



## 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 آماده سازی وابسته به توالی

رضا توکلی مقدم<sup>\*</sup>، مهدی یزدانی و صابر ملا علیزاده زواردهی

## چکیده:

در این مقاله، مسئله 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، زود کرد و دیر کرد تولید و تحويل می باشد، ارایه می شود. با توجه به پیچیدگی حل و ساخت بودن این مسئله، الگوریتم های ژنتیک و جستجوی همسایگی متغیر برای بهینه سازی پیشنهاد می گردد. همچنین با استفاده از طراحی آزمایشات تاگوجی، 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.

## کلمات کلیدی:

زمانبندی یکپارچه تولید و حمل هوایی،  
زنジره تامين،  
زمان آماده سازی وابسته به توالی،  
الگوريتم جستجوی همسایگی متغیر،  
الگوريتم ژنتيک

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 تحویل شان به سوی مشتریان منتقل می شود. همانهنج 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 دیر کرد حرکت پروازها نامیده می شود. هزینه های زود کرد 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 دیر کرد تحویل شامل ناراضایتی مشتریان، جریمه های قرارداد، از دست دادن فروش، از دست

## ۱. مقدمه

مسایل 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، مریبی، گروه مهندسی صنایع، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، m\_yazdani@qiau.ac.ir  
صابر ملا علیزاده زواردهی، دانشجوی دکترای مهندسی صنایع، مریبی دانشکده مهندسی صنایع، واحد مسجد سلیمان، دانشگاه آزاد اسلامی saber.alizadeh@iaumis.ac.ir

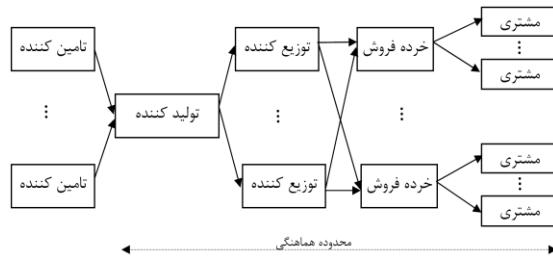
شده است [۶۷-۸۰]. دیگران [۹] نشان دادند که پتانسیل زیادی برای کاهش هزینه‌ها با هماهنگ کردن تصمیمات در زنجیره تامین وجود دارد.

به دلیل نو ظهور بودن مسئله زمانبندی هماهنگ تولید و حمل هوایی تحقیقات بسیار کمی راجع به این موضوع وجود دارد. لی و همکاران [۱۰] نخستین محققانی بودند که مسئله همزمانی<sup>۲</sup> زمانبندی تک ماشین و حمل و نقل هوایی با یک مقصد را بررسی کردند. کل مسئله به دو مسئله زمانبندی حمل و نقل هوایی و زمانبندی تک ماشین تقسیم شده است. آنها این مسئله 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 مسئله حمل هوایی گسترش دادند. لی و همکاران [۱۲] نشان دادند که مسئله تخصیص حمل هوایی دارای ساختار مسایل حمل منظم می‌باشد، در حالی که مسئله 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 ماشین‌های موازی در تولید توسعه دادند. آنها مسئله را به عنوان ماشین‌های موازی با جریمه‌های زودکرد حرکت پروازها در نظر گرفته و یک الگوریتم ابتکاری بر پایه شبیه‌سازی تبرید<sup>۳</sup> (SA) برای ماشین‌های موازی ارایه کردند. آنها الگوریتم شبیه‌سازی 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 استراتژی‌های تحویل مجاز بودن دیرکرد و مجاز بودن دیرکرد ارایه نمودند. زندیه و ملا علیزاده زواردهی [۱۷] مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی همزمانی خودشان را با در نظر 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<sup>۴</sup> (GA) برای مسئله مذکور توسعه دادند.

### ۳. مدل ریاضی و بیان مسئله

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.

