International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2014)

May 2014, Volume 25, Number 1
pp. 73-84

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

Outsourcing in Parallel Machine Scheduling

E.mardan, M.S. Amalnik & F.Jolai*

Ehsan mardan, *MS Student of Industrial Engineering Department, College of Engineering ,University of Tehran*
Mohsen Sadegh Amalnik, *Assistant Professor of Industrial engineering Department, college of engineering ,University of Tehran*
Fariborz Jolai, *Associate Professor of Industrial Engineering Department, College of Engineering ,University of Tehran*

Keywords

Parallel Machine Scheduling,
Outsourcing,
Mathematical Modeling,
Tabu Search, PSO

ABSTRACT

This paper considers a parallel machine scheduling problem with outsourcing allowed. The objective of this problem is the combination of makespan and Outsourcing costs. In order to solve the problem, A mathematical model is proposed. Because of high computational time of mathematical model a Tabu search and PSO methods are proposed to solve the problem.

© 2014 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 25, No. 1, All Rights Reserved

* **Corresponding author. Fariborz Jolai**
Email: *fjolai@ut.ac.ir*

[Downloaded from www.iust.ac.ir on 2026-06-17]

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــــریت تولیـــد

شمـــــاره ۱، جلـــد ۲۵، خـــــرداد ۱۳۹۳
صفحـــــه ۸۴-۷۴

نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران
IJIE

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

برونسپاری در مسئله ماشینهای موازی

احسان مردان، محسن صادق عمل نیک و فریبرز جولای*

کلمات کلیدی

زمانبندی ماشین‌های موازی،
برونسپاری، مدل ریاضی،
جستجوی ممنوع،
بهینه سازی ذرات

چکیده:

این تحقیق به بررسی مسئله زمانبندی ماشین های موازی با امکان برونسپاری می پردازد. تابع هدف مورد استفاده در این تحقیق مجموع زمان کل و هزینه برونسپاری است. به منظور حل مسئله مدل ریاضی متناسب با مسئله ارائه شده است. البته با توجه به اینکه زمان حل مسئله با مدل ریاضی با افزایش ابعاد مسئله به شدت افزایش می‌یابد، به ارائه دو روش متاهیوریستیک جستجوی ممنوع و بهینه‌سازی ذرات متناسب با مسئله پرداخته‌ایم. روش جستجوی ممنوع پیشنهادی با استفاده از چند عملگر به بهبود جواب اولیه موجود می‌پردازد. همچنین روش بهینه‌سازی ذرات نیز با استفاده از جواب اولیه ارائه شده و اپراتورهای پیشنهادی به حل مسئله می‌پردازد.

۱. مقدمه

مسئله زمانبندی ماشین زمینه‌ای غنی و مناسب برای تحقیق است که کاربردهای فراوانی در تولید، پشتیبانی، معماری کامپیوتر و مانند این را به همراه خود خواهد داشت. حوزه مورد بررسی در این تحقیق ماشین‌های موازی می‌باشد. زمانبندی ماشین‌های موازی در ارتباط با چگونگی زمانبندی گروهی از کارها بر روی تعدادی از ماشین‌ها به منظور اطمینان از پردازش کارها در مدت زمانی منطقی می‌باشد. ماشین‌های موازی از دو دیدگاه تئوری و عملی دارای اهمیت می‌باشند. از دیدگاه تئوری، تعمیمی از حالت تک ماشین است. از دیدگاه عملی به این جهت که در دنیای واقعی بسیار معمول است مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این روش هایی که در محیط ماشین های موازی مورد استفاده قرار می‌گیرند قابل استفاده در فرایند های تجزیه برای سیستم های چند مرحله ای می‌باشند. زمان‌بندی صنایع به طور کلی از کاربرد مدل ماشین های موازی منتفع شده است. ماشین‌های موازی توانایی انجام عملیات یکسان با داشتن ظرفیت و انعطاف پذیری سیستم را با پردازش کارهای متفاوت به همراه خواهد داشت.

