



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

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 تامین،
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 تامین با در نظر گرفتن زمان های آماده سازی وابسته به توالی جهت طراحی یک رویه کاربردی برای ایجاد زمانبندی تولید و توزیع قابل استفاده و واقعی تر مورد مطالعه قرار می گیرد. بدین منظور مدل های برنامه ریزی ریاضی با در نظر گرفتن زمان آماده سازی وابسته به توالی در تولید جهت کمینه نمودن کل هزینه های زنجیره تامین که شامل هزینه های توزیع، زودکرد و دیرکرد تولید و تحویل می باشد، ارائه می شود. با توجه به پیچیدگی حل و سخت بودن این مسأله، الگوریتم های ژنتیک و جستجوی همسایگی متغیر برای بهینه سازی پیشنهاد می گردد. همچنین با استفاده از طراحی آزمایشات تاگوچی، مقدار مناسب پارامترهای دو الگوریتم فوق و عملگرهای مناسب تعیین می گردد و سپس کیفیت جواب های به دست آمده با یکدیگر مقایسه می شود. نتایج محاسباتی نشان می دهد که الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر توسعه داده شده جواب های بهتری را نسبت به الگوریتم ژنتیک بدست می آورد.

۱. مقدمه

مسائل زمانبندی قدیمی و سنتی فرض می کردند که همیشه منابع نامحدودی برای تحویل کالاهای تمام شده به مقاصدشان وجود دارد و زمانی برای حمل آنها مورد نیاز نمی باشد، به طوری که محصولات تولید شده یا کامل شده می توانند بدون تاخیر به مشتریان حمل شوند. اما بر خلاف این دیدگاه یک نیاز برای یک رویه هماهنگ برای ایجاد زمانبندی تولید و توزیع واقعی تر برای قابل استفاده بودن در زنجیره تامین همواره احساس می شود.

تاریخ وصول: ۹۰/۲/۴

تاریخ تصویب: ۹۰/۵/۲۹

*نویسنده مسئول مقاله: دکتر رضا توکلی مقدم، استاد گروه مهندسی صنایع، پردیس دانشکده های 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 می دهد. در این زنجیره، قطعات به عنوان موجودی ذخیره می شوند. 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 می شود. هماهنگی تولید و حمل هوایی مهم است، زیرا محموله هایی که پرواز زمانبندی شده مربوطه را از دست می دهند باید با پروازهای اختصاصی حمل شوند که هزینه حمل سنگینی را باید متحمل شد. در این مطالعه، هزینه های اضافی که به پروازهای اختصاصی مرتبط است، جریمه دیرکرد حرکت پروازها نامیده می شود. هزینه های زودکرد حرکت پروازها ناشی از نیاز به ذخیره کردن سفارشات در کارخانه تولیدی یا هزینه انتظار و نگهداری در فرودگاه است. جریمه های تاخیر هنگامی اتفاق می افتد که یک سفارش دیرتر و یا زودتر از موعد مقرر به مشتریان می رسد. هزینه دیرکرد تحویل شامل نارضایتی مشتریان، جریمه های قرارداد، از دست دادن فروش، از دست

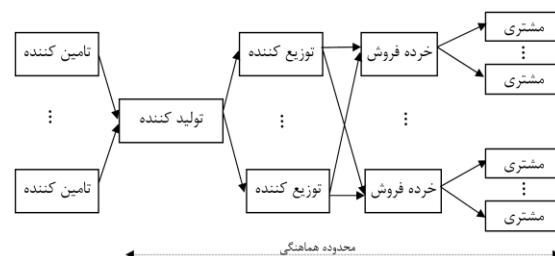
شده است [۸و۷]. دی‌ماتا و میلر [۹] نشان دادند که پتانسیل زیادی برای کاهش هزینه‌ها با هماهنگ کردن تصمیمات در زنجیره تامین وجود دارد.

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^۲ زمانبندی تک ماشین و حمل و نقل 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 ارائه 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 شبیه سازی تبرید^۳ (SA) برای ماشین های موازی ارائه 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] مدل های برنامه ریزی ریاضی همزمانی را با در نظر گرفتن استراتژی های تحویل مجاز بودن دیرکرد و مجاز نبودن دیرکرد ارائه نمودند. زندیه و ملاعلیزاده زواردهی [۱۷] مدل های برنامه ریزی ریاضی همزمانی خودشان را با در نظر گرفتن ظرفیت های مختلف حمل توسعه دادند. رستمیان دلاور و همکاران [۱۸] اولین مدل برنامه ریزی ریاضی یکپارچه تولید و حمل هوایی در حالت تک ماشین را ارائه نموده و یک روش فراابتکاری بر پایه الگوریتم ژنتیک^۴ (GA) برای مسأله مذکور توسعه دادند.

