چشم‌انداز مدیریت صنعتی
شماره ۳ ـ پاییز ۱۳۹۰
ص‌ص ۱۱۹ – ۹۹

به کارگیری الگوریتم‌های فراابتکاری در مدل یکپارچه‌سازی شبکه لجستیک توزیع کالا

حمزه قجاوند*، مصطفی زندیه ، بهروز دری*****

چکیده

با توسعه اقتصاد جهانی و گسترش بازاریابی الکترونیکی در بین کشورها، اینکه چگونه یک سیستم لجستیک به نحو کارآمد مدیریت شود، به یک موضوع کلیدی برای کاهش هزینه‌های شرکت‌ها تبدیل شده است، مخصوصاً شرکت‌های چند ملیتی که در فضای سخت رقابتی قرار دارند. یکی از زمینه‌های مناسب برای یکپارچه‌سازی در شبکه‌های لجستیک، طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم و معکوس است که می‌تواند باعث جلوگیری از زیربهینگی ناشی از طراحی جدا از هم شبکه لجستیک مستقیم و معکوس شود. در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس با هدف حداقل سازی هزینه‌ها ارائه شده است. با توجه به اینکه مدل ارائه شده به دسته NP-hard تعلق دارد، دو الگوریتم فراابتکاری– الگوریتم ممتیک(MA) و الگوریتم فرایند گروهی (TPA) برای حل مدل به کار گرفته شده است. الگوریتم ها از نظر بهترین مقدار تابع هدف و اولین زمان رسیدن به بهترین مقدار تابع هدف مقایسه شده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده، از نظر مقدار تابع هدف، الگوریتم ممتیک و از نظر زمان رسیدن به جواب، الگوریتم فرایند گروهی برتری داشتند.

کلید واژه‌ها: طراحی یکپارچه، لجستیک، الگوریتم MA، الگوریتم TPA.

تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۸/۱۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۸۹/۱۲/۲۵.

* دانش آموخته کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
** استادیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه شهید بهشتی (نویسنده مسئول).
Email: zandieh@sbu.ac.ir
*** دانشیار گروه مدیریت صنعتی دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه شهید بهشتی.

مقدمه

با توسعه اقتصاد جهانی و گسترش بازاریابی الکترونیکی در بین کشورها، خدمات مؤسسات چندملیتی- که از زنجیره تأمین لجستیک در سرتاسر جهان بهره می‌جویند- برای کسب و کار جهان امروز ضروری می‌نماید. پس اینکه چگونه یک سیستم لجستیک به نحو کارآمد مدیریت شود، به یک موضوع کلیدی برای کاهش هزینه‌های شرکت‌ها تبدیل شده است، مخصوصاً شرکت‌های چند ملیتی که در فضای سخت رقابتی قرار دارند. امروزه وجود اینترنت فراگیر و سیستم‌های پشتیبان تصمیم‌گیری تکامل یافته، امکان و فرصت بهبود کارایی سیستم‌های لجستیکی را مهیا ساخته است [۵]. زنجیره تأمین به دسته‌ای از تأسیسات تأمین‌کنندگان، مشتریان، محصولات و روش‌های کنترل موجودی، خرید و توزیع اطلاق می‌شود. این زنجیره، تأمین‌کنندگان و مشتریان را به هم متصل می‌کند که با تولید مواد اولیه و خام توسط تأمین کننده شروع می‌شود و به مصرف محصول توسط مشتری ختم می‌گردد. در زنجیره تأمین، جریان مواد بین تأمین‌کننده و مشتری از چند مرحله عبور می‌کند و هر مرحله ممکن است از تعدادی تأسیسات تشکیل شده باشد [۱۶]. در سال‌های اخیر، مسأله طراحی شبکه زنجیره تأمین، به دلیل رقابت به وجود آمده توسط بازار جهانی، اهمیت بیشتری پیدا کرده است [۱۷].

طراحی شبکه لجستیک، بخشی از برنامه‌ریزی برای زنجیره تأمین است. ساختار شبکه توزیع و مکانیابی تسهیلات، جزء موضوعاتی می‌باشند که در سطح استراتژیک مورد توجه واقع می‌شوند. این دو موضوع، در واقع، تشکیل دهنده شبکه لجستیک هستند. به طور کلی، تصمیمات طراحی شبکه شامل تعیین مکان تسهیلات، نقش و ظرفیت آنها و تخصیص آنها به منابع و بازارهای مختلف می‌باشد. همه این موضوعات، تأثیر به سزایی بر انعطاف‌پذیری، کارایی و در نتیجه، عملکرد زنجیره تأمین دارند. در چند دهه اخیر، بسیاری از شرکتها، تلاشهای قابل توجهی را صرف طراحی و توسعه شبکه‌های لجستیک معکوس نموده‌اند. عوامل محرک شرکتها برای توجه به برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل لجستیک معکوس را می‌توان در سه دسته اصلی- الزامات قانونی، حساسیتهای زیست محیطی و سودآوری اقتصادی- احصاء نمود[۱۲]. واژه "یکپارچه" به معنای یکپارچه سازی تصمیمات طراحی شبکه لجستیک مستقیم و معکوس است. در اغلب مقالات و کارهای گذشته، طراحی شبکه، تنها برای لجستیک مستقیم یا لجستیک معکوس و در مواردی هم برای هر دو، اما به صورت ترتیبی، صورت گرفته است. تعداد اندکی از مقالات نیز در سال‌های اخیر به طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم و معکوس پرداخته‌اند. طراحی یکپارچه شبکه لجستیک می‌تواند موجب جلوگیری از زیربهینگی و در نتیجه، صرفه‌جویی اقتصادی گردد. این نوع یکپارچگی (یکپارچه‌سازی افقی) نقشی اساسی در مدیریت زنجیره تأمین دارد. به طور دقیق، تصمیمات استراتژیک طراحی شبکه لجستیک

درجریان مستقیم و معکوس مرتبط با تعیین نوع شبکه (شامل مکانیابی و تعیین ظرفیت تسهیلات تولید، ظرفیت ذخیره، هم زمانی بارانداز[۲]، توزیع، جمع آوری، مرتب سازی، احیا، بازیافت و انهدام[۳] و تعریف انواع ارتباطات حمل و نقل) می باشد. مدل مسأله طراحی شبکه لجستیک مستقیم به فرم MLIP در می‌آید [۶]. معمولا حل یکپارچه مدل‌هایی از این نوع در اندازه کوچک با روش دقیق ممکن است. این مسأله در دسته مسائل NP-hard قرار می‌گیرد. لذا با بزرگ شدن مسأله و همچنین بررسی همزمان آن در جهت معکوس، بر پیچیدگی‌های الگوریتم افزوده می‌شود و نیاز به استفاده از روش‌های فرا ابتکاری را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید.

هدف از این تحقیق آن است که با استفاده از مطالعات و بررسی‌های پیشین و همچنین جستجو در اینترنت و تحلیل داده‌های به دست آمده بر اساس روش‌های آماری، بتوان پس از طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم و معکوس، با به کارگیری الگوریتم های فراابتکاری جدید (الگوریتم فرایند گروهی)، به حل مسأله طراحی شبکه لجستیک مستقیم و معکوس پرداخته شود.

پیشینه تحقیق

ادبیات متنوع و بسیاری در مورد لجستیک کالا و طراحی شبکه‌های توزیع وجود دارد که در این بخش به گوشه‌ای از آن اشاره می‌شود.

