International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2012)

November 2012, Volume 23, Number 3
pp. 351-362

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

Scheduling an Integrated Production and Air Transportation in Supply Chain with Sequence-Dependent Setup Times

R. Tavakkoli-Moghaddam*, M. Yazdani & S.Molla-Alizadeh-Zavardehi

Reza Tavakkoli-Moghaddam, *Professor, University of Tehran, Tehran*
Mehdi Yazdani, *Ph.D Student & Lecturer Islamic Azad University, Ghazvin*
Saber Molla-Alizadeh-Zavardehi, *Ph.D Student & Lecturer Islamic Azad University, Masjed Soleyman*

Keywords

Integrated production and air transportation scheduling, Sequence-dependent setup times, Variable neighborhood search, Genetic algorithm

ABSTRACT

This paper presents a new mathematical programming model for an integrated production and air transportation in supply chain management with sequence-dependent setup times in order to design an applied procedure for the production and distribution schedule. The aim of this model is to minimize the total supply chain cost consisting of the costs of distribution, production earliness and tardiness, and delivery. Because of the complexity and NP-hardness of this problem, two meta-heuristics based on genetic algorithm (GA) and variable neighborhood search (VNS) are proposed. The parameters of these algorithms and their appropriate operators are set and determined by the use of the Taguchi experimental design. Then, the quality of the results obtained by these algorithms is compared. The computational results show that the developed VNS outperforms the proposed GA.

© 2012 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 23, No. 3, All Rights Reserved

* **Corresponding author. Reza Tavakkoli-Moghaddam**
Email: *tavakoli@ut.ac.ir*

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-02-01]

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۳، جلـــد ۲۳، آذر ۱۳۹۱
صفحـــه ۳۶۲-۳۵۲

نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید
دانشگاه علم و صنعت ایران

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

زمانبندی یکپارچه تولید و حمل هوایی در زنجیره تامین با در نظر گرفتن زمان های آماده سازی وابسته به توالی

رضا توکلی مقدم*، مهدی یزدانی و صابر ملا علیزاده زواردهی

کلمات کلیدی

زمانبندی یکپارچه تولید و حمل هوایی، زنجیره تأمین، زمان آماده سازی وابسته به توالی، الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر، الگوریتم ژنتیک

چکیده:

در این مقاله، مسأله زمانبندی یکپارچه تولید و حمل هوایی در زنجیره تأمین با در نظر گرفتن زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی جهت طراحی یک رویه کاربردی برای ایجاد زمانبندی تولید و توزیع قابل استفاده و واقعی‌تر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی با در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی وابسته به توالی در تولید جهت کمینه نمودن کل هزینه‌های زنجیره تامین که شامل هزینه‌های توزیع، زودکرد و دیرکرد تولید و تحویل می‌باشد، ارایه می‌شود. با توجه به پیچیدگی حل و سخت بودن این مسأله، الگوریتم‌های ژنتیک و جستجوی همسایگی متغیر برای بهینه‌سازی پیشنهاد می‌گردد. همچنین با استفاده از طراحی آزمایشات تاگوچی، مقدار مناسب پارامترهای دو الگوریتم فوق و عملگرهای مناسب تعیین می‌گردد و سپس کیفیت جواب‌های به‌دست آمده با یکدیگر مقایسه می‌شود. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر توسعه داده شده جواب‌های بهتری را نسبت به الگوریتم ژنتیک بدست می‌آورد.

۱. مقدمه

مسایل زمانبندی قدیمی و سنتی فرض می‌کردند که همیشه منابع نامحدودی برای تحویل کالاهای تمام شده به مقاصدشان وجود دارد و زمانی برای حمل آنها مورد نیاز نمی‌باشد، به طوری که محصولات تولید شده یا کامل شده می‌توانند بدون تاخیر به مشتریان حمل شوند. اما بر خلاف این دیدگاه یک نیاز برای یک رویه هماهنگ برای ایجاد زمانبندی تولید و توزیع واقعی‌تر برای قابل استفاده بودن در زنجیره تامین همواره احساس می‌شود.

تاریخ وصول: ۹۰/۲/۴
تاریخ تصویب: ۹۰/۵/۲۹

***نویسنده مسئول مقاله: دکتر رضا توکلی مقدم**، استاد گروه مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران. tavakoli@ut.ac.ir

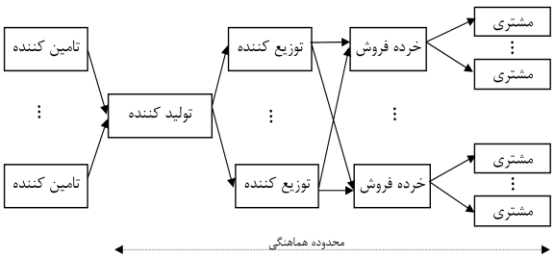
مهدی یزدانی، دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، مربی، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، m_yazdani@qiau.ac.ir

صابر ملا علیزاده زواردهی، دانشجوی دکترای مهندسی صنایع، مربی دانشکده مهندسی صنایع، واحد مسجد سلیمان، دانشگاه آزاد اسلامی saber.alizadeh@iaumis.ac.ir

شکل شماره ۱ زنجیره تامین مورد مطالعه در این مقاله را نمایش می‌دهد. در این زنجیره، قطعات به عنوان موجودی ذخیره می‌شوند. به محض رسید یک سفارش از مشتری، قطعات و مواد مورد نیاز به خط تولید منتقل شده و سپس محصولات تولید شده، با استفاده از حمل هوایی برای رسیدن به موعد تحویلشان به سوی مشتریان منتقل می‌شود. هماهنگی تولید و حمل هوایی مهم است، زیرا محموله‌هایی که پرواز زمانبندی شده مربوطه را از دست می‌دهند باید با پروازهای اختصاصی حمل شوند که هزینه حمل سنگینی را باید متحمل شد. در این مطالعه، هزینه‌های اضافی که به پروازهای اختصاصی مرتبط است، جریمه دیرکرد حرکت پروازها نامیده می‌شود. هزینه‌های زودکرد حرکت پروازها ناشی از نیاز به ذخیره کردن سفارشات در کارخانه تولیدی یا هزینه انتظار و نگهداری در فرودگاه است. جریمه‌های تاخیر هنگامی اتفاق می‌افتد که یک سفارش دیرتر و یا زودتر از موعد مقرر به مشتریان می‌رسد. هزینه دیرکرد تحویل شامل نارضایتی مشتریان، جریمه های قرارداد، از دست دادن فروش، از دست

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-02-01]

دادن و یا کاهش خوشنامی برای تولید کننده و خرده فروش است. اگر زمان ورود (زمان رسیدن) سفارشات تخصیص یافته در مدل حمل هوایی زودتر از موعد تحویلش باشد، خرده فروش دچار زودکرد در تحویل می‌شود. از این رو، هزینه زودکرد تحویل به عنوان هزینه انبارکردن سفارشات توسط خرده فروشان در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. هماهنگی مراحل زنجیره تامین

با توجه به پیچیدگی مسأله زمانبندی زنجیره تامین هماهنگ که یک مسأله NP-hard و جزء سخت‌ترین مسایل بهینه‌سازی ترکیبی می‌باشد و به سبب پیچیدگی ذاتی مسایل بهینه‌سازی ترکیبی و به خصوص مسایل زمانبندی تولید استفاده از روش‌های ابتکاری برای حل چنین مسایلی، بهبودهای موثری در تولید جواب های قابل قبول ایجاد کرده است. چرا که با افزایش ابعاد مسأله، عملا روش های سنتی ریاضی تعیین جواب بهینه به دلیل زمان‌بر بودن، کارایی خود را از دست می‌دهند [۱]. بنابراین استفاده از الگوریتم‌های فوق ابتکاری درحل این مسایل مورد توجه محققان قرارگرفته است.

