

## Minimizing Makespan in Job Shop Scheduling Problem with Parallel Machines

S. H. Zegordi\*, M.A. BeheshtiNia & N. Jafari Hajagha

S. H. Zegordi, Associate professor, Industrial Engineering Department, Tarbiat Modares University  
M.A. BeheshtiNia, Ph.D. Industrial Engineering Department, Tarbiat Modares University  
N. Jafari Hajagha... M.Sc student, Industrial Engineering Department, Tarbiat Modares University

### Keywords

Flexible Job Shop,  
Parallel Machines,  
Mathematical Modeling,  
Heuristic Algorithms

### ABSTRACT

In this paper the problem of job shop scheduling with parallel machines in each stages is discussed. The objective is to minimize the maximum completion time (makespan). This problem is a combination of two classic problems of job shop and parallel machines which in this case parallel machines has been used as kind of flexibility in the job shop problem. The review of literature has shown that this problem has not been discussed yet. After presenting the mathematical mode, heuristic algorithms are used for solving this NP-hard problem. Regarding this, five algorithms are presented and a lower bound is developed. Finally all these algorithms have been analyzed. According to results the proposed algorithm of H2 works better than the others when there are few jobs. As the number of jobs increases H1 is more efficient than H2 asymptotically. Also the efficiency of H3 algorithm is the worst among the rest.

© (نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید) شماره ۲، جلد ۲۰، ۱۳۸۸

## کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل در مسأله زمانبندی تولید کارگاهی با ماشینهای موازی

سید حسام‌الدین ذگردی، محمد علی بهشتی‌نیا و ناصر جعفری حاج‌آقا

### چکیده:

در این مقاله، مسأله زمانبندی تولید کارگاه منعطف (Flexible Job Shop) با تعریف جدیدی از انعطاف پذیری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این نوع انعطاف پذیری برای مسأله فرض می‌شود که در هر ایستگاه عملیاتی چند ماشین وجود دارند که کارها در هر ایستگاه می‌توانند به یکی از آنها تخصیص داده شود. تابع هدف کمینه‌سازی بازه ساخت (make span) است. ابتدا مدل ریاضی مسأله ارائه شده و سپس NP-hard بودن مسأله نشان داده می‌شود. بعلاوه NP-hard بودن مسأله استفاده از روشهای دقیق برای حل آن در زمان چندجمله‌ای ممکن نیست و باید از الگوریتمهای ابتکاری برای حل آن استفاده نمود. به این منظور دو الگوریتم ابتکاری به نامهای H1 و H2 به

### کلمات کلیدی

تولید کارگاهی  
انعطاف‌پذیر،  
ماشینهای موازی،  
مدلسازی ریاضی،  
الگوریتمهای ابتکاری

تاریخ وصول: ۸۶/۱۰/۱۲

تاریخ تصویب: ۸۷/۸/۲۲

دکتر سید حسام‌الدین ذگردی، دانشیار بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، zegordi@modares.ac.ir

محمد علی بهشتی‌نیا، دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، beheshtinia@modares.ac.ir

ناصر جعفری حاج‌آقا، دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، n\_jafari@modares.ac.ir

ترتیب برای مسائل با ابعاد بزرگ و معمولی برای حل مسأله ارائه می‌شود. بعلاوه این مسأله تا کنون در ادبیات موضوع مورد مطالعه قرار نگرفته است، معیار مناسبی برای ارزیابی الگوریتم‌های ارائه شده وجود ندارد. بنابراین بمنظور ارزیابی الگوریتم‌های ارائه شده، سه الگوریتم ابتکاری با نام‌های H3، H4 و H5 و همچنین یک کران پایین برای آن ارائه می‌شود و نتایج الگوریتم‌های H1 و H2 با آنها مقایسه شده است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهادی H2 برای مسائل با ابعاد کوچک، جواب‌های بهتری را نسبت به الگوریتم‌های دیگر ارائه می‌دهد. اما در مسائل با ابعاد بزرگ H1 به طور مجانبی کارتر از H2 است. همچنین کارایی الگوریتم H3 پایین‌تر از سایر الگوریتم‌ها است.

## ۱. مقدمه

زمانبندی تولید کارگاهی<sup>۱</sup> (JS) یکی از مهمترین مباحث مدیریت تولید است [۱] که شاخه‌ای از زمانبندی تولید محسوب شده و جزء پیچیده ترین مباحث بهینه‌سازی ترکیبی است [۲]. در مسأله JS فرض می‌شود که  $n$  کار وجود دارند که باید توسط  $m$  ایستگاه کاری مورد پردازش قرار گیرند. مسیر پردازش کارها مشخص بوده و حداقل برای دو کار مسیر پردازش کارها متفاوت از یکدیگر است [۳]. در مسأله تولید کارگاهی (JS) فرض بر این است که در هر ایستگاه عملیاتی یک ماشین وجود دارد که تمام کارهای که باید در آن ایستگاه پردازش شوند، توسط آن ماشین مورد پردازش قرار می‌گیرند. تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر<sup>۲</sup> (FJS) توسعه مسأله JS است. در مسأله FJS انواع متفاوتی از انعطاف‌پذیری را می‌توان تعریف نمود. از انواع انعطاف‌پذیری می‌توان انعطاف‌پذیری در مسیر پردازش کارها را نام برد که در آن برای هر کار چند مسیر پردازش متفاوت وجود دارد و هر کار می‌تواند یکی از این چند مسیر را انتخاب کند. همچنین می‌توان انعطاف‌پذیری در نوع عملیات ماشینها را نام برد که در آن یک ماشین خاص می‌تواند در صورت نیاز دو یا چند عملیات متفاوت از هم را انجام دهد. در این مقاله تعریف جدیدی از انعطاف‌پذیری برای مسأله FJS ارائه شده است. مسأله تولید کارگاهی منعطف اولین بار در سال ۱۹۹۰ توسط براکر و اسچلای [۴] بررسی گردید. آنها حالت وجود ماشینهای چند منظوره را مورد بررسی قرار داده و برای مسأله با دو کار، الگوریتمی چندجمله‌ای را ارائه نمودند. هارنیک و همکاران [۵] نیز حالت وجود ماشینهای چند منظوره در محیط تولید کارگاهی را مورد بررسی قرار داده‌اند. ماسترولیلی و گمبردلا [۶] یک روش جستجوی همسایگی را برای مسأله تولید کارگاهی منعطف ارائه داده‌اند. غدجتی [۷] یک رویکرد ترکیبی از روشهای ابتکاری بر مبنای الگوریتم ژنتیک (GA) برای حل مسأله FJS بمنظور کمیینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها ( $C_{max}$ ) ارائه نموده است. یکی از ویژگیهای تحقیق وی در نظر گرفتن محدودیتهای تقدمی بین عملیات کارها، به دو صورت خطی و غیرخطی است. کاسم و همکارانش [۸] نخستین بار مسأله FJS را در حالت چندهدفی مورد بررسی قرار داده‌اند، که در آن روش ارائه شده ترکیبی از

منطق فازی و الگوریتم‌های تکاملی است و انعطاف‌پذیری مسأله تنها به انعطاف‌پذیری عملیات محدود می‌شود. علاوه بر این براندمارته نیز مسأله FJS را با در حالت چندهدفه بررسی نموده‌است. وی از روش جستجو ممنوع<sup>۳</sup> برای حل مسأله استفاده نموده است.

لی و همکارانش [۹] یک الگوریتم ژنتیک برای حل مسأله مشابه با FJS در زنجیره تأمین ارائه کرده‌اند در مدل ارائه شده فرض وجود منابع بیرونی، فرض آلترناتیو ماشین برای هر عملیات و توالی عملیات چندگانه را برای هر قطعه در نظر گرفته است.

پارک و همکاران [۱۰] برای حل مسأله تولید کارگاهی یک روش ابتکاری با تکیه بر الگوریتم ژنتیک منفرد و موازی ارائه نموده‌اند. براکر و نیر [۱۱] در سال ۱۹۹۸ به بررسی مسأله تولید کارگاهی چند حالتی پرداخته<sup>۴</sup> و یک الگوریتم جستجو ممنوع برای حل آن ارائه نموده‌اند. در سال ۱۹۹۹ براکر و همکارانش [۱۲] مسأله تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر با ماشین‌های چند منظوره<sup>۵</sup> را مورد بررسی قرار دادند. این مسأله، حالت خاصی از کار کارگاهی انعطاف‌پذیر است که در آن، زمان پردازش هر عملیات به ماشینی که آن عملیات را انجام می‌دهد، بستگی ندارد.

