توسعه مدل ابتکاری برای تخصیص و تسطیح منابع محدود در مسائل فلوشاپ ترکیبی با هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های دیرکرد و زودکرد

مهدی حیدری[i] ؛ محمد باقر فخرزاد[ii]

چکیده

در این مقاله، موضوع تخصیص و تسطیح منابع محدود در مسائل فلوشاپ با چندین ماشین یکسان موازی[1] در هر ایستگاه (مرکز ماشین) با هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های زودکرد و دیرکرد بررسی شده است. بدین منظور با استفاده از ترکیب سه الگوریتم هیوریستیک پیشنهادی به حل مسأله پرداخته شده است. در الگوریتم اول با تخصیص کارها به ماشین‌ها، مسأله فلوشاپ ترکیبی به چند مسأله فلوشاپ کلاسیک تبدیل شده است. الگوریتم دوم به حل هر یک از مسائل فلوشاپ کلاسیک پرداخته و در الگوریتم سوم، با مقایسه منابع باقی مانده و منابع مصرف شده، عملیات تسطیح منابع صورت گرفته است. نتایج محاسبات عددی بیانگر استفاده نزدیک به بهینه از منبع کمیاب (گلوگاه) و برتری آن نسبت به الگو ریتم ترکیبی جستجوی ممنوع/انجماد تدریجی شبیه سازی و برنامه ریزی خطی عدد صحیح است.

کلمات کلیدی:

فلوشاپ ترکیبی ،هزینه‌های دیرکردو زودکرد، منابع گلوگاه، تخصیص و تسطیح منابع.

A heuristic algorithm for limited resources allocation and leveling in hybrid flow-shop problems for minimizing the sum of the earliness and tardiness costs

Mehdi Heydari ; Mohammad Bagher Fakhrzad

ABSTRACT

This paper addresses limited resources allocation and leveling in flow-shop problems with identical parallel machines at each station (machine center) for minimizing the sum of the earliness and tardiness costs. Three hybrid heuristic algorithms have been developed and utilized in this approach. In the first algorithm, jobs are allocated to machines and in this case, the hybrid flow-shop problem is converted to several classical flow-shop problems. Then each classical flow-shop problem is solved through the second algorithm and the third algorithm performs the resource leveling by comparing the unused and utilized resources. Computational experiments in this research testify the near optimum utilization of the limited resources (bottleneck) and its superiority over Simulated Annealing / Tabu search hybrid algorithm and present a solution method for integer linear programming problems.

KEYWORDS:

Hybrid flow-shop; Earliness and tardiness costs, Bottleneck resources, Resource leveling, Resource allocation

[i] استاد یار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت(Email:mheydari@iust.ac.ir)

[ii] عضو هیات علمی دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه یزد(Email:mfakhrzad@yazduni.ac.ir)

۱- مقدمه

تخصیص و تسطیح منابع محدود در مسائل فلوشاپ با ماشین‌های موازی (FSPM)[۲] که به فلوشاپ ترکیبی (HFS)[۳] نیز معروف است [۱]- [۳]، متشکل از مجموعه‌ای از مراحل تولید با چندین ماشین موازی در هر مرحله(مرکز ماشین) می‌باشد[۴].جریان کارها در داخل کارگاه به صورت یک طرفه[۴] صورت می‌گیرد. و هر کار در هر مرحله به وسیله یک ماشین انجام می‌شود که باید از یک یا چند مرحله بگذرد.

در طی دو دهۀ اخیر، بسیاری از محققان و پژوهشگران به بررسی موضوع تخصیص و تسطیح منابع محدود در مسائل HFS پرداخته‌اند. اکثر این محققین معیار حداکثر زمان پایان کار[۵] را به عنوان تابع هدف مطرح کرده‌اند[۳]، [۵]- [۷]. این مطالعات، یا یک الگوریتم دقیق و موشکافانه را ارائه کرده‌اند، که تنها قادر به حل مسائلی با اندازۀ متوسط است و یا انواع متفاوتی از الگوریتم‌های هیوریستیک و تقریبی را ارائه می‌دهند[۳]، [۸]- [۱۰]. بوتا[۸] شش روش ابتکاری برای حداقل کردن حداکثر زمان تاخیر در یک مسأله زمانبندی با N کار و M مرحله در محیط HFS با ماشین‌های موازی یکسان و با محدودیت زمان‌های تأخیری[۶] و موعد تحویل متفاوت ارائه کرده است. لین و لیاو[۱۱]یک روش ابتکاری نزدیک به بهینه را برای حداقل کردن حداکثر دیرکرد در یک مسأله زمانبندی HFS دو مرحله‌ای ارائه کرده‌اند. بوتل و بیلات[۱۲]یک الگوریتم ابتکاری را برای تخصیص و تسطیح منابع محدود در یک مسئله زمانبندی در محیط HFS با هدف حداقل کردن تعداد کارهای با دیرکرد ارائه کرده‌اند. آنها برای حل مسأله از یک مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح و سپس یک الگوریتم ژنتیک و یک حد پایین به عنوان روش‌های تقریبی، استفاده کرده‌اند. وب و وایت[۱۳]یک مسأله زمانبندی واقعی را در یک محیط HFS با ۱۶ مرحله تولید بررسی کرده‌اند. آنها با هدف حداقل کردن دیرکرد، یک مدل ریاضی بر اساس مسأله زمانبندی به صورت منابع محدود ارائه کرده و سپس با یک روش ابتکاری حل کرده‌اند. تعداد مقالات منتشره با هدف حداقل کردن دیرکرد و زودکرد در HFS بسیار محدود است[۱۷].