۲. پیشینه تحقیق

مسأله زمانبندی زنجیره تامین هماهنگ[1] یکی از سخت‌ترین مسایل بهینه‌سازی ترکیبی است. این مسأله از دو جنبه تحقیقاتی مدیریت تولید و عملیات و بهینه‌سازی ترکیبی دارای اهمیت است و در سالهای اخیر، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. تحقیقاتی که در این زمینه وجود دارد بر حسب نوع وسایل حمل در بخش توزیع به دو دسته حمل توسط خودرو (حمل جاده ای یا خودرویی) و حمل توسط هواپیما (حمل هوایی) تقسیم‌بندی می‌شود. اغلب تحقیقات گزارش شده در زنجیره تأمین مربوط به رویکرد استراتژیک و تاکتیکی برای بهینه کردن ساختار و مدیریت سیستم مطابق با اهداف اقتصادیشان می‌باشد [۶-۲]. اخیراً توجه بیشتری به هماهنگی تولید و توزیع در سطح زمانبندی عملیات شده است [۷و۸]. دی‌ماتا و میلر [۹] نشان دادند که پتانسیل زیادی برای کاهش هزینه‌ها با هماهنگ کردن تصمیمات در زنجیره تأمین وجود دارد.

به دلیل نو ظهور بودن مسأله زمانبندی هماهنگ تولید و حمل هوایی تحقیقات بسیار کمی راجع به این موضوع وجود دارد. لی و همکاران [۱۰] نخستین محققانی بودند که مسأله همزمانی[2] زمانبندی تک ماشین و حمل ونقل هوایی با یک مقصد را بررسی کردند. کل مسأله به دو مسأله زمانبندی حمل و نقل هوایی و زمانبندی تک ماشین تقسیم شده است. آنها این مسأله را فرموله-بندی کرده و سپس یک الگوریتم ابتکاری رو به عقب برای زمانبندی تک ماشین ارایه کردند. لی و همکاران [۱۱] کار خودشان را با در نظر گرفتن چند مقصد در مسأله حمل هوایی گسترش دادند. لی و همکاران [۱۲] نشان دادند که مسأله تخصیص حمل هوایی دارای ساختار مسایل حمل منظم می‌باشد، در حالی که مسأله زمانبندی تک ماشین NP-hard است. آنها همچنین یک روش ابتکاری رو به جلو و یک روش ابتکاری رو به عقب برای تک ماشین پیشنهاد کردند [۱۳]. لی و همکاران [۱۴] کار خودشان را با در نظر گرفتن ماشین های موازی در تولید توسعه دادند. آنها مسأله را به عنوان ماشینهای موازی با جریمه های زودکرد حرکت پروازها در نظر گرفته و یک الگوریتم ابتکاری بر پایه شبیه‌سازی تبرید[3] (SA) برای ماشین های موازی ارایه کردند. آنها الگوریتم شبیه سازی تبرید را با یک روش عملیاتی در یکی از کارخانجات سنگاپور مقایسه کردند [۱۵]. زندیه و ملا علیزاده زواردهی [۱۶] مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی همزمانی را با در نظر گرفتن استراتژی های تحویل مجاز بودن دیرکرد و مجاز نبودن دیرکرد ارایه نمودند. زندیه و ملاعلیزاده زواردهی [۱۷] مدلهای برنامه‌ریزی ریاضی همزمانی خودشان را با درنظر گرفتن ظرفیت‌های مختلف حمل توسعه دادند. رستمیان دلاور و همکاران [۱۸] اولین مدل برنامه‌ریزی ریاضی یکپارچه تولید و حمل هوایی در حالت تک ماشین را ارایه نموده و یک روش فراابتکاری بر پایه الگوریتم ژنتیک[4] (GA) برای مسأله مذکور توسعه دادند.

۳. مدل ریاضی و بیان مسأله

در این بخش از مقاله، مدل برنامه‌ریزی ریاضی یکپارچه تولید و حمل هوایی توسعه یافته‌ای با در نظر گرفتن زمان‌های آماده-سازی وابسته به توالی ارایه می‌شود.

[1]- *Coordinated Supply Chain Scheduling Problem*

[2]- *Synchronization*

[3]- *Simulated Annealing (SA)*

[4]- *Genetic Algorithm (GA)*

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-02-01]

۳-۱. تعاریف و فرض‌های مدل

فرض‌های در نظر گرفته شده برای این مدل عبارتند از:

- کارگاه تولیدی به عنوان تک ماشین در نظر گرفته شده است.
- سفارشات برای تخصیص حمل هوایی و زمانبندی تولید در دوره برنامه ریزی قبلی برای این دوره پذیرفته می شود.
- پروازهای متعددی با شاخص‌های حمل متفاوتی مانند هزینه و ظرفیت وجود دارد.
- زمان و هزینه فرایند اداری به همراه زمان و هزینه بارگیری برای هر پرواز، در زمان و هزینه حمل پروازها قرار داده شده است.
- حمل محلی محصولات را از کارگاه تولیدی تا فرودگاه منتقل می کند. زمان حمل محلی در زمان حمل پروازها قرار داده شده است.
- هنگامی که سفارشات به طور کامل تولید شدند، حمل محلی می تواند آنها را تا فرودگاه انتقال دهد.
- همه سفارشات پذیرفته شده باید به طور کامل مورد پردازش قرار گیرند. به عبارتی هیچ گونه پس‌افتی در تولید مجاز نیست.