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 مسئله زمانبندی زنجیره تامین هماهنگ که یک مسئله 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 جواب‌های قابل قبول ایجاد کرده است. چرا که با افزایش ابعاد مسئله، عملاً روش‌های سنتی ریاضی تعیین جواب بهینه به دلیل زمان‌بر بودن، کارایی خود را از دست می‌دهند [۱]. بنابراین استفاده از الگوریتم‌های فوق ابتکاری در حل این مسایل مورد توجه محققان قرار گرفته است.

### ۲. پیشینه تحقیق

مسئله زمانبندی زنجیره تامین هماهنگ<sup>۱</sup> یکی از سخت‌ترین مسایل بهینه‌سازی ترکیبی است. این مسئله 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 هوایپیما (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 اقتصادی‌سازان می‌باشد [۲-۶]. اخیراً توجه بیشتری به هماهنگی تولید و توزیع در سطح زمانبندی عملیات

<sup>2</sup>- Synchronization

<sup>3</sup>- Simulated Annealing (SA)

<sup>4</sup>- Genetic Algorithm (GA)

<sup>1</sup>- Coordinated Supply Chain Scheduling Problem

$\alpha'_i$ : جریمه زودکرد هر ساعت سفارش یا کار  $i$  برای تولید  
 $\beta'_i$ : هزینه حمل هر واحد از سفارش  $i$  هنگامی که با یک پرواز  
 اختصاصی حمل شود  
 $d_i$ : موعده 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.  
 $Cap_{tf}$ : امین نوع ظرفیت موجود وسیله حمل  $f$  بطوری  
 $t = 1, 2, \dots, T; f = 1, 2, \dots, F$ ; که  
 $Tc_{tf}$ : 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 می‌تواند به همه موعده تحویلش برسد  
 $\theta$ : یک عدد بین صفر و یک؛  $1 < \theta < 0$   
 $LN$ : یک عدد بزرگ مشتبث  
 بدون از دستدادن کلی بودن، فرض شده است که  
 $D_1 \leq D_2 \leq \dots \leq D_F$

### ۳-۴. متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم بکار گرفته شده در مدل ریاضی پیشنهادی  
 بصورت زیر می‌باشد:  
 $q_{tif}$ : 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  
 $u_{ip}$ : 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 [۱۰-۱۵] 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  $Cap_f$  برای  
 نشان دادن انواع مختلف ظرفیت وسایل حمل استفاده می‌شود.  
 همچنین اگر برای یک وسیله حمل داده شده ما فقط  $h$  نوع

### ۱-۳. 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 می‌شود.
- 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 می‌کند. زمان حمل محلی در زمان حمل پروازها قرار داده شده است.
- هنگامی که سفارشات به طور کامل تولید شدند، حمل محلی می‌تواند 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.

### ۲-۳. نمادها

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

$$\begin{aligned} i &= 1, 2, \dots, N; & i &: \text{شاخص سفارش یا کار}; \\ f &= 1, 2, \dots, F; & f &: \text{شاخص وسیله حمل}; \\ k &= 1, 2, \dots, K; & k &: \text{شاخص مقصد}; \\ t &= 1, 2, \dots, T; & t &: \text{شاخص نوع ظرفیت وسایل حمل}; \\ p &= 1, 2, \dots, N; & p &: \text{موقعیت یا توالی سفارش } i \end{aligned}$$

### ۳-۳. پارامترهای ورودی

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

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

$$\sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F q_{tif} + q_{(T+1)i} = Q_i \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

$$\sum_{p=1}^N u_{ip} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N u_{ip} = 1 \quad p = 1, \dots, N \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sum_{p=1}^N u_{ip} & \left( P_i + \left( \sum_{i'=1}^N s_{i'i} u_{i'(p-1)} \right) + u_{il} s_i \right. \\ & \left. + \left( \sum_{j=1}^N \sum_{p'=1}^{p-1} \left( u_{jp'} \left( P_j + \sum_{j'=1}^N s_{jj'} u_{j'(p'-1)} \right) \right) + u_{jl} s_j \right) \right) = c_i \\ & i = 1, \dots, N \quad (7) \end{aligned}$$