معیارهای مورد استفاده در این مقاله شامل مجموع دیرکرد و زودکرد است. مرکز ماشین دارای ماشین‌های یکسان بوده و هر کاری در داخل این مراکز ماشین (مراحل) با ترتیب یکسان جریان می‌یابد. در هر مرکز ماشین، یک کار را می‌توان فقط و فقط بر روی یک ماشین انجام داد. در همین حین، هر ماشین فقط قادر به پردازش حداکثر یک کار در آن واحد است. براین اساس، در ابتدا یک مدل ریاضی زمانبندی تولید ارائه، و در ادامه برای حل آن از سه الگوریتم هیوریستیک استفاده شده است. در الگوریتم اول با تخصیص کارها به ماشین‌ها، مسأله HFS به چند مسأله فلوشاپ کلاسیک تبدیل شده است. الگوریتم دوم به حل هر یک از مسائل فلوشاپ کلاسیک پرداخته و در الگوریتم سوم، با مقایسه منابع باقی مانده، تسطیح منابع صورت گرفته است. بر این اساس، بعد از چند مرحله تسطیح منابع باقی مانده، در صورتی که در جواب مسأله بهبودی ایجاد نشد، شرایط توقف حاصل گردیده است.

ساختار مابقی این مقاله به صورت زیر است: در بخش دوم به تدوین و فرموله‌کردن مسأله پرداخته می‌شود. برای حل مسأله به ارائه سه الگوریتم هیوریستیک بصورت سه مرحله در بخش سوم اقدام شده است. نتایج محاسبه آزمایش‌ها در بخش چهارم و نتایج مقاله در بخش پنجم آورده شده است.

۲- مدل سازی ریاضی

سیستم فلوشاپ ترکیبی با مجموعۀ $M=\{1,....,j,.....m\}$، متشکل از m مرحلۀ پردازش (مرکز ماشین)، تعریف می‌شود. در هر مرحله j ($j\in M$) یک مجموعۀ شامل k ماشین یکسان وجود دارد. مجموعۀ $I=\{1,...,i,...n\}$ متشکل از n کار مستقل در سیستم تعریف شده و با مجموعه‌های M و K پردازش می‌شود. هر کار i ($i\in I$) را به صورت یک توالی از m عملیات با زمان‌های پردازش P_{ij} $(p_{ij}\geq 0,\ j\in M)$ در نظر بگیرید. عملیات jاز هر کار در مرحلۀ j تنها پس از تکمیل عملیات قبلی $(j-1)$ می‌تواند شروع شود. پردازش هر کار نمی‌تواند قبل از زمان آماده سازی آن انجام شود، هر ماشین می‌تواند فقط یک عملیات در هر زمان انجام دهد. همه کارها در زمان صفر در کارگاه وجود دارد. مفروضات مدل به شرح ذیل است:

۱- کارها نسبت به یکدیگر مستقل است.

۲- هر مرحله، k ماشین موازی یکسان دارد. زمان انجام یک کار با ماشین‌های مختلف متفاوت است.

۳- زمان انجام کار i روی ماشینk در مرحله m شناخته شده، ثابت ومستقل از ترتیبی است که کارها تحت پردازش قرارمی‌گیرند.

٤- کارها وماشین آلات به طور همزمان در ابتدای دوره برنامه ریزی در دسترس هستند.

٥- هرکارمی‌تواند موعد تحویل خاص خود را داشته باشد. درضمن، تکمیل یک کار بعد از موعد تحویل یا قبل از موعد تحویل مجاز است ؛ولی به آن جریمه تعلق می‌گیرد.

۶- بریدگی وانقطاع یک کار خاص مجاز نیست.

۷- کارها مجازند که بین دو مرحله کاری منتظر بمانند.

۸- ماشین آلات همیشه در دسترس هستند. زمان حمل ونقل ناچیز است ویا در زمان انجام کار مد نظر قرار گرفته‌اند.

بر این اساس، مدل ریاضی تخصیص و تسطیح منابع محدود در مسائل HFS به صورت زیر است:

متغیرهای تصمیم گیری و پارامترها:

$i = 1,2,...,N$: تعداد کار

$j = 1,2,...,m$: تعدادمراحل تولید

$k = 1,2,...,K$: تعداد ماشین یکسان در هر مرحله

C_i : زمان تکمیل کار i

C_{ij} : زمان تکمیل کار i در مرحله j

E_i : مقدار زودکرد کار i

T_i : مقدار دیرکرد کار i

d_i : موعد تحویل کار i

R_i : زمان آمادگی کار i

P_{ij} : زمان پردازش کار i در مرحله j

S_{ij} : زمان آماده سازی کار i در مرحله j

H_i : هزینه نگهداری کار i در هر واحد زمانی

β_i : هزینه کمبود کار i در هر واحد زمانی

U_{ij} : زمان شروع کار i در مرحله j

$X_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{اگر کار } i \text{ در مرحله } j \text{ به ماشین } k \text{ تخصیص داده شود.} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$