کیم و همکارانش [۱۳] یک الگوریتم تکاملی برای یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی فرآیند و زمانبندی JS ارائه داده‌اند، که از ویژگیهای این تحقیق می‌توان به جستجوی موازی چندگانه و در نظر گرفتن سه نوع انعطاف‌پذیری (انعطاف‌پذیری عملیات، توالی عملیات، و فرآیند) در برنامه‌ریزی فرآیند اشاره کرد. اسکریچ و همکارانش [۱۴] انعطاف‌پذیری در مسأله JS را تنها به انعطاف‌پذیری در عملیات محدود کرده‌اند. تابع هدف مسأله آنها کمیینه‌سازی دیرکردها است که با استفاده از الگوریتم TS به حل مسأله پرداخته شده است. ژیا و وو [۲] مسأله FJS مطالعه شده توسط کاسم و و همکارانش [۸] را با روشی جدید مورد مطالعه قرار دادند. آنها یک رویکرد ترکیبی از PSO<sup>۶</sup> و SA بوجود آوردند که PSO در تخصیص عملیات به ماشینها مورد استفاده قرار گرفته و از SA برای تعیین توالی عملیات استفاده شده است.

<sup>3</sup> Tabu Search

<sup>4</sup> Multi-mode

<sup>5</sup> Multi Purpose Machine

<sup>6</sup> Particle Swarm Optimization

<sup>1</sup> Job shop

کرز و آسکین [۲۰-۲۱] مسأله جریان کاری منعطف را با در نظر گرفتن زمانهای آماده سازی وابسته به توالی، مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها سه دسته از الگوریتمهای ابتکاری را نخست برای حل مسأله مزبور ارائه داده‌اند که الگوریتمهای دسته اول بر مبنای تخصیص ساده کارها به ماشینها، دسته دوم بر مبنای روشهای حل مسأله فروشنده دوره‌گرد و دسته سوم بر مبنای قاعده جانسون استوار هستند [۲۰]. آنها مجدداً به بررسی همین مسأله پرداخته‌اند و در آن یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای الگوریتم ژنتیک (RKGA) برای حل مسأله ارائه داده‌اند [۲۱].

همانگونه که ذکر گردید در این مقاله تعریف جدیدی از انعطاف پذیری برای مسأله تولید کارگاهی (JS) ارائه شده است که در آن فرض می‌شود که در هر ایستگاه عملیاتی ماشینهای مختلفی وجود دارند و هر عملیات در هر ایستگاه عملیاتی می‌تواند روی یکی از ماشینهای آن مرحله مورد پردازش قرار گیرد. علاوه بر آن فرض می‌شود در هر مرحله سرعت پردازش ماشینها می‌تواند متفاوت باشد. این مسأله زمانبندی ترکیب دو مسأله سنتی زمانبندی در محیط کارگاهی (JS) و محیط ماشینهای موازی (PM) است و ما آن را با کارگاهی با JSPM نشان می‌دهیم.

## ۲. تعریف مسأله و مدل‌سازی ریاضی

### ۲-۱. تعریف مسأله

در مسأله زمانبندی تولید کارگاهی با ماشینهای موازی (JSPM) در نظر گرفته شده در این تحقیق فرض می‌شود تعداد  $n$  کار  $m$  ایستگاه عملیاتی وجود دارد که در هر ایستگاه یک عملیات خاص انجام می‌شود. فرض می‌شود هر کار باید از تمام  $m$  مرحله عملیاتی عبور کند ولی مسیر طی کردن ایستگاهها برای هر کار می‌تواند متفاوت از کارهای دیگر باشد. در هر ایستگاه عملیاتی چند ماشین بطور موازی برای پردازش کارها وجود دارند که سرعت آنها با یکدیگر متفاوت است و هر کار در هر ایستگاه عملیاتی می‌تواند روی یکی از آنها مورد پردازش قرار گیرد. همچنین فرض می‌شود هر کار در هر مرحله نمی‌تواند بیش از یکبار مورد پردازش قرار گیرد. ترتیب حرکت هر کار بین مراحل مختلف مسیر ساخت نامیده می‌شود که این مسیر برای کارهای مختلف متفاوت ولی از پیش تعیین شده است. سایر فرضیات مسأله به صورت زیر هستند:

- ۱- هر ماشین در هر لحظه تنها می‌تواند یک کار را مورد پردازش قرار دهد.
- ۲- هر کار در هر ایستگاه به منظور پردازش تنها باید به یک ماشین تخصیص یابد.
- ۳- همه ماشینها و کارها از زمان صفر در دسترس هستند.
- ۴- ماشینها همیشه در دسترس هستند و خراب نمی‌شوند.
- ۵- قطع کردن عملیات<sup>۵</sup> مجاز نیست.

در این مقاله نوع جدیدی از انعطاف پذیری تعریف می‌شود که در آن در هر ایستگاه چند ماشین برای پردازش کارها وجود دارد و هر کار در هر ایستگاه می‌تواند یکی از ماشینها را برای پردازش انتخاب کند. (بر خلاف حالت معمولی مسأله تولید کارگاهی که در آن فرض می‌شود در هر مرحله تنها یک ماشین وجود دارد و تمام عملیات حتماً باید توسط آن ماشین پردازش شوند). حل مسأله زمانبندی FJS شامل دو زیر مسأله مسیریابی (تخصیص ماشین به عملیات) و زمانبندی عملیات (تعیین توالی عملیات) می‌باشد [۱۵].

این نوع انعطاف پذیری قبلاً در مورد مسأله تولید جریان<sup>۱</sup> بررسی شده است. مسأله تولید جریان<sup>۲</sup> منعطف<sup>۳</sup> مطالعه شده است اما تا کنون مسأله تولید کارگاهی بررسی نشده است. در ادامه این بخش مرور ادبیات مربوط به مسأله تولید جریان<sup>۴</sup> منعطف بیان می‌گردد که نوآوری ارائه شده را در مسائل تولید جریان<sup>۵</sup> مورد بررسی قرار داده‌اند.

ریانه و همکارانش [۱۶] مسأله تولید جریان<sup>۱</sup> منعطف (FFS) سه مرحله‌ای را با ساختار ویژه یک ماشین در مراحل اول و سوم و دو ماشین در مرحله دوم با هدف کمینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل کارها<sup>۲</sup> ( $C_{max}$ ) مورد بررسی قرار داده‌اند. برای این مسأله آنها یک مدل‌سازی ریاضی و دو رویکرد ابتکاری ارائه کرده‌اند. در همان سال نوویکی و اسموتنیکی [۱۷] یک الگوریتم جستجوی ممنوع برای حل مسأله تولید جریان<sup>۱</sup> با ماشینهای موازی ارائه کردند. کاری مشابه با کارهای قبلی نیز توسط دسوک و همکارانش [۱۸] انجام شده است آنها مسأله زمانبندی تولید جریان<sup>۱</sup> با ماشینهای موازی یکنواخت را با فرض یکسان بودن کارها با هدف کمینه سازی  $C_{max}$  مورد بررسی قرار داده و نشان دادند. مسأله با دو مرحله در زمان چند جمله‌ای قابل حل است و برای بیش از دو مرحله NP-hard است. همچنین بر مبنای تجزیه مسأله سه مرحله‌ای به سه مرحله جداگانه و استفاده از روش شاخه و کران برای مرحله دو و روشهای ابتکاری برای مراحل یک و سه، به یک الگوریتم بهینه دست یافته‌اند و یک الگوریتم ابتکاری نیز برای مسأله سه مرحله‌ای ارائه کرده‌اند

لو [۱۹] با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری بر مبنای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید<sup>۴</sup> (SA) به حل مسأله زمانبندی تولید جریان<sup>۱</sup> چند مرحله‌ای با ماشینهای موازی متفاوت پرداخته است که در آن هدف کمینه‌سازی کل زمان جاری است. کیپرسز و کولاماس [۱۵] مسأله زمانبندی تولید جریان<sup>۱</sup> انعطاف‌پذیر با ماشینهای موازی یکنواخت را با تابع هدف کمینه‌سازی  $C_{max}$  مورد مطالعه قرار داده‌اند و دسته‌ای از هیوریستیکهای موجود برای مسأله جریان کارگاهی را بسط داده و اثبات کرده‌اند هیوریستیک مبتنی بر روش جمع برداری، هنگامی که تعداد کارها بسیار زیاد باشد بطور مجانبی بهینه است.