در این مقاله امکان برون‌سپاری فعالیت‌ها نیز مورد توجه قرار گرفته است. برونسپاری موجب ارتقای بهره‌وری و زمان‌بندی در بسیاری از صنایع بخصوص صنایع الکترونیک و خودروسازی می-شود. هدف مسئله مورد بررسی در این تحقیق این است که توالی مناسب کارها را با امکان برونسپاری کار بدست‌آورد. در این زمینه توابع هدفی از قبیل حداقل کردن هزینه های برون‌سپاری در کنار حداقل‌سازی زمانهای تکمیل مورد توجه است. قابل توجه است که مجموع زمانهای تکمیل، متناسب با هزینه نگهداری کار می-باشد. برون‌سپاری در مسئله زمانبندی سعی دارد علاوه بر کاهش هزینه، کیفیت زمانبندی کل را نیز ارتقاء دهد. به عنوان مثال در موقعیتی که تعداد زیادی کار به یک کارگاه ارائه شود ممکن است که بسیاری از کارها برای مدت زیادی برای انجام عملیات بدون فرض برونسپاری منتظر بمانند که با فرض برونسپاری می‌توان کارهایی را که منتظر می‌مانند را با برونسپاری به بخش ساخت دیگری منتقل کرد. اگرچه انجام فرایند برونسپاری ممکن است موجب افزایش هزینه‌های سیستم شود ولیکن چنین هزینه هایی با توجه به سودی که از طریق ارضای نیاز مشتری در زمان معقول به سیستم وارد می شود قابل توجیه است.

تاریخ وصول: ۹۰/۶/۳۰
تاریخ تصویب: ۹۱/۴/۱۷

احسان مردان، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ehsanmardan_63@yahoo.com
محسن صادق عمل نیک، استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی دانشگاه تهران amalnick@ut.ac.ir
*نویسنده مسئول مقاله: **دکتر فریبرز جولای**، دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی دانشگاه تهران fjolai@ut.ac.ir

[Downloaded from www.iust.ac.ir on 2026-06-17]