براساس پارامترها و متغیرهای تصمیم گیری، تابع هدف و محدودیت‌های این مدل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Min \quad Z = \sum_{i=1}^{N} (H_i E_i + \beta_i T_i) \qquad (۱)$$

subject to:

$$C_i + E_i - T_i = d_i \qquad i = 1,2,...,N \qquad (۲)$$

$$\sum_{k=1}^{k} X_{ijk} = 1 \qquad i = 1,2,....N, \; j = 1,2,...., m \qquad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{N} X_{ijk} = K, \; k = 1,2,...,K, \quad j = 1,2,...,m \qquad (۴)$$

$$C_{i,[j+1]} - C_{i,[j]} + L(1 - X_{ijk}) \geq P_{ij} + S_{ij} \qquad (۵)$$

$$i = 1,2,...,N, \; j = 1,2,...,m, \; k = 1,2,...,K$$

$$C_i \geq \sum_{j=1}^{m} (P_{ij} + S_{ij}), \; i = 1,2,...,N \qquad (۶)$$

$$U_{i,j+1} \geq U_{ij} + P_{ij} + S_{ij} \quad i = 1,2,...., N, \qquad (۷)$$

$$j = 1,2,...., m$$

$$U_{i1} \geq R_i \qquad i = 1,2,...., N \qquad (۸)$$

$$X_{i,j,k} = 0,1 \quad i = 1,2,...,N, \; j = 1,2,...., m, \qquad (۹)$$

$$k = 1,2,...., K$$

$$(E_i, T_i, U_{ij}) \geq 0, i = 1,2,...., N, \; j = 1,2,..., m \qquad (۱۰)$$

در مدل ارائه شده، رابطه ۱ بیانگر تابع هدف است که مجموع هزینه های دیرکرد و زودکرد را حداقل می‌کند. رابطه ۲ نشانگر میزان دیرکرد (زودکرد) هر یک ازکارها با توجه به موعد تحویل است. رابطه ۳ نشان می‌دهد کار i در مرحله jفقط با یک ماشین انجام می‌شود. رابطه۴ تضمین می‌کند کار i دارای زودکرد و دیرکرد به صورت همزمان نیست. رابطه۵ بیان می‌دارد زمان تکمیل هر کاری که بلافاصله بعد از یک کار دیگر بیاید، بزرگ‌تر یا مساوی مجموع زمان تکمیل کار ما قبل و زمان های پردازش و آماده سازی آن کار روی ماشین است. در این رابطه، L عدد مثبت بزرگ است. رابطه ۶ تضمین می‌کند زمان تکمیل هر کار بزرگ تر یا مساوی مجموع زمان‌های پردازش و آماده سازی آن کار روی همه ماشین آلات است. رابطه ۷ نشان می‌دهدمجموع زمان شروع هر کار در مرحله j بزرگ‌تر یا مساوی زمان شروع آن کار در مرحله قبل و زمان عملیات و آماده سازی همان مرحله است. رابطه ۸ نیز محدودیت زمان شروع کار I را که در اختیار است،را نشان می‌دهد و روابط ۹و۱۰ بیانگر وضعیت متغیرهاست.

۳- تشریح الگوریتم های پیشنهادی

همان طور که بیان گردید برای مسأله زمانبندی *HFS* اگر در هر مرحله تنها یک ماشین وجود داشته باشد، آنگاه آن یک مسأله زمانبندی فلوشاپ کلاسیک خواهد بود که از نوع *NP-hard* است[۱۴]. حالت دو مرحله‌ای نیز از نوع *NP-hard* می‌باشد، حتی اگر فقط یکی از دو مرحله دارای چند ماشین باشد[۶]. بر این اساس، زمانبندی *HFS* به طور کلی از نوع *NP-hard* است که میزان پیچیدگی آن با بسط و توسعه مراحل به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد، لذا یک رویکرد ابتکاری مبتنی بر سه الگوریتم شامل: تخصیص کارها به ماشین آلات، زمانبندی تولید هر یک از مسائل فلوشاپ کلاسیک و تسطیح منابع باقی مانده در این مقاله پیشنهاد شده است. الگوریتم اول تعیین می‌کند که کدام یک از کارها بر روی چه ماشینی (مسیر) انجام شود. در الگوریتم دوم، کارهای تخصیص داده شده بر روی هر ماشین مرتب و زمانبندی می‌شود و نهایتا در الگوریتم سوم بر اساس موعد تحویل هر کار نسبت به تسطیح دیرکرد و زودکرد آن کار نسبت به بقیه کارها اقدام می‌شود. در صورتیکه بعد از چند مرحله عملیات تسطیح منابع باقیمانده، در جواب مسأله بهبودی ایجاد نشود، شرایط توقف (جواب مطلوب) حاصل شده است.