جایارامان[۱] و همکاران در طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته برای فراهم آورندگان خدمات لجستیک طرف سوم[۲] یک مدل پیشرفته دو هدفه برنامه ریزی عدد صحیح آمیخته با ادغام مراکز توزیع با مراکز جمع آوری و مراکز احیا ارائه کرده اند [۷].

جایارامان و پیرکول[۳] یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته[۴] را برای یک شبکه لجستیک چندکالایی چهار رده‌ای ارائه کردند [۶]. این مدل، جزء معدود مدلهایی است که به تصمیم‌گیری درباره رده تأمین‌کنندگان می‌پردازد.

ملاکرینودیس[۵] و همکاران (۲۰۰۵) برای طراحی مجدد ساختار شبکه انبارها به منظور کاهش هزینه‌ها از یک متدولوژی چند هدفه برنامه‌ریزی فیزیکی استفاده کرده‌اند [۱۴].

لیستس[۶] و دکر[۷] یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح آمیخته را برای طراحی شبکه لجستیک معکوس با هدف کمینه‌سازی هزینه ارائه داده‌اند. این کار، جزء معدود مقالاتی است

1. Jayaraman
2. Third Party Logistics (3PL)
3. Pirkul
4. Mixed Integer Linear Programming (MILP)
5. Melachrinoudis
6. Listes
7. Dekker

که به طراحی یک سیستم کششی در لجستیک معکوس مبتنی بر تقاضای مشتریان برای محصولات احیا شده پرداخته است [۱۱].

جن[1] و همکاران، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته را برای طراحی شبکه لجستیک مستقیم در یک زنجیره دو رده‌ای با هدف حداقل‌سازی هزینه ارائه نمودند. در این مقاله برای حل مسأله از روش کدگذاری اولویت- محور استفاده شد [۴].

کو[2] و ایوانز[3] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح آمیخته[4] را برای طراحی شبکه لجستیک یکپارچه مستقیم ومعکوس برای فراهم آورندگان خدمات لجستیک طرف ارائه دادند. برای غلبه بر عدم قطعیت موجود شرایط، مشخصه‌های مسأله برای هر دوره تعیین شدند، و در دوره بعد، مدل مجدداً برای مشخصه‌های جدید حل شد. آنها الگوریتم ژنتیک را برای حل مدل توسعه دادند [۸].

دولائرت[5] و همکاران، مروری کلی بر طراحی مدلهای زنجیره تأمین نمودند و از این طریق، امکان دستیابی به مدل‌های کاملتر- که توانایی در نظر گرفتن تمامی هزینه‌های لجستیکی را دارا باشند- را فراهم کردند [۳].

میپچدی[6] و شاه[7] (۲۰۰۷) هزینه شبکه لجستیک را در یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته کمینه کردند. آنها محدودیت‌هایی را در نظر گرفتند تا شبکه لجستیک، دارای مقاومت[8] و پیچیدگی[9] در طراحی باشد [۱۳].

آراس[10] و همکاران، یک مدل غیر خطی از شبکه لجستیک را ارائه دادند و با کمک الگوریتم جستجوی ممنوع [11]به حل آن پرداختند. آنها از این طریق، موقعیت مکانی مراکز جمع‌آوری و قیمت خرید بهینه محصولات را محاسبه نمودند. هدف آنها بیشینه کردن سود در یک شبکه لجستیک معکوس بود [۱].

دو[12] و ایوانز، یک شبکه لجستیک حلقه بسته را در نظر گرفتند که توسط فراهم آورندگان لجستیک طرف سوم اداره می‌شد. آنها هدف خود را کمینه کردن دیرکرد و هزینه کل تصمیمات

1. Gen
2. Ko
3. Evans
4. Mixed Integer Non-linear Programming (MINLP)
5. Dullaert
6. Meepetchdee
7. Shah
8. Robustness
9. Complexity
10. Aras
11. Tabu search
12. Du

مربوط به جایابی و ظرفیت تسهیلات قرار دادند و برای حل مدل خود نیز از روش ترکیبی جستجوی پراکنده[1] استفاده کردند [۲].

لی[2] و دانگ[3] یک مدل خطی عدد صحیح آمیخته را برای طراحی یکپارچه شبکه لجستیک ارائه دادند. روش حل مورد استفاده، جستجوی ممنوع بود [۹].

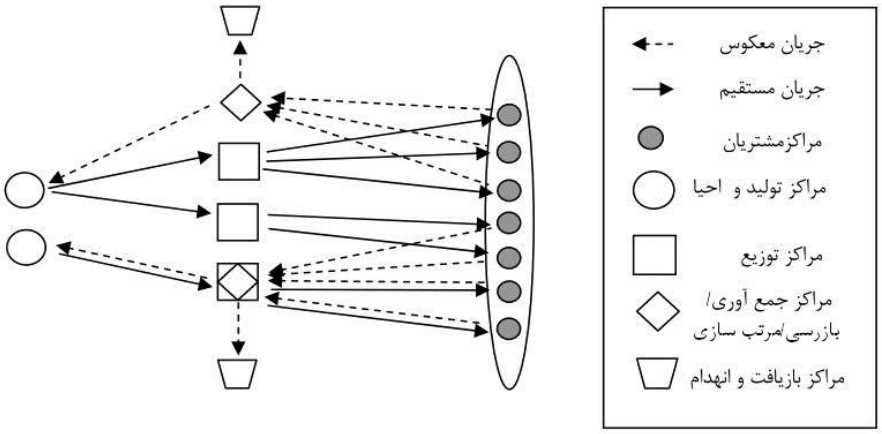
پیشوایی و همکاران (۲۰۰۹) برای طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم و معکوس از یک مدل خطی عدد صحیح آمیخته استفاده کردند. آنها برای کمینه‌کردن هزینه‌ها و بیشینه‌کردن پاسخگویی[4]، مدل را با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک مجهز به جستجوی همسایگی[5] حل کردند [۱۵].

مدل مفهومی/فرضیه ها یا سئوال‌های تحقیق

در این مقاله از مدل مفهومی ارائه شده توسط پیشوایی و همکاران در سال ۲۰۰۹ استفاده شده است. در ادامه به توضیح مدل می پردازیم.

شبکه لجستیک یکپارچه مستقیم و معکوس[6] (IFRLN) مورد بحث در اینجا یک شبکه چند مرحله‌ای است که شامل تولید، توزیع، مناطق مشتری، جمع‌آوری و بازرسی، بازیافت و انهدام با ظرفیت‌های چند سطحی می‌باشد.