۲. مرور ادبیات

مسئله زمانبندی ماشین‌های موازی اخیراً به طور گسترده‌ای مورد بررسی محققین قرار گرفته است. به منظور آشنایی بیشتر با این مسائل در زیر به برخی از این مسائل که مورد بررسی قرار گرفته-اند می‌پردازیم. (1) به بررسی مسئله ماشین‌های موازی با فرض کار خراب شونده[1] با زمان پردازش متغیر خطی و تابع هدف زمان کل می‌پردازد. (2) زمان نصب و برداشتن قطعه را با اضافه کردن زمان آن به زمان پردازش بررسی می‌کند. از آنجایی که نصب و برداشتن یک قطعه توسط نیروی انسانی انجام می‌شود لذا این زمان با افزایش تجربه نیروی انسانی کاهش می‌یابد. بنابراین زمان پردازش قطعه نزولی می‌باشد. تابع هدف این مسئله مجموع موزون زمان تکمیل و کل دیرکرد می‌باشد. (3) به بررسی اثر یادگیری با خرابی خطی و غیر خطی در محیط ماشین‌های موازی می‌پردازد، به گونه‌ای که برای همه کارها زمان تحویل مشترک مد نظر قرار میگیرد. (4) مسئله ماشین های موازی را با معیار خراب شوندگی کار و ماشین در نظر می‌گیرد و تابع هدف مورد بررسی کل دیرکرد می‌باشد. (5) روش متاهیوریستیک هیبرید ANGEL را برای مسئله زمانبندی با محدودیت منابع(RCPSP)[2] ارائه کرده است. روش ANGEL ترکیب شده روش بهینه سازی مورچگان و ژنتیک و استراتژی جستجوی محلی می‌باشد. در ابتدا ACO فضای جواب را جستجو می‌کند و لیست فعالیت را برای ایجاد جواب اولیه روش ژنتیک تولید می‌کند. همچنین این روش از روش‌های جستجوی محلی کارا نیز برای بهبود جواب استفاده می‌کند. (6) به ارائه یک روش جدید جهت حل مدل ماشین های موازی می‌پردازد. این مقاله در ابتدا به بررسی مدل PSO می-پردازد و از آنجایی که روش PSO عادی حالت پیوسته را بررسی می‌کند لذا به ارائه روش جدید گسسته برای حل این مسائل می‌پردازد. در زمینه ماشینهای موازی روشهای متاهیوریستیک فراوانی مورد استفاده قرار گرفته است. در این زمینه الگوریتم‌های متاهیوریستیکی نظیر جستجوی ممنوع و جستجوی بهینه ذرات از کارائی بیشتری برخوردار بوده است. (7) به بررسی مدل زمانبندی n کار روی m ماشین موازی یکسان با تابع هدف کمینه سازی زمان کل[3] می‌پردازد. در این مقاله یک روش هیوریستیک سه مرحله‌ای برای حل ارائه شده است. که در فاز اول جواب اولیه بهبود داده شده ارائه می‌شود. در فاز دوم با استفاده از روش جستجوی ممنوع، جواب بهبود داده می شود. و در فاز نهایی با بهبود جواب بهینه فعلی به بهبود تابع هدف می‌پردازد. با مقایسه جوابهای بدست آمده از این روش و جواب بهینه مشاهده می‌شود که مدل جوابی با کیفیت مناسب ایجاد می کند. (8)به بررسی مسئله انتخاب و زمانبندی همزمان ماشین های موازی به منظور کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های نگه‌داری و هزینه دیرکرد می-پردازد. یک مدل بهینه‌سازی ترکیبی برای این منظور توسعه داده شده است و همچنین یک روش هیوریستیک برای بدست آوردن جواب بهینه یا نزدیک بهینه بر اساس روش جستجوی ممنوع به خصوص برای کنترل فرایند جستجو در همسایگی یک ماشین خاص ارائه شده است. (9) مسئله زمانبندی پروژه با محدودیت منابع(RCPSP) را مورد بررسی قرار داده است. همچنین بجای استفاده از روش جستجوی ممنوع سنتی[4] و سایر روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، این مقاله به استفاده از روش بهبود یافته جستجوی ممنوع با اصلاح روش ایجاد جواب اولیه بجای روش سنتی می پردازد.

مدل به خوبی می تواند نتایج بهتری را در کاهش زمان نسبت به زمان حل روش سنتی جستجوی ممنوع و هوش مصنوعی ارائه دهد. همچنین این مدل می‌تواند با انجام آنالیز حساسیت کیفیت جواب بهتری را آسانتر بدست آوریم.

از طرف دیگر بررسی مسائل زمانبندی با امکان برونسپاری حوزه-ی جدیدی در مسائل زمانبندی است که کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. در این تحقیق سعی بر این است به بررسی این گونه مسائل بپردازیم. تحقیقاتی که در این حوزه انجام شده است به بررسی برونسپاری در مسائل زمانبندی تک ماشین پرداخته اند. (10) مدل ریاضی برونسپاری در محیط زمانبندی تک ماشین را مورد بررسی قرار داده است.

از طرف دیگر با توجه به NP-Hard بودن مسئله تک ماشینه دو روش هیوریستیک و یک روش شاخه و حد ارائه شده است. (11) به توسعه روش‌های هیوریستیک ارائه شده در (10) پرداخته است به گونه‌ای که پارامتر موعد تحویل نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی برونسپاری در حوزه مسائل زمانبندی محدود به (10) و (11) است.