۳-۲. نمادها

نمادهای بکار گرفته شده در مدلهای ریاضی این تحقیق بصورت زیر است:

i, i', j: شاخص سفارش یا کار $i = 1, 2, ..., N;$

f, f' : شاخص وسیله حمل $f = 1, 2, ..., F;$

k: شاخص مقصد $k = 1, 2, ..., K;$

t: شاخص نوع ظرفیت وسایل حمل $t = 1, 2, ..., T;$

p : موقعیت یا توالی سفارش i $p = 1, 2, ..., N;$

۳-۳. پارامترهای ورودی

پارامترهای ورودی که برای هر مسأله جمع‌آوری شوند و در طول دوره برنامه‌ریزی ثابت می‌باشند:

D_f: زمان حرکت وسیله حمل f در فرودگاه محلی

A_f: زمان ورود وسیله حمل f در مقصد

des_f: مقصد وسیله حمل f

Q_i: مقدار سفارش i

p_i : زمان پردازش سفارش i

α_i : هزینه جریمه زودکرد تحویل (ساعت/ واحد) سفارش i

β_i: هزینه جریمه دیرکرد تحویل (ساعت/ واحد) سفارش i

α'_i: جریمه زودکرد هر ساعت سفارش یا کار i برای تولید

β'_i: هزینه حمل هر واحد از سفارش i هنگامی که با یک پرواز اختصاصی حمل شود

d_i: موعد تحویل سفارش i

Des_i: مقصد سفارش i

S_{ij}: زمان آماده سازی کار j اگر بعد از کار i انجام شود.

S_j: زمان آماده سازی کار j اگر در ابتدا شروع شود.

Cap_{tf}: t امین نوع ظرفیت موجود وسیله حمل f بطوری که $t = ۱, ۲, ..., T \;;\; f = ۱, ۲, ..., F;$

Tc_{tf}: هزینه حمل هر واحد محصول وقتی که به ظرفیت نوع t ام وسیله حمل f تخصیص یابد

MD_i: حداکثر زمان حرکت پرواز اختصاصی برای سفارش i که با آن می تواند به همه موعد تحویلش برسد

θ: یک عدد بین صفر و یک $۰ < \theta < ۱;$

LN: یک عدد بزرگ مثبت

بدون از دست‌دادن کلی بودن، فرض‌شده است که $D_۱ \le D_۲ \le ... \le D_F$.

۳-۴. متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم بکار گرفته شده در مدل ریاضی پیشنهادی بصورت زیر می باشد:

q_{tif}: مقدار تخصیص یافته از سفارش i به ظرفیت نوع t ام وسیله حمل f

$q_{(T+1)i}$: مقدار تخصیص یافته از سفارش i به پرواز اختصاصیش

u_{ip}: ۱ اگر سفارش i در موقعیت p باشد، ۰ در غیر این صورت

c_i: زمان تکمیل سفارش یا کار i

۳-۵. مدل ریاضی

لی و همکاران [۱۵-۱۰] و زندیه و ملا علیزاده زواردهی [۱۶] از دو نوع ظرفیت و هزینه حمل در هر پرواز معمولی استفاده کردند. برای توسعه این تحقیق و تحقق یک زمانبندی واقعی‌تر مشابه با زندیه و ملا علیزاده زواردهی [۱۷] فرض شده که در بسیاری از صنایع و دوره های زمانی ممکن است که فقط یک و یا بیش از دو نوع ظرفیت در هر وسیله حمل وجود داشته باشد.

بنابراین T نوع ظرفیت پرواز در نظر گرفته شده و از Cap_{tf} برای نشان دادن انواع مختلف ظرفیت وسایل حمل استفاده می شود. همچنین اگر برای یک وسیله حمل داده شده ما فقط h نوع

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-02-01]

ظرفیت داشته باشیم، $Cap_{t,f}$ که $t = h+1...,T$ صفر خواهد بود.

علاوه بر این با در نظرگرفتن پروازهای اختصاصی و مجاز بودن دیرکرد تحویل سفارشات می توانند با پروازهای اختصاصی حمل شوند. با توجه به مسأله تعریف شده، مدل برنامه ریزی ریاضی به صورت زیر فرموله بندی می شود:

$$\min \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}\sum_{f=1}^{F} \left(\left(\left(\frac{\min\left(0, c_i - D_f - \frac{1}{LN}\right)}{c_i - D_f - \frac{1}{LN}}\right)\left(\left(Tc_{tf} \times q_{tif}\right) + \left(\alpha_i' \times \left(D_f - c_i\right) \times q_{tif}\right) + \left(\left(\alpha_i \times \max\left(0, d_i - A_f\right) \times q_{tif}\right) + \left(\beta_i \times \max\left(0, A_f - d_i\right) \times q_{tif}\right)\right)\right) + \left(\left(1 - \left(\frac{\min\left(0, c_i - D_f - \frac{1}{LN}\right)}{c_i - D_f - \frac{1}{LN}}\right)\right)\left(\left(\beta_i' \times q_{tif}\right) + \left(\min\left(\alpha_i', \alpha_i\right) \times \max\left(0, MD_i - c_i\right) \times q_{tif}\right) + \left(\beta_i \times \max\left(0, A_f - d_i\right) \times q_{tif}\right)\right)\right)\right) + \left(\left(1 - \left(\frac{\min\left(0, c_i - D_f - \frac{1}{LN}\right)}{c_i - D_f - \frac{1}{LN}}\right)\right)\left(\left(\beta_i' \times q_{tif}\right)\left(\min\left(\alpha_i', \alpha_i\right) \times \max\left(0, MD_i - c_i\right) \times q_{tif}\right) + \left(\beta_i \times \max\left(0, c_i - MD_i\right) \times q_{tif}\right)\right)\right) + \sum_{i=1}^{N}\left(\left(\beta_i' \times q_{(T+1)i}\right) + \left(\min\left(\alpha_i', \alpha_i\right) \times \max\left(0, MD_i - c_i\right) \times q_{(T+1)i}\right) + \left(\beta_i \times \max\left(0, c_i - MD_i\right) \times q_{(T+1)i}\right)\right) \quad (۱)$$

s.t:

$$\left(\sum_{t=1}^{T} q_{tif}\right) \times \left(Des_i - des_f\right) = 0 \quad i = 1,..., N;\ f = 1,..., F \quad (۲)$$

$$\sum_{i=1}^{N} q_{tif} \le Cap_{tf} \quad t = 1,..., T;\ f = 1,..., F \quad (۳)$$

$$\sum_{t=1}^{T}\sum_{f=1}^{F} q_{tif} + q_{(T+1)i} = Q_i \quad i = 1,..., N \quad (۴)$$

$$\sum_{p=1}^{N} u_{ip} = 1 \quad i = 1,..., N \quad (۵)$$

$$\sum_{i=1}^{N} u_{ip} = 1 \quad p = 1,..., N \quad (۶)$$

$$\sum_{p=1}^{N} u_{ip}\left(p_i + \left(\sum_{i'=1}^{N} s_{i'i} u_{i'(p-1)}\right) + u_{i1} s_i + \left(\sum_{j=1}^{N}\left(\sum_{p'=1}^{p-1}\left(u_{jp'}\left(p_j + \sum_{j'=1}^{N} s_{j'j} u_{j'(p'-1)}\right)\right)\right) + u_{j1} s_j\right)\right) = c_i \quad i = 1,..., N \quad (۷)$$

$$u_{ip} \in \{0,1\} \quad i = 1,..., N;\ p = 1,..., N \quad (۸)$$

$$q_{tif} = \text{Non-negative integer variable} \quad (۹)$$

$$q_{(T+1)i} = \text{Non-negative integer variable} \quad (۱۰)$$

مدل ریاضی هر دو وظیفه تخصیص سفارشات به حمل و زمانبندی تولید را انجام می‌دهد که شامل تخصیص سفارشات به ظرفیتهای پرواز ۱ تا T و پروازهای اختصاصی، تعین زمان حرکت پروازهای اختصاصی در صورت تخصیص یافتن و تعین توالی و زمان تولید سفارشات می‌باشد. با در نظر گرفتن پروازهای اختصاصی و دیرکرد تحویل، سفارشات می‌توانند با پروازهای اختصاصی حمل شوند.