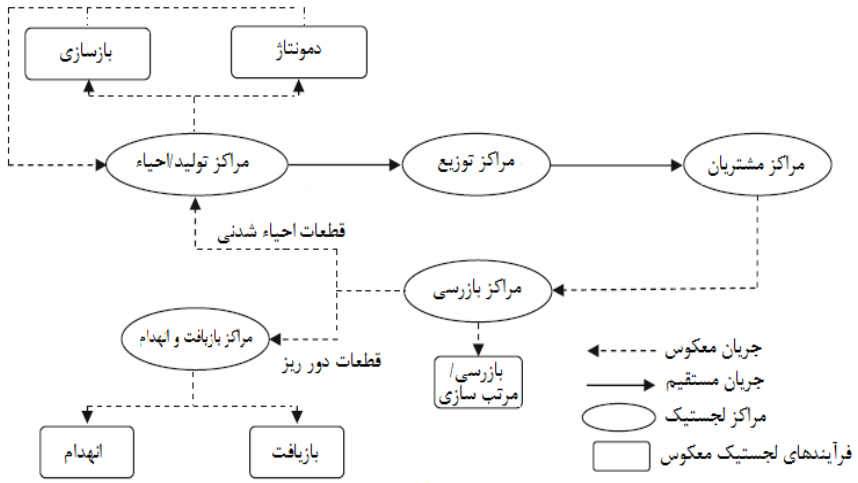
1. Hybrid scatter search
2. Lee
3. Dong
4. Responsivness
5. Variable Neighborhood Search (VNS)
6. Integrated Forward/Reverse Logistics Network (IFRLN)



شکل ۱. شبکه لجستیک یکپارچه مستقیم و معکوس

همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، در جریان مستقیم، کالاها از طریق کانال توزیع از مراکز تولید به مناطق مشتریان انتقال داده می‌شوند پاسخ داده شود. مناطق مشتریان از قبل معین و ثابت فرض شده است.

در جریان معکوس، کالاهای برگشتی در مراکز جمع‌آوری/بازرسی گردآوری می‌شوند و بعد از آزمایش، کالاهای قابل بازیافت قابل بازیافت به مراکز بازیافت و کالاهای دورریز به مراکز انهدام فرستاده می‌شوند. بر طبق این استراتژی، از حمل و نقل اضافی کالاهای برگشتی (به خصوص محصولات دورریز) پرهیز می‌شود و محصولات برگشتی به تسهیلات مربوطه انتقال داده می‌شوند. در این شبکه لجستیکی یکپارچه، مراکز دارای فرایندهای ترکیبی از هزینه کمتری نسبت به مراکز جداگانه جمع‌آوری و توزیع برخوردار هستند. لذا در IFRLN، هر گاه مراکز توزیع و مراکز جمع‌آوری در یک مکان مستقر شوند، آنجا به عنوان مرکز ترکیبی توزیع و جمع‌آوری شناخته می‌شود. کاهش هزینه ایجاد شده در تابع هزینه نشان داده شده است که شامل هزینه ثابت بازگشایی مرکز و هزینه‌های متغیر حمل و نقل است و لذا برخلاف مدل‌های قبلی که دارای مراکز ترکیبی توزیع و جمع‌آوری بودند، استفاده از مرکز ترکیبی در این مدل، یک متغیر تصمیم‌گیری محسوب می‌شود.



شکل ۲. فرایندهای لجستیک معکوس در شبکه مورد بررسی

در جریان مستقیم، محصولات به صورت کششی در یک شبکه واگرا انتقال داده می‌شوند و در جریان معکوس، محصولات برگشتی به صورت فشاری در یک شبکه نیمه همگرا جابه‌جا می‌شوند. درصد مشخصی از تقاضای مشتریان به عنوان محصولات برگشتی تعیین شده است و میانگین معینی نیز برای محصولات دورریز در نظر گرفته شده است.

به تقاضای مشتریان باید پاسخ داده شود و تمام محصولات برگشتی نیز باید از مراکز مشتریان جمع‌آوری گردد. فرایند بازیافت در مراکز تولید/بازیابی صورت می‌گیرد و تمام محصولات بازیافت شده دوباره به عنوان محصول جدید به جریان مستقیم شبکه لجستیک وارد می‌گردند. لذا IFRLN یک شبکه لجستیک حلقه بسته محسوب می‌شود.

با در نظر گرفتن شرایط مطرح شده، مسأله اصلی در این تحقیق، مکان، تعداد و ظرفیت مراکز تولید/بازیابی، توزیع، جمع‌آوری/بازرسی و دورریزی است که بیانگر میزان تمرکز شبکه هستند و همچنین تعیین میزان جریان محصولات بین تسهیلات، یکی از مسائل مورد بررسی می‌باشد.

IFRLN شبکه‌ای موردی[1] نمی‌باشد و به دلیل دارا بودن ماهیت عام، در صنایع گوناگونی مانند تجهیزات الکترونیکی و دیجیتال و خودروسازی کاربرد دارد.

برای درک بهتر مدل ریاضی پیشنهادی، ابتدا آن را به صورت کلامی توضیح می‌دهیم:

1. Case-based network

هزینه کمینه= هزینه‌های ثابت بازگشایی – مقادیر صرفه‌جویی ناشی از ترکیب تسهیلات + هزینه‌های حمل و نقل

- برآورده ساختن تمام تقاضاها در جهت مستقیم و معکوس
- توازن جریان بین گره‌ها
- محدودیت‌های ظرفیت
- محدودیت‌های منطقی ناشی از تفاوت ظرفیت‌ها
- محدودیت‌های غیر منفی بودن و صفر و یک

نمادهای مورد استفاده که در مدل IFRLN عبارتند از:

I: اندیس مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز تولید و احیا

J: اندیس مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز توزیع

K: اندیس مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز مشتریان

L: اندیس مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز جمع‌آوری/ بازرسی

M: اندیس مجموعه نقاط بالقوه برای مراکز بازیابی و انهدام

N: اندیس مجموعه نقاط سطوح ظرفیت برای همه تسهیلات

E: اندیس مجموعه نقاط مشترک بین نقاط مراکز توزیع (J) و نقاط مراکز جمع‌آوری بازرسی (L)

d_k: تقاضای مرکز مشتری (k)

r_k: متوسط کسر محصولات برگشتی از مرکز مشتری k (درصد)

S: متوسط کسر محصولات قراضه در مراکز جمع‌آوری/بازرسی (درصد)

f_i^n: هزینه ثابت احداث مرکز تولید و بازیابی (کارخانه) در محل با ظرفیت سطح n

g_j^n: هزینه ثابت احداث مرکز توزیع در محل j با ظرفیت سطح n

h_l^n: هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری/بازرسی در محل L با ظرفیت n

b_m^n: هزینه ثابت احداث مرکز بازیافت و انهدام در محل m با ظرفیت n

$f_e^{nn'}$: مقدار ثابت صرفه‌جویی حاصل از انطباق مرکز توزیع با ظرفیت n و مرکز جمع‌آوری/بازرسی با ظرفیت n' در محل e

cx_{ij}: کل هزینه‌های حمل و نقل و جابه‌جایی یک واحد محصول از مرکز تولید تا مرکز توزیع j

cu_{jk}: کل هزینه‌های حمل و نقل و جابه‌جایی یک واحد محصول از مرکز توزیع j تا مرکز مشتری k

cq_{kl}: کل هزینه‌های حمل و نقل و جابه‌جایی یک واحد محصول برگشتی از مرکز مشتری k تا مرکز جمع‌آوری l

cp_{li}: کل هزینه‌های حمل و نقل و جابه‌جایی یک واحد محصول برگشتی از مرکز جمع‌آوری l تا مرکز تولید i

ct_{lm}: کل هزینه‌های حمل و نقل و جابه‌جایی یک واحد محصول برگشتی از مرکز جمع‌آوری l به مرکز دورریزی m

caw_i^n: ظرفیت سطح n مرکز بالقوه تولید در محل i (جریان مستقیم)

cay_j^n: ظرفیت سطح n مرکز بالقوه توزیع در محل j

caz_l^n: ظرفیت سطح n مرکز بالقوه جمع‌آوری در محل l

cav_m^n: ظرفیت سطح n مرکز بالقوه دورریزی در محل m

car_i^n: ظرفیت سطح n مرکز بالقوه بازیابی در محل i (جریان معکوس)