<sup>1</sup> Flow shop

<sup>2</sup> Flexible Flow Shop

<sup>3</sup> Makespan

<sup>4</sup> Simulated Annealing

<sup>5</sup> Preemption

- ۶- انبار میانی بین ایستگاهها وجود دارد و ظرفیت آن نامحدود است.
- ۷- زمانهای پردازش عملیات قطعی و معلوم هستند.
- ۸- زمانهای آماده سازی بین عملیات ناچیز است یا جزئی زمانهای پردازش هستند.
- ۹- زمان حمل و نقل بین ایستگاههای عملیاتی قابل چشم پوشی است.

**۲-۲. مدل ریاضی**

در این قسمت مدل ریاضی عدد صحیح مختلط برای مسأله مورد بررسی ارائه می‌گردد. نمادهای مورد استفاده برای پارامترهای مسأله عبارتند از:

$n$  : تعداد کارها  
 $j = 1, \dots, n$  : شاخص کار

$J_j$  :  $j$  امین کار

$m$  : تعداد مراحل پردازش

$i = 1, \dots, m$  : شاخص عملیات (چون فرض شده است که هر کار باید از تمام مراحل بگذرد، بنابراین هر کار دارای  $m$  عملیات است).

$k = 1, \dots, m$  : شاخص مرحله (چون فرض شده است که هر کار باید از تمام مراحل بگذرد، بنابراین حداکثر مقدار  $k$  برابر  $m$  است).

$M_k$  :  $k$  امین مرحله پردازش

$M_{k,r}$  :  $r$  امین ماشین موازی در مرحله  $k$  ام

- $O_{i,j}$  :  $i$  امین عملیات کار  $j$
- $St_{i,j}$  : مرحله پردازش عملیات  $O_{i,j}$
- $l_k$  : تعداد ماشینهای موازی در مرحله  $k$  ام
- $r = 1, \dots, l_k$  : شاخص ماشین
- $S_{k,r}$  : سرعت ماشین  $M_{k,r}$  (بر حسب ماشین-ساعت در هر ساعت).
- به عبارت دیگر ماشین  $M_{k,r}$  در هر واحد زمانی می‌تواند  $S_{k,r}$  ماشین-ساعت را پردازش نماید.

$P_{i,j}$  : زمان پردازش عملیات  $O_{i,j}$  (بر حسب ماشین-ساعت)

$L$  : یک مقدار ثابت بسیار بزرگ

همچنین نمادهای مورد استفاده برای متغیرهای تصمیم مسأله بصورت زیر هستند:

$C_{i,j}$  : زمان تکمیل عملیات  $O_{i,j}$

$C_{\max}$  : حداکثر زمان تکمیل کارها (یا Makespan)

$C_{i,j}$  : زودترین زمان تکمیل عملیات  $O_{i,j}$

$avail_{k,r}$  : زمان دسترسی به ماشین  $M_{k,r}$

اگر کار  $j$  ام روی ماشین  $r$  ام مرحله  $St_{i,j}$  پردازش شود برابر ۱ و در غیر اینصورت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

$X_{i,j,r} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$

اگر عملیات  $O_{a,b}$  زودتر از عملیات  $O_{i,j}$  صورت پذیرد برابر ۱ و در غیر اینصورت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

$Y_{a,b,i,j} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$

$\min Z = C_{\max}$  (۱)

$C_{i,j} \geq C_{(i-1),j} + \sum_{r=1}^{l_{St_{i,j}}} (X_{i,j,r} \times P_{i,j} / S_{St_{i,j},r})$   $\forall i: 1 \leq j \leq n,$  (۲)  
 $\forall j: 2 \leq i \leq m.$

$C_{1,j} \geq \sum_{r=1}^{l_{St_{1,j}}} (X_{1,j,r} \times P_{1,j} / S_{St_{1,j},r})$   $\forall j: 1 \leq j \leq n.$  (۳)

$\sum_{r=1}^{l_{St_{i,j}}} X_{i,j,r} = 1$   $\forall i: 1 \leq j \leq n,$  (۴)  
 $\forall j: 1 \leq i \leq m.$

$C_{i,j} \geq C_{ab} + P_{i,j} / S_{St_{i,j},r} - L \times (3 - Y_{ab,i,j} - X_{i,j,r} - X_{ab,r})$   $\forall j, b \in \{1 \leq j, b \leq n \mid j \neq b\}$  (۵)  
 $\forall r \in \{1, \dots, l_{St_{i,j}}\}$

$C_{a,b} \geq C_{i,j} + P_{a,b} / S_{St_{a,b},r'} - L \times (2 + Y_{ab,i,j} - X_{i,j,r} - X_{a,b,r'})$   $\forall i, a \in \{1 \leq i, a \leq m \mid St_{i,j} = St_{a,b}\}$  (۶)  
 $\forall r' \in \{1, \dots, l_{St_{a,b}}\}$

$C_{\max} \geq C_{m,j}$   $\forall j: 1 \leq j \leq n$  (۷)

**۲-۳. شرح مدل**

رابطه (۱) تابع هدف مسأله را که کمیینه‌سازی حداکثر زمان تکمیل برای کارها است را نشان می‌دهد. مجموعه محدودیت (۲) عدم تداخل زمانی برای مجموعه توالی عملیات کارها را تضمین می‌کند.

به عبارتی مجموعه این محدودیتها باعث می‌شود هر عملیات از یک توالی در صورتی شروع شود که عملیات متقدم آن تکمیل شده باشد. مجموعه محدودیت (۳) زمان تکمیل اولین عملیات برای هرکاری را بزرگتر یا مساوی طول زمان پردازش آن بر روی ماشین

کارها بر اساس تاریخ تکمیلشان بدست می‌آورد. در این حالت کاری دارای اولویت است که زمان تکمیل کمتری دارد ( $ECT^1$ ). این الگوریتم توانایی حل مسأله به صورت یکپارچه را دارد یعنی به طور همزمان از اطلاعات مربوط به کارها و ماشینها استفاده می‌کند. گامهای اجرای این الگوریتم در زیر آورده شده است.

**گام صفر:** قرار دهید ( $i=1$ ) و مجموعه عملیات قابل زمانبندی را به شکل زیر تشکیل دهید.

$$B := \{o_{i,j} | 1 \leq j \leq n\}$$

**گام یک:** برای هر یک از عملیات متعلق به مجموعه  $B$  زودترین زمان تکمیل ( $c_{i,j}$ ) را به روش زیر بدست آورید:

اگر  $i=1$  آنگاه

$$c_{i,j} = \min\{avail_{st_{i,j},r} + (P_{i,j}/S_{st_{i,j},r}), r = 1, \dots, l_k\}$$

اگر  $i \neq 1$  آنگاه:

$$c_{i,j} = \min\{\max(avail_{st_{i,j},r}, c_{i-1,j}) + (P_{i,j}/S_{st_{i,j},r}), r = 1, \dots, l_k\}$$

که  $avail_{k,r}$  زمان آماده بودن ماشین  $r$  در مرحله  $k$  است.