بنابراین تابع هدف شامل هزینه حمل، جریمه های زودکرد و دیرکرد زمان پرواز و تحویل برای سفارشات تخصیص یافته به نوع ۱ تا T از ظرفیت پروازها، هزینه حمل پروازهای اختصاصی، مینیمم جریمه های زودکرد زمان پرواز و تحویل و جریمه‌های دیرکرد تحویل برای سفارشات تخصیص یافته به پروازهای اختصاصی می‌باشد. آن دسته از سفارشاتی که با پروازهای اختصاصی حمل شده و زمان تکمیل آنها کمتر از MD شان است، اگر $\alpha_i' \le \alpha_i$ باشد، زمان حرکت پرواز اختصاصی i برابر با MD_i و اگر $\alpha_i' \ge \alpha_i$ باشد زمان حرکت c_i خواهد بود. بنابراین $\min(\alpha_i', \alpha_i)$ را به عنوان هزینه زودکرد در نظر گرفته شده است.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-02-01]

محدودیت دوم تضمین می‌کند که اگر سفارش i و حمل f مقاصد متفاوتی دارند، سفارش i نمی‌تواند به حمل f تخصیص یابد. محدودیت سوم تضمین می‌نمایند که مقادیر تخصیص یافته نمی-تواند از ظرفیت ۱ تا T پروازها تجاوز کند.

محدودیت چهارم تضمین می‌کند که تمامی سفارشات به طور کامل به پروازها تخصیص یابد.

محدودیتهای (۵) و (۶) بیان می‌دارد که هر کار باید به یک موقعیت و به هر موقعیت فقط یک کار تخصیص یابد. محدودیت (۷) زمان تکمیل کارها را با در نظر گرفتن زمان آماده سازی وابسته توالی بین کارها محاسبه می‌کند.

۴. الگوریتم ژنتیک

از سال ۱۹۶۰ تقلید از پدیده‌های طبیعی برای استفاده در الگوریتمهای قوی جهت حل مسایل مشکل بهینه‌سازی مورد توجه قرار گرفت که تکنیکهای محاسبه تکاملی[1] نام گرفتند. الگوریتم ژنتیک از روشهای فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت می-باشد و در واقع یکی از روش‌های جستجوی تصادفی می‌باشد و بر اساس انتخاب طبیعی و نسل‌شناسی طبیعی کار می‌کند. این الگوریتم دارای تفاوتهای اساسی با دیگر روشهای متداول بهینه-سازی است که گلدبرگ این تفاوتها را به صورت زیر بیان کرده است:

۱. الگوریتم ژنتیک با مجموعه‌ای از جوابهای کدگذاری شده کار می‌کند نه با خود آنها.

۲. الگوریتم ژنتیک در یک جمعیت از جوابها و یا مجموعه‌ای از آنها شروع به جستجو می‌کند نه با یک جواب و در واقع با کل جامعه کار می‌کند نه با یک فرد جامعه.

۳. الگوریتم ژنتیک از اطلاعات تابع برازش استفاده می‌کند نه از مشتقها یا علوم کمکی دیگر.

۴. الگوریتم ژنتیک از قواعد مبتنی بر احتمال استفاده می‌کند نه از قواعد قطعی.

الگوریتم ژنتیک، الگوریتمی ریاضی است که با استفاده از الگوهای عملیاتی داروینی در مورد تکثیر بقای احسن و بر اساس فرآیند طبیعی ژنتیک مجموعه‌ای از اشیاء منفرد ریاضی را با میزان تطبیقی خاص به جمعیتی جدید تبدیل می‌کند. بطور کلی مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک ارایه شده در این مقاله را به صورت شکل شماره های ۲ و ۳ نشان داده است.

[1]- *Evolutionary Algorithms*

```
Procedure   Hybrid genetic algorithm
Initialization
Fitness evaluation
X_best = Update
Counter = 0
While stopping criterion is not met do
    Reproduction (p_r%)
    Crossover (1- p_r%)
    Mutation (All offspring produced by crossover, p_m)
    Fitness evaluation
    X_best = Update
    X_best = Local search

    If X_best is not improved do
        Counter = Counter + 1
        If Counter > no_change do
            Population = restart phase
            Counter = 0
        Endif
    Else
        Counter = 0
    Endif
Endwhile
```

شکل ۲. مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک اصلاح شده

```
Procedure   Local Search
k = 1
While k < n + 1 do
    v = mutated solution
    If f(v) < f(x) do
        x = v
        k = n
        If f(v) < f(x_best) then
            x_best = v
        Endif
    Endif
    k = k + 1
Endwhile
```

شکل ۳. مراحل اجرای جستجوی محلی توسعه داده شده

رویه کلی مسأله بدین صورت می باشد که ابتدا الگوریتم برای مسأله حمل اجرا شده و با بدست آوردن مقادیر تخصیص حمل بدست آمده بار دیگر الگوریتم برای زمانبندی تولید اجرا می‌گردد. در هر مرحله از اجرای الگوریتم ابتدا جواب اولیه برای نسل اول بطور تصادفی ایجاد می‌شوند، سپس در هر تکرار عملگر های تولید مجدد، تقاطع و جهش و جستجوی محلی به کار گرفته می‌شود.

نوع همسایگی به گرفته شده جستجوی محلی معادل با نوع عملگر جهش به کار رفته می‌باشد. نحوه نمایش جواب در مرحله زمانبندی به صورت بردار توالی سفارشات، عملگر تقاطع بکار رفته عملگر تک نقطه‌ای و عملگر جهش بکار رفته عملگر جابجایی است. نحوه نمایش جواب در مرحله تخصیص حمل به صورت

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-02-01]

ماتریسی است که عملگرهای تقاطع و جهش در شکل شماره های ۴ و ۵ توضیح داده شده است.

عملگر تقاطع بکار رفته در تخصیص حمل:

این عملگر توسط ویکناکس و میشایلویچ [۱۹] به شرح زیر و مطابق شکل شماره ۴ ارایه گردیده است:

مرحله ۱: دو والد x^1 و x^2 را با استفاده از چرخ رولت انتخاب کنید.