x_{ij}: مقدار جریان محصولات از مرکز تولید تا مرکز توزیع j

u_{jk}: مقدار جریان محصولات از مرکز توزیع j تا مرکز مشتری k

q_{kl}: مقدار جریان محصولات از مرکز مشتری k تا مرکز جمع‌آوری l

p_{li}: مقدار جریان محصولات از مرکز جمع‌آوری l تا مرکز بازیابی i

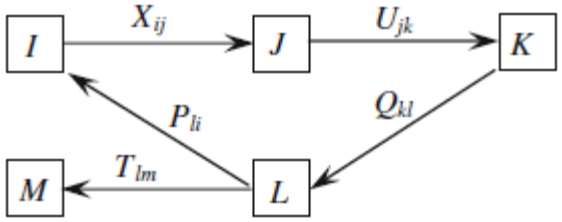
t_{lm}: مقدار جریان محصولات از مرکز جمع‌آوری l تا مرکز دورریزی m

w_i^n: متغیر بانیری است که در صورت یک بودن مرکز تولید و بازیابی با سطح ظرفیت n در محل i احداث می‌گردد.

y_j^n: متغیر بانیری است که در صورت یک بودن مرکز توزیع و بازیابی ظرفیت n در محل j احداث می‌گردد.

z_l^n: متغیر بانیری است که در صورت یک بودن مرکز جمع‌آوری و بازیابی با سطح ظرفیت n در محل l احداث می‌گردد.

v_m^n: متغیر بانیری است که در صورت یک بودن مرکز دورریزی و بازیابی با سطح ظرفیت n در محل m احداث می‌گردد.



شکل ۳. جریان مواد در شبکه مورد بررسی

با استفاده از نمادهای بیان شده، مدل برنامه‌ریزی غیر خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه لجستیک یکپارچه با هدف حداقل سازی هزینه‌ها به صورت ذیل ارائه می‌گردد:

$$\begin{aligned}\mathbf{MinW} = {} & \sum_{i\epsilon I}\sum_{n\epsilon N} f_i^n W_i^n + \sum_{j\epsilon J}\sum_{n\epsilon N} g_j^n Y_j^n + \sum_{l\epsilon L}\sum_{n\epsilon N} h_l^n Z_l^n + \sum_{m\epsilon M}\sum_{n\epsilon N} b_m^n V_m^n - \\ & \sum_{e\epsilon E}\sum_{n'\epsilon N}\sum_{n\epsilon N} f_e^{nn'} Z_e^{n'} Y_e^n + \sum_{i\epsilon I}\sum_{j\epsilon J} cx_{ij} X_{ij} + \sum_{j\epsilon J}\sum_{k\epsilon K} cu_{jk} U_{jk} + \\ & \sum_{k\epsilon K}\sum_{l\epsilon L} cq_{kl} Q_{kl} + \sum_{l\epsilon L}\sum_{m\epsilon M} ct_{lm} T_{lm} + \sum_{l\epsilon L}\sum_{i\epsilon I} cp_{li} P_{li}\end{aligned} \quad (۱)$$

$$\sum_{j\epsilon J} U_{jk} = d_k \quad \forall k\epsilon K \quad (۲)$$

$$\sum_{l\epsilon L} Q_{kl} = r_k d_k \quad \forall k\epsilon K \quad (۳)$$

$$\sum_{i\epsilon I} X_{ij} = \sum_{k\epsilon K} U_{jk} \quad \forall j\epsilon J \quad (۴)$$

$$\sum_{m\epsilon M} T_{lm} = s \sum_{k\epsilon K} Q_{kl} \quad \forall l\epsilon L \quad (۵)$$

$$\sum_{i\epsilon I} P_{li} = (1-s) \sum_{k\epsilon K} Q_{kl} \quad \forall l\epsilon L \quad (۶)$$

$$\sum_{j\epsilon J} X_{ij} \leq \sum_{n\epsilon N} W_i^n caw_i^n \quad \forall i\epsilon I \quad (۷)$$

$$\sum_{i\epsilon I} X_{ij} \leq \sum_{n\epsilon N} Y_j^n cay_j^n \quad \forall j\epsilon J \quad (۸)$$

$$\sum_{k\epsilon K} U_{jk} \leq \sum_{n\epsilon N} Y_j^n cay_j^n \quad \forall j\epsilon J \quad (۹)$$

$$\sum_{k\epsilon K} Q_{kl} \leq \sum_{n\epsilon N} Z_l^n caz_l^n \quad \forall l\epsilon L \quad (۱۰)$$

$$\sum_{l\epsilon L} T_{lm} \leq \sum_{n\epsilon N} V_m^n cav_m^n \quad \forall m\epsilon M \tag{۱۱}$$

$$\sum_{l\epsilon L} P_{li} \leq \sum_{n\epsilon N} W_i^n car_i^n \quad \forall i\epsilon I \tag{۱۲}$$

$$\sum_{m\epsilon M} T_{lm} \leq \sum_{n\epsilon N} Z_l^n caz_l^n \quad \forall l\epsilon L \tag{۱۳}$$

$$\sum_{l\epsilon L} P_{li} \leq B \sum_{j\epsilon J} X_{ij} \quad \forall i\epsilon I \tag{۱۴}$$

$$\sum_{n\epsilon N} W_i^n \leq 1 \quad \forall i\epsilon I \tag{۱۵}$$

$$\sum_{n\epsilon N} Y_j^n \leq 1 \quad \forall j\epsilon J \tag{۱۶}$$

$$\sum_{n\epsilon N} Z_l^n \leq 1 \quad \forall l\epsilon L \tag{۱۷}$$

$$\sum_{n\epsilon N} V_m^n \leq 1 \quad \forall m\epsilon M \tag{۱۸}$$

$$W_i^n, Y_j^n, Z_l^n, V_m^n \epsilon \{0,1\} \quad \forall i\epsilon I, \forall j\epsilon J, \forall l\epsilon L, \forall m\epsilon M \tag{۱۹}$$

$$X_{ij}, U_{jk}, Q_{kl}, T_{lm}, P_{li} \geq 0 \quad \forall i\epsilon I, \forall j\epsilon J, \forall k\epsilon K, \forall l\epsilon L, \forall m\epsilon M \tag{۲۰}$$

عبارت (۱) نشاندهنده تابع هدف مدل است که شامل حداقل هزینه احداث تسهیلات، صرفه‌جویی حاصل از انطباق محل احداث مراکز ترکیبی (توزیع و جمع‌آوری)، و هزینه جابه‌جایی و حمل و نقل محصولات می‌باشد. عبارت‌های (۲) و (۳) تضمین می‌کنند که در جریان مستقیم، به همه تقاضای مشتریان پاسخ داده می‌شود و در جریان برگشت، همه کالاهای برگشتی از مراکز مشتریان جمع‌آوری می‌گردد. عبارت‌های (۴) تا (۶) مربوط به محدودیت‌های تعادل جریان در گره‌ها می‌باشد. محدودیت‌های (۷) تا (۱۴) تضمین می‌کنند که جریان تنها بین نقاطی در جریان باشد که در آن‌ها تسهیلی احداث گردیده است و نیز اینکه مجموع جریان در هر تسهیل از ظرفیت آن تجاوز ننماید. محدودیت‌های (۱۵) تا (۱۸) تضمین می‌کنند که تنها یک سطح ظرفیت به هر تسهیل اختصاص می‌یابد. محدودیت‌های (۱۹) و (۲۰) هم محدودیت‌های منطقی و بدیهی مربوط به متغیرهای تصمیم مسأله می‌باشند. همان طور که در مدل مشاهده می‌شود،