۳-۱- الگوریتم A : تخصیص کارها به ماشین آلات

قدم ۱ : مجموع زمان پردازش کارها را در هر یک از مراکز کاری محاسبه کنید.

$$P_j = \sum_{i=1}^{N} P_{ij} \qquad j = 1,2,...,m \qquad (۱۱)$$

قدم ۲ : متوسط زمان مورد نیاز هر یک از ماشین ها را در هر یک از مراکز کاری محاسبه کنید.

$$\overline{P}_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_{ij}}{K} = \frac{P_j}{K} \qquad j = 1,2,...,m \qquad (۱۲)$$

K: تعداد ماشین ها در هر مرحله

قدم ۳ : مرکز کاری گلوگاه را در بین مراکز کاری (مراحل) تعیین کنید.

$$P = \max(\overline{P_1}, \overline{P_2}, ..., \overline{P_m}) \qquad (۱۳)$$

قدم ٤ : کارهای موجود در مرکز کاری گلوگاه j را بر اساس قاعده SPT مرتب کنید.

$$P_{[1j]} \le P_{[2j]} \le ... \le P_{[ij]} \le ... \le P_{[Nj]} \qquad (۱۴)$$

j: مرکز کاری گلوگاه

قدم ٥ : از لیست مرتب شده قدم ٤ به تعداد K کار به ماشین آلات مرحله j تخصیص دهید. (کارهای انتخابی این مرحله دارای کمترین زمان فعالیت در مرحله j می‌باشند).

قدم ۶ : کار بعدی را بر اساس لیست مرتب شده در قدم ۴ به ماشینی اختصاص دهید که دارای کمترین زمان کاری تخصیص داده شده باشد(هر ماشینی که زودتر بیکار شود کار بعدی به آن تخصیص داده می‌شود).

قدم ۷ : این عملیات را تا زمانی ادامه دهید که همه کارهای مرحله j به ماشین آلات تخصیص یابند.

قدم ۸ : لیست کارهای تخصیص داده شده به هر یک از ماشین آلات در مرکز کاری گلوگاه را تعیین، و سپس کارهای دیگر مراکز کاری را بر اساس تخصیص‌های مرکز کاری گلوگاه بین ماشین آلات توزیع کنید.

در این مرحله با توجه به لیست کارهای تخصیص داده شده به هر یک از ماشین آلات بر اساس زمان مورد نیاز ایستگاه گلوگاه، مسأله چند کاری با k خط تولید (مسأله HFS)به k مسأله چند کاری با یک خط تولید (مسأله فلوشاپ کلاسیک) تبدیل شده است.

۳-۲- الگوریتم B: زمانبندی کارهای تخصیص داده شده در مسائل فلوشاپ کلاسیک

برای حل هر یک از مسائل فلوشاپ کلاسیک با توجه به معیار عملکردی حداقل کردن مجموع هزینه‌های دیرکرد و زود کرد، از یک رویکرد ترکیبی (EDD+JIT) استفاده شده است. با توجه به اینکه استفاده بهینه از منابع گلوگاه در روش JIT مطرح و مورد توجه قرار گرفته و این امر در الگوریتم A گنجانده شده است؛ لذا در این رویکرد یک توالی عملیات اولیه به کمک قاعده EDD تعیین می‌شود، سپس طبق معیار (JIT) مقدار اختلاف بین حداکثرهای مقادیر زودکرد و دیرکرد حداقل می‌شود. بر این اساس، یک کار در توالی با کار دیگر جایگزین می‌شود، تا موقعی که به ترکیبی مشخص از کارها با معیار عملکردی نزدیک به بهینه دست یافت. در این بررسی، فرض بر این است که تمام کارها مجزا و مستقل از یکدیگر بوده و روی تمام ماشین ها پردازش می شوند. مراحل لازم برای حل مسأله مفروض $n/m/F/ET_{Sum}$ به صورت زیر است:

قدم ۱ : تمام کارها را بر اساس قاعده EDD مرتب کرده و سپس کارها را با توجه به ترتیب به دست آمده به ماشین آلات تخصیص دهید.

$$d_{[1]} \le d_{[2]} \le .... \le d_{[n]} \qquad (۱۵)$$

قدم ۲ : براساس توالی عملیات به وجود آمده در قدم ۱، زمان تکمیل (C_{ij}) را برای هر کار بر روی هر ماشین محاسبه کنید.

$$C_{ij} = \max(C_{i,j-1}, C_{i-1,j}) + P_{ij} \qquad (۱۶)$$

قدم۳ : زمان تکمیل هر کار (C_i) را بعد از اتمام عملیات بر روی کلیه ماشین آلات (ماشین آخر) محاسبه کنید.

قدم۴ : برای هر یک از کارها بر اساس توالی قدم ۳ مقادیر زودکرد و دیرکرد را محاسبه کنید.

$$T_i = \max(0, C_i - d_i) \quad E_i = \max(0, d_i - C_i) \qquad (۱۷)$$

قدم۵ : مجموع مقادیر زودکرد و دیرکرد (Z_k) را برای کلیه کارها در قدم ۳ محاسبه کنید.

$$Z_k = \sum_{i=1}^{n} (H_i E_i + \beta_i T_i) \quad k = 1,2,.....,k \qquad (۱۸)$$

قدم۶ : بهبود توالی عملیات در فلوشاپ کلاسیک

۶-۱) کار با حداکثر مقدار دیرکرد در توالی عملیات قدم ۳ را انتخاب کنید. در صورتیکه هیچ کاری با مقادیر دیرکرد وجود نداشت به الگوریتم C بروید.

$$T_k = \max(T_1, T_2, ..., T_n) \qquad (۱۹)$$

۶-۲) کار با حداکثر مقدار زودکرد در توالی عملیات قدم ۳ را انتخاب کنید. در صورتیکه هیچ کاری با مقادیر زودکرد وجود نداشت به الگوریتم C بروید.

$$E_k = \max(E_1, E_2, ..., E_n) \qquad (۲۰)$$

۶-۳) توالی عملیات کارهای انتخاب شده در قدم های ۱-۶ و ۲-۶ را در توالی عملیات مربوط به قدم ۱ جابجا کنید.