**گام دو:** اولین عملیات ( $o_{i,j}^*$ ) متعلق به مجموعه  $B$  که دارای زودترین زمان تکمیل است را انتخاب کنید و آنرا به ماشینی تخصیص دهید که زودترین زمان تکمیل روی آن بدست آمده است.

$$o_{i,j}^* = \{o_{i,j} \in B | c_{i,j} = \min\{c_{i',j'} \in B\}\} \quad (8)$$

**گام سه:** عملیات زمانبندی شده  $o_{i,j}^*$  را از مجموعه  $B$  حذف کنید.

$$B := B \setminus \{o_{i,j}^*\}$$

**گام چهار:** عملیات  $o_{i+1,j}^*$  را که پس نیاز عملیات  $o_{i,j}^*$  است را در صورت وجود به مجموعه  $B$  اضافه کنید.

$$B := B \cup \{o_{i+1,j}^*\} \quad (9)$$

**گام پنج:** اگر  $B$  ناتهی بود به گام یک برگردید. در غیر اینصورت به الگوریتم خاتمه دهید.

### ۲-۳. الگوریتم H2

این الگوریتم برای حل مسأله آن را به دو زیر مسأله تعیین توالی کارها و تخصیص کارها به ماشینها تقسیم می‌کند. تعیین توالی عملیات با مرتب کردن نزولی کارها بر پایه مقدار زمان باقیمانده از

مربوطه قرار می‌دهد. مجموعه محدودیت (۴) هر کار را در هر مرحله دقیقاً روی یک ماشین قرار می‌دهد و برای اینکه مجموعه عملیاتی که روی یک ماشین انجام می‌شوند تداخل زمانی نداشته باشند، مجموعه محدودیتهای (۵) و (۶) در مدل گنجانده شده است. مجموعه محدودیت (۷) نیز حداکثر زمان تکمیل کارها را محاسبه می‌کند.

### ۴-۲. NP-hard بودن مسأله

هنگامی که همکارانش اثبات کرده‌اند که مسأله زمانبندی تولید جریانی با ماشینهای موازی یکسان ( $FP_m || C_{max}$ ) در حالت خاص  $FP2 || C_{max}$  با  $l_1 = 1, l_2 = 2$  یا  $l_1 = 2, l_2 = 1$  حتی زمانی که اجازه قطع پردازش عملیات را نیز داریم قویاً NP-hard است [۸]. بنابراین از آنجایی که مسأله زمانبندی تولید کارگاهی با ماشینهای موازی بسط مسأله زمانبندی تولید جریانی با ماشینهای موازی یکنواخت ( $FQ_m || C_{max}$ ) است و مسأله  $FQ_m || C_{max}$  بسط  $FP_m || C_{max}$  است، قویاً NP-hard خواهد بود.

### ۳. حل مسأله

از آنجا که مسأله JSPM جزء مسائل NP-hard است، در نتیجه الگوریتمی که بتواند در زمان چندجمله‌ای به جواب بهینه مسأله با اندازه بزرگ حتی متوسط دست یابد وجود نخواهد داشت و الگوریتمی که بتواند به جواب بهینه برسد، زمان بسیار زیادی را لازم دارد. در این مقاله به منظور حل مسأله الگوریتم ابتکاری H1 برای مسائل با ابعاد بزرگ و الگوریتم ابتکاری H2 برای مسائل با ابعاد کوچک و متوسط ارائه شده است. به علت جدید بودن مسأله در ادبیات موضوع روش حلی برای مسأله مذکور ارائه نشده است و معیار مناسبی برای ارزیابی الگوریتمهای ارائه شده وجود ندارد. بنابراین الگوریتمهای H3، H4 و H5 (بر پایه قواعد زمانبندی) برای حل مسأله ارائه گردیده‌اند که با الگوریتمهای H1 و H2 مقایسه می‌شوند. به منظور ارزیابی بیشتر الگوریتمهای ارائه شده یک کران پایین نیز در بخش بعد توسعه داده می‌شود. مسأله زمانبندی JSPM به دو زیر مسأله، مسیریابی و تعیین توالی عملیات تقسیم می‌شود که در زیر مسأله مسیریابی، عملیات به یکی از ماشینها که توانایی پردازش آن را دارد تخصیص داده می‌شوند و در زیر مسأله تعیین توالی عملیات، توالی انجام عملیات مشخص می‌شود. در الگوریتم H1 به صورت یکپارچه دو زیر مسأله حل می‌شود ولی در الگوریتمهای H2، H3، H4، H5 تعیین توالی در مرحله اول انجام می‌گیرد و در مرحله بعدی زیر مسأله مسیریابی حل می‌شود.

### ۱-۳. الگوریتم H1

بمنظور حل مسأله در ابعاد بزرگ الگوریتم ابتکاری H1 ارائه می‌گردد. این الگوریتم اولویت بندی کارها با مرتب کردن صعودی

<sup>1</sup> Earliest Completion Time

### ۳-۳. الگوریتم H3

این الگوریتم بر پایه قاعده اولویت بندی LWR<sup>۲</sup> توالی عملیات را تعیین می‌کند. بر اساس اولویت تعیین شده هر عملیات نیز به ماشینی تخصیص می‌یابد که زودتر از سایر ماشینها بتواند آنرا تکمیل کند. تفاوت این الگوریتم با الگوریتم H2 تنها در گام چهارم است که این گام نیز به صورت زیر در این الگوریتم پی گرفته می‌شود.

**گام چهارم:** از مجموعه A کاری را که دارای کمترین مقدار  $WR'_j$  است را انتخاب و در مجموعه‌ای بنام B قرار دهید. اگر چند کار دارای مقدار کمینه  $WR'_j$  هستند، همه آنها را در مجموعه B قرار دهید:

$$B = \{o_{i,j} \in A \mid WR'_j = \min\{WR'_{j'} \mid o_{i',j'} \in A\}\} \quad (۱۷)$$

### ۳-۴. الگوریتم H4

این الگوریتم بر پایه قاعده اولویت بندی SPT<sup>۳</sup> توالی کارها را تعیین می‌کند. بر اساس اولویت تعیین شده هر عملیات نیز به ماشینی تخصیص می‌یابد که زودتر از سایر ماشینها بتواند آنرا تکمیل کند. به منظور تعیین توالی عملیات از وزنه‌های ویژه‌ای بر مبنای ساختار مسأله استفاده می‌شود. گامهای این الگوریتم به شرح زیر است:

**گام صفر:** وزن مجازی مربوط به هر یک از عملیات را به طریق زیر بدست آورید.

$$w_{i,j} = l_{st_{i,j}} / \sum_{r=1}^{l_k} S_{st_{i,j},r} \quad (۱۸)$$

**گام یک:** زمان پردازش مجازی مربوط به هر یک از عملیات را از فرمول زیر محاسبه کنید.

$$P'_{i,j} = P_{i,j} \times w_{i,j} \quad (۱۹)$$

**گام دو:** قرار دهید  $(i=1)$  و مجموعه عملیات قابل زمانبندی را به شکل زیر تشکیل دهید.

$$A := \{o_{i,j} \mid 1 \leq j \leq n\} \quad (۲۰)$$

**گام سه:** از مجموعه A کاری را که دارای کمترین مقدار زمان پردازش مجازی است را انتخاب و در مجموعه‌ای بنام B قرار دهید. اگر چند کار دارای مقدار کمینه زمان پردازش مجازی هستند، همه آنها را در مجموعه B قرار دهید:

$$B = \{o_{i,j} \in A \mid P'_{i,j} = \min\{P'_{i',j'} \mid o_{i',j'} \in A\}\} \quad (۲۱)$$

تکمیل نهاییشان ( $MWR^1$ ) صورت می‌پذیرد. بر اساس اولویت تعیین شده هر عملیات نیز به ماشینی تخصیص می‌یابد که زودتر از سایر ماشینها بتواند آنرا تکمیل کند.

در مرحله نخست برای تعیین توالی عملیات از وزنه‌های ویژه‌ای بر مبنای ساختار مسأله برای عملیات استفاده می‌شود. گامهای این الگوریتم در زیر آورده شده است.