مرحله ۲: دو ماتریس موقتی D و R را با استفاده از فرمولهای زیر بدست آورید.

$$d_{ij} = \left[\left(x_{ij}^1 + x_{ij}^2 / 2\right)\right] \quad (۱۱)$$

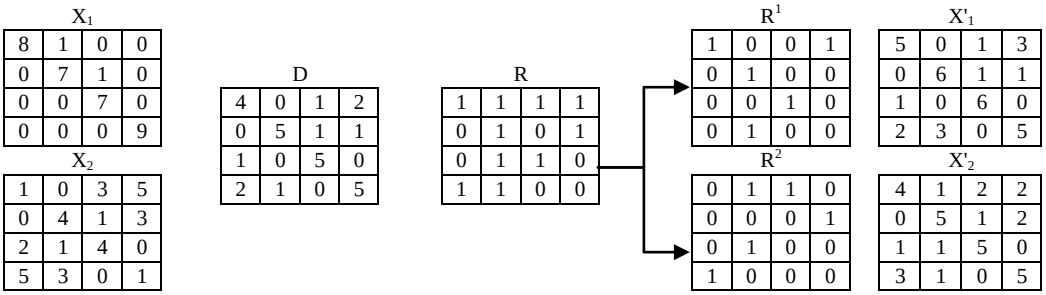
$$r_{ij} = \left(x_{ij}^1 + x_{ij}^2\right) \bmod 2 \quad (۱۲)$$

مرحله ۳: ماتریس R را به دو قسمت تقسیم کنید بطوری که:

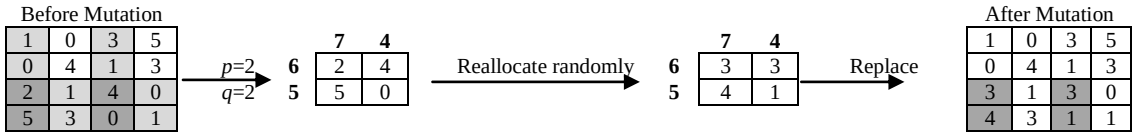
$$R = R^1 + R^2$$

$$\sum_{j=1}^{n} r_{ij}^1 = \sum_{j=1}^{n} r_{ij}^2 = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{n} r_{ij} \quad i = 1,2,\ldots,F \quad (۱۳)$$

$$\sum_{i=1}^{F} r_{ij}^1 = \sum_{i=1}^{F} r_{ij}^2 = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{F} r_{ij} \quad j = 1,2,\ldots,n \quad (۱۴)$$



شکل ۴. نحوه تولید فرزند به وسیله عملگر تقاطع



شکل ۵. نحوه کار عملگر جهش

مرحله ۴: دو فرزند X'_1 و X'_2 را به صورت زیر تولید کنید:

$$X_1^{'} = D + R^1 \quad (۱۵)$$

$$X_2^{'} = D + R^2 \quad (۱۶)$$

عملگر جهش بکار رفته در تخصیص حمل:

در این عملگر مطابق شکل شماره ۵ یک قسمت کوچک از ماتریس حمل به طور تصادفی انتخاب شده و دوباره به طور تصادفی یک تخصیص حمل برای قسمتهای انتخاب شده ایجاد می‌شود.

۵. الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

ملادنویچ [۲۰] در سال ۱۹۹۵، اولین کسی بود که الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر[1] (VNS) را مطرح کرد. این الگوریتم کاربرد زیادی در حل مسایل بهینه سازی داشته است. الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر یکی از الگوریتم‌های فوق ابتکاری جدید بر پایه تغییرات سیستماتیک ساختار همسایگی[2] می باشد که برای جستجوی جواب بهینه در فضای مسایل بهینه سازی ترکیباتی به کار می‌رود. تغییرات سیستماتیک از طریق تغییر موقعیت از یک همسایگی به همسایگی دیگر جواب در حین جستجوی فضای جواب صورت می‌گیرد. VNS ساختارهای

[1]- *Variable neighborhood search (VNS)*
[2]- *Neighborhood structure (NS)*

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-02-01]

همسایگی مناسب و متنوع را به کار می‌گیرد و به این ترتیب جستجوی جواب را در نواحی مختلف از فضای جواب انجام می‌دهد. الگوریتم VNS روشی است که قادر است خود را از دام بهینه موضعی رها کند.

مبنای این الگوریتم براساس این ایده می‌باشد که تغییرات ساختار همسایگی در هنگام جستجوی فضای جواب، از خطر افتادن در بهینه محلی که در بسیاری از مسایل بهینه سازی ترکیباتی محتمل می‌باشد، جلوگیری می کند [۲۱] . خصوصا، با رشد سریع فضای جواب همراه با اندازه مسأله، احتمال به دام افتادن در مینیمم محلی اجتناب ناپذیر خواهد بود.

به طور عمومی الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر از یک جواب اولیه $x \in S$ شروع می‌کند که S فضای جواب مسئله می‌باشد. برای جستجو در فضای جواب از دو موتور جستجوی اصلی یعنی فرآیندهای ارتعاش[1] و جستجوی محلی[2] استفاده می‌شود. فرآیند ارتعاش به عنوان یک عامل نوگرا[3] برای حلقه جستجوی محلی به کار می‌رود. در حالی که جستجوگر محلی جستجوی وسیع و اصلی را انجام می‌دهد، فرآیند ارتعاش با حرکت از یک ساختار همسایگی به ساختار همسایگی دیگر در جواب ها تنوع ایجاد می‌کند [۲۲ و ۲۳] .

عملکرد مناسب الگوریتم VNS بستگی به کارایی ساختارهای همسایگی به کار گرفته شده دارد که دقت زیادی برای انتخاب آن باید انجام داد. نامگذاری این روش به نام جستجوی همسایگی متغیر به دلیل تغییرات ساختار همسایگی در حین انجام فرآیند جستجو می‌باشد. این الگوریتم با استفاده از یک روش معین رفتارهای زیر را از خود نشان می‌دهد:

(i) نقطه مینیمم محلی با در نظر گرفتن یک ساختار همسایگی (به طور مثال ساختار شماره ۱) با نقطه مینیمم محلی به دست آمده توسط یک ساختار همسایگی دیگر (به طور مثال ساختار شماره ۲) لزوما یکی نیست.

(ii) نقطه مینیمم مطلق با در نظر گرفتن تمام ساختارهای همسایگی ممکن همان نقطه محلی می‌باشد.

(iii) در بسیاری از مسایل، نقاط مینیمم محلی به دست آمده با توجه در نظر گرفتن یک یا چند همسایگی، به طور نسبی نزدیک به یکدیگر می‌باشند [۲۴] .