از طرف دیگر برونسپاری در حوزه‌های متعدد دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفته است که به بررسی اجمالی برخی از آنها خواهیم پرداخت. (12) به بررسی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پیشرفته [5] پرداخته است به گونه‌ای که در آن هر سفارش مشتری دارای امکان برونسپاری با زمان تحویل[6] در زنجیره تامین می-پردازد. نویسنده به منظور حل این مسئله مدل ریاضی پیشنهاد کرده است که برنامه‌های زمان‌بندی متفاوت را برای انواع کارها با محدودیت اولویت‌بندی مد نظر قرار می‌دهد. همچنین برای حل

[1] *Deteriorating job*
[2] *Resource-constrained project scheduling problem*
[3] *Makespan*
[4] *Traditional Tabu Search*
[5] *Advanced Planning and Scheduling*
[6] *Due date*

[Downloaded from www.iust.ac.ir on 2026-06-17]

این مسئله از روش هیوریستیک مبتنی بر الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. (13) به بررسی سیستماتیک پدیده برون‌سپاری در زمینه‌ی سیستم‌های اطلاعاتی می‌پردازد به گونه‌ای که پدیده برونسپاری را هم از دیدگاه تعریفی و هم تکاملی مورد بررسی قرار می دهد. (14) برونسپاری سیستم اطلاعات مراکز سلامت را بررسی می‌کند.

تحلیل هزینه و سود می بایست در مورد هزینه های سازمانی و یا کاربردهایی با توابع خواص صورت پذیرد. همچنین در این تحقیق به بررسی اطلاعات ۱۶۰۰۰ واحد مدیریت اطلاعات مراکز بهداشتی در ایالات متحده امریکا پرداخته شده است. (15) به بررسی فرایند انتخاب فروشنده برای برونسپاری می‌پردازد. با توجه به ضعف روش یک مرحله‌ای انتخاب فروشنده، چهارچوب دو مرحله ای برای انتخاب فروشنده بکار رفته است که مرحله اول مرحله آزمایش است که به مشتری اجازه انتخاب فروشنده را میدهد و مرحله دوم فروشنده انتخاب شده را برای انجام کار بکار می‌گیرد. (16) به بررسی هزینه های موجودی در حوزه سلامت می‌پردازد.

در این مقاله مقایسه‌ای بین هزینه‌های نگهداری و سطح سرویس می‌پردازد. (17) به بررسی امر برون‌سپاری روی ارزش واحدهای تولیدی در ژاپن می‌پردازد. این مطالعه تاثیر برون‌سپاری را از منظر توان ایجاد سود با استفاده از ارزش بازار بررسی می‌کند. ارتباط بین ارزش‌گذاری بازار سازمان و تصمیم برون‌سپاری توسط رویکرد ارزش‌گذاری متقاطع بررسی شده‌است که نتایج آن بر اساس صنایع تولیدی ژاپن مورد بررسی قرار گرفته است. (18) به ارائه مدل استراتژیک برای برونسپاری می‌پردازد.

در این مقاله بر اساس تئوری تعامل هزینه[1] که ابزار اصلی رویکردهای اقتصادی و مالی می‌باشد، برونسپاری را مورد بررسی قرار داده است. این بررسی رویکردی منبع محور[2] برای بررسی نقش قابلیت های خاص به عنوان منبع خاص ارتباطات بین سازمان ها دارد. (19) به بررسی سیاست بهینه برون‌سپاری تولید و موجودی برای سازمان با استفاده از توان تولیدی داخلی مارکوفی می‌پردازد. (20)

مدل رقابتی بین دو نهاد را در مقیاس اقتصادی بررسی می‌کند و یک چهار چوب رقابتی بین تقاضای دو سرویس‌دهنده با حساسیت روی قیمت و زمان، و رقابت بین دو فروشنده، با فرض هزینه سفارش‌دهی ثابت می‌پردازد. (21) به بررسی رفتاری که با استفاده از اینترنت در زنجیره تامین با فرض برونسپاری رخ می‌دهد می‌پردازد.

