
23. Sedgwick, R. and Wayne, K., *Algorithms*, Fourth Edition, Pearson Education, USA (2011).
24. Coremen, T., Leiserson, C., Rivest, R. and et al. "Introduction to algoritms", The MIT Press, USA (2009).
25. Meunier, D. and Quinet, E. "Value of Time estimations in cost benefit analysis:the french experience", *European Transport Conference* (2014).
26. Alvarez, B., Hanley, N. and Barberan, R. "The value of leisure time: a contingent rating approach", *Journal of Environmental Planning and Management*, **44**, pp. 681-699 (2010).
27. Feather, P. and Douglass, W. "Estimating cost of lieser time for recreation demand models", AAEA Meetings, USA (1998).