



## Heuristic Approach for Scheduling and Order Acceptance in Flexible Flow Shop Environment

E. Asadi Gangraj & N. Nahavandi\*

Ebrahim Asadi Gangraj; PhD of Industrial Engineering; Faculty of Engineering; Tarbiat Modares University; Email: e.asadi@nit.ac.ir  
Nasim Nahavandi; Associate Professor of Industrial Engineering; Faculty of Engineering; Tarbiat Modares University; n\_nahavandi@modares.ac.ir

### KeyworXs

Scheduling;  
Order acceptance;  
Sequence dependent setup time;  
Heuristic method;  
Flexible flow shop

### ABSTRACT

In this research, two problems, scheduling and order acceptance, is considered so that orders are defined based on their revenue and processing time in flexible flow shop environment with unrelated parallel machines. Two new heuristic methods, named SFAT and AFST, is developed for revenue maximization and makespan minimization. Also a mathematical model and two lower bounds are introduced for this problem. For performance evaluation, heuristic methods and lower bounds are compared with optimal solution. Results show that both heuristic methods are efficient and effective for scheduling and order acceptance problem.

© 2014 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 25, No. 2, All Rights Reserved

\* Corresponding author. Nasim Nahavandi  
Email: n\_nahavandi@modares.ac.ir



## ارائه روش‌های ابتکاری برای حل مسئله زمانبندی و انتخاب سفارشات در محیط سری انعطاف‌پذیر

\*ابراهیم اسدی گنگرج و نسیم نهادوندی\*

### چکیده:

در این مقاله دو مسئله انتخاب و زمانبندی سفارشات به صورت همزمان مورد بررسی قرار می‌گیرد که در آن هر سفارش با توجه به میزان درآمد ناشی از تحویل آن به مشتری و مدت زمان فرآیند در محیط سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌ها موازی غیرمشابه تعریف می‌شود. برای مدل یکپارچه انتخاب و زمانبندی سفارشات یک مدل ریاضی عدد صحیح با تابع هدف ترکیبی حداکثر نمودن درآمد و حداقل نمودن طول دوره ساخت ارائه شده است که برای هر کدام از توابع هدف یک حد پایین معرفی شده است؛ همچنین دو روش ابتکاری جدید با نامهای SFAT و AFST برای حل این مسئله توسعه داده شده است. به منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها و روش‌های معرفی شده، حدود پایین و روش‌های ابتکاری با جواب بهینه مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو روش ابتکاری توسعه یافته دارای عملکرد مطلوبی در حل مسئله یکپارچه زمانبندی و انتخاب همزمان سفارشات دارند.

### کلمات کلیدی:

زمانبندی؛ انتخاب سفارشات؛  
زمان آماده‌سازی و استه به توالی؛  
روش ابتکاری؛  
محیط سری انعطاف‌پذیر

در این تحقیق بر روی شرکت‌هایی تمرکز شده است که سیاست آنها تولید برای سفارش<sup>۱</sup> است که این سفارشات از مشتریان به واحد تولید می‌رسد. در اینجا فرض می‌شود که ظرفیت خط تولید توانایی پاسخگویی به تمامی سفارشات رسیده را ندارد. در بازار رقابتی موجود، یک تولید کننده می‌باشد که ظرفیت موجود به صورت کارا استفاده نماید تا بتواند با برآورده نمودن نیازهای مشتریان، میزان درآمد سفارشات را حداکثر نماید. برای بررسی این موضوع، محیط کاری سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های غیرمشابه در این تحقیق در نظر گرفته شده است که توابع هدف برای مسئله، بیشینه نمودن درآمد و کمینه نمودن طول دوره ساخت<sup>۲</sup> می‌باشد. در این تحقیق به این پرسش‌ها پاسخ داده می‌شود: در یک افق زمانی محدود کدامیک از سفارشات انتخاب شود به‌گونه‌ای که درآمد ناشی از آن بیشینه شود؟ سفارشات انتخاب شده به چه صورتی فرآیند شوند تا طول دوره ساخت کمینه شود؟

ادبیات مربوط به مسئله زمانبندی و انتخاب سفارشات در محیط سری انعطاف‌پذیر را می‌توان از دو منظر مورد بررسی قرار داد: زمانبندی در محیط سری انعطاف‌پذیر و انتخاب سفارشات.

### ۱. مقدمه

امروزه انتخاب سفارشات، در محیط‌های کاری که توانایی فرآیند تمامی سفارشات رسیده را ندارند، مورد توجه تعداد زیادی از محققان قرار گرفته است. از منظر مدیران شرکت‌های تولیدی، یک شرکت ممکن است بنا به دلایل مختلفی نظیر تمرکز بازار، مزایای رقابتی و محدودیت ظرفیت تعدادی از سفارشات را رد یا قبول نماید. این شرکت‌های سعی دارند میزان درآمد خود را در یک افق زمانی محدود بیشینه نمایند؛ از این رو آنها تعدادی از سفارشات را رد یا قبول می‌کنند که این ممکن است بنا به دلایل مختلفی نظیر جهتگیری استراتژیک یک شرکت، وضعیت جاری ظرفیت و میزان سوددهی سفارش باشد. در این حالت مدیرات باید یک تعادل میان میزان درآمد ناشی از سفارشات و هزینه‌های تولید برقرار نمایند.

تاریخ وصول: ۹۰/۱۲/۱۷

تاریخ تصویب: ۹۱/۶/۱۵

ابراهیم اسدی گنگرج؛ دانشجوی دکتری مهندسی صنایع؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۱</sup>تویسندۀ مسئول مقاله: دکتر نسیم نهادوندی دانشیار مهندسی صنایع؛ دانشکده فنی و مهندسی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ n\_nahavandi@modares.ac.ir

نمودند. آنها یک روش فراابتکاری جستجوی ممنوعه و دو روش ابتکاری m-ATCS و ISFAN برای این مسئله توسعه دادند. نتایج نشان می‌دهد روش جستجوی ممنوعه نتایج بهتری را ارائه می‌دهد ولی برای حل، زمان بیشتری نسبت به دو روش ابتکاری مورد نیاز است. Oguz و همکاران [۱۶] مسئله OAS را در محیط تکماشینه با در نظر گرفتن موعد تحویل و زمان آماده‌سازی وابسته به توالی مورد بررسی قرار داده‌اند.

تابع هدف در نظر گرفته شده بیشینه کردن سود می‌باشد که ناشی از فرآیند سفارشات و هزینه تأخیرات می‌باشد. آنها یک مدل ریاضی عدد صحیح مختلط و سه روش ابتکاری برای حل این مسئله پیشنهاد نمودند. نتایج نشان می‌دهد که روش ابتکاری توسعه داده شده توانایی حل مسائل بزرگ تا ۳۰۰ سفارش را به صورت کارا دارد.

در این تحقیق بهصورت همزمان دو تصمیم انتخاب سفارشات و زمانبندی آنها در محیط سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های غیر مشابه مورد بررسی قرار می‌گیرد. مهمترین نواوری‌های این تحقیق به شرح زیر است: برای اولین بار مسئله OAS در محیط FFS با ماشین‌های غیر مشابه مورد بررسی قرار گرفته است و یک مدل ریاضی برای آن توسعه داده است.

دو حد پایین جدید برای درآمد ناشی از سفارشات و طول دوره ساخت به همراه دو روش ابتکاری جدید برای حل این مسئله پیشنهاد شده است.