۳. مدل ریاضی و بیان مسأله

در این بخش از مقاله، مدل برنامه ریزی ریاضی یکپارچه تولید و حمل هوایی توسعه یافته ای با در نظر گرفتن زمان های آماده-سازی وابسته به توالی ارائه می شود.

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 می شود. 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 سخت ترین مسایل بهینه سازی ترکیبی می باشد و به سبب پیچیدگی ذاتی مسایل بهینه سازی ترکیبی و به خصوص مسایل زمانبندی تولید استفاده از روش های ابتکاری برای حل چنین مسایلی، بهبودهای موثری در تولید جواب های قابل قبول ایجاد کرده است. چرا که با افزایش ابعاد مسأله، عملاً روش های سنتی ریاضی تعیین جواب بهینه به دلیل زمان بر بودن، کارایی خود را از دست می دهند [۱]. بنابراین استفاده از الگوریتم های فوق ابتکاری در حل این مسایل مورد توجه محققان قرار گرفته است.

۲. پیشینه تحقیق

مسأله زمانبندی زنجیره تامین هماهنگ^۱ یکی از سخت ترین مسایل بهینه سازی ترکیبی است. این مسأله از دو جنبه تحقیقاتی مدیریت تولید و عملیات و بهینه سازی ترکیبی دارای اهمیت است و در سال های 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) تقسیم بندی می شود. اغلب تحقیقات گزارش شده در زنجیره تامین مربوط به رویکرد استراتژیک و تاکتیکی برای بهینه کردن ساختار و مدیریت سیستم مطابق با اهداف اقتصادی شان می باشد [۶-۲]. اخیراً توجه بیشتری به هماهنگی تولید و توزیع در سطح زمانبندی عملیات

²- Synchronization

³- Simulated Annealing (SA)

⁴- Genetic Algorithm (GA)

¹- Coordinated Supply Chain Scheduling Problem

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:

$$\begin{aligned} i, i', j &: \text{شاخص سفارش یا کار}; i = 1, 2, \dots, N \\ f, f' &: \text{شاخص وسیله حمل}; f = 1, 2, \dots, F \\ k &: \text{شاخص مقصد}; k = 1, 2, \dots, K \\ t &: \text{شاخص نوع ظرفیت وسایل حمل}; t = 1, 2, \dots, T \\ p &: \text{موقعیت یا توالی سفارش}; p = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

۳-۳. پارامترهای ورودی

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

$$\begin{aligned} D_f &: \text{زمان حرکت وسیله حمل } f \text{ در فرودگاه محلی} \\ A_f &: \text{زمان ورود وسیله حمل } f \text{ در مقصد} \\ des_f &: \text{مقصد وسیله حمل } f \\ Q_i &: \text{مقدار سفارش } i \\ p_i &: \text{زمان پردازش سفارش } i \\ \alpha_i &: \text{هزینه جریمه زودکرد تحویل (ساعت/واحد) سفارش } i \\ \beta_i &: \text{هزینه جریمه دیرکرد تحویل (ساعت/واحد) سفارش } i \end{aligned}$$

۳-۴. متغیرهای تصمیم

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

$$\begin{aligned} q_{tif} &: \text{مقدار تخصیص یافته از سفارش } i \text{ به ظرفیت نوع } t \text{ ام وسیله حمل } f \\ q_{(T+1)i} &: \text{مقدار تخصیص یافته از سفارش } i \text{ به پرواز اختصاصیش} \\ u_{ip} &: \text{اگر سفارش } i \text{ در موقعیت } p \text{ باشد، } 0 \text{ در غیر این صورت} \\ c_i &: \text{زمان تکمیل سفارش یا کار } i \end{aligned}$$

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 دوره‌های 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

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

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

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

$$\sum_{p=1}^N u_{ip} \left(p_i + \left(\sum_{i'=1}^N S_{i'i} u_{i'(p-1)} \right) + u_{i1} S_i + \left(\sum_{j=1}^N \left(\sum_{p'=1}^{p-1} \left(u_{jp'} \left(p_j + \sum_{j'=1}^N S_{jj'} u_{j'(p'-1)} \right) \right) \right) + u_{j1} S_j \right) \right) = c_i \quad i=1, \dots, N \quad (۷)$$