برخلاف بسیاری از الگوریتم های ابتکاری دیگر، الگوریتم VNS و مشتقات آن بسیار ساده هستند و نیاز به تعداد پارامترهای تنظیم شده کمتری دارند. بنابراین دستیابی به جواب هایی با کیفیت بالا، در کنار ساده بودن این روش، کارایی مناسب این الگوریتم را نشان می‌دهد. الگوریتم VNS در حالت پایه (BVNS) دو روش جستجوی احتمالی و قطعی را ترکیب می‌کند. ابتدا یک سری از ساختارهای همسایگی N_k , $k = 1,...,k_{\max}$ برای تولید جواب همسایگی حول نقاط موجود در فضای جواب تعیین می‌شوند. $N_k(x)$ یعنی همان مجموعه جوابهایی هستند که در kامین همسایگی از فضای x قرار دارند و توسط kامین ساختار همسایگی N_k ایجاد می‌باشند [۲۵] . سپس جواب اولیه از فضای جواب انتخاب می‌شود و به عنوان جواب فعلی[4] در x قرار می‌گیرد ($x \in S_p$). همچنین شرط توقف الگوریتم در این مرحله مشخص می‌شود. شرایط یک مرحله از حلقه داخلی الگوریتم (مرحله شماره ۳) به شرح زیر است:

در حلقه جستجو (مرحله ۳) و در حالی که $k = 1$ می‌باشد، فرایند ارتعاش برای تولید تصادفی جواب همسایگی x' از جواب فعلی به کار می‌رود که این عمل با توجه به اولین ساختار همسایگی N_1 انجام می‌شود (3.a). سپس جستجوی محلی برای به دست آوردن نقطه مینیمم محلی x'' با توجه به جواب اولیه x' انجام می‌شود (3.b). در مرحله (3.c) عمل مقایسه بین مینیمم محلی x'' و جواب فعلی x انجام می‌شود. اگر مقدار x'' نسبت به x بهبود پیدا کرد، x'' در جای x قرار می گیرد و فرآیند جستجو مجددا از اولین ساختار همسایگی کار خود را شروع می‌کند.

در غیر این صورت اگر مینیمم محلی بدست آمده بدتر باشد، فرآیند جستجو در همسایگی دیگری از جواب کاندیدا با استفاده از ساختار همسایگی دیگر ادامه می‌یابد جایی که $k \longleftarrow k+1$.

در این حالت ساختار همسایگی به طور سیستماتیک تغییر می‌کند و فرآیند ارتعاش نقطه شروع دیگری را برای اجرای جستجوی محلی جدید جستجو می‌کند.

به عبارت دیگر فرآیند ارتعاش به عنوان یک ارتباط دهنده از یک ناحیه به ناحیه‌ای دیگر از فضای جواب عمل می‌کند تا در آنجا یک فرآیند جستجوی محلی جدید اجرا شود. در حقیقت فرآیند ارتعاش به اکتشاف تنوع می‌بخشد. بعد از اینکه تمام همسایگی ها در نظر گرفته شد، مجددا از اولین همسایگی فرآیند جستجو را توسط اولین ساختار ادامه می‌دهیم تا هنگامی که شرط توقف ارضا شود. شرط توقف به طور معمول حداکثر تعداد تکرار الگویتم یا حداکثر زمان محاسباتی و یا ماکزیمم زمان محاسباتی بعد از آخرین بهبود می‌باشد [۲۴] . شبه‌کد این الگوریتم در شکل شماره ۶ نمایش داده شده است.

[1]- Shake
[2]- Local search
[3]- Refresher
[4]- Current Solution

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-02-01]

۶. طراحی آزمایش‌ها و نتایج محاسباتی

برای ارزیابی و مقایسه عملکرد الگوریتم ژنتیک و روشهای دقیق از یک طرح برای تولید داده‌های آزمایشی استفاده می شود. برای ایجاد مسایل آزمایشی از نماد j--F--d-- مطابق با مقاله لی و همکاران [۱۴] استفاده می‌شود که j معرف تعداد کارها، F معرف تعداد پروازها و d معرف تعداد مقاصد می‌باشد. زمان حرکت هر پرواز از یک توزیع یکنواخت مطابق با مقصدش تولید شده است. تعداد کل پروازهایی که مقصد یکسانی دارند با TF_k نشان داده شده است. به پروازهای متناظر یک شماره پرواز اختصاص یافته که از ۱ تا TF_k می‌باشد. سپس زمان حرکت هر پرواز از توزیع یکنواخت مطابق با جدول زیر تولید شده است. همچنین دیگر داده های مورد نیاز برای طرح آزمایش در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

در فرآیند دستیابی یک الگوریتم به جواب های مناسب و مطلوب عوامل مختلفی تاثیر گذار می‌باشند. از جمله این عوامل منطق به کار رفته در توسعه الگوریتم و مقادیر تخصیص داده شده به پارامترها و انتخاب عملگرهای الگوریتم می‌باشد. چنانچه ترکیب پارامترهای مؤثر در اجرای الگوریتم به درستی انتخاب نشود، جواب‌های به دست آمده از کیفیت لازم برخوردار نخواهند بود. طراحی آزمایشات تاگوچی، یکی از روشهای مورد استفاده در مبحث طراحی آزمایشات است که اجرای آن در صنایع مختلف با موفقیتهای زیادی همراه بوده است. لذا در این قسمت سعی می‌شود که با استفاده از یک روش سیستماتیک پارامترهای مؤثر در عملکرد الگوریتم شناسایی و سپس مقادیر مناسب آن ها جهت اجرا تعیین گردد.

1. Initialization

Define the set of neighborhood structures N_k, for $k = 1,...,k_{\max}$ that will be used in the search;

Choose a stopping condition; and find the initial solution x;

2. Repeat until stopping condition is met:

Set $k \longleftarrow 1$;

3. Repeat the following steps until $k > k_{\max}$:

3.a. Shaking: Generate point x' at random from the kth neighborhood of x ($x' \in N_k(x)$);

3.b. Local search: Apply some local search methods with x' as initial solution to obtain a local optimum given by x'';

3.c. Neighborhood change:

if the local optimum x'' is better than x then $x \longleftarrow x''$ and continue the search with N_1 ($k \longleftarrow 1$); Otherwise, set $k \longleftarrow k+1$;

شکل ۶. مراحل اجرای الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

در خصوص پارامترهای الگوریتم ژنتیک سه عامل تعداد جمعیت در هر نسل (pop-size) و درصد استفاده از عملگر تقاطع (p_c) و در خصوص عملگرها، عملگرهای تقاطع و جهش در تشکیل طرح آزمایش بکار می‌رود.

پس از اجرای آزمایشات برای تجزیه و تحلیل نتایج الگوریتم ها و جهت تعیین پارامترهایی که بهترین جواب را ارایه می دهند، از نسبت S/N و درصد انحراف نسبی[1] (RPD) که به صورت زیر تعریف می‌گردد، استفاده می‌شود.