همچنین در این مقاله چهارچوبی جهت ارزیابی کارایی چنین زنجیره تامینی ارائه شده است. همانطور که بیان شد مسئله زمانبندی با امکان برونسپاری به صورت بسیار محدود و تنها توسط برخی محققین مورد بررسی قرار گرفته‌است. لذا در این تحقیق سعی خواهد شد به بررسی مسئله ماشین های موازی با امکان برونسپاری خواهیم پرداخت که تا کنون مورد بررسی محققین قرار نگرفته‌است.

در ادامه در بخش دوم با استفاده از مدل ریاضی به حل مسئله ماشین های موازی با امکان برونسپاری می‌پردازیم. البته با توجه به این که زمان حل مسئله با این مدل بسیار طولانی خواهد بود در بخش سوم به ارائه روش متاهیوریستیک جهت حل مسئله خواهیم پرداخت. روشهای متاهیوریستیک مورد استفاده در این مقاله روشهای جستجوی ممنوع و روش جستجوی بهینه ذرات است. در بخش چهارم مقاله نیز به ارائه نتایج عددی پرداخته شده‌است و در بخش پنجم و ششم نیز به نتایج عددی و پیشنهادات برای تحقیقات آتی اشاره شده‌است.

۳. مدل ریاضی ماشین‌های موازی با امکان برونسپاری

مسئله مورد نظر به این شرح است: n کار(job) موجود می‌باشد که در زمان صفر همگی در دسترس می‌باشند. هر کاری را می‌توان با زمان P_i در داخل سیستم بدون برونسپاری انجام داد و یا این که با هزینه O_i برونسپاری نمود. O_π نشان دهنده مجموعه کارهای برونسپاری شده می باشد که از مجموعه کارهای برونسپاری شده در توالی π تشکیل شده است.

البته این مسئله محدودیت بودجه برونسپاری را نیز مد نظر قرار می‌دهد. تابع هدف این مسئله ترکیبی از توابع کارهای برونسپاری شده و کارهای برونسپاری نشده‌است که با ترکیب محدب این دو جزء تابع هدف کلی مسئله تشکیل می‌شود. بخش اول تابع هدف مبتنی است بر حداکثر زمانی که کارها در کارگاه تحت پردازش هستند و در بخش دوم مجموع هزینه‌های برونسپاری مد نظر می‌گیرد. در بخش زیر به بررسی متغیرها و اندیس‌های مورد استفاده پرداخته شده است.

متغیرها:

i, j	اندیس کار است که مقدار صفر به معنی کار مجازی است.
k	اندیس ماشین
K	تعداد کل ماشین ها
N	تعداد کل کارها
p_i	زمان پردازش کار i
o_i	هزینه برونسپاری کار i
M	یک عدد بسیار بزرگ
δ	عددی است بین صفر و یک که ضریب محدب برای تابع هدف است

[1] *Transaction cost theory*
[2] *Resource-base*

[Downloaded from www.iust.ac.ir on 2026-06-17]

$$x_{ijk} = \begin{cases} ۱ & \text{در صورتی که کار } j \text{ بلافاصله بعد از کار } i \text{ روی ماشین } k \text{ پردازش شود} \\ ۰ & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad i = 1,\dots,N,\ k = 1,\dots,K$$

$$y_{ik} = \begin{cases} ۱ & \text{در صورتی که کار } i \text{ به ماشین } k \text{ تخصیص یابد.} \\ ۰ & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad i = 1,\dots,N,\ k = 1,\dots,K$$

$$Z_i = \begin{cases} ۱ & \text{در صورتی که کار } i \text{ برونسپاری شود} \\ ۰ & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad i = 1,\dots,N$$

مدل ریاضی

$$Min[\delta\left(\max_{\forall i} C_i\right) + (1-\delta) \times (\sum_{i=1}^{N}(Z_i \times O_i))]$$