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

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

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

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، تعیین زمان حرکت پروازهای اختصاصی در صورت تخصیص یافتن و تعیین 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 سفارشات که با پروازهای اختصاصی حمل شده و زمان تکمیل آنها کمتر از MD شان است، اگر $\alpha'_i \leq \alpha_i$ باشد، زمان حرکت پرواز اختصاصی i برابر با MD_i و اگر $\alpha'_i \geq \alpha_i$ باشد زمان حرکت c_i خواهد بود. بنابراین $\min(\alpha'_i, \alpha_i)$ را به عنوان هزینه زودکرد در نظر گرفته شده است.

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

علاوه بر این با در نظر گرفتن پروازهای اختصاصی و مجاز بودن دیرکرد تحویل سفارشات می‌توانند با پروازهای اختصاصی حمل شوند. با توجه به مسأله تعریف شده، مدل برنامه ریزی ریاضی به صورت زیر فرموله بندی می‌شود:

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

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

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

Procedure Hybrid genetic algorithm

Initialization

Fitness evaluation

$X_{best} = \text{Update}$

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

$X_{best} = \text{Update}$

$X_{best} = \text{Local search}$

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

$v = \text{mutated solution}$

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 می گردد. در هر مرحله از اجرای الگوریتم ابتدا جواب اولیه برای نسل اول بطور تصادفی ایجاد می شوند، سپس در هر تکرار عملگر های تولید مجدد، تقاطع و جهش و جستجوی محلی به کار گرفته می شود.

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

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

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

محدودیت های (۵) و (۶) بیان می دارد 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 می کند.

۴. الگوریتم ژنتیک

از سال ۱۹۶۰ تقلید از پدیده های طبیعی برای استفاده در الگوریتم های قوی جهت حل مسایل مشکل بهینه سازی مورد توجه قرار گرفت که تکنیک های محاسبه تکاملی^۱ نام گرفتند. الگوریتم ژنتیک از روش های فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت می باشد و در واقع یکی از روش های جستجوی تصادفی می باشد و بر اساس انتخاب طبیعی و نسل شناسی طبیعی کار می کند. این الگوریتم دارای تفاوت های اساسی با دیگر روش های متداول بهینه سازی است که گلدبرگ این تفاوتها را به صورت زیر بیان کرده است:

۱. الگوریتم ژنتیک با مجموعه ای از جواب های کدگذاری شده کار می کند نه با خود آنها.

۲. الگوریتم ژنتیک در یک جمعیت از جوابها و یا مجموعه ای از آنها شروع به جستجو می کند نه با یک جواب و در واقع با کل جامعه کار می کند نه با یک فرد جامعه.

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

۴. الگوریتم ژنتیک از قواعد مبتنی بر احتمال استفاده می کند 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 مجموعه ای از اشیاء منفرد ریاضی را با میزان تطبیقی خاص به جمعیتی جدید تبدیل می کند. 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

$$d_{ij} = \left\lceil \left(x_{ij}^1 + x_{ij}^2 / 2 \right) \right\rceil \quad (11)$$

$$r_{ij} = (x_{ij}^1 + x_{ij}^2) \bmod 2 \quad (12)$$

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 میشایلوچ [۱۹] به شرح زیر و مطابق شکل شماره ۴ ارائه گردیده است:

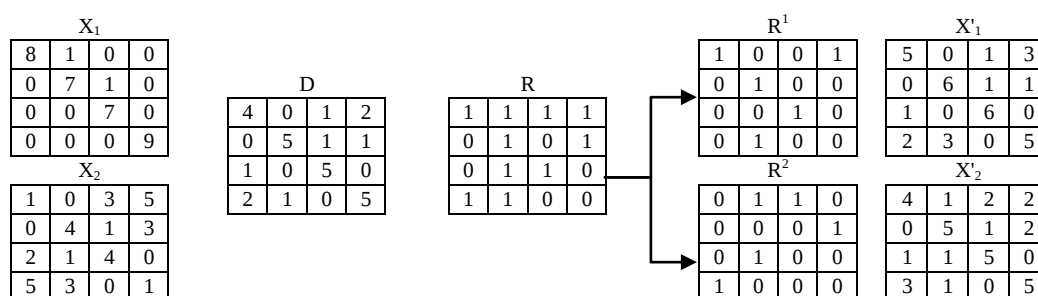
مرحله ۱: دو والد X^1 و X^2 را با استفاده از چرخ رولت انتخاب کنید.