جدول ۱. طرح تولید داده های مورد نیاز مسایل آزمایشی

پارامتر مسایل	تعداد حالات	مقادیر
N	9	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100
F	9	4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20
K	4	2, 2, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 5
Q_i	1	Uniform [50,200]
d_i	1	Uniform [1,6] × ($Q_i \times p_i + t_i$)
α_i	1	Uniform [3,5]
α'_i	1	Uniform [3,5]
β_i	1	Uniform [5,8]
Des_i	1	Uniform [1,K]
des_f	1	Uniform [1,K]

[1]- *Relative percentage deviation*

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-02-01]

ادامه جدول ۱. طرح تولید داده های مورد نیاز مسایل آزمایشی

پارامتر مسایل	تعداد حالات	مقادیر
D_f	1	Uniform [24× (FN_f -1)/TF_k , 24×FN_f/TF_k]
Cap_{1f}	1	Uniform [200,800]
Cap_{2f}	1	Uniform [100,200]
Tc_{1f}	1	Uniform [60+20 des_f, 80+20 des_f]
Tc_{2f}	1	Uniform [60+20 des_f, 80+20 des_f]
β'_i	1	Uniform [60+20 des_f, 80+20 des_f]
A_f	1	$D_f + t_f$
MD_i	1	$d_i - t_i$
p'_i	1	Uniform [0.5,1.5]
λ	1	λ=($\sum Q_i p'_i$)× uniform [1.2,2]/24
p_i	1	p_i=p'_i / λ
S'_{ij}	1	Uniform [0.1,0.3]
S_{ij}	1	$S_{ij} = S'_{ij} / \lambda$

$$S/N\ ratio = -10\log_{10}(objective function)^2 \qquad (۱۱)$$

$$RPD = \frac{Alg_{sol} - Min_{sol}}{Min_{sol}} \times 100 \qquad (۱۲)$$

Alg_{sol}: جواب بدست آمده توسط الگوریتم ها

Min_{sol}: بهترین جواب به دست آمده برای مسایل نمونه توسط الگوریتم‌ها

بدین منظور و برای بدست آوردن مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم ها با استفاده از ۴۵ مسأله آزمایشی تولید و به علت تصادفی بودن این روشها هر کدام از مسایل در هر از حالت از جدول تاگوچی ۶ بار اجرا می شوند.

پس از اجرای برنامه‌ها، مقادیر نسبت S/N و RPD برای تمامی تابع هدف مسایل محاسبه می‌شود و در نهایت میانگین آنها در هر سطح محاسبه می گردد. دلیل استفاده از RPD نرمالیزه کردن خروجی‌ها جهت مقایسه با یکدیگر می‌باشد. هر چقدر مقدار میانگین RPD کمتر باشد، جواب بهتر است.

نتایج بدست آمده از آزمایشات با استفاده از نسبت S/N و درصد انحراف نسبی (RPD) نشان می‌دهد که در الگوریتم زنتیک مقادیر بهینه اندازه جمعیت، نرخ تقاطع و نرخ جهش برای مرحله حمل به ترتیب برابر با ۳۵، ۰/۶ و ۰/۱ و برای مرحله زمانبندی تولید به ترتیب برابر با ۲۰، ۰/۸ و ۰/۰۵ می‌باشد.

همچنین در الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر مقدار بهینه تعداد ساختارهای همسایگی و تعداد تکرار در هر جستجوی محلی برای مرحله حمل به ترتیب برابر با ۳ و ۲۰۰ و برای مرحله زمانبندی تولید به ترتیب برابر با ۴ و ۱۵۰ می باشد. ساختار همسایگی های مورد استفاده در مرحله حمل بدین صورت می‌باشد که با افزایش شماره ساختار همسایگی تعداد بیشتری سطر و ستون ماتریس تخصیص حمل برای تخصیص دوباره تصادفی انتخاب می‌شود. همچنین ساختار همسایگی‌های مورد استفاده در مرحله زمانبندی تولید به ترتیب برابر با جابجایی متوالی، جابجایی بزرگ، جاگذاری و وارونگی است.

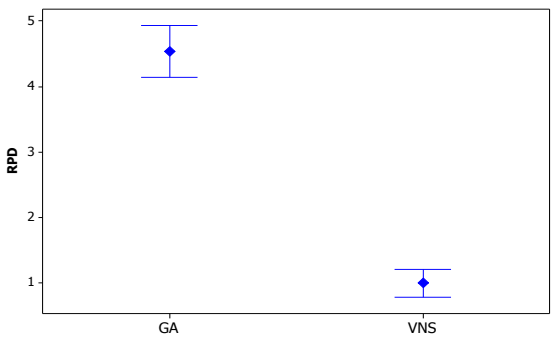
برای تحلیل آماری دقیق از تحلیل واریانس یک طرفه[1] استفاده می‌شود که این کار را با استفاده از نرم افزار MINITAB 14 انجام می‌گیرد. شکل شماره ۷ نتایج حاصل از ANOVA را نشان می‌دهد.

برای تحلیل بیشتر و یافتن اختلافات معنا دار از روش حداقل اختلاف معنی دار (LSD) استفاده می‌کنیم. در این شکل، خروجی روش LSD را با استفاده از نرم افزار MINITAB 14 نشان می‌دهد.

همان‌گونه که مشخص است بین نتایج الگوریتم ها تفاوت معنا دار وجود دارد. با توجه به نتایج می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم VNS از لحاظ آماری و در سطح اطمینان ۹۵٪ عملکرد بهتری نسبت به GA دارد.

در شکل شماره ۸، نتیجه حاصل از الگوریتم ژنتیک و جستجوی همسایگی متغیر در ابعاد ۲۰ سفارش ۴ پرواز ۲ مقصد تا ۱۰۰ سفارش ۲۰ پرواز ۵ مقصد مقایسه شده است. این شکل نشان داده می‌شود که کیفیت جواب بدست آمده از الگوریتم VNS بهتر از GA می‌باشد.

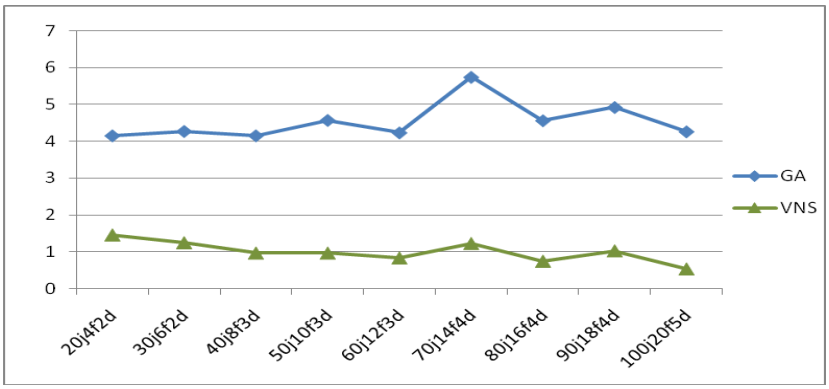
با افزایش ابعاد مسأله یعنی افزایش تعداد سفارشات، پروازها و مقاصد، اختلاف بین این دو الگوریتم افزایش می‌یابد و کیفیت جواب الگوریتم VNS بهبود می‌یابد.