**گام صفر:** وزن مجازی مربوط به هر عملیات را به طریق زیر بدست آورید.

$$w_{i,j} = (l_{st_{i,j}}) / \left( \sum_{r=1}^{l_k} S_{st_{i,j},r} \right) \quad (۱۰)$$

**گام یک:** زمان پردازش مجازی مربوط به هر یک از عملیات را از فرمول زیر محاسبه کنید.

$$P'_{i,j} = P_{i,j} \times w_{i,j} \quad (۱۱)$$

**گام دو:** قرار دهید  $(i=1)$  و مجموعه عملیات قابل زمانبندی را به شکل زیر تشکیل دهید.

$$A := \{o_{i,j} \mid 1 \leq j \leq n\} \quad (۱۲)$$

**گام سه:** برای هر یک از عملیات متعلق به A مجموع زمانهای پردازش باقیمانده مجازی را از فرمول زیر محاسبه کنید.

$$WR'_j = P'_{i,j} + P'_{i+1,j} + \dots + P'_{m,j} \quad (۱۳)$$

**گام چهارم:** از مجموعه A کاری را که دارای بیشترین مقدار  $WR'_j$  است را انتخاب و در مجموعه‌ای بنام B قرار دهید. اگر چند کار دارای مقدار بیشینه  $WR'_j$  هستند، همه آنها را در مجموعه B قرار دهید.

$$B = \{o_{i,j} \in A \mid WR'_j = \max\{WR'_{j'} \mid o_{i',j'} \in A\}\} \quad (۱۴)$$

**گام پنجم:** گام یک و دو الگوریتم H1 را اجرا کنید.

**گام شش:** عملیات زمانبندی شده  $o_{i,j}^*$  را از مجموعه A حذف کنید.

$$A := A \setminus \{o_{i,j}^*\} \quad (۱۵)$$

**گام هفت:** عملیات  $o_{i+1,j}^*$  را که پس نیاز عملیات  $o_{i,j}^*$  است را در صورت وجود به مجموعه A اضافه کنید.

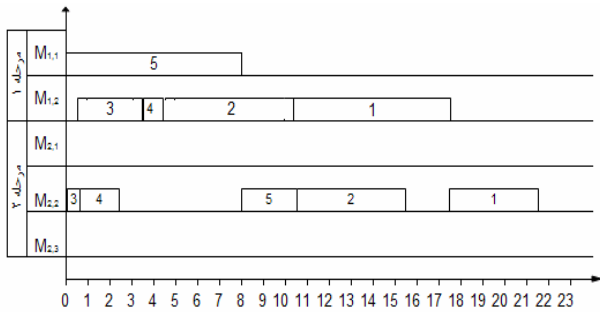
$$A := A \cup \{o_{i+1,j}^*\} \quad (۱۶)$$

**گام هشتم:** اگر A ناتهی بود به گام سه برگردید. در غیر اینصورت به الگوریتم خاتمه دهید.

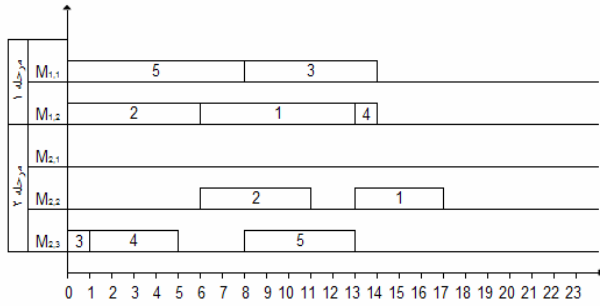
<sup>2</sup> Least Work Remaining

<sup>3</sup> Shortest Processing Time

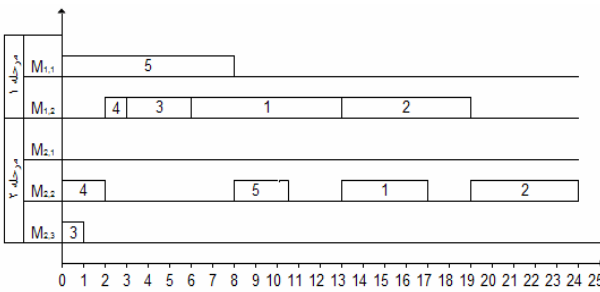
<sup>1</sup> Most Work Remaining



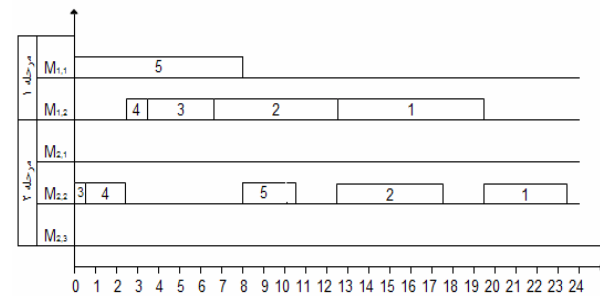
شکل ۱. حل مثال عددی توسط الگوریتم H1



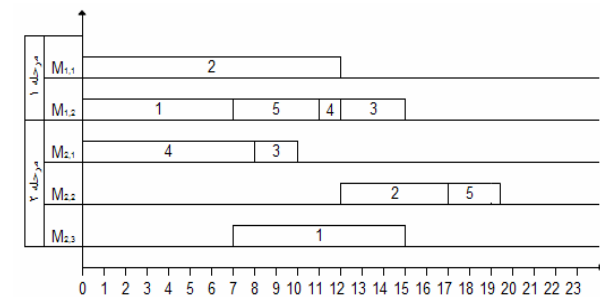
شکل ۲. حل مثال عددی توسط الگوریتم H2



شکل ۳. حل مثال عددی توسط الگوریتم H3



شکل ۴. حل مثال عددی توسط الگوریتم H4



شکل ۵. حل مثال عددی توسط الگوریتم H5

گام چهارم: گام یک و دو الگوریتم H1 را اجرا کنید.

گام پنجم: عملیات زمانبندی شده  $O_{i,j}^*$  را از مجموعه A حذف کنید.

$$A := A \setminus \{O_{i,j}^*\} \quad (22)$$

گام ششم: عملیات  $O_{i+1,j}^*$  را که پس نیاز عملیات  $O_{i,j}^*$  است را در صورت وجود به مجموعه A اضافه کنید.

$$A := A \cup \{O_{i+1,j}^*\} \quad (23)$$

گام هفتم: اگر A ناتمامی بود به گام سه برگردید. در غیر اینصورت به الگوریتم خاتمه دهید.

### ۳-۵. الگوریتم H5

این الگوریتم بر پایه قاعده اولویت بندی  $LPT^1$  توالی عملیات را تعیین می‌کند. بر اساس اولویت تعیین شده هر عملیات نیز به ماشینی تخصیص می‌یابد که زودتر از سایر ماشینها بتواند آنرا تکمیل کند. تفاوت این الگوریتم با الگوریتم H4 تنها در گام سه است که این گام به صورت زیر در این الگوریتم دنبال می‌شود

گام سه: مجموعه عملیاتی از A را که بیشترین زمان پردازش مجازی را دارند در مجموعه B قرار دهید.

$$B = \{O_{i,j} \in A \mid P'_{i,j} = \max \{P'_{i,j'} \mid O_{i,j'} \in A\}\} \quad (24)$$

### ۳-۶. مثال عددی

بمنظور تبیین بیشتر در این بخش یک مثال عددی ذکر شده و توسط هر یک از پنج الگوریتم ارائه شده حل می‌گردد. فرض کنید ۵ کار و دو مرحله عملیاتی وجود دارند. در مرحله اول دو ماشین وجود دارند که سرعتهای آنها به ترتیب برابر ۱ و ۲ است. در مرحله دوم نیز سه ماشین وجود دارند که سرعتهای آنها به ترتیب برابر ۱، ۴ و ۲ است. همچنین زمان پردازش کارها و توالی ساخت آنها از جدول ۱ تبعیت می‌کند. با حل این مسأله توسط هر یک از ۵ الگوریتم ابتکاری ارائه شده، نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۱ تا ۵ بدست می‌آید.

جدول ۱. داده‌های مربوط به مثال عددی

کار	مرحله ۱	مرحله ۲	توالی ساخت
۱	۱۴	۱۶	۱→۲
۲	۱۲	۲۰	۱→۲
۳	۶	۲	۲→۱
۴	۲	۸	۲→۱
۵	۸	۱۰	۱→۲

<sup>1</sup> Longest Processing Time

در نتیجه کران پایین مسأله به شکل زیر خواهد بود.

$$LB = \max\{LB_j, LB_M\} \quad (29)$$

## 5. طراحی آزمایش‌های عددی

### 5-1. روشهای مورد مقایسه

به خاطر اینکه مسأله مورد نظر در ادبیات مورد مطالعه قرار نگرفته است به منظور ارزیابی الگوریتم‌های H1 و H2 سه الگوریتم ابتکاری دیگر و همچنین یک کران پایین برای مسأله توسعه داده شد. در این بخش توانایی هر یک الگوریتم‌های ابتکاری ارائه شده نسبت به هم مورد مقایسه قرار می‌گیرد. برای مقایسه الگوریتم‌ها از میانگین جوابها (Mean)، بهترین جوابها (Best) و انحراف معیار (s.d.) پارامتر (ml) استفاده شده است که از اجرای مثالهای تصادفی ایجاد شده بدست آمده‌اند.

$$ml = \frac{(\text{makespan} - \text{lowerbound})}{\text{lowerbound}}$$

### 5-2. تولید مسائل تصادفی

برای تولید مسائل تصادفی نخست پنج پارامتر از مسأله شناسایی گردید. توزیع چهار پارامتر از کار مشابهی که در زمینه تولید جریان‌های مختلط انجام شده بود مشخص شد و توزیع پارامتر پنجم نیز به شرح زیر تعیین گردید.