Subject to:

$$\sum_{i=0, i\neq j}^{N}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk} \leq 1, \quad j = 1,\dots,N, \tag{1}$$

$$\sum_{i=0, i\neq j}^{N} x_{ijk} = y_{jk}, \quad j = 1,\dots N, \quad k = 1,\dots,K \tag{2}$$

$$\sum_{i=1, i\neq j}^{N} x_{ijk} \leq y_{ik}, \quad i = 1,\dots N, \quad k = 1,\dots,K \tag{3}$$

$$\sum_{i=0, i\neq j}^{N}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk} = 1 - z_j, \quad j = 1,\dots,N \tag{4}$$

$$\sum_{k=1}^{K} y_{jk} = 1 - z_j, \quad j = 1,\dots,N \tag{5}$$

$$C_j + M(1 - x_{ijk}) \geq C_i + P_j, C_0 = 0, j = 1,\dots,N, i = 0,\dots,N, i \neq j, k = 1,\dots K \tag{6}$$

$$C_i \geq z_i \times L_i, \quad i = 1,\dots,N, \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{N} z_j \times o_j \leq B \tag{8}$$

$$x_{ijk}, y_{jk}, z_j = 0 \text{ or } 1;\ C_i \geq 0, \quad j = 1,\dots N, i = 0,\dots N, \ k = 1,\dots K \tag{9}$$

تابع هدف این مسئله از کمینه سازی مجموع محدب حداکثر زمان تکمیل و هزینه برونسپاری تشکیل شده است. محدودیت اول بیان می‌کند که اگر کاری برونسپاری نشده باشد تنها می‌تواند روی یک ماشین و در یک موقعیت پردازش شود. محدودیت دوم نشان میدهد که یک کار الزاماً می‌بایست بعد از کار دیگری قرار بگیرد. محدودیت سوم نشان دهنده این است که یک کار حداکثر می‌تواند قبل از یک کار دیگر قرار بگیرد. محدودیت چهارم و پنجم نشان دهنده این است که اگر یک کار برونسپاری شود نمی‌تواند در داخل پردازش شوند.

محدودیت ششم نشان میدهد که یک کار بعد از اتمام کار قبلی روی ماشین می‌بایست انجام شود. بعد از اتمام کار قبلی شروع به پردازش روی ماشین می‌کند و امکان انجام دو کار به طور همزمان روی یک ماشین وجود نخواهد داشت. محدودیت هفتم تضمین می‌کند که کاری که برونسپاری شده‌است تنها پس از Lead time قابل تحویل می‌باشند. محدودیت هشتم نشان می-دهد که بودجه برونسپاری که مقدار محدودی دارد، می‌بایست ارضاء شود. محدودیت نهم نیز ویژگی های متغیرهای مسئله را بیان می کند.

به منظور مقیاس کردن تابع هدف از

$$\delta\left(\frac{\max_{\forall i} C_i - OPT_{Scheduling}}{\min\{OPT_{Scheduling}, OPT_{outsourcing}\}}\right) + (1-\delta) \times \left(\frac{\sum_{i=1}^{N}(Z_i \times O_i) - OPT_{outsourcing}}{\min\{OPT_{Scheduling}, OPT_{outsourcing}\}}\right)$$

بجای تابع هدف استفاده کرده‌ایم.

۴. روش حل

همانطور که در بخش قبلی دیده شد مدل ریاضی برای مسائل زمانبندی ماشین‌های موازی ارائه شد با توجه به اینکه زمان حل

[Downloaded from www.iust.ac.ir on 2026-06-17]

مسائل با مدل ریاضی با افزایش ابعاد مسئله به شدت افزایش می-یابد لذا استفاده از روش متاهیوریستیک معقول به نظر می‌رسد. در این فصل به ارائه روش‌های حل متاهیوریستیک متناسب با مسائل مورد بررسی می‌پردازیم.

۴-۱. روش جستجوی ممنوع در محیط ماشین‌های موازی

همانطور که در قبل نیز گفته شده‌است، به منظور حل مسئله ماشین‌های موازی با امکان برونسپاری به ارائه روش فرا ابتکاری پرداخته‌ایم. همانطور که می‌دانید روش جستجوی ممنوع در نقاط بهینه موضعی با راهکار لیست ممنوع به دام نمی‌افتد.