$$u_{ip} \in \{0,1\} \quad i = 1, \dots, N; p = 1, \dots, N \quad (8)$$

$$q_{tif} = \text{Non-negative integer variable} \quad (9)$$

$$q_{(T+1)i} = \text{Non-negative integer variable} \quad (10)$$

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، جریمه‌های زودکرد و دیرکرد زمان پرواز و تحویل برای سفارشات تخصیص یافته به نوع ۱ تا  $T$  از ظرفیت پروازها، هزینه حمل پروازهای اختصاصی، مینیمم جریمه‌های 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  $\alpha'_i \leq \alpha_i$  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 مسئله تعریف شده، مدل برنامه ریزی ریاضی به صورت زیر فرموله بندی می‌شود:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{f=1}^F \left( \left( \frac{\min \left( 0, c_i - D_f - \frac{1}{LN} \right)}{c_i - D_f - \frac{1}{LN}} \right) \left( T c_{if} \times q_{tif} \right) \right. \\ & + \left( \alpha'_i \times (D_f - c_i) \times q_{tif} \right) + \left( (\alpha'_i \times \max(0, d_i - A_f)) \times q_{tif} \right) \\ & + \left( \beta_i \times \max(0, A_f - d_i) \times q_{tif} \right) + \left( 1 - \left( \frac{\min \left( 0, c_i - D_f - \frac{1}{LN} \right)}{c_i - D_f - \frac{1}{LN}} \right) \right) \\ & \left( (\beta'_i \times q_{tif}) + (\min(\alpha'_i, \alpha_i) \times \max(0, MD_i - c_i) \times q_{tif}) \right. \\ & \left. + (\beta_i \times \max(0, A_f - d_i) \times q_{tif}) \right) \\ & + \left( 1 - \left( \frac{\min \left( 0, c_i - D_f - \frac{1}{LN} \right)}{c_i - D_f - \frac{1}{LN}} \right) \right) \left( (\beta'_i \times q_{tif}) \times \min(\alpha'_i, \alpha_i) \times \right. \\ & \left. \left( \max(0, MD_i - c_i) \times q_{tif} \right) + (\beta_i \times \max(0, c_i - MD_i) \times q_{tif}) \right) \\ & + \sum_{i=1}^N \left( (\beta'_i \times q_{(T+1)i}) + (\min(\alpha'_i, \alpha_i) \times \max(0, MD_i - c_i) \right. \\ & \left. \times q_{(T+1)i}) + (\beta_i \times \max(0, c_i - MD_i) \times q_{(T+1)i}) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

s.t:

$$\left( \sum_{t=1}^T q_{tif} \right) \times (Des_i - des_f) = 0 \quad i = 1, \dots, N; f = 1, \dots, F \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N q_{tif} \leq Cap_{tf} \quad t = 1, \dots, T; f = 1, \dots, F \quad (13)$$

**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 مسئله بدین صورت می باشد که ابتدا الگوریتم برای مسئله 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 نقطه‌ای 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 طرفیت ۱ تا  $T$  پرواژها تجاوز کند.

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

محدودیتهای (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 توالي بین کارها محاسبه می کند.

**۴. الگوریتم ژنتیک**

از سال ۱۹۶۰ تقلید از پدیده های طبیعی برای استفاده در الگوریتم های قوی جهت حل مسائل مشکل بهینه سازی مورد توجه قرار گرفت که تکنیک های محاسبه تکاملی<sup>۱</sup> نام گرفتند. الگوریتم ژنتیک از روش های فراباکاری 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 گلبرگ این تفاوت ها را به صورت زیر بیان کرده است:

۱. الگوریتم ژنتیک با مجموعه ای از جواب های کد گذاری 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 برآش 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، الگوریتم 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.

<sup>1</sup>- Evolutionary Algorithms

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

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

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

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

$$\sum_{j=1}^n r_{ij}^1 = \sum_{j=1}^n r_{ij}^2 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n r_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, F \quad (13)$$

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

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 میشاپلیج [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.