ادامه این مقاله بهصورت زیر سازماندهی شده است: در بخش ۲ مدل ریاضی توسعه یافته برای حل این مسئله معرفی می‌شود و بخش ۳ حدود پایین توسعه یافته را تشریح می‌کند. در بخش ۴ به صورت اجمالی روش‌های ابتکاری مورد بررسی قرار می‌گیرد و بخش ۵ نتایج حل مسئله OAS را ارائه می‌کند. در نهایت بخش ۶ خلاصه‌ای از یافته‌های این تحقیق و زمینه‌های موجود برای تحقیقات آینده را مورد بررسی قرار می‌دهد.

## ۲. مدل ریاضی

مسئله بررسی شده در این تحقیق قابلیت بیان بهصورت مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح را دارد. همانطور که در بخش قبل ذکر شد تابع هدف در نظر گرفته شده برای این مسئله بیشینه‌سازی درآمد و کمینه سازی طول دوره ساخت است. برای بیان این مسئله از نمادهای زیر استفاده شده است:

*j, l*: اندیس کارها

*i, h*: اندیس مراحل

*k*: اندیس ماشین‌ها در هر مرحله

*n*: تعداد کارها

در ادبیات مربوط به زمانبندی هنگامی که *n* کار بر روی *m* مرحله فرآیند می‌شوند به‌گونه‌ای که در هر مرحله حداقل یک یا چند ماشین غیرمشابه وجود داشته باشد به عنوان زمانبندی در محیط سری انعطاف‌پذیر (FFS)<sup>۱</sup> با ماشین‌های غیرمشابه شناخته می‌شود. محیط کاری FFS در شرکتهای تولیدی مختلفی نظیر صنایع بسته‌بندی [۱]، صنایع تولید فولاد [۲] شرکتهای تولیدی لوازم الکترونیکی [۳] و خط مونتاژ اتوموبیل [۴] وجود دارد. در محیط FFS با ماشین‌های غیرمشابه، مدت زمان فرآیند کارها متفاوت و وابسته به نوع ماشین و کار است. این تفاوت ممکن است به علت تفاوت میان ماشین‌ها باشد و یا نوعی ماشین خاص برای فرآیند یک کار مناسب‌تر باشد [۵]. تعدادی از محققان این خاصیت را در تحقیقات خود مورد ارزیابی قرار دادند که می‌توان به Kadipasaoglu و همکاران [۶]، suresh [۷]، Jenabi و همکاران [۸] و Jenabi و همکاران [۹]، He و همکاران [۱۰] اشاره نمود.

تعدادی از محققان برای زمانبندی در محیط‌های کاری مختلف از مفهوم زمانبندی بر پایه گلوگاه استفاده نموده‌اند. بر پایه گلوگاه برای محیط FFS معرفی نموده‌اند. تابع هدف در نظر گرفته شده برای مسئله، طول دوره ساخت می‌باشد. روش Quadt و Kuhn [۵] یک روش سلسله‌مراتبی زمانبندی مبتنی بر گلوگاه در محیط FFS پیشنهاد نمودند.

Chen و Chen [۱۱] یک روش ابتکاری مبتنی بر گلوگاه را برای حل مسئله زمانبندی در محیط FFS پیشنهاد نمودند که تابع هدف در نظر گرفته شده طول دوره ساخت می‌باشد. روش ابتکاری توسعه داده شده برای حل این مسئله دارای سه مرحله اصلی می‌باشد:

(۱) یافتن مرحله گلوگاه

(۲) تولید توالی اولیه کارها براساس گلوگاه (BBMSG)

(۳) تولید زمانبندی نهایی براساس روش ورود چندگانه مبتنی بر گلوگاه (BBMIP).

همانطور که اشاره شد مسئله زمانبندی و انتخاب سفارشات <sup>۲</sup> توجه زیادی را از محققان مختلف در دهه گذشته به خود جلب نموده است. Slotnick [۱۴] یک معرفی ادبیات جامعی را برای مسئله OAS انجام داد؛ او این مسئله را از چند جنبه مختلف مورد بررسی قرار داد مانند: مسئله تکماشینه قطعی، مسئله تکماشینه احتمالی، مسئله ماشین‌های چندگانه و مسئله رد سفارشات. Cesarete و همکاران [۱۵] این مسئله را با فرض محدود بودن زمان در دسترس در محیط تکماشینه بررسی

<sup>1</sup> Flexible Flow Shop

<sup>2</sup> Order Acceptance and Scheduling

|           |  |   |
|-----------|--|---|
| $WLL$     | زمان در دسترس در مرحله گلوگاه  | $m$   |
| $OA_j$    | اگر سفارش $j$ انتخاب شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت صفر                               | $B$   |
| $X_{ijk}$ | اگر سفارش $j$ بر روی ماشین $k$ در مرحله $i$ فرآیند شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت صفر | $S_i$   |
| $Y_{ilj}$ | اگر سفارش $l$ قبل از سفارش $j$ در مرحله $i$ فرآیند شود برابر با ۱ و در غیر اینصورت صفر | $LB_C$  |
| $P_{ijk}$ | مدل ریاضی مسئله OAS در محیط سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های غیر مشابه به شرح زیر می‌باشد: | $LB_{Revenue}$  |
|           |  | $R_j$   |
|           |  | $P_{ijk}$ : مدت زمان فرآیند سفارش $j$ در مرحله $i$ بر روی ماشین $k$ |
|           |  | $C_{ij}$ : زمان تکمیل سفارش $j$ در مرحله $i$                        |
|           |  | $M$ : عدد بزرگ  |

$$\text{Min } Z = w_1 \frac{\max_j \{C_{mj}\}}{LB_C} - w_2 \frac{\sum_{j=1}^n R_j \cdot OA_j}{LB_{Revenue}} \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{S_i} X_{ijk} = OA_j \quad j = 1, 2, \dots, n \& i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$C_{1j} \geq \sum_{k=1}^{S_1} P_{1jk} X_{1jk} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$C_{ij} \geq C_{i-1,j} + \sum_{k=1}^{S_i} P_{ijk} X_{ijk} \quad j = 1, 2, \dots, n \& i = 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

$$C_{ij} + M(3 - X_{ijk} - X_{ilk} - Y_{ilj}) \geq C_{il} + P_{ijk} X_{ijk} \quad j, l = 1, 2, \dots, n \& j \neq l \\ i = 1, 2, \dots, m \& k = 1, 2, \dots, S_i \quad (5)$$

$$C_{il} + M(2 - X_{ijk} - X_{ilk} + Y_{ilj}) \geq C_{ij} + P_{ilk} X_{ilk} \quad j, l = 1, 2, \dots, n \& j \neq l \\ i = 1, 2, \dots, m \& k = 1, 2, \dots, S_i \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{S_B} P_{Bjk} X_{Bjk} \leq WLL \quad (7)$$

$$Y_{ilj} \leq OA_l \quad j, l = 1, 2, \dots, n \& l \neq j \\ i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

$$Y_{ilj} \leq OA_j \quad j, l = 1, 2, \dots, n \& l \neq j \\ i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad j = 1, 2, \dots, n \& i = 1, 2, \dots, m \\ k = 1, 2, \dots, S_i \quad (10)$$

$$Y_{ilj} \in \{0, 1\} \quad j, l = 1, 2, \dots, n \& i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$OA_j \in \{0,1\}$$

$$j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

$$a_{ik} \in \{0,1\}$$

$$i = 1, 2, \dots, m \quad k = 1, 2, \dots, S_i \quad (13)$$

### ۳. محاسبه حدود پایین

همانطور که در بخش قبل بیان شد، طول دوره ساخت و درآمد دارای واحد یکسانی نیستند و بنابراین قابل جمع نیستند؛ برای بدون واحد کردن این پارامترها، هر پارامتر بر روی حد پایین خود تقسیم شده است. در این بخش به صورت مختصر حد پایین دوره ساخت (LB<sub>c</sub>) و حد پایین درآمد (LB<sub>Revenue</sub>) معرفی می‌شوند.