قدم ۷ : قدم های ۳،۴و۵ را برای توالی عملیات جدید مجددا

محاسبه کنید.

قدم ۸ : معیار مقایسه و انتخاب جواب برتر

مقدار Z_k را برای توالی عملیات جدید محاسبه و سپس به قدم ۹ بروید.

قدم ۹ : معیار توقف الگوریتم (B)

۹-۱) اگر مقدار Z_k برای توالی عملیات جدید بیشتر یا مساوی Z_k قدیم بود، به الگوریتم (C) بروید.

۹-۲) اگر مقدار Z_k برای توالی عملیات جدید نسبت به Z_k قدیم بهبود قابل ملاحظه ای پیدا نکرد، به الگوریتم (C) بروید، (حداقل بهبود قابل ملاحظه‌ای در این الگوریتم ۵٪ فرض شده است) .

۹-۳) اگر تعداد تکرار مراحل به ۲۰ مرحله رسید به الگوریتم (C) بروید.

قدم ۱۰ : در صورتیکه هیچ کدام از معیارهای توقف الگوریتم (B) در قدم ۹ حاصل نشد و مقدار Z_k جدید کمتر از مقدار Z_k قبلی بود، Z_k جدید را به عنوان Z_k برتر انتخاب کنید و مبنای مقایسه مراحل بعدی قرار داده و به قدم ۶ از الگوریتم (B) بروید.

۳-۳- الگو ریتم C: تسطیح منابع باقی مانده

قدم ۱ : مجموع مقادیر دیرکرد وزودکرد را برای کلیه خطوط تولید محاسبه کنید.

$$Z=\sum_{k=1}^{k}\sum_{i=1}^{n}(H_iE_i+\beta_iT_i)=\sum_{i=1}^{N}(H_iE_i+\beta_iT_i) \quad (۲۱)$$

قدم ۲ : مقادیر دیرکرد وزودکرد را برای هر یک از خطوط تولید محاسبه کنید.

$$Z_{E(k)}=\sum_{i=1}^{n}H_iE_i \quad Z_{T(k)}=\sum_{i=1}^{n}\beta_iT_i \quad (۲۲)$$
$$k=1,2,...,k$$

قدم ۳ : بهبود توالی عملیات در HFS ۳-۱) : خط تولید با حداکثر مقدار دیرکرد را تعیین کنید. این خط تولید دارای حداکثر مقدار دیرکرد در میان k مسأله فلوشاپ کلاسیک است. در صورتیکه هیچ خط تولیدی با مقادیر دیرکرد وجود نداشته باشد، الگوریتم متوقف می‌شود.

$$T=\max(Z_{T(1)},Z_{T(2)},...,Z_{T(k)}) \quad (۲۳)$$

۳-۲) : خط تولید با حداکثر مقدار زودکرد را تعیین کنید. این خط تولید دارای حداکثر مقدار زودکرد در میانk مسأله فلوشاپ کلاسیک است. در صورتیکه هیچ خط تولیدی با مقادیر زودکرد وجود نداشته باشد، الگوریتم متوقف می‌شود.

$$E=\max(Z_{E(1)},Z_{E(2)},...,Z_{E(k)}) \quad (۲۴)$$

۳-۳) : در خط تولیدی انتخابی قدم ۱-۳ کار با حداکثر مقدار دیرکرد را انتخاب کنید. در صورتی‌که هیچ خط تولیدی با مقادیر دیرکرد وجود نداشته باشد، الگوریتم متوقف می‌شود.

$$T_k=\max(T_1,T_2,...,T_n) \quad (۲۵)$$

۳-۴) : در خط تولید انتخابی قدم ۲-۳ کار با حداکثر مقدار زودکرد را انتخاب کنید. در صورتی‌که هیچ خط تولیدی با مقادیر زودکرد وجود نداشته باشد، الگوریتم متوقف می‌شود.

$$E_k=\max(T_1,T_2,...,T_n) \quad (۲۶)$$

۳-۵) : کار انتخاب شده در قدم ۳-۳ از خط تولید انتخاب شده در قدم ۱-۳ را، با کار انتخاب شده در قدم ۴-۳ از خط تولید انتخاب شده در قدم ۲-۳ ، جابجا کنید.

قدم ۴ : با توجه به تسطیح منابع انجام شده الگوریتم B را برای دو خط تولید انتخاب شده در قدم ۱-۳ و ۲-۳ مجددا اجرا کنید.

قدم ۵ : معیار مقایسه و انتخاب جواب برتر

مقدار Z برای حالت جدید را با استفاده از رابطه(21) محاسبه و به قدم ۶ بروید.

قدم ۶ : معیار توقف الگوریتم (C) :

۶-۱) اگر مقدار Z برای توالی عملیات جدید بیشتر یا مساوی Z قدیم بود، الگوریتم متوقف می‌شود.