تعداد کارها، تعداد مراحل پردازش، تعداد ماشینهای موجود در هر مرحله و زمان پردازش هر عملیات از مسأله مشابه [18] موجود در ادبیات گرفته شده است. که در آن تعداد کارها برابر 2,4,6,8,10 و تعداد مراحل پردازش برابر 2050100150200300 است. همچنین تعداد ماشینهای موجود در هر مرحله دارای توزیع گسسته یکنواخت بین 1 و 5 ( $U[1,5]$ ) می‌باشد و زمان پردازش در نظر گرفته شده برای هر عملیات دارای توزیع گسسته یکنواخت بین 1 و 40 برابر مجموع سرعت ماشینهایی است که قابلیت پردازش عملیات مزبور را دارند (k مرحله‌ایست که عملیات مورد نظر در آن پردازش خواهد شد).

سرعت ماشینها نیز دارای توزیع گسسته یکنواخت بین 1 و 3 ( $U[1,3]$ ) در نظر گرفته شده است.

### 5-3. طراحی روش انجام آزمایش‌ها

حالات مختلفی که می‌توان برای تولید نمونه‌های تصادفی در نظر گرفت برابر  $6 \times 5 \times 1 \times 1 \times 1 = 30$  حالت است که از هر اندازه مسأله 10 نمونه تصادفی تولید شده و در یک فایل باینری ذخیره شدند تا با هر یک از الگوریتم‌های معرفی شده اجرا شوند. برنامه

## 4. محاسبه یک کران پایین برای مسأله

در این قسمت دو کران پایین برای مسأله توسعه داده می‌شود. یکی از این کرانها مبتنی بر کار و دیگری مبتنی بر ماشین نامگذاری شده است. بدیهی است که در مورد هر مسأله هر یک از این دو کران که مقدار بزرگتری دارد، می‌تواند بعنوان کران پایین اصلی مسأله مورد استفاده قرار گیرد. در محاسبه کران مبتنی بر هرکار فرض می‌شود که تنها یک کار برای زمانبندی آماده است در نتیجه انتظار در صف برای این کار در هر مرحله برابر صفر خواهد شد و در هر مرحله روی سریعترین ماشین مرحله مورد نظر پردازش خواهد شد. اگر فرض شود که  $T_{i,j}$  مدت زمانی باشد که عملیات  $O_{i,j}$  برای پردازش در مرحله  $St_{i,j}$  در صف باقی مانده است و در آن مرحله روی ماشین  $r'$  پردازش شود در این صورت می‌توان کران مبتنی بر کار را به طریق زیر بدست آورد.

$$C_{m,j} = \sum_{i=1}^m (T_{i,j} + P_{i,j} / S_{St_{i,j},r'}) \quad (25)$$

$$\Rightarrow C_{m,j} \geq \sum_{i=1}^m (P_{i,j} / S_{St_{i,j},r'})$$

از طرفی چون  $S_{St_{i,j},r} \leq (\max_r S_{St_{i,j},r})$  پس می‌توان نتیجه گرفت که

$$P_{i,j} / (\max_r S_{St_{i,j},r}) = \min_r (P_{i,j} / S_{St_{i,j},r})$$

$$P_{i,j} / (\max_r S_{St_{i,j},r}) \leq P_{i,j} / S_{St_{i,j},r} \quad (26)$$

$$\Rightarrow LB_j = \sum_{i=1}^m \min_r (P_{i,j} / S_{St_{i,j},r})$$

$$\leq \sum_{i=1}^m (P_{i,j} / S_{St_{i,j},r'}) \leq C_{m,j} \leq C_{\max}$$

اگر برای تک‌تک کارها این کران را محاسبه شود در نهایت بیشینه آنها کران مبتنی بر کار برای مسأله تحقیق خواهد بود، یعنی:

$$LB_j = \max_j \left\{ \sum_{i=1}^m (\min_r (P_{i,j} / S_{St_{i,j},r})) \right\} \quad (27)$$

برای محاسبه کران مبتنی بر ماشین، کران بدست آمده برای مسأله  $FQ_m \| C_{\max}$  موجود در ادبیات را گسترش داده شد (اثبات آن در [22] ارائه شده است). سپس این کران را با افزودن جمله

$$O_k = \frac{\max_{O_{i,j} \in O_k} (P_{i,j})}{\max_r (S_{k,r})}$$

مجموعه عملیاتی است که توسط مرحله  $k$ ام پردازش می‌شوند. این جمله بیانگر این واقعیت است که چون اجازه قطع عملیات وجود ندارد، در نتیجه عملیاتی که دارای بیشترین زمان پردازش است در خوشبینانه‌ترین حالت روی سریعترین ماشین پردازش شود.

$$LB_M = \max_k \left\{ \max \left\{ \sum_{O_{i,j} \in O_k} P_{i,j} / \sum_{i=1}^{I_k} S_{k,r}, \max_{O_{i,j} \in O_k} (P_{i,j}) / \max_r (S_{k,r}) \right\} \right\} \quad (28)$$



۶. نتایج آزمایش‌ها

برای تجزیه و تحلیل الگوریتم‌ها، ۱۰ نمونه تصادفی ذخیره شده در فایل باینری برای هر یک از حالات اجرا شده و آماره‌های میانگین جوابهای بدست آمده (Mean)، بهترین جواب بدست آمده (Best) و انحراف معیار (s.d.) پارامتر (ml) که انحراف نسبی از جوابهای بدست آمده است محاسبه شده است.

با توجه به داده‌های جدول ۲ و شکل‌های ۶، ۷ و ۸ مشاهده می‌شود هنگامی که تعداد کارها (۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ کم) باشد، الگوریتم H2 به طور نسبی از الگوریتم H1 کاراتر است ولی هنگامی که تعداد کارها (۲۰۰، ۱۵۰ و ۳۰۰) بیشتر شود و تعداد مراحل پردازش کمتر (۲ و ۴)، الگوریتم H1 بهتر از H2 جواب می‌دهد.

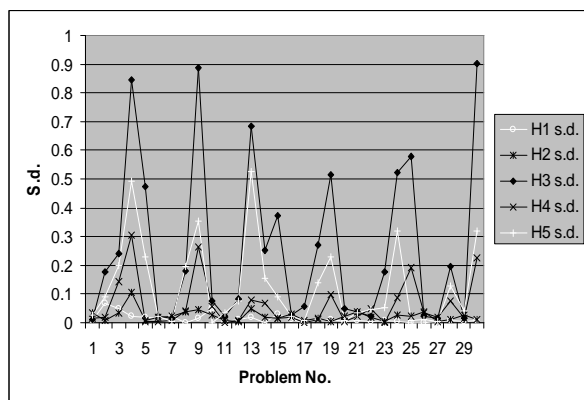
همه الگوریتم‌ها به زبان C کد شده و با یک کامپیوتر شخصی Pentium III (CPU 1100 MHz , RAM 128 M) شدند.

نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم‌های H1, H2, H3, H4, H5 در شکل‌های ۶، ۷، ۸ و جدول ۲ آورده شده است. ستون اول و دوم و سوم جدول ۲ به ترتیب شماره مسأله، تعداد کارها و تعداد مراحل را در هر نمونه از مسائل نشان می‌دهد.