این اصلی‌ترین تفاوت روش جستجوی ممنوع با الگوریتم‌های بهبود مستمر[1] است که سعی می‌کنند در هر تکرار تابع هدف را بهبود دهند. این مزیت از این امر نشات می‌گیرد که روش جستجوی ممنوع این اجازه را به ما می‌دهد که بتوان در یک سری از توالی‌های از قبل تعیین‌شده بدون بهبود و یا حتی با بدتر شدن مقدار تابع هدف به جستجوی در فضای حل ادامه داد.

۴-۱-۱.جواب اولیه

از آنجایی که روش جستجوی ممنوع با تک جواب اولیه به دنبال جواب بهینه میگردد، لذا جواب اولیه نزدیک بهینه[2] می‌تواند تا حدود زیادی موجب بدست آوردن جواب های با کیفیت بالا در مراحل بعدی شود.

این خاصیت این الزام را فراهم می آورد که با ایجاد جواب اولیه نزدیک بهینه بتوانیم جواب‌های با کیفیت مناسب‌تری در مرحله بعدی بدست آوریم. به این منظور در این مسئله می‌بایست با ایجاد مکانیزمی به دنبال مجموعه جواب اولیه‌ای بود که دارای مجموعه جواب کارهای برونسپاری شده مناسب باشد. برای این منظور فاکتور نسبت زمان به هزینه برونسپاری تعریف شده‌است. این نسبت عبارت است از $\frac{\delta}{1-\delta}\times\frac{p_i}{K\times o_i}\ (i=1,\dots N)$. نسبت $\frac{p_i}{K}$ نشان دهنده متوسط زمانی است که به طور متوسط به مقدار زمان کل[3] اضافه می‌شود. حاصل تقسیم متوسط افزایش زمان به هزینه برونسپاری کار i است. عبارت $\frac{\delta}{1-\delta}$ مقدار نسبت را با توجه به مقدار δ به روز می‌کند.

همانطور که در قبل بیان شده است δ ضریب ترکیب محدب تابع هدف است. منطقی است که کارهایی با مقدار نسبت بیشتر شانس بیشتری برای برونسپاری داشته باشد. با بدست آوردن مجموعه کارهای برونسپاری شده با توجه به نسبت تعریف شده در بالا، کارهایی که در داخل کارگاه می‌بایست پردازش شوند بر اساس روش LPT چیده می شوند. البته (22) نشان داده است که این روش پایدار[4] است.

مراحل بدست آوردن جواب اولیه در زیر آمده است:

گام۰: p_i ,K ,δ, o_i را به عنوان ورودی دریافت کنید.

گام۱: $I_i=\frac{\delta}{1-\delta}\times\frac{p_i}{K\times o_i}$ را به ازای $i=1,2,\dots,N$ محاسبه کنید.

گام۲: کارها را بر اساس توالی غیر نزولی مقدار I_i مرتب کنید

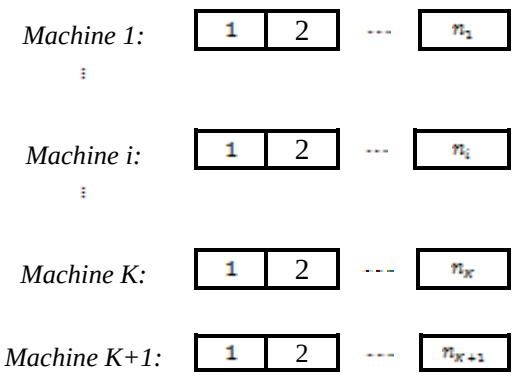
گام۳: اگر $N\geq 50$ بود آنگاه $X=0.1$ وگرنه $X=0.2$

گام۴: عدد $Y=Uniform[1,XN]$ را بدست آورید و Y کار را از ابتدای لیست مرتب شده در گام ۲ انتخاب کنید.