۶-۲) اگر مقدار Z برای توالی عملیات جدید نسبت به Z قدیم بهبود قابل ملاحظه‌ای پیدا نکرد، الگوریتم متوقف می‌شود (حداقل بهبود قابل ملاحظه‌ای در این الگوریتم ۵٪ فرض شده است) .

۶-۳) اگر تعداد تکرار مراحل به ۲۰ مرحله رسید الگوریتم متوقف می‌شود.

قدم ۷ : در صورتیکه هیچ کدام از معیارهای توقف الگوریتم (C) در قدم ۶ حاصل نشد و مقدار Z جدید کمتر از مقدار Z قبلی بود، Z جدید را به عنوان Z برتر انتخاب کنید و مبنای مقایسه مراحل بعدی قراردهید و سپس به قدم ۲ از الگوریتم (C) بروید.

٤- نتایج محاسبات عددی

برای بررسی میزان کارآیی الگوریتم‌های ارائه شده تعداد ٤۰۰ مسأله تصادفی با مشخصات زیر طراحی شده است:

۱- ابعاد مسائل ایجاد شده در محدوده الی $(N.M.K)=(20\times5\times3)$ $(N.M.K)=(200\times30\times20)$ است. لیست مسائل در جدول (۱) آمده است.

۲- زمان راه اندازی هر یک از کارها در هر مرحله به صورت تصادفی و جداگانه از توزیع یکنواخت U(۱۰-۱) انتخاب شده‌اند.

۳- هزینه نگه داری (زودکرد) و هزینه کمبود (دیرکرد) هر یک ازکارها به صورت جداگانه از توزیع یکنواخت U(۱۰-۱) انتخاب شده‌اند.

٤- زمان انجام عملیات هر یک از کارها در هر مرحله به صورت تصادفی از توزیع یکنواخت (۳۰-۱۵) انتخاب شده است.

٥- موعد تحویل هر یک از کارهادر مرحله نهایی تولید به صورت تصادفی از توزیع یکنواخت U(۸۰-۳۰) انتخاب شده است.

برای حل مسائل فوق دو برنامه در محیط *MATLAB* نوشته شده است. این دو برنامه بر اساس الگوریتم‌های ترکیبی و ابتکاری *(EDD+JIT)* و الگو ریتم ترکیبی جستجوی ممنوع/انجماد تدریجی شبیه سازی شده[۷] *(SA/TS)* نوشته شده است.

الگوریتم *SA/TS* [۱۷]دارای مراحل زیر است:

قدم۱: مسأله اصلی را به کمک الگو ریتم *SPT* در ماشین آلات موازی به m مسأله فرعی تقسیم کنید(تبدیل مسأله فلوشاپ ترکیبی به مسأله فلوشاپ کلاسیک).

قدم۲: هر یک از مسائل فلوشاپ کلاسیک را به کمک الگو ریتم *SA* حل کنید.

الگوریتم *SA* شامل جواب اولیه، درجه حرارت اولیه، بهبود جواب اولیه، طرح خنک کنند گی و شرط توقف است.

قدم ۳: به کمک الگوریتم *TS* عملیات تسطیح منابع را انجام دهید.

الگوریتم *TS* شامل جواب اولیه، تعیین *tabu list*، طرح جستجوی همسایگی، بهبود جواب اولیه و شرط توقف است.

قدم ۴: بعد از عملیات تسطیح منابع، هر یک از مسائل فلوشاپ کلاسیک را مجددا به کمک الگو ریتم *SA* حل کنید.

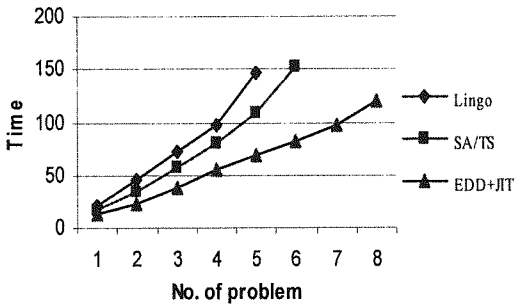
قدم ۵: عملیات مربوط به قدم های ۳،۲و۴ را آنقدر تکرار کنید تا به حداکثر تعداد مراحل از قبل تعیین شده دسترسی پیدا کنید و یا دیگر در جواب ها بهبود حاصل نشود.

نتایج مقایسه جواب های حاصل از روش *(EDD+JIT)* از جنبه زمان حل با دو روش *SA/TS* و*Lingo8* ، در جدول(۱) و نمودار(۱) و از جنبه مقدار تابع هدف در جدول(۲) و نمودار(۲)آمده است. توضیح این مطلب لازم است که رسم نمودارها بر اساس میانگین اطلاعات مندرج در جداول()۱و(۲)برای هر مرحله محاسبه شده است.