#### ۳-۱. حد پایین طول دوره ساخت

در این بخش به صورت مختصر حد پایین توسعه یافته مبتنی بر گلوگاه برای طول دوره ساخت در محیط FFS با ماشین‌های سری انعطاف‌پذیر معرفی می‌شود. در این روش برای هر مرحله یک حد پایین محاسبه شده و بیشینه این مقادیر به عنوان حد پایین نهایی انتخاب می‌شود. این حد پایین از سه بخش متفاوت تشکیل شده است که بخش اول یک حد پایین برای بیکاری ماشین‌ها در هر مرحله، بخش دوم حد پایین برای بار کاری ماشین‌ها در هر مرحله و بخش پایانی یک حد پایین برای عبور آخرین کار بر روی هر ماشین از مرحله مورد نظر تا مرحله آخر محاسبه می‌کند.

لم ۱: یک حد پایین مبتنی بر مراحل برای محیط سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های غیر مشابه برابر است با:

$$LB_i^1 = \frac{1}{S_i} \left[ \sum_{j=1}^{SPT(S_i)} \sum_{o=1}^{i-1} \min_k P_{ojk} + \sum_{o=1}^{i-1} \min_j \left( \min_k P_{ojk} \right) (S_i - S_{i-1})^+ + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} \min_k P_{ijk} + \sum_{j=1}^{SPT(S_i)} \sum_{o=i+1}^m \min_k P_{ojk} \right] \quad (14)$$

دارد بنابراین حداقل یک ماشین وجود دارد که میزان بار کاری بر روی آن برابر است  $\frac{1}{S_i} [\sum_{j=1}^{SPT(S_i)} \sum_{k=1}^m \min_k P_{ijk}]$  بخش آخر نیز به مانند بخش اول، مدت زمان لازم برای رسیدن آخرین کار موجود بر روی ماشین‌های مرحله  $i$  تا مرحله آخر را نشان می‌دهد. بنابراین حداقل یک ماشین در مرحله  $i$  وجود دارد که مدت زمان لازم برای رسیدن آخرین کار از این مرحله تا مرحله آخر برابر است  $\frac{1}{S_i} [\sum_{j=1}^{SPT(S_i)} \sum_{o=i+1}^m \min_k P_{ojk}]$ .  
لم ۲. یک حد پایین مبتنی بر مراحل برای محیط سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های غیر مشابه برابر است با:

تابع هدف در نظر گرفته شده (رابطه ۱) مقدار درآمد را بیشینه و طول دوره ساخت را کمینه می‌کند.

با توجه به این که این دو معیار هم‌واحد نمی‌باشند مقادیر این پارامترها بر مقدار حد پایین خود تقسیم شده‌اند تا این دو پارامتر جمع‌پذیر باشند. محدودیت ۲ بر این نکته تأکید می‌کند که هر سفارش انتخاب شده فقط بر روی یک ماشین در هر مرحله فرآیند می‌شود. محدودیت ۳ بیان می‌کند که زمان تکمیل هر سفارش انتخاب شده مانند ز در مرحله اول بزرگ‌تر و یا مساوی مدت زمان فرآیند در همان مرحله می‌باشد.

رابطه میان زمان تکمیل یک سفارش در دو مرحله متوالی در محدودیت ۴ بیان شده است.

مجموعه محدودیت‌های ۵ و ۶ رابطه دو سفارش متوالی بر روی یک ماشین نشان می‌دهد.

محدودیت ۷ بیان می‌کند که بار کاری در مرحله گلوگاه باید از زمان در دسترس کوچک‌تر باشد. محدودیت‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهد اگر یک سفارش انتخاب شود این سفارش باید قبل و یا بعد از یک سفارش دیگر فرآیند شود. در نهایت محدودیت‌های ۱۳، ۱۴، ۱۵ و ۱۶ بیان می‌کنند که متغیرها تصمیم فقط باید مقادیر ۱ انتخاب نمایند.

اثبات: حداقل مدت زمان لازم برای رسیدن سفارش  $j$  به مرحله  $i$  برابر است با  $\sum_{o=1}^{i-1} \min_k P_{ojk}$  اگر  $S_i$  ماشین در مرحله  $i$  وجود داشته باشد کل بیکاری موجود در مرحله  $i$  (که قبل از فرآیند کارها رخ می‌دهد) برابر است با  $\sum_{j=1}^{SPT(S_i)} \sum_{o=1}^{i-1} \min_k P_{ojk}$  بنابراین حداقل یک ماشین در مرحله  $i$  وجود دارد که مدت زمان بیکاری بر روی آن برابر است با:

$$\frac{1}{S_i} [\sum_{j=1}^{SPT(S_i)} \sum_{o=1}^{i-1} \min_k P_{ojk}] + \sum_{o=i+1}^{i-1} \min_j \left( \min_k P_{ojk} \right) (S_i - S_j)^+$$

بخش دوم دهنده کل بار کاری است که در مرحله  $i$  وجود

:  $\sum_{j=1}^{SPT(S_i)} \min_j \left( \min_k P_{ojk} \right) (S_i - S_j)^+$  نشان دهنده مجموع تعداد  $S_i$  مقدار از پارامتر  $h_j$  که کمترین مقدار را دارا می‌باشد.

$$^2 (S_i - S_j)^+ = \max \{0, S_i - S_j\}$$

$$LB_i^2 = \frac{1}{S_i} \left[ \sum_{j=1}^{SPT(S_i)} \sum_{o=1}^{i-1} \min_k P_{ojk} + \sum_{o=i+1}^m \min_j \left\{ \min_k P_{ojk} \right\} (S_i - S_{i-1})^+ + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} P_{ijk} + \sum_{j=1}^{SPT(S_i)} \sum_{o=i+1}^m \min_k P_{ojk} \right] \quad (15)$$

۴. اگر مجموعه سفارشات انتخاب شده شامل همه سفارشات باشد و یا بار کاری از مدت زمان در دسترس بیشتر باشد توقف نمایید؛ در غیر اینصورت به مرحله ۳ بروید.
۵. مقدار درآمد سفارشات انتخاب شده را محاسبه نمایید.

#### ۴. روش‌های ابتکاری

در این بخش، دو روش ابتکاری جدید برای مسئله OAS در محیط سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های غیر مشابه و زمان آماده‌سازی وابسته به توالی معرفی می‌شود. روش ابتکاری اول که روش ابتدا زمانبندی-سپس انتخاب (SFAT)<sup>۲</sup> نامیده می‌شود، ابتدا همه سفارشات زمانبندی می‌کند و در ادامه این سفارشات تا زمانی حذف می‌شوند که بار کاری مرحله گلوگاه به زمان در دسترس برسد. روش دوم که برخلاف روش اول عمل می‌کند روش ابتدا انتخاب-سپس زمانبندی (AFST)<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. در این روش سفارشات انتخاب و زمانبندی می‌شوند تا زمانی که بار کاری به زمان در دسترس برسد و یا همه سفارشات انتخاب شوند. در هر دو این روش‌ها از یک روش مشابه برای انتخاب سفارشات استفاده می‌شود.

##### ۱-۴. روش ابتکاری SFAT

همانطور که در بخش قبل ذکر شد، در این روش همه سفارشات براساس یک روش ابتکاری مبتنی بر گلوگاه زمانبندی می‌شوند و در ادامه سفارشات تا جایی حذف می‌شوند که شرط جستجوی محلی با نام روش جابجایی جفتی<sup>۴</sup> برای بهبود مقدار تابع هدف استفاده می‌شود. در این روش جستجوی محلی تعدادی توالی مختلف از کارهای موجود براساس جابجایی کار پذیرفته شده با کمینه مقدار  $RPR_j$  و کارهای حذف شده تولید می‌شوند.