تابع هدف مدل، دارای عبارت غیر خطی است که نشاندهنده میزان صرفه‌جویی حاصل از انطباق دو تسهیل مرکز توزیع و جمع‌آوری در یک مکان مشترک می‌باشد که وجود آن باعث غیر خطی شدن مدل می‌گردد؛ ضمن اینکه در این عبارت، دو متغیر صفر و یک در یکدیگر ضرب شده‌اند. برای خطی کردن عبارت فوق، یک متغیر صفر و یک جدید که برابر ضرب دو متغیر صفر و یک پیشین است، به شرح زیر تعریف می‌گردد:

$$Q_e^{nn'} = Z_e^{n'} * Y_e^n$$
$$Q_e^{nn'} \epsilon \{0,1\} \quad \forall e \epsilon E, \forall n' \epsilon N, \forall n \epsilon N \qquad (۲۱)$$

در نتیجه، تابع هدف غیر خطی مدل به صورت زیر خطی می‌شود:

$$\begin{aligned} MinW = & \sum_{i\epsilon I}\sum_{n\epsilon N} f_i^n W_i^n + \sum_{j\epsilon J}\sum_{n\epsilon N} g_j^n Y_j^n + \sum_{l\epsilon L}\sum_{n\epsilon N} h_l^n Z_l^n + \sum_{m\epsilon M}\sum_{n\epsilon N} b_m^n V_m^n \\ & - \sum_{e\epsilon E}\sum_{n'\epsilon N}\sum_{n\epsilon N} f_e^{nn'} Q_e^{nn'} + \sum_{i\epsilon I}\sum_{j\epsilon J} cx_{ij} X_{ij} + \sum_{j\epsilon J}\sum_{k\epsilon K} cu_{jk} U_{jk} \\ & + \sum_{k\epsilon K}\sum_{l\epsilon L} cq_{kl} Q_{kl} + \sum_{l\epsilon L}\sum_{m\epsilon M} ct_{lm} T_{lm} + \sum_{l\epsilon L}\sum_{i\epsilon I} cp_{li} P_{li} \end{aligned} \qquad (۲۲)$$

همان طور که در عبارت (۲۲) مشاهده می‌شود، از آنجا که هدف، کمینه‌سازی است و عبارت خطی شده نیز با علامت منفی در تابع هدف وجود دارد، مدل به طور طبیعی تمایل به یک بودن متغیر $Q_e^{nn'}$ دارد. لذا برای صحیح بودن جایگزینی $Q_e^{nn'}$، به جای ضرب دو متغیر Y_e^n و $Z_e^{n'}$ تنها کافی است با اضافه کردن قید و قیودی به مدل، از یک شدن متغیر $Q_e^{nn'}$ در سه حالتی که یکی از دو متغیر Y_e^n و $Z_e^{n'}$ و یا هر دو صفر هستند جلوگیری نمود. لذا عبارت ذیل باید به محدودیت‌های مدل اضافه گردد:

$$2Q_e^{nn'} \leq Z_e^{n'} + Y_e^n$$
$$\forall e \epsilon E, \forall n' \epsilon N, \forall n \epsilon N \qquad (۲۳)$$

بدین ترتیب، مدل ارائه شده، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته خواهد بود که دارای (IJ+JK+KL+LM+LI) متغیر پیوسته،N(I+J+L+M+EN) متغیر صفر و یک $2(2I+2J+K+M)+5L+EN^2$ محدودیت، بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های منطقی (۱۹) و (۲۰) است. بنابراین (N) نقش مهمی در افزایش پیچیدگی مدل یکپارچه شبکه لجستیک دارا می‌باشد.

چون مسأله طراحی شبکه یکپارچه لجستیک مستقیم و معکوس، شامل مسأله جابه‌جایی تسهیلات با ظرفیت‌های مختلف – که به عنوان مسائل NP-complete شناخته شده– هستند،

مسأله طراحی IFRLN جزء مسائل NP-hard قرار می‌گیرد. برای حل اینگونه مسائل نمی‌توان از روش‌های دقیق استفاده کرد. در این تحقیق با بکارگیری الگوریتم‌های ممتیک، جستجوی محلی متغیر و فرآیند گروهی به حل مساله مورد بررسی می‌پردازیم.

روش شناسی

برای مسأله طراحی یکپارچه شبکه لجستیک مستقیم و معکوس، ۱۰ نمونه مسأله آزمایشی از اندازه کوچک تا بزرگ تولید شده است. این مسائل با کمک مسائل مورد استفاده در مقالات مشابه تولید شدند (جدول ۱). دیگر داده‌های مسأله نیز از مقاله پیشوایی و همکاران [۱۵] استخراج شد.

جدول۱. اندازه مسائل آزمایشی تولید شده

شماره مسأله	تعداد مراکز تولید/ احیاء I	تعداد مراکز توزیع J	تعداد مراکز مشتریان K	تعداد مراکز جمع آوری/ بازرسی L	تعداد مراکز انهدام M	تعداد سطوح ظرفیت N
۱	۲	۳	۵	۳	۱	۲
۲	۵	۱۰	۱۰	۵	۴	۲
۳	۵	۱۰	۱۵	۱۰	۴	۳
۴	۱۰	۱۵	۲۰	۱۵	۵	۲
۵	۲۰	۳۰	۴۰	۳۰	۱۰	۳
۶	۲۰	۴۰	۶۰	۴۰	۱۰	۳
۷	۳۰	۵۰	۸۰	۵۰	۱۰	۲
۸	۳۰	۶۰	۱۰۰	۶۰	۱۵	۳
۹	۴۰	۶۰	۱۳۰	۶۰	۱۵	۳
۱۰	۵۰	۷۰	۱۵۰	۷۰	۲۰	۳

در این مقاله از روش کدینگ اولویت- محور استفاده شده است. نحوه نمایش جواب و همچنین الگوریتم‌های بازخوانی جواب، مطابق با مقاله پیشوایی و همکاران می‌باشد. در نمایش اولویت- محور، جواب به صورت ماتریس دو بعدی می‌باشد که سطر اول، نشاندهنده اولویت است و سطر دوم، سطوح ظرفیت را نشان می‌دهد.

برای استفاده از روش کدگذاری اولویت- محور در مسأله مورد بررسی، ابتدا می‌بایست طرح کدگذاری هر جواب را به پنج قسمت تقسیم کنیم. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، قسمت اول به مراکز تولید و مراکز توزیع، قسمت دوم به مراکز توزیع و مراکز مشتریان، قسمت سوم به مراکز مشتریان و مراکز جمع‌آوری/بازرسی/مرتب سازی، قسمت چهارم به مراکز

جمع‌آوری/بازرسی/مرتب‌سازی و انهدام و قسمت پنجم به مراکز جمع آوری/بازرسی/مرتب‌سازی و مراکز احیا اختصاص می‌یابد.