شکل ۷. فاصله اصمینان ۹۵٪ برای RPD تابع هدف مسایل

[1]- *One-Way Analysis of Variance*

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-02-01]



شکل ۸. مقایسه تابع هدف جواب‌های بدست آمده از GA و VNS

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، به مسأله زمانبندی یکپارچه تولید و حمل هوایی در زنجیره تأمین با در نظر زمان آماده سازی وابسته به توالی پرداخته شد. بدین منظور برای مسأله مورد نظر مدل ریاضی جدیدی ارایه شد. همچنین با توجه به NP-hard بودن مسأله، دو الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر (VNS) با استفاده از نرم افزار MATLAB 7.6 توسعه داده شد. در ادامه به علت تاثیر مقدار پارامترهای یک الگوریتم در کیفیت جواب‌های به دست آمده به تنظیم پارامترها و عملگرهای الگوریتم با استفاده از طراحی آزمایشهای تاگوچی پرداخته شد. سپس کیفیت جواب-های بدست آمده از دو الگوریتم مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرار گرفته و کارایی بهتر الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر به طور کامل نشان داده شده است. برای کارهای آینده می توان با بسط مدل‌های تشریح شده برای حالتهای دیگر تولیدی مانند ماشین‌های موازی، جریان کارگاهی و غیره تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام گیرد. همچنین می توان برای مدل های ارایه شده از دیگر روش‌های فراابتکاری مانند الگوریتم شبیه سازی تبرید، الگوریتم ممتیک و غیره را توسعه داد.

مراجع

[1] Brucker, P., knust, S., *Complex Scheduling*, Springer 2006.

[2] Blumenfeld, D.E., Burns, L.D., Daganzo, C.F., *Synchronizing Production and Transportation Schedules*. Transportation Research B, 25, 1991, pp. 23-27.

[3] Beamon, B.M., *Supply Chain Design and Analysis: Models and Methods*. International Journal of Production Economics, 55, 1998, pp. 281–294.

[4] Erengüç, S.S., Simpson, N.C., Vakharia, A.J., *Integrated Production/Distribution Planning in Supply Chains*: An invited review. European Journal of Operational Research 115, 1999, pp. 219–236.

[5] Sarmiento, A.M., Nagi, R., *A Review of Integrated Analysis of Production Distribution Systems*. IIE Transactions, 31, 1999, pp. 1061– 1074.

[6] Goetschalckx, M., Vidal, C.J., Dogan, K., *Modeling and Design of Global Logistics Systems: A Review of Integrated Strategic and Tactical Models and Design Algorithms*. European Journal of Operational Research, 143, 2002, pp. 1-18.

[7] Hall, N.G., Potts, C.N., *Supply Chain Scheduling: Batching and Delivery*. Operations Research, 51, 2003, pp. 566–584.

[8] Chen, Z.L., *Integrated Production and Distribution Operations: Taxonomy, Models, and Review*, in Handbook of Quantitative Supply Chain Analysis: Modeling in the E-Business Era, Simchi-Levi, D., Wu, D. and Shen, Z.-J. (eds.), Kluwer, Boston, MA, 2004, pp. 711–745.

[9] De-Matta, R., Miller, T., *Production and Inter-Facility Transportation Scheduling for a Process Industry*. European Journal of Operational Research, 158, 2004, pp. 72–88.

[10] Li, K.P., Sivakumar, A.I., Mathirajan, M. and Ganesan, V.K. (2004). Solution methodology for synchronizing assembly manufacturing and air transportation of consumer electronics supply chain. International Journal of Business, 9, pp. 361-380.

[11] Li, K.P., Ganesan, V.K., Sivakumar, A.I., *Synchronized Scheduling of Assembly and Multi-Destination Air Transportation in a Consumer Electronics Supply Chain*. International Journal of production Research, 43, 2005, pp. 2671-2685.

[12] Li, K.P., Ganesan, V.K., Sivakumar, A.I., *Scheduling of Single Stage Assembly with Air Transportation in a Consumer Electronic Supply Chain*. Computers and Industrial Engineering, 51, 2006. pp. 264-278.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-02-01]

[13] Li, K.P., Ganesan, V.K., Sivakumar, A.I., *Methodologies for Synchronized Scheduling of Assembly and Air Transportation in a Consumer Electronic Supply Chain*. International Journal of Logistics Systems and Management, 2, 2006, pp. 52-67.

[14] Li, K.P., Sivakumar, A.I., Ganesan, V.K., *Complexities and algorithms for Synchronized Scheduling of Parallel Machine Assembly and Air Transportation in Consumer Electronic Supply Chain*. European Journal of Operational Research, 187, 2008, pp. 442-455.

[15] Li, K.P., Sivakumar, A.I., Fu, Q., Jin, X., *A Case Study for Ssynchronized Scheduling and Manufacturing and Air Transportation in Consumer Electronics Supply Chain. In: IEEE* Conference on Industrial Engineering and Engineering *Management* (IEEM), December 2-4, Singapore, 2007, pp. 1629-1633.

[16] Zandieh, M., Molla-Alizadeh-Zavardehi, S., *Synchronized Production and Distribution Scheduling with Due Window*, Journal of Applied Sciences, 8, 2008, pp. 2752-2757.

[17] Zandieh, M., Molla-Alizadeh-Zavardehi, S., *Synchronizing Production and Air Transportation Scheduling using Mathematical Programming Models*, Journal of Computational and Applied Mathematics, 230, 2009, pp. 546-558.

[18] Rostamian Delavar, M., Hajiaghaei-Keshteli, M., Molla-Alizadeh-Zavardehi, S., *Genetic Algorithms for Coordinated Scheduling of Production and Air Transportation,* Expert Systems with Applications (2010), doi:10.1016/j.eswa.2010.05.060.

[19] Vignaux, G.A., Michalewicz, Z., *A Genetic Algorithm for the Linear Transportation Problem*. IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics, 21, 1991, pp. 445-452.

[20] Mladenovic, N., *A Variable Neighborhood Algorithm-a New Metaheuristic for Combinatorial Optimization*. Abstracts of papers presented at Optimization Days, Montreal, 1995, p. 112.

[21] Sevkli, M., Aydin, M.E., *Parallel Variable Neighbourhood Search Algorithms for Job Shop Scheduling Problems*. IMA Journal of Management Mathematics, 18, 2007, pp. 117-133.

[22] Mladen ovic, N., Hansen, P., *Variable Neighborhood Search.* Computers and Operations Research, 24, 1997, pp. 1097–1100.

[23] Hansen, P., Mladenovic, N., *Variable Neighborhood Search: Principles and Applications*. European Journal of Operational Research, 130, 2001, pp. 449–67.

[24] Hansen, P., Mladenovic, N., Urosevic, D., *Variable Neighborhood Search and Local Branching.* Computers and Operations Research, 33, 2006, pp. 3034–3045.

[25] Mladenovic, N., Drazic, M., Kovacevic-Vujcic, V., Cangalovic, M., *General Variable Neighborhood Search for the Continuous Optimization*. European Journal of Operational Research, 191, 2008, pp. 753-770.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-02-01]