روش SAFT به شرح زیر می‌باشد:

- زمانبندی و انتخاب سفارشات

► مرحله گلوگاه را براساس شاخص  $FR_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} p_{ijk}}{s_i}$  بیابید. مرحله‌ای که بیشترین مقدار  $FR_i$  را دارد به عنوان گلوگاه شناخته و با B شناخته می‌شود.

اثبات: به راحتی مشخص است که بر عکس نمودن خط تولید، این حد پایین به مانند لم ۱ اثبات می‌شود.

لم ۳. یک حد پایین مبتنی بر مراحل برای محیط سری انعطاف-پذیر با ماشین‌های غیر مشابه به شرح زیر می‌باشد:

$$LB = \max\{LB_1^i, LB_2^i\} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

#### ۲-۳. حد پایین درآمد

در این قسمت یک روش ابتکاری برای حل مسئله انتخاب سفارشات با بیشینه کردن درآمد معرفی می‌شود. با توجه به نوع تابع هدف (بیشینه‌سازی)، هر جواب امکان‌پذیر یک حد پایین برای مسئله می‌باشد. از طرف دیگر با توجه تعاریف زیر، مسئله انتخاب سفارشات به صورت مسئله کوله‌پشتی ۱-۰ قابل بیان می‌باشد:

**WLL**: حجم کوله‌پشتی

**n**: تعداد کالاها

$R_j$ : ارزش هر کالا در تابع هدف

$\bar{p}_{Bj}$ : حجم هر کالا در تابع هدف

در نتیجه هر جواب برای مسئله کوله‌پشتی یک جواب برای مسئله انتخاب سفارشات می‌باشد و می‌تواند یک حد پایین را برای درآمد سفارشات تشکیل دهد. در این بخش یک روش ابتکاری برای این مسئله بیان می‌شود که هر سفارش با سود بالاتر و متوسط مدت زمان فرآیند کمتر شناسی بیشتری برای انتخاب دارد. این روش ابتکاری به شرح زیر است:

$$FR_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{S_i} p_{ijk}}{s_i}$$

تعیین می‌شود. مرحله‌ای که حداقل مقدار  $FR_i$  دارد به عنوان مرحله گلوگاه شناخته می‌شود.

۲. سفارشات براساس ترتیب نزولی نسبت درآمد-مدت زمان فرآیند ( $RPR_j$ ) مرتب نمایید که

$$RPR_j = \frac{R_j}{\bar{p}_{Bj}} \quad (1)$$

۳. هر سفارشی که دارای بیشترین مقدار  $RPR_j$  می‌باشد به ماشینی تخصیص می‌باید که در صورت اضافه شده به آن ماشین، حداقل مدت زمان تکمیل فرآیند را داشته باشد.

$$\bar{p}_{Bj} = \frac{\sum_{k=1}^{S_j} p_{Bjk}}{S_j}$$

گلوگاه می‌باشد.

<sup>2</sup> Sequence First-Acceptance Then

<sup>3</sup> Acceptance First-Sequence Then

<sup>4</sup> Pairwise Exchange

- ۷. اگر توالی جزئی جاری شامل همه کارها باشد توقف نمایید؛ در غیر اینصورت به مرحله ۵ بروید.
- مقدار بار کاری را برای مرحله گلوگاه محاسبه کنید.
- سفارش‌ها را براساس ترتیب صعودی  $RPR_j$  مرتب نمایید.
- تا زمانی که  $WL_B > available\ time$  است سفارش‌ها با مقدار کمینه  $RPR_j$  را حذف نمایید.
- مقدار طول دوره ساخت، درآمد و سفارش‌های انتخاب شده و حذف شده را مشخص نمایید.
- روش جابجایی جفتی
- سفارش با حداقل مقدار  $RPR_j$  را از بین سفارشات انتخاب شده بیابید و آن را pairwise1 بنامید.
- توالی‌های جدید را براساس تعویض جفتی pairwise1 و سفارشات حذف شده تولید نمایید.
- اگر  $WL_B > available\ time$  را براساس روش زمانبندی مبتنی بر گلوگاه زمانبندی نموده و مقادیر طول دوره ساخت و درآمد را معین نمایید.
- مقدار تابع هدف توالی‌های ایجاد شده را براساس رابطه زیر محاسبه نمایید:

$$objective\ function = w_1 \frac{makespan}{LB_{makespan}} - w_2 \frac{Revenue}{LB_{Revenue}} \quad (18)$$

- سفارش‌ها را براساس ترتیب صعودی  $RPR_j$  مرتب نمایید.
- تا زمانی که  $WL_B < available\ time$  است سفارش‌ها با مقدار بیشینه  $RPR_j$  را انتخاب نمایید و آنها را براساس روش ابتکاری مبتنی بر گلوگاه زمانبندی نمایید.
- مقدار بار کاری گلوگاه را محاسبه نموده و به مرحله اول بروید.
- مقدار طول دوره ساخت، درآمد و سفارش‌های انتخاب شده و حذف شده را مشخص نمایید.
- روش جابجایی جفتی
- سفارش با حداقل مقدار  $RPR_j$  را از بین سفارشات انتخاب شده بیابید و با نام pairwise1 بنامید.
- توالی‌های جدید را براساس تعویض جفتی pairwise1 و سفارشات حذف شده تولید نمایید.

- همه سفارشات را براساس روش مبتنی گلوگاه به شرح زیر زمانبندی نمایید:

۱. برای هر سفارش  $j$  مقدار

$$R_j = \sum_{i=1}^{n-1} \min_k \{p_{ijk}\}, k = 1, 2, \dots, s_i; j = 1, 2, \dots, n$$

را محاسبه نمایید.  $R_j$  حداقل زمان لازم برای رسیدن سفارش  $j$  را محاسبه نماید. رسیدن به مرحله گلوگاه نشان می‌شود.

۲. برای سفارش  $j$  مقدار

$$D_j = \sum_{i=B+1}^m \min_k \{p_{ijk}\}, k = 1, 2, \dots, s_i; j = 1, 2, \dots, n$$

را محاسبه نمایید.  $D_j$  نشان دهنده حداقل زمان لازم برای رسیدن سفارش  $j$  از مرحله گلوگاه به مرحله آخر را نشان می‌دهد.

۳. کارها را براساس ترتیب صعودی  $R_j$  مرتب نمایید. اگر بیش از یک دارای  $R_j$  مشابه است کارها را براساس ترتیب صعودی  $D_j$  مرتب کنید و آن را توالی اولیه بنامید.

۴. اولین کار را در ترتیب مشخص نمایید.

۵. کار بعدی را قبل، میان و بعد از هر دو کار متولی قرار دهید و آنها را توالی‌های جزئی بنامید.

۶. مقدار طول دوره ساخت را برای تمامی توالی‌های جزئی محاسبه کنید و توالی که کمترین مقدار را دارد را به عنوان توالی جزئی جاری بنامید.

- حداقل مقدار تابع هدف را مشخص نمایید.

## ۲-۴. روش ابتکاری AFST

در این روش ابتکاری برخلاف روش قبلی، در ابتدا سفارشات انتخاب و زمانبندی می‌شوند تا زمانی که شرط  $WL_B < available\ time$  برقرار شود. در ادامه به مانند SFAT، روش جستجوی محلی تعویض جفتی برای بهبود مقدار تابع هدف مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش ابتکاری AFST به شرح زیر است:

- انتخاب و زمانبندی

➤ مرحله گلوگاه را براساس شاخص  $FR_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{s_i} p_{ijk}}{s_i}$  بیابید. مرحله‌ای که بیشترین مقدار  $FR_i$  را دارد به عنوان گلوگاه شناخته و با B شناخته می‌شود.