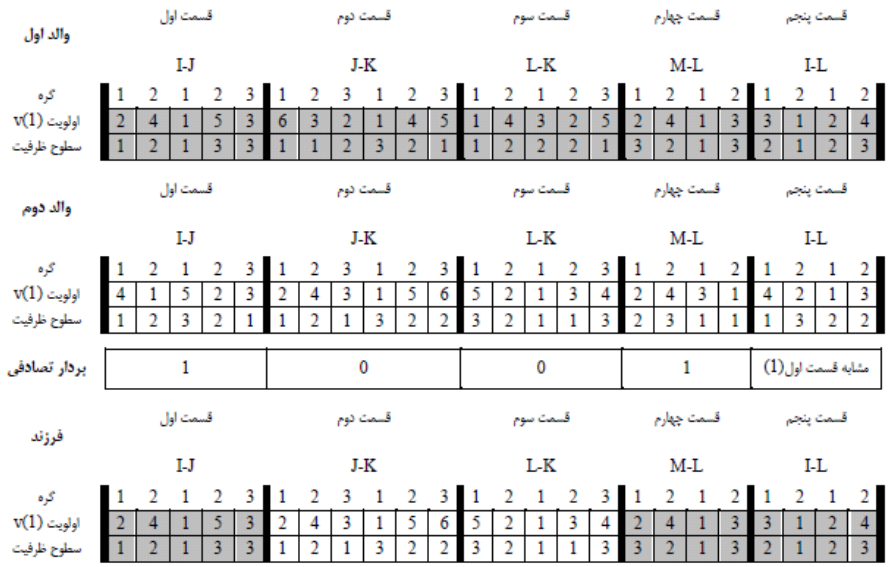
	قسمت اول					قسمت دوم						قسمت سوم					قسمت چهارم				قسمت پنجم			
	I-J					J-K						L-K					M-L				I-L			
گره	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	1	2	3	1	2	1	2	1	2	1	2
اولویت v(1)	2	4	1	5	3	6	3	2	1	4	5	1	4	3	2	5	2	4	1	3	3	1	2	4
سطوح ظرفیت	1	2	1	3	3	1	1	2	3	2	1	1	2	2	2	1	3	2	1	3	2	1	2	3

شکل۴. نمونه‌ای از طرح نمایش جواب برای مسأله مورد بررسی

الگوریتم MA

الگوریتم ممتیک مورد استفاده در این مقاله، توسط پیشوایی و همکارانش ارائه شده است. شباهت الگوریتم ممتیک به الگوریتم ژنتیک، در استفاده از جمعیتی از جواب‌ها، مکانیزم انتخاب چرخ رولت و استفاده از نوعی اپراتور تقاطع می‌باشد. تمایز الگوریتم ارائه شده از الگوریتم ژنتیک، در استفاده از جستجوی محلی برای بهبود جواب و برخی جزئیات الگوریتم بوده است.

در این الگوریتم، جمعیت اولیه به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. مکانیزم انتخاب والدین بر اساس چرخ رولت می‌باشد و برای تولید فرزندان از اپراتور تقاطع مطابق شکل ۵ استفاده می‌شود. سپس بر روی فرزندان به صورت احتمالی جستجوی محلی صورت می‌گیرد. در الگوریتم ممتیک مورد استفاده از سه نوع جستجوی همسایگی استفاده شده است. دو نوع اول برای جستجو روی سطر اول جواب- که در واقع همان اولویت‌ها می‌باشند- مورد استفاده قرار می‌گیرند و نوع سوم برای جستجو روی سطر دوم جواب- که همان سطوح ظرفیت هستند- به کار می‌رود. مکانیزم عمل دو نوع اول، یک مکانیزم دو مرحله‌ای است، به طوری که در مرحله اول، قسمت‌هایی از جواب کد شده که جابجایی در آن صورت می‌گیرد، به کمک یک بردار پنج قسمتی(تعداد مراحل شبکه) که مقادیر صفر و یک را به طور تصادفی می‌پذیرد، انتخاب می‌شوند. سپس در داخل قسمت‌های انتخاب شده، مقادیر تعدادی از خانه‌ها با هم تعویض می‌شوند. در جستجوی همسایگی نوع اول $(3-\text{opt})$، در مرحله دوم، سه خانه برای جابجایی در قسمت‌های انتخاب شده انتخاب می‌گردند.

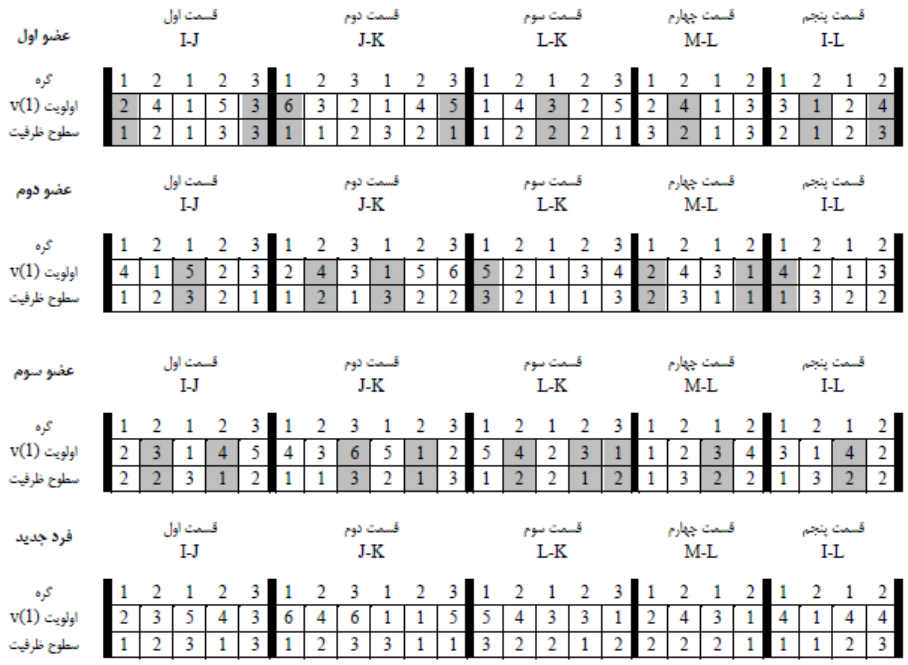


شکل۵. اپراتور تقاطع

الگوریتم TPA

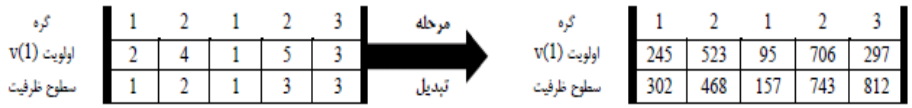
الگوریتم TPA از جدیدترین الگوریتم‌های فراابتکاری است که توسط لی و همکاران در سال ۲۰۱۰ در مورد مسئله زمان‌بندی ارائه شد [۱۰]. در این مقاله سعی شده است که این الگوریتم، مطابق با روش اولویت- محور مورد استفاده قرار گیرد. لذا در بعضی قسمت‌ها تغییراتی اعمال شده است.