ستونهای چهارم، پنجم و ششم به ترتیب میانگین جوابها (Mean)، بهترین جوابها (Best) و انحراف معیار (s.d.) ده بار اجرای هر مسأله را با الگوریتم H1 نشان می‌دهد. به همین ترتیب ستونهای هفتم تا هجدهم نیز به ترتیب میانگین جوابها، بهترین جوابها و انحراف معیار ده بار اجرای هراندازه از مسأله را با الگوریتم‌های H1, H2, H3, H4, H5 نشان می‌دهد

جدول ۲. مقایسه آماره‌های  $C_{max}$  الگوریتم‌ها

Problem No.	Job	Stage	H1			H2			H3			H4			H5		
			Mean	Best	s.d.	Mean	Best	s.d.	Mean	Best	s.d.	Mean	Best	s.d.	Mean	Best	s.d.
1	20	2	525.72	473.67	0.008	482.92	434	0.0339	611.18	531.33	0.0115	572.55	485	0.0134	574.7	435	0.0264
2	20	4	595.37	529.17	0.066	566.63	477.5	0.0069	1167.38	872	0.1753	774.53	632.83	0.0186	940.45	644.67	0.0888
3	20	6	742	648.17	0.0478	645.17	578.5	0.0352	1785.72	1388.67	0.2395	1050.28	864.33	0.1411	1465.75	1081.17	0.2
4	20	8	812.83	740.5	0.0238	768.35	713.67	0.1049	2782.03	1699.5	0.8464	1435.73	1140.17	0.304	2010.8	1443.67	0.4931
5	20	10	941.1	866.83	0.0203	860.32	766.83	0.0077	3367.12	2504.5	0.4721	1799.95	1476.33	0.0033	2436.65	1748.33	0.2303
6	50	2	1202.95	1010.33	0.0143	1233.18	1068	0.02	1401.88	1208.5	0.023	1380.05	1160	0.0044	1376.87	1234.5	0.0209
7	50	4	1363.97	1239.67	0.0226	1254.57	1120.33	0.021	2325.48	1978.33	0.0156	1807	1652.17	0.0068	1974.25	1773.33	0.0039
8	50	6	1467.73	1328.67	0.0001	1411.32	1242.33	0.0363	3964.77	3080.83	0.1816	2399.35	1985.83	0.0404	2910.57	2369.5	0.1956
9	50	8	1543.83	1381.17	0.0163	1485.63	1400	0.0465	6508.85	4407.17	0.888	3190.8	2560.17	0.2634	4405.67	3546.5	0.3524
10	50	10	1694.78	1571.33	0.0487	1517.4	1423.5	0.0254	7567.38	5236.83	0.0764	3577.85	2889.83	0.0574	4989.08	3782	0.0006
11	100	2	2217.9	2037	0.0043	2234.22	1969.5	0.0079	2671.3	2398.33	0.0209	2719.48	2534.5	0.0014	2532.28	2187.5	0.0339
12	100	4	2465.05	2364.33	0.0114	2767.7	2625.33	0.0034	5578.45	4335.67	0.0838	3726.2	3570	0.0082	4460.15	3605.5	0.0738
13	100	6	2654.95	2428.5	0.0183	2541.42	2356	0.0494	7754.33	6019.5	0.6826	4485.43	4032.67	0.079	5705.83	4524.5	0.528
14	100	8	2723.35	2550.33	0.0006	2613.1	2407	0.0173	10444.05	7299.83	0.2533	5649.15	4861.17	0.0667	7162.45	5447.83	0.1547
15	100	10	2805.25	2686.83	0.0306	2600.8	2389	0.0146	14218.48	10685.17	0.3704	6957.67	5888.5	0.0161	9357.05	7590.17	0.091
16	150	2	3374.93	3136.5	0.0103	3922.68	3245.33	0.03	4138.47	3763.17	0.0267	4151.17	3650.5	0.0173	4164.17	3692	0.0214
17	150	4	3584.37	3386	0.0016	3864.37	3350	0.0092	6887.32	5431	0.0581	5373.43	5001.67	0.0002	5921.98	4396.5	0.0085
18	150	6	3757.42	3651.5	0.011	3886.52	3601	0.0159	12437.83	10099.17	0.2692	7020.42	6565.67	0.0101	8900.57	7014.83	0.1401
19	150	8	3958.98	3900.83	0.0125	3898.38	3733.5	0.0019	17087.93	11534.33	0.5156	8702.37	7397.83	0.099	11361.17	8347	0.2286
20	150	10	4071.93	3881.33	0.0054	4002.3	3742	0.0225	25136.78	18414.33	0.0504	11587.95	9742	0.0028	15611.2	12152.83	0.0057
21	200	2	4421.73	4322.17	0.0074	5077.5	4056	0.038	5458.52	4827.67	0.0358	5436.65	4944.33	0.022	5550.13	4576.33	0.0352
22	200	4	4750.22	4506.83	0.0037	5240.85	4501	0.0203	9401.8	7526	0.0207	7393.7	6684.67	0.0488	7711.33	6252.17	0.0446
23	200	6	4971.75	4695.33	0.0061	5116.23	4560.33	0.0041	14826.27	11792.83	0.1753	8971.07	8294.17	0.001	10466.07	8775.5	0.0537
24	200	8	5196.97	4889.33	0.0024	5058.57	4670.67	0.0247	21917.6	14635.17	0.5235	10795.12	9358.33	0.086	14407.1	9952.33	0.3196
25	200	10	5317.92	5044.83	0.0011	5147.22	4900.67	0.0239	31408.73	17897.33	0.5772	14026.15	10922.5	0.1906	19284.42	13421.83	0.0076
26	300	2	6607.8	6295.5	0.0007	6896.67	6010	0.0363	7652.2	7135.67	0.0226	7879.13	7067.5	0.032	7506.37	6776.67	0.0123
27	300	4	6917.08	6606.67	0.0043	7979.82	6987.5	0.0045	15038.3	10964.67	0.0144	11190.3	10078.33	0.0182	12133.62	9430.83	0.0026
28	300	6	7283.67	7025	0.0076	7652.38	7053	0.0101	20990.86	15976	0.1965	13511.55	12019.17	0.0752	15525.53	12860.5	0.1292
29	300	8	7439.83	7228.17	0.0043	7840.67	7322.33	0.0262	37534.49	28610.84	0.0143	17511.63	16440.84	0.0168	23362.95	19267.16	0.0414
30	300	10	7634.75	7409.17	0.0072	7603.1	7060.33	0.0129	46082.6	27314.5	0.9014	21086.71	16177.33	0.2262	27727.12	20798.67	0.3214



شکل ۸. مقایسه انحراف معیارهای ( پارامتر ml ) بدست آمده از الگوریتم‌ها

### ۷. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک انعطاف‌پذیری جدید در مسأله زمانبندی تولید کارگاهی (JS) که از ترکیب مساله تولید کارگاهی و ماشینهای موازی بدست می‌آید، ارائه گردید. پس از نشان دادن NP-hard بودن مساله از نظر زمان حل، برای حل این مسأله دو الگوریتم ابتکاری H1 و H2 به ترتیب برای مسائل با ابعاد بزرگ و معمولی ارائه گردید. بعلاوه جدید بودن مساله در ادبیات موضوع روش حلی برای مساله مذکور ارائه نشده است و معیار مناسبی برای ارزیابی الگوریتمهای ارائه شده وجود ندارد. بنابراین الگوریتمهای H3، H4 و H5 (بر پایه قواعد زمانبندی) برای حل مساله ارائه گردید که با الگوریتمهای H1 و H2 مقایسه شده‌اند. نتایج محاسبات نشان داد که برای تعداد کارهای کم (کمتر از ۱۰۰) الگوریتم H2 به طور نسبی از سایر الگوریتمها کارتر است ولی هنگامی که تعداد کارها بسیار زیاد باشد، الگوریتم H1 به طور مجانبی کارتر از H2 است. همچنین کارایی الگوریتم H3 به مراتب بدتر از سایر الگوریتمها می‌باشد.

همچنین بمنظور ارزیابی بیشتر الگوریتمهای ارائه شده یک کران پایین نیز برای مساله توسعه داده شده است و نتایج الگوریتمهای ارائه شده با آن مقایسه شده‌است.

حل مسأله با استفاده از روشهای فرا ابتکاری یا ارائه روشهای حل جدید و در نظر گرفتن سایر انعطاف‌پذیریها در کنار ماشینهای موازی در تولید کارگاهی می‌تواند به عنوان تحقیقات آتی در نظر گرفته شود.