همه روش‌های ابتکاری با استفاده از نرم‌افزار Matlab کد شده‌اند و بر روی یک ریانه با مشخصات Intel Core 2 Dou 2.2 GHz CPU and 2 GB RAM اجرا شده‌اند. همچنین Lingo 9.0 همه جواب‌های بهینه با استفاده از نرم‌افزار بدست آمده‌اند.

### ۵-۱. ارزیابی حدود پایین

برای بررسی کیفیت حدود پایین توسعه یافته که در بخش قبلی بحث شد، ۲۰ مسئله آزمایشی براساس مشخصات جدول ۱ تولید شده‌اند. این مشخصات به شرح زیر است:

جدول ۱. فاکتورهای آزمایشی برای مسائل کوچک

| سطح        | فاکتور آزمایشی          |
|------------|-------------------------|
| U[4,8]     | تعداد سفارشات           |
| U[2,4]     | تعداد مراحل             |
| U[0.5,0.9] | ضریب زمان در دسترس      |
| U[2,4]     | تعداد ماشین در هر مرحله |
| U[5,10]    | زمان فرآیند             |

ضریب زمان در دسترس برای یافتن مقدار زمان در دسترس در مرحله گلوگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد که برای هر مسئله رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\text{available time} = \text{rounup}\{\text{COE} * \frac{\sum_{j=1}^n \bar{P}_{Bj}}{S_B}\}$$

|     |    |    |    |
|-----|----|----|----|
| %۰۰ | ۲۶ | ۲۳ | ۱۲ |
| %۴۰ | ۴۲ | ۴۲ | ۱۳ |
| %۰۰ | ۵۲ | ۵۰ | ۱۴ |
| %۸۷ | ۵۳ | ۵۳ | ۱۵ |
| %۴۸ | ۲۵ | ۲۳ | ۱۶ |
| %۰۰ | ۲۲ | ۲۱ | ۱۷ |
| %۴۰ | ۲۹ | ۲۹ | ۱۸ |
| %۰۰ | ۲۶ | ۲۵ | ۱۹ |
| *—  | ۵۰ | ۵۰ | ۲۰ |

ترم‌افزار Lingo بعد از ۶۰۰ ثانیه نتوانسته است به جواب بهینه برسد.

براساس جدول ۲، حد پایین توسعه یافته در ۵۳٪ موارد توانایی رسیدن به جواب بهینه را دارا می‌باشد و در سه مسئله آزمایشی نرم‌افزار نمی‌تواند بعد از ۶۰۰ ثانیه به جواب بهینه برسید. مقدار فاصله بهینگی<sup>۱</sup> در حدود ۳٪ می‌باشد. براساس این توضیحات

اگر  $WL_B > \text{available time}$  توالی‌های جدید را براساس روش زمانبندی مبتنی بر گلوگاه زمانبندی نموده و مقادیر طول دوره ساخت و درآمد را معین نمایید.

- مقدار تابع هدف توالی‌های تولید شده را براساس رابطه (۱۸) محاسبه نمایید.
- حداقل مقدار تابع هدف را مشخص نمایید.

### ۵. نتایج محاسباتی

برای بررسی کارایی مدل‌ها و روش‌های ارائه شده، تعدادی مسئله آزمایشی برای مقایسه تولید شده است. برای این منظور دو سری مسئله آزمایشی تولید شده است که سری اول روش‌های ابتکاری توسعه داده شده را با جواب بهینه، برای مسئله‌هایی با حجم کوچک، مقایسه می‌نماید و سری دوم برای مقایسه دو روش ابتکاری توسعه یافته با یکدیگر برای مسائل متوسط و بزرگ استفاده شده است. البته قبل از این بررسی، کارایی حدود پایین توسعه یافته مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که برای این منظور جواب‌های بهینه با حدود پایین مقایسه می‌شوند.

(۲)

در رابطه بالا  $\text{COE}$  ضریب زمان در دسترس و  $S_B$  تعداد ماشین‌های مرحله گلوگاه می‌باشد و  $\text{rounup}$  عدد تولید شده را رو به بالا گرد می‌کند. نتایج مربوط به مقایسه حد پایین و جواب‌های بهینه در جدول‌های ۲ و ۳ دیده می‌شود:

جدول ۲. ارزیابی حد پایین مربوط به طول دوره ساخت

| مسئله آزمایشی | حد پایین | جواب بهینه | فاصله بهینگی |
|---------------|----------|------------|--------------|
| %۸۱           | ۲۹       | ۲۶         | ۱            |
| %۰۰           | ۴۰       | ۳۷         | ۳            |
| %۲۷           | ۵۳       | ۵۳         | ۰            |
| *—            | ۳۸       | ۳۷         | ۱            |
| *—            | ۲۹       | ۲۶         | ۳            |
| %۴۲           | ۲۶       | ۲۲         | ۴            |
| %۰۰           | ۲۵       | ۲۴         | ۱            |
| %۰۰           | ۲۷       | ۲۷         | ۰            |
| %۲۲           | ۵۵       | ۵۵         | ۰            |
| %۰۰           | ۴۷       | ۴۶         | ۱            |
| %۱۳۰          | ۲۵       | ۲۵         | ۰            |

<sup>۱</sup> Optimal Gap

براساس جدول ۳ مقدار فاصله بهینگی برابر با ۴،۸٪ می‌باشد. روش ابتکاری توسعه یافته می‌تواند در ۶۰٪ موارد به جواب بهینه دست یابد و برای ۸۵٪ مسائل مقدار فاصله از نقطه بهینه بهطور متوسط حدود ۱۰٪ می‌باشد.

با توجه به دو جدول بالا می‌توان نتیجه گرفت که هر دو حد پایین توسعه یافته کیفیت قابل توجهی در رسیدن به جواب بهینه را دارا می‌باشند.

## ۲-۵. مقایسه روش‌های ابتکاری با جواب بهینه برای مسائل آزمایشی کوچک

این بخش به مقایسه روش‌های ابتکاری با جواب بهینه برای مسائل آزمایشی کوچک تولید شده می‌پردازد. به خاطر خاصیت مسئله NP-completeness در محیط FFS، رسیدن به جواب بهینه برای مسائل متوسط و بزرگ امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین مسائل آزمایشی در این بخش فقط به مسائل کوچک محدود شده‌اند. برای این منظور ۲۰ مسئله آزمایشی براساس اطلاعات جدول ۱ تولید شده‌اند. دو فاکتور برای مقایسه کیفیت روش‌های ابتکاری با روش جواب بهینه مورد استفاده قرار گرفته‌اند که عبارتند از: مقدار تابع هدف و مدت زمان حل. نتایج این مقایسه‌ها در جدول ۴ خلاصه شده است:

می‌توان دریافت که حد پایین توانایی مناسبی در رسیدن به جواب بهینه را دارد.