در این روش، ابتدا یک تیم از افراد (جواب‌ها) به اندازه M+N جواب تصادفی تولید می‌شود. پس از تولید جواب تصادفی، جواب‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و بر حسب تابع هدف مرتب می‌شوند. N تای اول که دارای مقدار تابع هدف بهتری هستند، گروه نخبه و مابقی گروه عادی را تشکیل می‌دهند. در این الگوریتم، هر فرد با برداری که نشاندهنده خصوصیات آن فرد است، نمایش داده می‌شود. در این تحقیق فرض بر این است که هر گره به همراه ظرفیت مربوط به آن نشاندهنده یک خصوصیت فرد می‌باشد. به عبارت دیگر، هر ستون از ماتریس جواب، نمایانگر یک خصوصیت می‌باشد. در این مرحله، یکی از گروه‌های نخبه یا عادی به صورت تصادفی با شانس مساوی انتخاب می‌شود و فرد جدید به صورت کاملا تصادفی از افراد آن گروه (نخبه یا عادی) به وجود می‌آید؛ به این صورت که برای هر خصوصیت فرد جدید، از بین تمامی خصوصیت‌های افراد گروه نخبه/عادی، یکی انتخاب می‌شود و این روند تا تکمیل تمام خصوصیت‌های فرد جدید ادامه می‌یابد. شکل ۶ با فرض اینکه یک فرد جدید قرار است از یک گروه سه نفره نخبه/عادی تولید شود، فرایند را نمایش می‌دهد.



شکل۶. نحوه تولید فرد جدید

همانطور که مشاهده می‌شود، این روش تولید جواب- که در ادبیات آورده شده است- با روش نمایش جواب اولویت- محور سازگاری ندارد و موجب می‌شود در قسمت‌هایی از جواب، گره‌هایی با اولویت مساوی به وجود آید. برای غلبه بر این مشکل و همچنین برای راحتی در انجام عملیات رفتاری- که در ادامه اشاره خواهد شد- یک مرحله تبدیلی توسعه داده شد. در مرحله تبدیل، عدد اولویت به جای آنکه از اعداد بین ۱ تا مجموع تعداد گره (مثلا ۱ تا ۵) باشد، از اعداد بین یک بازه بزرگ اعداد (مثلا ۱ تا ۱۰۰۰) انتخاب می‌گردد و سپس بر اساس کوچکتر/بزرگتر اولویت می‌شود.



شکل۷. عملگر تبدیل

برای تبدیل ظرفیت‌ها نیز کافی است بازه اعداد به دو/سه قسمت مساوی (متناسب با ظرفیت تعریف شده در مسأله) تقسیم شود و هر قسمت نمایانگر یک ظرفیت باشد. به عنوان مثال، اعداد بین ۱ تا ۳۳۳ مربوط به ظرفیت یک، اعداد بین ۳۳۳ تا ۶۶۶ مربوط به ظرفیت دو و اعداد بین ۶۶۶ تا ۱۰۰۰ مربوط به ظرفیت سه باشد. در دو قسمت از الگوریتم، از عملگر تبدیل استفاده

می‌شود یکی در ابتدای الگوریتم برای تبدیل جمعیت اولیه به جمعیت قابل استفاده و قبل از قسمت‌هایی که نیاز است مقدار تابع برای جواب محاسبه شود (در جهت معکوس تبدیل). با توسعه عملگر تبدیل براحتی افراد جدید قابل تولید هستند و مشکل مربوط به اولویت‌ها دیگر مطرح نخواهد شد.

پس از اینکه فرد جدید از یکی از گروه‌های نخبه یا عادی وجود آمد، برای بهبود و نامزد شدن برای ورود به تیم، یکی از عملیات یادگیری و یا اکتشاف باید روی آن صورت گیرد. اینکه چه عملیاتی صورت پذیرد، وابسته به ضریب یادگیری (l) می‌باشد. هرچه این عدد، بزرگتر باشد، احتمال اینکه عملیات یادگیری انتخاب شود، بیشتر خواهد شد. یادگیری به این معناست که فرد جدید به سمت نماینده[1] گروه نخبه حرکت کند یا به عبارتی از نماینده گروه عادی دور شود تا برآورد بهتری را به دست آورد. نماینده گروه نخبه (e_e) و نماینده گروه عادی (e_p)به عنوان میانگین خصوصیت‌های هر گروه تعریف می‌شود.

$$e_e = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} x_{ej} \quad (۲۴)$$

$$e_p = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} x_{pj} \quad (۲۵)$$

وقتی مقادیر نماینده گروه‌ها به دست آمد، عملیات یادگیری فرد جدید از گروه عادی، قابل تعریف است. اگر فرد جدید از گروه عادی تولید شده باشد، عضو نامزد با عملیات یادگیری به صورت زیر بدست می آید:

$$x_c = (1-\gamma)x\gamma + \gamma e_e \quad (۲۶)$$

γ عددی حقیقی و تصادفی بین صفر و یک می‌باشد. معادله (۲۶) یعنی X_c با حرکت X_r به سمت نماینده نخبه به دست آمده است و متقابلا در صورتی که فرد جدید از گروه نخبه تولید شده باشد، عملیات یادگیری آن در جهت دور شدن از نماینده عادی است. لذا X_c به صورت زیر است:

$$x_c = (1-\gamma)x\gamma - \gamma e_e \quad (۲۷)$$

برای اینکه X_c از مقادیر کران‌های بالا و پایین تجاوز نکند، بررسی مقدار X_c لازم است. در صورتی که عدد تصادفی r بزرگتر یا مساوی γ (احتمال یادگیری) باشد،فرد جدید از طریق

1. Epitome

عملیات اکتشاف به عضو نامزد تبدیل می‌شود. در این صورت، عضو نامزد از طریق زیر محاسبه می‌گردد:

$$t_{e,p} = 1 - \gamma_i^{(1-k_e/K)^{\alpha_{e,p}}} \quad (۲۸)$$

$$\begin{cases} x_c = [x_{c1}, x_{c2}, \dots, x_{cn}]^i \\ x_{ci} = \begin{cases} x_{ri} + t_{e,p}(b_i - x_{ri}), & \text{when } m_i = 0 \\ x_{ri} - t_{e,p}(b_i - a_i), & \text{when } m_i = 1 \end{cases} \end{cases} \quad (۲۹)$$

K حداکثر تکرار برای توقف الگوریتم می‌باشد و k_e شمارنده تکرار عملیات اکتشاف است. t_e و t_p فاکتورهای قدرت اکتشاف برای فرد جدید تولید شده از گروه‌های نخبه و عادی هستند و متعاقبا α_e و α_p برای ضریب کاهش هستند. γ_i عددی تصادفی و حقیقی بین صفر و یک برای i مین خصوصیت است. m_i یک عدد صفر و یکی است و i به تعداد خصوصیت‌ها می‌باشد. در صورتی که فرد نامزد،بهتر از آخرین (بدترین) عضو گروه نخبه باشد، نامزد به گروه نخبه وارد می شود و آخرین عضو گروه نخبه از تیم حذف خواهد شد. اگر عضو نامزد،بهتر از آخرین عضو گروه نخبه باشد ولی از آخرین عضو تیم (که آخرین عضو گروه عادی نیز است) بهتر باشد،عملیات انجام شده بر روی نامزد باید بررسی شود تا در مورد ورود و جایگزینی در گروه عادی تصمیم‌گیری شود. اگر عملیات اکتشاف صورت گرفته بود،عضو نامزد به جای آخرین گروه عادی وارد می شود و آخرین عضو عادی پیشین حذف می‌گردد . در غیر این صورت، عضو نامزد کنار گذاشته می‌شود تا از یکسان شدن گروه عادی پرهیز شود.

تفاوتی که این الگوریتم TPA با مشابه قبلی خود در مقاله قبلی دارد، در اضافه شدن مرحله جدیدی تحت عنوان شروع مجدد می‌باشد. در این مرحله، الگوریتم، بهترین فرد تیم- که همان بهترین فرد گروه نخبه است- را نگه می دارد و بقیه افراد تیم را ب صورت تصادفی تولید و جایگزین می‌نماید. این مرحله، به صورت تناوبی با گذشت یک زمان مشخص تکرار می‌گردد. وجود این مرحله تضمین می‌کند که الگوریتم در یک محدوده محلی گرفتار نشده است و جستجوی متنوع‌تری دارد.