نتایج مقایسه‌ای نشان می‌دهد که روش *(EDD+JIT)* علاوه بر ارایه جواب‌های بهتر با هزینه کمتر، مسائل را در زمان کمتری حل می‌کند. الگوریتم*(EDD+JIT)* همچنین مسائل با ابعاد بزرگ تر را؛که با نرم افزار *Lingo8* و الگوریتم *(SA/TS)* در حداکثر زمان مورد بررسی (۳ ساعت) حل نشده اند، در زمان‌های کمتر از ۳ ساعت با جواب های نزدیک بهینه حل می‌کند. مقدار بهبود حاصله، به وسیله الگوریتم *(EDD+JIT)* با توجه به مسائل حل شده به میزان ۳۲/۱۸ درصد کاهش زمان و ۱۵/۸٦ درصد کاهش مجموع دیرکرد و زودکرد در تابع هدف است.

۵- نتیجه گیری

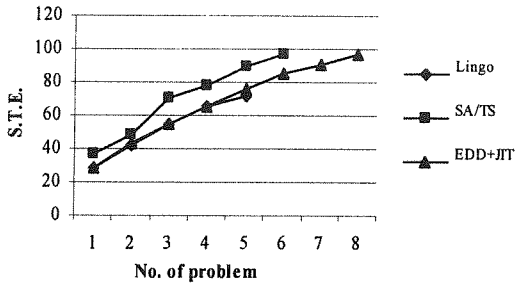
این تحقیق یک الگوریتم کارا و ابتکاری براساس تجزیه و ترکیب کارها، برای زمانبندی تولید HFS با هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های دیرکرد و زودکرد ارایه نموده است. در این روش از ترکیب سه الگو ریتم هیوریستیک پیشنهادی برای حل مسائل استفاده شده است. در الگوریتم اول، کارهای مختلف به ماشین آلات تخصیص داده می‌شود. بر این اساس، مسأله HFSبه چند مسأله فلوشاپ کلاسیک تبدیل می‌شود. الگوریتم دوم به حل هر یک از مسائل فلوشاپ کلاسیک پرداخته و در الگوریتم سوم، با مقایسه منابع باقی مانده با منابع مصرف شده، عملیات تسطیح منابع صورت گرفته است. در صورتی که بعد از چند مرحله تسطیح منابع باقی مانده در جواب مسأله بهبودی ایجاد نشود، شرایط توقف حاصل شده است. آزمایش‌های طراحی شده در این مقاله بیانگر استفاده نزدیک به بهینه از منبع کمیاب (گلوگاه) و برتری آن نسبت به الگوریتم *SA/TS* و روش حل مسائل برنامه ریزی خطی عدد صحیح از جهت کاهش زمان و درصد کاهش تابع هدف (مجموع دیرکرد و زودکرد) است. همچنین نشان داده شده است که به دلیل پیچیدگی محاسباتی و افزایش زمان در *SA/TS* ، رویکرد *(EDD+JIT)* برای حل مسائل بزرگ مناسب تر است.



نمودار(۱):مقایسه زمان در سه روش

جدول(۲):مقایسه تابع هدف در روش های مختلف

Problem Size (N.M.K)	Number of Problems Solved	(S.T.E.) Lingo8	SA/TS	EDD+JIT
20×5×3	5	22.65	34.15	22.65
20×8×3	8	24.12	35.82	24.13
20×10×3	10	26.15	37.28	26.97
20×12×3	12	31.18	39.41	31.25
20×15×3	15	35.27	39.55	35.12
30×5×5	5	36.45	41.15	36.45
30×8×5	8	39.75	42.95	39.81
30×10×5	10	42.84	45.19	43.17
30×12×5	12	45.27	52.27	46.15
30×15×5	15	48.44	59.29	48.94
50×5×8	5	51.28	68.21	51.28
50×8×8	8	52.18	69.87	52.76
50×10×8	10	54.29	70.25	55.38
50×12×8	12	56.44	71.48	56.59
50×15×8	15	58.99	74.26	59.37
80×5×10	5	61.85	76.41	62.18
80×8×10	8	63.24	75.49	64.14
80×10×10	10	65.41	78.76	66.28
80×12×10	12	66.81	79.47	67.11
80×15×10	15	68.85	80.26	68.25
100×10×12	5	69.21	84.48	70.12
100×15×12	8	71.95	85.27	72.11
100×20×12	10	72.45	89.41	73.14
100×25×12	12	-	92.45	80.25
100×30×12	15	-	94.15	80.87
120×10×15	5	-	95.17	83.15
120×15×15	8	-	96.45	84.12
120×20×15	10	-	99.56	85.17
120×25×15	12	-	-	86.18
120×30×15	15	-	-	87.12
150×10×17	5	-	-	88.45
150×15×17	8	-	-	89.11
150×20×17	10	-	-	90.25
150×25×17	12	-	-	91.50
150×30×17	15	-	-	92.10
200×10×20	5	-	-	95.22
200×15×20	8	-	-	96.47
200×20×20	10	-	-	96.98
200×25×20	12	-	-	98.21
200×30×20	15	-	-	99.17