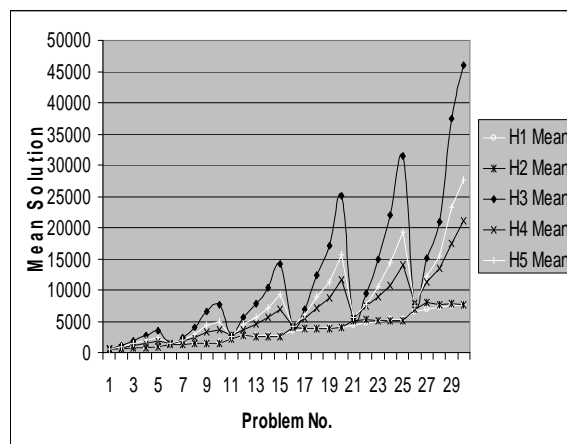
### مراجع

- [1] Zhou, H., Feng, Y., Han, L., "The Hybrid Heuristic Genetic Algorithm for Job Shop Scheduling", Computers & Industrial Engineering, Vol. 40, 2001, pp. 191-200.
- [2] Xia, W., Wu, Z., "An Effective Hybrid Optimization Approach for Multi-Objective Flexible Job-Shop Scheduling Problems", Computers & Industrial Engineering, Vol. 48, 2005, pp. 409-425.

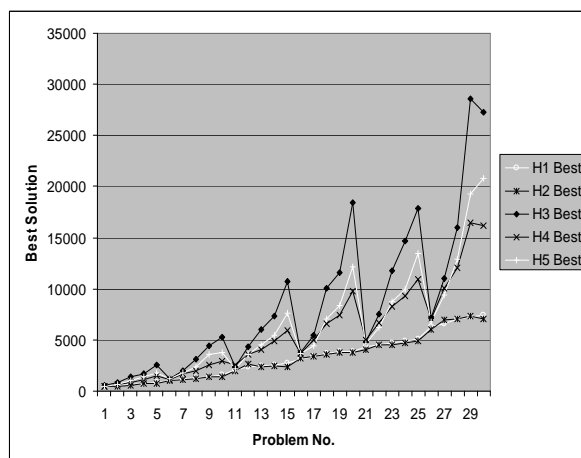
با توجه به داده‌های بدست آمده از جدول ۲، هنگامی که تعداد کارها بسیار زیاد باشد الگوریتم H1 بطور مجانبی از الگوریتم H2 کارتر است. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که کارایی سه الگوریتم دیگر به مراتب از دو الگوریتم H2 و H1 بدتر است و بدترین کارایی و سپس به ترتیب H5 و H4 بدترین کارایی را بین این پنج الگوریتم دارند.

همچنین با افزایش مراحل پردازش اختلاف بین جوابهای بین الگوریتمها به شدت افزایش پیدا می‌کند ولی هنگامی که تعداد مراحل کم باشد اختلاف فاحشی میان جوابهای بین الگوریتمها وجود ندارد.

شکل ۷ نشان می‌دهد که ۸۰ درصد بهترین جوابهای بدست آمده متعلق به الگوریتم H2 است و ۲۰ درصد بقیه مربوط به الگوریتم H1 می‌باشد. نتایج تلفیقی شکلهای ۶ و ۷ را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد که انحراف نسبی جوابهای بدست آمده در الگوریتم H1 در اکثر موارد پایین‌تر از انحراف نسبی بدست آمده از الگوریتم H2 است که حاکی از نزدیکی نسبی جوابهای هر گروه به میانگین بدست آمده است.



شکل ۶. مقایسه میانگین جوابهای بدست آمده از الگوریتمها



شکل ۷. مقایسه بهترین جوابهای بدست آمده از الگوریتمها

- [17] Nowicki, E., Smutniciki, C., "The Flow Shop with Parallel Machines: A Tabu Search Approach", European Journal of Operational Research, Vol. 106, 1998, pp. 226-253.
- [18] Dessouky, M.M., Dessouky, M.I., Verma, S.K., "Flowshop Scheduling with Identical Jobs and Uniform Parallel Machines", European Journal of Operational Research, Vol. 109, 1998, pp. 620-631.
- [19] Low, C., "Simulated Annealing Heuristic for Flow Shop Scheduling Problem with Unrelated parallel Machines", Computer & operation Research, Vol. 32, 2005, pp. 2013-2025.
- [20] Kurz, M.E., Askin, R.G., "Comparing Scheduling Rules for Flexible Flow Lines", Int. J. Production Economics, Vol. 85, 2003, pp. 371-388.
- [21] Kurz, M.E., Askin, R.G., "Scheduling Flexible Flow Lines with Sequencing-Dependent Setup Times", European Journal of Operational Research, Vol. 159, 2004, pp. 66-82.
- [22] Hoogeveen, J.A., van de Velde, S.L., Veltman, B., "Complexity of Scheduling Multiprocessor Tasks with Prespecified Processor Allocations", Discrete Applied Mathematics, Vol. 55, 1994, pp. 259-272.
- [23] Brandimarte, P., "Routing and Scheduling in a Flexible Jobshop by Tabu Search", Annals of Operations Research, Vol. 41, 1993, pp. 157-183.
- [3] Baker, K.R., Introduction to Sequencing and Scheduling, John Wiley, New York, 1974.
- [4] Brucker, P., Schlie, R., "Job-Shop Scheduling with Multipurpose Machines", Computing, Vol. 45, 1990, pp. 369-375.
- [5] Hurink, J., Jurisch, B., Thole, M., "Tabu Search for the Job Shop Scheduling Problem with Multi-Purpose Machines", OR-Spektrum, Vol. 15, 1994, pp. 205-215.
- [6] Mastrolilli, M., Gambardella, L.M., "Effective Neighbourhood for the Flexible Job-Shop Problem", Journal of Scheduling, Vol. 3, 2000, pp. 3-20.
- [7] Ghedjati, F., "Genetic Algorithms for the Job-Shop Scheduling Problem with Unrelated Parallel Constraints: Heuristic Mixing Method Machines and Precedence", Computer & Industrial Engineering, Vol. 37, 1999, pp. 39-42.
- [8] Kacem, I., Hammadi, S., Borne, P., "Pareto-Optimality Approach for Flexible Job-Shop Scheduling Problems: Hybridization of eVolutionary Algorithms and Fuzzy Logic", Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 60, 2002, pp. 245-276.
- [9] Lee, Y.H., Jeong, C.S., Moon, C., "Advanced Planning and Scheduling with Outsourcing in Manufacturing Supply Chain", Computer & Industrial Engineering, Vol. 43, 2002, pp. 351-374.
- [10] Park, B.J., Choi, H.R., Kim, H.S., "A Hybrid Genetic Algorithm for the Job Shop Scheduling Problems", Computers & Industrial Engineering, Vol. 45, 2003, PP. 597-613.
- [11] Brucker, P., Neyer, J., "Tabu Search for the Multi-Mode Jobshop Problem", OR-Spektrum, Vol. 20, 1998, pp. 21-28.
- [12] Brucker, P., Drexl, A., Mohring, R., Neumann, K., Pesch, E., "Resource-Constrained Project Scheduling: Notation, Classification, Models, and Methods", European Journal of Operational Research, Vol. 112, 1999, pp. 3-41.
- [13] Kim, Y.K., Park, K., Ko, J., "A Symbiotic eVolutionary Algorithm for the Integration of Process Planning and Job Shop Scheduling", Computers & Operations Research, Vol. 30, 2003, pp. 1151-1171.
- [14] Scrich, C.A., Armentano, V.A., Laguna, M., "Tardiness Minimization in a Flexible Job Shop: A Tabo Search Approach", Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 15, 2004, pp. 103-115.
- [15] Kyparisis, G.J., Koulamas, C., "Flexible Flow Shop Scheduling with Uniform Parallel Machines", European Journal of Operational Research, Vol. 168, 2006, pp. 985-997.
- [16] Riane, F., Artiba, A., Elmaghraby, S.E., "A Hybrid Three-Stage Flowshop Problem: Efficient Heuristics to minimize Makespan", European Journal of Operational Research, Vol. 109, 1998, pp. 321-329.