معیار توقف در این مقاله، زمان محاسبات است. به عبارت دیگر، بعد از سپری شدن زمان معین، الگوریتم‌ها متوقف می شوند و نتایج استخراج می‌گردد.

تجزیه و تحلیل نتایج

هر یک از الگوریتم‌ها روی ۱۰ نمونه مسأله با اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ(هر کدام به تعداد ۱۰) بار اجرا شد و پس از هر اجرا، نتایج به دست آمده مربوط به بهترین مقدار تابع هدف (کمترین هزینه) و اولین زمان رسیدن به بهترین مقدار تابع هدف ثبت گردید. برای این منظور، هر یک از الگوریتم‌ها با استفاده از نرم افزار MATLAB 7.11.0 (R2010b) کدگذاری شدند.تمامی مسائل در کامپیوتری با پردازشگر Intel(R) Core(TM)2 Duo, 2.53 GHz و حافظه اصلی 4.00 GB و با استفاده از سیستم عامل Windows 7 Ultimate اجرا شدند. پس از اجرای الگوریتم‌های فرا ابتکاری بر روی مسائل در نظر گرفته شده، برای انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری دقیق، از روش آنالیز واریانس یک طرفه با استفاده از نرم افزار MINITAB 16 بهره گرفته شد.

جدول۲. مقایسه میانگین نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم‌ها از نظر بهترین مقدار تابع هدف و زمان رسیدن

شماره مسأله	*MA*		*TPA*	
	بهترین جواب	زمان رسیدن به بهترین جواب(ثانیه)	بهترین جواب	زمان رسیدن به بهترین جواب(ثانیه)
۱	1681287	3.27582	1682259	3.284238
۲	2585285	113.2026	2523722	155.0064
۳	3346849	279.1461	3460418	147.1615
۴	4617757	391.763	4719573	212.1324
۵	9826318	843.5395	10130991	269.7153
۶	15736646	1187.997	16683356	198.0702
۷	21197022	2108.261	22560944	443.3334
۸	29593244	3223.257	30713579	128.2397
۹	37752088	4100.323	40278964	575.2727
۱۰	43468636	4715.03	47223508	2188.198

در این تحقیق، برای ارزیابی الگوریتم‌های فراابتکاری از معیار درصد انحراف نسبی (RDP) استفاده می‌شود. نحوه محاسبه آن در رابطه (۳۰) آورده شده است. در این رابطه، Alg_{sol} نشاندهنده جواب به دست آمده توسط الگوریتم‌های توسعه داده شده و Min_{sol} و Max_{sol} به ترتیب، کوچک‌ترین و بزرگترین مقدار مورد نظر از هر اجرای الگوریتم ها در هر ۱۰ نمونه از مسائل در نظر گرفته شده هستند. مقدار RDP نشان می‌دهد که جواب‌ها در هر الگوریتم تا چه اندازه از بهترین جواب به دست آمده فاصله دارند. هر چه این فاصله، بیشتر باشد، به این معنی است که الگوریتم‌ها جواب‌های پرت‌تری تولید می کنند و متقابلاً هر چه این فاصله، کمتر باشد، نشان می‌دهد که الگوریتم‌ها جواب‌های بهتری تولید می‌کنند و لذا الگوریتم‌های مناسب‌تری هستند.

$$RPD = \frac{Alg_{sol} - Min_{sol}}{Max_{sol} - Min_{sol}} \times 100 \quad (۳۰)$$

برای مقایسه دو الگوریتم، دو فرض برابری میانگین بهترین جواب و برابری میانگین زمان رسیدن به بهترین جواب در نظر گرفته شدند و با استفاده آنالیز واریانس یکطرفه [1] و آزمون توکی [2] بررسی گردیدند.

نتیجه‌گیری

نتیجه به دست آمده از آنالیز واریانس یکطرفه به همراه آزمون توکی نشان داد که فرض‌های برابری میانگین بهترین جواب و برابری میانگین زمان رسیدن به بهترین جواب رد شدند. به عبارت دیگر اختلاف معنا داری میان الگوریتم‌ها از لحاظ جواب و زمان جواب وجود دارد. در ادامه، آزمون توکی نشان داد که الگوریتم MA اثر بخش‌تر است، یعنی جواب های بهتری نسبت به الگوریتم TPA به دست می‌دهد و الگوریتم TPA ،کاراتر است، یعنی در زمان کمتری به جواب بهتر می‌رسد. با این نتیجه، در صورتی که معیار وزنی برای اثربخشی و کارایی در نظر گرفته نشود، نمی‌توان به درستی برتری مطلقی را میان این دو الگوریتم در نظر گرفت.

1. One-way ANOVA
2. Tuckey

منابع

1. Aras, N, Aksen, D, Tanugur, AG (2008) "Locating collection centers for incentive-dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles", *European Journal of Operational Research*, 191:12, 23-40.
2. Du, F, Evans, GW (2008) "A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service", *Computers & Operations Research*, 35:26, 17–34.
3. Dullaert, W, Braysy, O, Goetschalckx, M, Raa, B (2007) "Supply chain (re)design: support for managerial and policy decisions", *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 7:2, 73–91.
4. Gen, M, Altiparmak, F and Lin, L (2006) "A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding" *OR Spectrum*, 28, 337–354.
5. Gen, M, Cheng, R and Lin, L (2008) *Network models and optimization: multiobjective genetic algorithm approach.* Springer, London, chapter 3.
6. Jayaraman, V and Pirkul, H (2001) "Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities" *European Journal of Operational Research*, 133, 394–408.
7. Jayaraman, V, Guige, VDR and Srivastava, R (1999) "A closed-loop logistics model for manufacturing", *Operational Research Society*, 50, 497-508.
8. Ko, HJ and Evans, GW (2007) "A genetic-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs" *Computers & Operations Research*, 34, 346-366.
9. Lee, D and Dong, M (2008) "A heuristic approach to logistics network design for end-of- lease computer products recovery", *Transportation Research*, 44:E, 455–474.
10. Li, Y and Chen, Y (2010) "An effective TPA-based algorithm for job-shop scheduling problem", *Expert Systems with Applications.*
11. Listes, O and Dekker, R (2005) "A stochastic approach to a case study for product recovery network design", *European Journal of Operational Research*, 160, 268–287.
12. Meade, L., Sarkis, J. and Presley, A. (2007). "The theory and practice of Reverse Logistics." *International Journal of Logistics systems and Management*, Vol. 3, PP. 56-84.
13. Meepetchdee, Y and Shah, N (2007) "Logistical network design with robustness and complexity considerations", *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37:20, 1–22.
14. Melachrinoudis, E, Messac, A and Min, H (2005) "Consolidating a warehouse network: a physical programming approach", *International Journal of Production Economics*, 97, 1-17.
15. Pishvaee, MS, Farahani, RZ and Dullert, W (2009) "A MA algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design", *Computers and Operation Research*, 37:6, 1100-1112.
16. Sabri, EH and Beamon, BM (2000) "A multi-objective approach to simultaneous strategic & operational planning in supply chain design", *Omega*, 28:5, 581–598.
17. Thomas, DJ and Griffin, PM (1996) "Coordinated supply chain management", *European Journal of Operational Research*, 94:1, 1–15.