$X_1$			
8	1	0	0
0	7	1	0
0	0	7	0
0	0	0	9

$D$			
4	0	1	2
0	5	1	1
1	0	5	0
2	1	0	5

$X_2$			
1	0	3	5
0	4	1	3
2	1	4	0
5	3	0	1

$R$			
1	1	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	1	0	0

$R^1$			
1	0	0	1
0	1	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0

$R^2$			
0	1	1	0
0	0	0	1
0	1	0	0
1	0	0	0

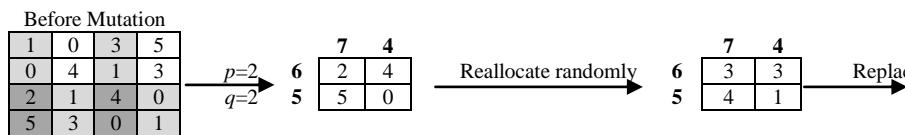
  

$X'_1$			
5	0	1	3
0	6	1	1
1	0	6	0
2	3	0	5

$X'_2$			
4	1	2	2
0	5	1	2
1	1	5	0
3	1	0	5

شکل ۴. نحوه تولید فرزند به وسیله عملگر تقاطع



شکل ۵. نحوه کار عملگر جهش

##### ۵. الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر

ملادنویج [۲۰] در سال ۱۹۹۵، اولین کسی بود که الگوریتم جستجوی همسایگی متغیر<sup>۱</sup> (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<sup>۲</sup> می‌باشد 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

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 می‌شود.

<sup>1</sup>- Variable neighborhood search (VNS)

<sup>2</sup>- Neighborhood structure (NS)

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.  $(x)_k$  یعنی همان مجموعه جوابهایی است 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  $x$  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، فرآیند 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  $k+1 \leftarrow k$ .

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 همسایگی‌ها در نظر گرفته شد، مجدداً از اولین همسایگی فرآیند جستجو را توسط اولین ساختار ادامه می‌دهیم تا هنگامی که شرط توقف ارضاء شود. شرط توقف به طور معمول حداقل تعداد تکرار الگوریتم یا حداقل زمان محاسباتی و یا ماکریزم زمان محاسباتی بعد از آخرین بهبود می‌باشد [۲۶]. شبکه این الگوریتم در شکل شماره ۶ نمایش داده شده است.

<sup>۴</sup>- Current Solution

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 روشنی است که قادر است خود را از دام بهینه موضعی رها کند.

مبنا 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 فرآیندهای ارتعاش<sup>۱</sup> و جستجوی محلی<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. فرآیند ارتعاش به عنوان یک عامل نوگرا<sup>۳</sup> برای حلقة 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 جواب‌ها 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 ۲) 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 الگوریتم‌های ابتکاری دیگر، الگوریتم VNS و مشتقه آن بسیار ساده هستند و نیاز به تعداد پارامترهای تنظیم شده کمتری دارند. بنابراین دستیابی به جواب‌هایی با کیفیت بالا،

<sup>1</sup>- Shake

<sup>2</sup>- Local search

<sup>3</sup>- Refresher

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، جواب‌هایی به دست آمده از کیفیت لازم برخوردار نخواهند بود. طراحی آزمایشات تاگوجی، یکی از روش‌های مورد استفاده در مبحث طراحی آزمایشات است که اجرای آن در صنایع مختلف با موقیتهای 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.

## 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.

### 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  $k^{\text{th}}$  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

	تعداد حالات	مقادیر
	پارامتر مسایل	
$N$	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] $\times$ ( $Q_i \times p_i + t_i$ )
$a_i$	1	Uniform [3,5]
$a'_i$	1	Uniform [3,5]
$\beta_i$	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 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 ارایه می‌دهند، از نسبت S/N و درصد انحراف نسبی<sup>۱</sup> (RPD) که به صورت زیر تعریف می‌گردد، استفاده می‌شود.

<sup>۱</sup>- Relative percentage deviation

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 متواالی، جابجایی بزرگ، جاگذاری و وارونگی است.