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

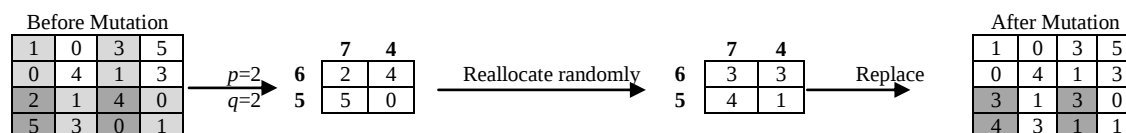
$$R = R^1 + R^2 \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n r_{ij}^1 = \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, F$$

$$\sum_{i=1}^F r_{ij}^1 = \sum_{i=1}^F r_{ij}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^F r_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$



شکل ۴. نحوه تولید فرزند به وسیله عملگر تقاطع



شکل ۵. نحوه کار عملگر جهش

۵. الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

ملاذنیچ [۲۰] در سال ۱۹۹۵، اولین کسی بود که الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر^۱ (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^۲ می باشد که برای جستجوی جواب بهینه در فضای مسایل بهینه سازی ترکیباتی به کار می رود. تغییرات سیستماتیک از طریق تغییر موقعیت از یک همسایگی به همسایگی دیگر جواب در حین جستجوی فضای جواب صورت می گیرد. VNS ساختارهای

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

$$X'_1 = D + R^1 \quad (15)$$

$$X'_2 = D + R^2 \quad (16)$$

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 می شود.

^۱ - Variable neighborhood search (VNS)

^۲ - Neighborhood structure (NS)

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 می‌کند [۲۱]. خصوصاً، 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 فرایندهای ارتعاش^۱ و جستجوی محلی^۲ استفاده می‌شود. فرآیند ارتعاش به عنوان یک عامل نوگرا^۳ 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) لزوماً 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 $N_k, k=1, \dots, k_{\max}$ برای تولید جواب همسایگی حول نقاط موجود در فضای جواب تعیین می‌شوند. $N_k(x)$ یعنی همان مجموعه جوابهایی هستند که در k امین همسایگی از فضای x قرار دارند و توسط k امین ساختار همسایگی N_k ایجاد می‌باشند [۲۵]. سپس جواب اولیه از فضای جواب انتخاب می‌شود و به عنوان جواب فعلی^۴ 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 می‌گیرد و فرآیند جستجو مجدداً 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 $k \leftarrow k+1$. 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، مجدداً 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 الگوریتم 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

۶. طراحی آزمایش‌ها و نتایج محاسباتی

برای ارزیابی و مقایسه عملکرد الگوریتم ژنتیک و روشهای دقیق از یک طرح برای تولید داده‌های آزمایشی استفاده می‌شود. 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 داده‌های مورد نیاز برای طرح آزمایش در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

در فرآیند دستیابی یک الگوریتم به جواب‌های 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 آن‌ها جهت اجرا تعیین گردد.

1. Initialization

Define the set of neighborhood structures N_k , for $k = 1, \dots, k_{\max}$ 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 $k \leftarrow 1$;

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

3.a. Shaking: Generate point x' at random from the k^{th} 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 $x \leftarrow x''$ and continue the search

with N_1 ($k \leftarrow 1$); Otherwise, set $k \leftarrow k + 1$;

شکل ۶. مراحل اجرای الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

جدول ۱. طرح تولید داده‌های 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 $[1,6] \times (Q_i \times p_i + t_i)$
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]

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 الگوریتم‌ها و جهت تعیین پارامترهایی که بهترین جواب را ارائه می‌دهند، از نسبت S/N و درصد انحراف نسبی^۱ (RPD) که به صورت زیر تعریف می‌گردد، استفاده می‌شود.