**جدول ۳. ارزیابی حد پایین مربوط به درآمد**

| مسئله آزمایشی | حد پایین | جواب بهینه | فاصله بهینگی |
|---------------|----------|------------|--------------|
| %۰۰           | ۷۴       | ۷۴         | ۱            |
| %۰۰           | ۶۴       | ۶۴         | ۲            |
| %۵،۳          | ۹۹       | ۹۴         | ۳            |
| %۰۰           | ۶۵       | ۶۵         | ۴            |
| %۹،۱          | ۶۰       | ۵۵         | ۵            |
| %۰۰           | ۶۳       | ۷۳         | ۶            |
| %۴،۴          | ۹۴       | ۹۰         | ۷            |
| %۰۰           | ۶۴       | ۶۴         | ۸            |
| %۲۰،۴         | ۵۹       | ۴۹         | ۹            |
| %۰۰           | ۶۲       | ۶۲         | ۱۰           |
| %۰۰           | ۳۱       | ۳۱         | ۱۱           |
| %۰۰           | ۸۲       | ۸۲         | ۱۲           |
| %۰۰           | ۹۰       | ۹۰         | ۱۳           |
| %۲۲،۴         | ۷۱       | ۵۸         | ۱۴           |
| %۰۰           | ۸۱       | ۸۱         | ۱۵           |
| %۰۰           | ۱۰۱      | ۱۰۱        | ۱۶           |
| %۹،۲          | ۵۹       | ۵۴         | ۱۷           |
| %۰۰           | ۷۰       | ۷۰         | ۱۸           |
| %۸،۳          | ۷۸       | ۷۲         | ۱۹           |
| %۱۳،۹         | ۸۲       | ۷۲         | ۲۰           |

**جدول ۴. ارزیابی روش‌های ابتکاری برای مسائل کوچک<sup>۱</sup>**

| شماره مسئله | جواب بهینه | درآمد | Cmax | زمان | درآمد | Cmax  | فاصله بهینگی | ASFT | فاصله بهینگی | درآمد | Cmax | فاصله بهینگی | SAFT |
|-------------|------------|-------|------|------|-------|-------|--------------|------|--------------|-------|------|--------------|------|
|             |            |       |      |      |       |       |              |      |              |       |      |              |      |
| ۱           | ۹۵         | ۴۰    | ۱۱۲  | ۴۰   | ۹۵    | ۷۴    | %۰۰          | ۹۵   | ۴۲           | ۸۸    | ۶۰۰  | ۳۱           | ۹۰   |
| ۲           | ۹۰         | ۹۰    | —    | —    | —     | ۳۳    | —            | —    | ۴۲           | ۵۵    | ۱۲۵  | ۴۲           | ۵۸   |
| ۳           | ۵۸         | ۴۲    | ۵۵   | ۴۲   | ۵۵    | %۵،۲  | %۰۰          | ۴۰   | ۱۷           | ۲۵    | ۴۰   | ۴۰           | ۴    |
| ۴           | ۵۰         | ۴۰    | ۴۰   | ۴۰   | ۴۰    | %۱۰،۷ | ۲۸           | ۴۰   | ۴۸           | ۲۲    | ۲۰   | ۵۰           | ۵    |
| ۵           | ۵۰         | ۴۰    | ۴۰   | ۴۰   | ۴۰    | %۰۰   | ۲۰           | ۴۰   | ۸۰           | ۴۵    | ۳۰   | ۸۸           | ۶    |
| ۶           | ۸۸         | ۳۰    | ۸۲   | ۳۰   | ۸۰    | %۰۰   | ۳۰           | ۹۰،۱ | ۸۰           | ۴۵    | ۳۰   | ۸۱           | ۷    |
| ۷           | ۵۹         | ۳۸    | ۵۹   | ۳۹   | ۵۹    | %۰۰   | ۳۹           | ۹۰،۱ | ۵۹           | ۲۵۴   | ۳۵   | ۵۹           | ۷    |
| ۸           | ۷۸         | ۳۶    | ۷۰   | ۳۶   | ۶۹    | %۱۰،۳ | %۱۰،۳        | ۳۶   | ۱۹           | ۳۳    | ۷۸   | ۷۸           | ۸    |
| ۹           | ۶۰         | ۲۰    | ۶۰   | ۲۰   | ۶۰    | %۰۰   | %۰۰          | ۲۰   | ۶۰           | ۸     | ۲۰   | ۶۰           | ۹    |
| ۱۰          | ۸۶         | ۲۹    | ۸۴   | ۲۸   | ۸۶    | %۲۰،۳ | %۰۰          | ۲۸   | ۸۶           | ۵     | ۲۸   | ۸۶           | ۱۰   |
| ۱۱          | ۱۱۰        | ۴۹    | ۱۱۰  | ۴۹   | ۱۰۰   | %۰۰   | %۹،۱         | ۴۹   | ۱۰۰          | ۲۲۱   | ۴۹   | ۱۱۰          | ۱۱   |
| ۱۲          | ۶۳         | ۳۰    | ۶۰   | ۲۸   | ۵۹    | %۱۰،۷ | %۱۰،۷        | ۲۸   | ۵۹           | ۳     | ۲۵   | ۶۳           | ۱۲   |
| ۱۳          | ۵۹         | ۲۷    | ۵۹   | ۳۰   | ۵۸    | %۱۰،۰ | %۱۰،۰        | ۳۰   | ۵۸           | ۱۶    | ۲۷   | ۵۹           | ۱۳   |
| ۱۴          | ۸۲         | ۳۲    | ۸۲   | ۳۲   | —     | —     | —            | ۳۲   | ۷۰           | ۴۰۰   | ۳۲   | ۸۲           | ۱۴   |
| ۱۵          | ۹۵         | ۵۴    | ۹۰   | ۶۰   | ۹۵    | %۱۰،۰ | %۰۰          | ۶۰   | ۹۵           | ۸۷    | ۵۴   | ۹۵           | ۱۵   |
| ۱۶          | ۷۲         | ۳۶    | ۷۲   | ۳۸   | ۶۹    | %۱۳،۲ | %۱۳،۲        | ۳۸   | ۶۹           | ۳۴    | ۳۳   | ۷۲           | ۱۶   |
| ۱۷          | ۶۶         | ۲۴    | ۶۶   | ۶۶   | ۶۶    | %۰۰   | %۰۰          | ۲۴   | ۶۶           | ۴     | ۲۴   | ۶۶           | ۱۷   |

<sup>۱</sup> با توجه به اینکه مدت زمان حل برای دو روش ابتکاری بسیار ناچیز است از ارائه آنها صرفنظر شده است.

|       |      |      |      |       |      |      |      |       |      |      |                          |
|-------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|--------------------------|
| %۱۷,۶ | ۵۱   | %۶,۸ | ۱۱۰  | %۱۶,۰ | ۵۰   | %۹,۳ | ۱۰۷  | ۱۳    | ۴۲   | ۱۱۸  | ۱۸                       |
| %۱۹,۲ | ۲۶   | %۶,۵ | ۷۲   | %۱۹,۲ | ۲۶   | %۶,۵ | ۷۲   | ۳۴    | ۲۱   | ۷۷   | ۱۹                       |
| ---   | ۳۰   | ---  | ۷۰   | ---   | ۳۰   | ---  | ۶۹   | ۶۰۰   | ۳۰   | ۷۰   | ۲۰                       |
| %۵,۵  | ۳۳,۷ | %۲,۹ | ۷۳,۸ | %۶,۷  | ۳۴,۳ | %۴,۰ | ۷۲,۳ | ۱۴۱,۰ | ۳۲,۱ | ۷۵,۸ | میانگین NBO <sup>۱</sup> |
| ۸     | ---  | ۹    | ---  | ۷     | ---  | ۶    | ---  | ---   | ---  | ---  |                          |

<sup>۱</sup> نرم‌افزار Lingo بعد از ۶۰۰ ثانیه توانسته است به جواب بهینه برسد.