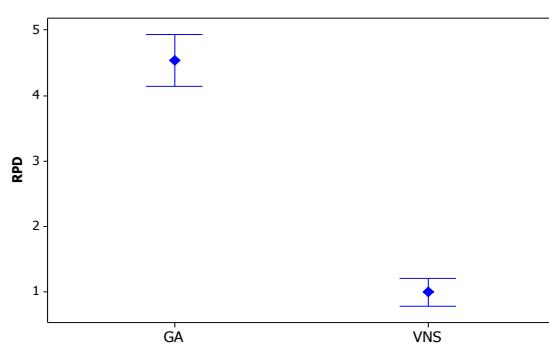
برای تحلیل آماری دقیق از تحلیل واریانس یک طرفه<sup>۱</sup> استفاده می شود که این کار را با استفاده از نرم افزار 14 MINITAB انجام می گیرد. شکل شماره ۷ نتایج حاصل از ANOVA را نشان می دهد.

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 14 MINITAB 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 زنتیک 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 مسئله 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 اطمینان ۹۵٪ برای RPD تابع هدف مسایل

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

مقادیر	تعداد حالات	پارامتر مسایل
$D_f$	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]
$\beta'_i$	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]
$\lambda$	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	$S_{ij} = S'_{ij} / \lambda$

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

$$RPD = \frac{\text{Alg}_{sol} - \text{Min}_{sol}}{\text{Min}_{sol}} \times 100 \quad (12)$$

جدول ۱: جواب بدست آمده توسط الگوریتم  $\text{Alg}_{sol}$  بهترین جواب به دست آمده برای مسایل نمونه توسط الگوریتمها

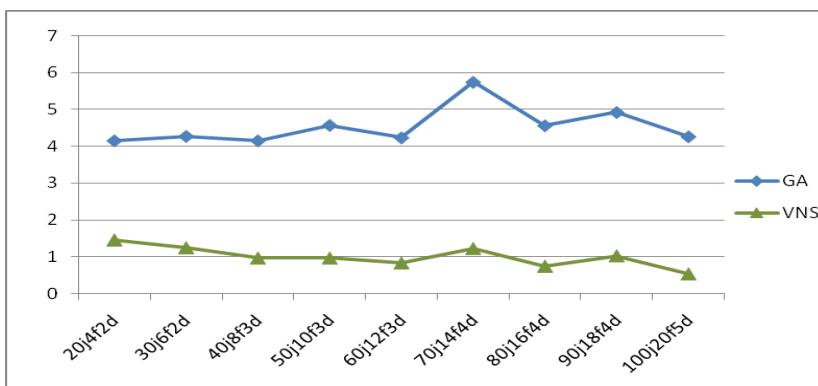
جدول ۲: جواب بدست آوردن مقدار بهینه پارامترهای الگوریتم ها با استفاده از ۴۵ مسئله آزمایشی تولید و به علت تصادفی بودن این روشها هر کدام از مسایل در هر از حالت از جدول تاگوچی ۶ بار اجرا می شوند.

جدول ۳: مقادیر نسبت S/N و RPD برای تمامی پس از اجرای برنامه ها، مقادیر نسبت S/N و RPD برای 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 زنتیک مقادیر بهینه اندازه جمعیت، نرخ تقاطع و نرخ جهش برای مرحله حمل به ترتیب برابر با ۰/۶، ۰/۰ و ۰/۰۵ و برای مرحله تولید به ترتیب برابر با ۰/۰۵، ۰/۰۸ و ۰/۰۵ 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

<sup>1</sup>- One-Way Analysis of Variance



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

*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 تامین با در نظر زمان آمده 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 رنگیک (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 بدست 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 می‌توان با بسط مدل‌های تشریح شده برای حالت‌های دیگر تولیدی مانند ماشین‌های موازی، جریان کارگاهی و غیره تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام گیرد. همچنین می‌توان برای مدل‌های ارایه شده از دیگر روش‌های فرآیندکاری 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., 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] 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.