نمودار(۲):مقایسه تابع هدف در سه روش

جدول (۱): مقایسه زمان در روش های مختلف

Problem Size (N.M.K)	Number of Problems Solved	Time (min) Lingo8	SA/TS	EDD+JIT
20×5×3	5	13.19	12.59	7.24
20×8×3	8	15.12	13.11	10.11
20×10×3	10	16.18	16.42	11.15
20×12×3	12	27.51	23.49	15.27
20×15×3	15	29.17	24.15	18.19
30×5×5	5	37.15	28.19	19.48
30×8×5	8	38.11	31.17	19.79
30×10×5	10	48.17	35.14	22.18
30×12×5	12	48.25	37.29	25.41
30×15×5	15	59.17	42.27	27.57
50×5×8	5	61.27	50.48	32.48
50×8×8	8	64.42	52.25	35.87
50×10×8	10	76.11	56.17	38.25
50×12×8	12	79.26	59.42	41.17
50×15×8	15	84.45	67.15	45.27
80×5×10	5	92.55	71.18	48.61
80×8×10	8	94.17	74.49	51.17
80×10×10	10	96.15	81.27	56.15
80×12×10	12	107.18	84.14	58.17
80×15×10	15	109.25	91.26	61.15
100×10×12	5	115.18	99.45	65.87
100×15×12	8	148.11	101.27	68.16
100×20×12	10	179.18	106.24	71.47
100×25×12	12	-	109.15	70.49
100×30×12	15	-	125.48	71.18
120×10×15	5	-	137.18	78.51
120×15×15	8	-	148.48	80.47
120×20×15	10	-	171.15	81.78
120×25×15	12	-	-	80.11
120×30×15	15	-	-	88.15
150×10×17	5	-	-	89.18
150×15×17	8	-	-	91.76
150×20×17	10	-	-	95.12
150×25×17	12	-	-	99.18
150×30×17	15	-	-	107.51
200×10×20	5	-	-	110.18
200×15×20	8	-	-	115.59
200×20×20	10	-	-	120.17
200×25×20	12	-	-	126.15
200×30×20	15	-	-	131.19

۶- منابع

[۱] Hoogeveen, J., Lenestra, J.K., Veltman, B. "*Preemptive scheduling in a two-stage multiprocessor flow-shop is NP-hard*",European Journal of Operation Research 89 2-175,1996.

[۲] Janiak, A., Lichtenstein, M.,. "*Comparison of some heuristic algorithms for the flow-shop problem with parallel machines to minimize the total earliness, tardiness and waiting time*", Selected Papers of the Symposium on O R ,Dresden Springer, Berlin,59-63,2000.

[۳] Tian, P., Ma, J., Zhang, D. M., "*Application of the simulated annealing algorithm to the combinatorial optimization problem with permutation property an*

۷- زیرنویس ها

[1] - Identical
[2] - Flow Shop With Parallel Machine
[3] - Hybrid Flow Shop
[4] - Unidirectional
[5] -Completion time
[6] -Time legs
[7]- Simulated Annealing / Tabu Search

investigation of generation mechanism", European Journal of Operational Research 118, 1-94,1999.

[۴] Elmaghraby S.E. and R.E. Karnub., "*Production control in flexible flow-shops: An example for textile manufacturing*", OR Report, OR & IE Dept. North Carolina State University USA,No. 305,1995.

[۵] Chen, B., "*Analysis of classes of heuristics for scheduling a two-stage flow shop with parallel machines at one stage*", Journal of Operation Research Society 46, 234-244, 1995.

[۶] Gupta, J.N.D., "*Two-stage hybrid flow-shop scheduling problem*", Journal of Operation Research Society 39 (4), 359-364,1988.

[۷] Haouari, M., M,Hallah, R., "*Heuristics algorithms for the two-stage hybrid flow-shop problems*", Operation Research Letters, 213-53,1997.

[۸] Botta-Genoulaz, V., "*Hybrid flow- shop scheduling with precedence constrains and time legs to minimize maximum lateness*",International Journal of Production Economics64,101 -111, 2000

[۹] Braha, S.A., Loob, L.L., "*Heuristics for scheduling in a flow-shop with multiple processors*", European Journal of Operational Research 113, 13 122,2000.

[۱۰] Kyparisis, G.J.,Koulamas, C., "*A note on weighted completion time minimization in a flexible flow-shop*", Operation Research Letters 29, 5-11,2001.

[۱۱] Lin, H.T., Liao, C.J., "*A case study in a two-stage hybrid flow-shop with setup time and dedicated machines*",International Journal of Production Economics 86 (2),133-143,2003.

[۱۲] Bertel. S., Billaut. J.C., "*A genetic algorithm for an industrial multiprocessor flow-shop scheduling problem with recirculation*", European Journal of Operational Research 159 (3,51-662,2004.

[۱۳] Vob. S., Witt. A., "*Hybrid flow shop scheduling as a multi-mode multi- project scheduling roblem with batching requirements:A real-world application*", International Journal of Production Economics. 105,445-458,2007.

[۱۴] Garey. M.R., Johnson. D.S., "*Computers and intractability. A guide to the theory of NP-completeness*", Freeman, Oxford, England 1979

[۱۵] Smit, W. E., "*Various optimizers for single stage production*",Naval Research Logistics Quarterly, 3, 133-145,1959.

[۱۶] Jeremiah, B., Lalchandani, "*A., and Schrage, L., Heuristic rules toward optimal scheduling*", Research Report, Department of Industrial Engineering, Cornell University ,1964.

[۱۷] Janiak, A., Kozan, E., Lichtenstein, M., Oguz, C., "*Meta-heuristic approaches to the hybrid flow-shop scheduling problem with a cost-related criterion*", International Journal of Production Economics, 105,407-424, 2007.