#### جدول ۵. فاکتورهای آزمایشی برای مسائل بزرگ

| علامت | سطح        | فاکتورهای آزمایشی          |
|-------|------------|----------------------------|
| L     | ۱۰         |                            |
| M     | ۲۰         | تعداد سفارشات              |
| H     | ۵۰         |                            |
| L     | ۶          |                            |
| H     | ۱۲         | تعداد مراحل                |
| L     | U[2,4]     |                            |
| M     | U[4,6]     | تعداد ماشین‌ها در هر مرحله |
| H     | U[6,10]    |                            |
| ---   | U[0,5,0,9] | ضریب زمان در دسترس         |
| ---   | U[10,50]   | مدت زمان فرآیند            |
| ---   | U[10,20]   | درآمد                      |

#### جدول ۶. تعداد جواب‌های بهینه برای مسائل آزمایشی

| SFAT | AFST | تابع هدف |
|------|------|----------|
| ۰,۴۱ | ۰,۵۹ | کلی      |
| ۰,۵۰ | ۰,۵۰ | درآمد    |
| ۰,۳۵ | ۰,۶۵ | Cmax     |

#### جدول ۷. تعداد جواب‌های بهینه برای سناریوها

| SFAT | AFST | تابع هدف |
|------|------|----------|
| ۰,۴۴ | ۰,۵۶ | کلی      |
| ۰,۴۹ | ۰,۵۱ | درآمد    |
| ۰,۲۸ | ۰,۷۲ | Cmax     |

براساس جدول‌های ۶ و ۷ می‌توان نتیجه گرفت که روش AFST بهتر از روش SFAT در رسیدن به جواب بهینه عمل می‌کند. برای بررسی بیشتر مقادیر حداقل، متوسط و حداکثر برای جواب بهینه در جدول ۸ نشان داده شده است که به شرح زیر است:

همانطور که در جدول ۴ دیده می‌شود هر دو روش ابتکاری دارای کیفیت مناسبی در رسیدن به جواب بهینه دارند که می‌توان براساس دو معیار متوسط جواب بهینه و NBO به این نتیجه رسید. نرم‌افزار Lingo در ۷ مورد توانایی رسیدن به جواب بهینه در ۶۰۰ ثانیه را دارا نمی‌باشد. برای سایر مسائل آزمایشی، مقدار فاصله بهینگی برای دو معیار درآمد و طول دوره ساخت به ترتیب برابر با ۴,۰٪ و ۶,۷٪ برای روش SFAT می‌باشد. همچنین این روش ابتکاری در ۶ مورد برای درآمد و ۷ مورد برای طول دوره ساخت می‌باشد. همچنین این روش در ۹ مورد برای درآمد و ۸ مورد برای طول دوره ساخت، می‌تواند به جواب بهینه دست یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که هر دو روش ابتکاری قابلیت مناسبی در رسیدن به جواب بهینه را دارند، ولی روش AFST بهتر از روش SFAT عمل می‌کند.

#### ۵-۳. مقایسه روش‌های ابتکاری برای مسائل بزرگ

همانطور که در بخش قبل ذکر شد، در مسئله انتخاب سفارشات و زمانبندی رسیدن به جواب بهینه برای مسائل بزرگ در مدت زمان معقول بسیار زمانبر و مشکل می‌باشد؛ در نتیجه در این بخش فقط به مقایسه این دو روش ابتکاری پرداخته می‌شود. برای این منظور، تعدادی مسئله آزمایشی براساس فاکتورهای مختلف تولید شده‌اند. این فاکتورهای آزمایشی در جدول ۵ خلاصه شده‌اند.

براساس جدول ۵، ۱۸ سناریوی مختلف وجود دارند که برای هر سناریو ۱۰ مسئله مختلف تولید شده‌اند. این مسائل آزمایشی ۱۸۰ مورد) برای مقایسه دو روش ابتکاری SFAT و AFST استفاده شده‌اند.

با توجه به اینکه رسیدن به جواب بهینه مسئله OAS در زمان معقول با استفاده از مدل ریاضی امکان‌پذیر نمی‌باشد، در این قسمت فقط به مقایسه عملکرد این دو روش ابتکاری پرداخته می‌شود. جدول‌های ۶ و ۷ تعداد جواب‌های بهینه (به درصد) برای کلیه سناریوها (۱۸ سناریو) و کلیه مسائل آزمایشی (۱۸۰ مسئله آزمایشی) را نشان می‌دهد.

<sup>۱</sup> تعداد بهترین جواب

جدول ۸. تابع هدف برای هر روش ابتکاری

| متوسط | ASFT  | SFAT  | متوسط | SFAT  | حداکثر | حداکثر | تعداد ماشین‌ها | تعداد مراحل | تعداد سفارشات |
|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|----------------|-------------|---------------|
| ۰,۵۶- | ۰,۸۵- | ۰,۳۷- | ۰,۶۰- | ۰,۹۴- | ۰,۳۶-  | L      |                |             |               |
| ۰,۴۳- | ۰,۶۵- | ۰,۱۴- | ۰,۵۰- | ۰,۷۹- | ۰,۲۱-  | M      | L              |             |               |
| ۰,۰۷- | ۰,۲۲- | ۰,۲۰- | ۰,۱۱- | ۰,۲۸- | ۰,۱۸-  | H      |                |             |               |
| ۰,۴۶- | ۰,۶۰- | ۰,۲۰- | ۰,۴۶- | ۰,۶۲- | ۰,۱۸-  | L      |                | L           |               |
| ۰,۵۵- | ۰,۷۲- | ۰,۲۵- | ۰,۵۵- | ۰,۷۶- | ۰,۲۵-  | M      | H              |             |               |
| ۰,۲۶- | ۰,۴۸- | ۰,۱۵- | ۰,۱۶- | ۰,۲۱- | ۰,۱۱-  | H      |                |             |               |
| ۰,۰۲- | ۰,۷۲- | ۰,۶۹- | ۰,۰۸- | ۰,۷۶- | ۰,۶۸-  | L      |                |             |               |
| ۰,۱۹- | ۰,۳۴- | ۰,۰۹- | ۰,۱۹- | ۰,۳۷- | ۰,۰۵-  | M      | L              |             |               |
| ۰,۳۳- | ۰,۶۰- | ۰,۰۷- | ۰,۳۵- | ۰,۵۷- | ۰,۱۳-  | H      |                |             |               |
| ۰,۴۹- | ۰,۶۹- | ۰,۳۰- | ۰,۴۴- | ۰,۵۸- | ۰,۲۸-  | L      |                | M           |               |
| ۰,۱۴- | ۰,۳۷- | ۰,۰۱- | ۰,۱۱- | ۰,۳۷- | ۰,۰۳-  | M      | H              |             |               |
| ۰,۴۵- | ۰,۶۱- | ۰,۳۳- | ۰,۴۸- | ۰,۵۸- | ۰,۳۵-  | H      |                |             |               |
| ۰,۴۴- | ۰,۶۷- | ۰,۱۰- | ۰,۴۹- | ۰,۷۵- | ۰,۰۱-  | L      |                |             |               |
| ۰,۵۳- | ۰,۸۷- | ۰,۲۱- | ۰,۵۳- | ۰,۸۷- | ۰,۲۱-  | M      | L              |             |               |
| ۰,۰۸- | ۰,۴۳- | ۰,۱۴- | ۰,۰۷- | ۰,۴۱- | ۰,۱۵-  | H      |                |             |               |
| ۰,۵۲- | ۰,۷۷- | ۰,۱۱- | ۰,۴۹- | ۰,۸۰- | ۰,۰۸-  | L      |                | H           |               |
| ۰,۴۹- | ۰,۸۸- | ۰,۱۱- | ۰,۴۸- | ۰,۸۶- | ۰,۰۹-  | M      | H              |             |               |
| ۰,۶۶- | ۰,۸۴- | ۰,۳۵- | ۰,۶۹- | ۰,۸۹- | ۰,۳۴-  | H      |                |             |               |

## ۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق مسأله زمانبندی و انتخاب همزمان سفارشات (OAS) در محیط سری انعطاف‌پذیر با ماشین‌های موازی غیر مشابه مورد بررسی قرار گرفته است که می‌تواند در شرکت‌های تولیدی که تولید آنها برای سفارش می‌باشد مورد استفاده قرار گیرد. اولین نوآوری این مقاله فراهم نمودن یک مدل ریاضی برای این مسأله می‌باشد که تابع هدف در نظر گرفته شده بیشینه‌سازی درآمد و کمینه‌سازی طول دوره ساخت می‌باشد. دومین نوآوری این مقاله توسعه حود پایین برای هر دو پارامتر درآمد و طول دوره ساخت می‌باشد. حد پایین طول دوره ساخت یک حد پایین وابسته به مراحل می‌باشد که برای تمامی مراحل موجود در خط تولید یک حد پایین ایجاد می‌کند و برای حد پایین مربوط به درآمد یک الگوریتم ابتکاری برای مسأله زمانبندی حدود توسعه داده شده است که در برای هر مسأله یک جواب امکان‌پذیر برای این مسأله تولید می‌نماید. در نهایت این تحقیق دو روش ابتکاری برای حل مسأله OAS (SFAT و AFST) پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد برای کلیه مسائل با حجم‌های مختلف، روش AFST به طور متوسط عملکرد بهتری در مقایسه با روش SFAT دارد.

پژوهش‌های آتی در این زمینه می‌تواند در محیط‌های کاری دیگر نظیر کار کارگاهی و کارگاه باز انجام گیرد. روش‌های

با توجه به جدول ۸ نتایج زیر قابل مشاهده است:

- مقادیر میانگین، حداقل و حداکثر تابع هدف برای الگوریتم SFAT به ترتیب برابر با  $-0,37$ ،  $-0,63$  و  $-0,09$  و برای الگوریتم AFST به ترتیب برابر با  $-0,38$ ،  $-0,63$  و  $-0,07$  می‌باشند.
- هنگامی که تعداد سفارشات به ترتیب در سطوح L، M و H قرار دارد، مقدار تابع هدف برای SFAT از  $-0,40$  به  $-0,26$  و در نهایت به  $-0,46$  تغییر می‌کند که این مقادیر برای الگوریتم AFST به ترتیب برابر با  $-0,41$  به  $-0,27$  و  $-0,46$  می‌باشد. بنابراین روند خاصی در تغییر مقدار تابع هدف با تغییر تعداد کارها دیده نمی‌شود.
- هنگامی که تعداد ماشین‌ها در هر مرحله به ترتیب در SFAT و H قرار دارد، مقدار تابع هدف برای AFST از  $-0,43$  به  $-0,40$  و در نهایت به  $-0,31$  تغییر می‌کند که این مقادیر برای الگوریتم AFST از  $-0,42$  به  $-0,39$  و در نهایت به  $-0,31$  تغییر می‌کند.
- و سرانجام هنگامی گه تعداد مراحل از سطح L به سطح H تغییر می‌کند، مقدار تابع هدف برای الگوریتم SFAT از  $-0,33$  به  $-0,43$  کاهش می‌یابد که این مقدار برای الگوریتم AFST از  $-0,32$  به  $-0,45$  کاهش می‌یابد.

- [10] Jenabi, M., Ghomi, S.M.T.F., Torabi, S.A., Karimi, B., *Two Hybrid Meta-Heuristics for the Finite Horizon ELSLP in Flexible Flow Lines with Unrelated Parallel Machines*. Applied Mathematics and Computation. Vol. 186, No. 1, 2007, 230–245.
- [11] He, L.M., Sun, S.J., Luo, R.Z., *A Hybrid Two-Stage Flowshop Scheduling Problem*. Asia Pacific Journal of Operation Research, Vol. 24, No. 1, 2007, pp. 45–56.
- [12] Acero-Dominguez, M., Paternina-Arboleda, C., *Scheduling Jobs on a k-Stage Flexible Flow Shop using a TOC-Based (Bottleneck) Procedure*, Proceedings of the 2004 Systems and Information Engineering Design Symposium. 2004, pp. 295-298.
- [13] Chen, C.L., Chen, C.L., *A Bottleneck-Based Heuristic for Minimizing Makespan in a Flexible Flow Line with Unrelated Parallel Machines*. Computers and Operation Research, Vol. 36, 2009, pp. 3073-3081.
- [14] Slotnick, S.A., *Order Acceptance and Scheduling: A Taxonomy and Review*, International Journal of Operation Research, Vol. 212, 2011, pp. 1-11.
- [15] Cesaret, B, et al., 2010, *A Tabu Search Algorithm for Order Acceptance and Scheduling*. Computers and Operation Research. doi:10.1016/j.cor.2010.09.018.
- [16] Oguz, C., Salman, F.S., Yalcin, Z.B., *Order Acceptance and Scheduling Decisions in Make-to-Order Systems*, International Journal of Production Economics. Vol. 125, 2010, pp. 200-211.

ابتکاری مانند SA و TS می‌تواند برای این مسئله توسعه یافته و عملکرد آنها در مقایسه با عملکرد الگوریتم‌های موجود مورد بررسی قرار گیرد. همچنین یافتن حدود پایین بهتر برای پارامترهای طول دوره ساخت و درآمد می‌تواند از زمینه‌های پژوهش‌های آتی باشد.

## مراجع

- [1] Adler, L., Fraiman, N., Kobacker, E., Pinedo, M., Plotnicoff, J.C., Wu, T.P., *BPSS: a Scheduling Support System for the Packaging Industry*. Operations Research. Vol. 41, 1993, pp. 641–648.
- [2] Wittrock, R.J., *An Adaptable Scheduling Algorithm for Flexible Flow Lines*. Operations Research. Vol. 36, 1988, pp. 445–453.
- [3] Mirzapour Al-e-hashem, S.M.J., Malekly, H., Aryanezhad, M.B., *A Multi-Objective Robust Optimization Model for Multi-Product Multi-Site Aggregate Production Planning in A Supply Chain Under Uncertainty*. International Journal of Production Economics , 134(1) , 2011, 28-42.
- [4] Agnetis, L., Pacifici, A., Rossi, F., Lucertini, M., Nicoletti, S., Nicolo, F., *Scheduling of Flexible Flow Shop in an Automobile Assembly Plant*. European Journal of Operation Research. Vol. 97, No. 2, 1997, pp. 348–362.
- [5] Quadt, D., Kuhn, H., *Conceptual Framework for Lot-Sizing and Scheduling of Flexible Flow Lines*, International Journal of Production Research, Vol. 43, No. 11, 2005, pp. 2291–2308.
- [6] Kadipasaoglu, S.N., Xiang, W., Khumawala, B.M., *A Comparison of Sequencing Rules in Static and Dynamic Hybrid Flow Systems*, International Journal of Production Research, Vol. 35, No. 5, 1997, pp. 1359–1384.
- [7] S Kadipasaoglu, S.N., Xiang, W., Khumawala, B.M., *A Note on Scheduling Hybrid Flow Systems*, International Journal of Production Research, Vol. 35, No. 5, 1997, pp. 1491–1494.
- [8] Suresh, V., *A Note on Scheduling of Two-Stage Flow Shop with Multiple Processors*, International Journal of Production Economics, Vol. 49, No. 1, 1997, pp. 77–82.
- [9] Hayrinne, T., Johnsson, M., Johtela, T., Smed, H., Nevalainen, O., *Scheduling Algorithms for Computer-Aided Line Balancing in Printed Circuit Board Assembly*. Production Planning and Control, Vol. 11, 2000, pp. 497–510.