^۱ - Relative percentage deviation

ادامه جدول ۱. طرح تولید داده های مورد نیاز مسایل

آزمایشی

مقادیر	تعداد حالات	پارامتر مسایل
D_f	1	Uniform $[24 \times (FN_f - 1)/TF_k, 24 \times FN_f/TF_k]$
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	$\lambda = (\sum Q p'_i) \times \text{uniform } [1.2, 2]/24$
p_i	1	$p_i = p'_i / \lambda$
S'_{ij}	1	Uniform $[0.1, 0.3]$
S_{ij}	1	$S_{ij} = S'_{ij} / \lambda$

زمانبندی تولید به ترتیب برابر با ۴ و ۱۵۰ می باشد. ساختار همسایگی های مورد استفاده در مرحله حمل بدین صورت می باشد که با افزایش شماره ساختار همسایگی تعداد بیشتری سطر و ستون ماتریس تخصیص حمل برای تخصیص دوباره تصادفی انتخاب می شود. همچنین ساختار همسایگی های مورد استفاده در مرحله زمانبندی تولید به ترتیب برابر با جابجایی متوالی، جابجایی بزرگ، جاگذاری و وارونگی است.

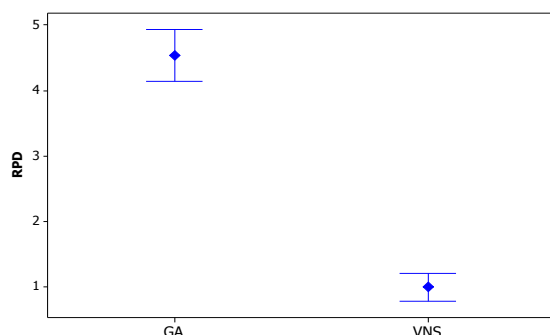
برای تحلیل آماری دقیق از تحلیل واریانس یک طرفه^۱ استفاده می شود که این کار را با استفاده از نرم افزار MINITAB 14 انجام می گیرد. شکل شماره ۷ نتایج حاصل از ANOVA را نشان می دهد.

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

همان گونه که مشخص است بین نتایج الگوریتم ها تفاوت معنا دار وجود دارد. با توجه به نتایج می توان 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 می شود که کیفیت جواب بدست آمده از الگوریتم VNS بهتر از GA می باشد.

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



شکل ۷. فاصله اصمینان ۹۵٪ برای RPD تابع هدف

مسایل

$$S/N \text{ ratio} = -10 \log_{10}(\text{objective function})^2 \quad (11)$$

$$RPD = \frac{Alg_{sol} - Min_{sol}}{Min_{sol}} \times 100 \quad (12)$$

Alg_{sol} : جواب بدست آمده توسط الگوریتم ها

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

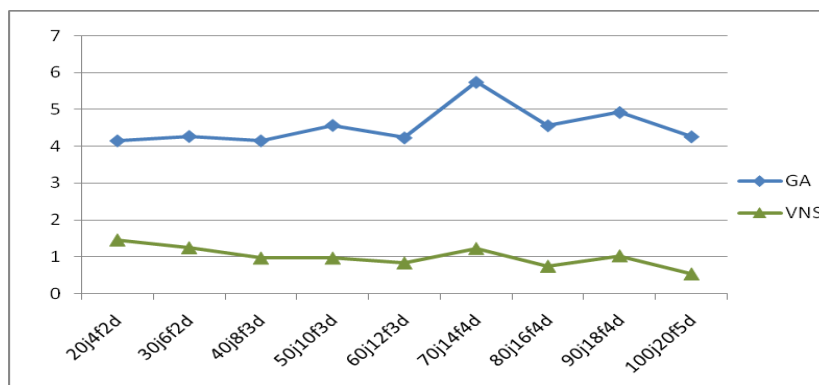
بدین منظور و برای بدست آوردن مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم ها با استفاده از ۴۵ مسأله آزمایشی تولید و به علت تصادفی بودن این روشها هر کدام از مسایل در هر از حالت از جدول تاگوچی ۶ بار اجرا می شوند.

پس از اجرای برنامه ها، مقادیر نسبت S/N و RPD برای تمامی تابع هدف مسایل محاسبه می شود و در نهایت میانگین آنها در هر سطح محاسبه می گردد. دلیل استفاده از RPD نرمالیزه کردن خروجی ها جهت مقایسه با یکدیگر می باشد. 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 می دهد که در الگوریتم ژنتیک مقادیر بهینه اندازه جمعیت، نرخ تقاطع و نرخ جهش برای مرحله حمل به ترتیب برابر با ۰/۶، ۰/۱ و ۰/۱ و برای مرحله زمانبندی تولید به ترتیب برابر با ۰/۸، ۰/۲ و ۰/۵ می باشد.

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

¹- One-Way Analysis of Variance



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

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.

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 ارائه 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 جواب‌های 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 ارائه 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

- [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.
- [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 Synchronized 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., Hajiaghahi-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] Mladenovic, 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.