گام۵: Y کار را برونسپاری کنید و (X-Y) کار باقی مانده را بر اساس روش LPT بچینید.

۴-۱-۲. نمایش جواب

یک جواب شدنی از مسئله PMSPCOM[5] همانطور که در شکل دیده می‌شود ساختاری است که n_k کار را روی ماشین k (k=1,2,…,K) ام و n' کار به عنوان کارهای برونسپاری شده در نظر می‌گیرد. به گونه‌ای که $N=\sum_{k=1}^{K}n_k+n'$. جواب شدنی که روابط (۲) الی (۸) را در بخش ماشینهای موازی ارضا، می‌کنند را می‌توان در شکل دید. باید توجه کرد که ماشین K+1ام به عنوان مجموعه کارهای برونسپاری شده در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۱. نمایش جواب شدنی

[1] *Hill-climbing*
[2] *Near Optimal*
[3] *Makespan*
[4] *Robust*
[5] *Parallel Machine Scheduling Problem Considering Outsourcing Model*

[Downloaded from www.iust.ac.ir on 2026-06-17]

۴-۱-۳. تولید جواب همسایه

به منظور ایجاد جواب همسایه پنج نوع حرکت مورد استفاده قرار گرفته است که می‌تواند موجب ایجاد جواب همسایه شود.

۴-۱-۳-۱ جابجایی کار برونسپاری نشده تک جهته[1]

این اپراتور یک کار برونسپاری نشده را از جای کنونی اش برمیدارد و آن را روی مجموعه کارهای ماشین دیگر قرار می‌دهد. این اپراتور تنها می‌تواند مقدار زمان کل[2] را بهبود دهد.

۴-۱-۳-۲. جابجایی کار برونسپاری نشده دو جهته[3]

این اپراتور دو کار را به طور رندوم از دو ماشین انتخاب می کند باید توجه کرد که UJS-UDوUJS-BD تنها می توانند تابع هدف زمانبندی را بهبود دهد و در برونسپار تاثیری ندارد.

۴-۱-۳-۳. جابجایی کارهای برونسپاری شده تک جهته[4]

این حرکت در ابتدا یک کار را انتخاب می‌کند. در صورتی که کار برونسپاری شده باشد به مجموعه کارهای برونپاری نشده اضافه می‌شود و بلعکس.

۴-۱-۳-۴. جابجایی کارهای برونسپاری شده دو جهته

این اپراتور دو کار را که یکی از آنها کار برونسپاری شده است را انتخاب می‌کند و جای آنها را دو به دو عوض می‌کند.

۴-۱-۳-۵. جابجایی کار ماشین و مجموعه برونسپاری شده

این اپراتور موقعیت تمام کارهایی را که روی یک ماشین خاص پردازش می‌شوند را با مجموعه کارهای برونسپاری شده عوض می‌کند. این اپراتور کارهای دو مجموعه را جابجا می‌کند و یک جواب جدید می‌سازد. این اپراتور به طور کلی از محدوده جواب فعلی به منطقه جواب دیگر رفته و باعث ایجاد تنوع[5] بیشتر در جواب می‌شود. باید توجه کرد که اپراتورهای OJS-UD، OJS-BD وOMS زمانی شدنی هستند که محدودیت بودجه ارضا شود، وگرنه اپراتور می‌بایست تکرار شود.

۴-۱-۴. دسته بندی و محدودیت ممنوع[6]

فرض کنید که بردار (i, k) نشان دهنده این باشد که کار i روی ماشینk پردازش شود. لذا یک مجموعه از چنین کارهایی که شامل همه کارها باشد نمایشگر یک جواب است. بعد از انجام یک اپراتور حرکت بردارهایی که اخیراً تغییر کرده‌اند ممنوع میشوند. هنگامی که بردار (i, k) ممنوع باشند، تمام کارهایی که شامل بردار (i, k) باشند ممنوع می‌باشند. این نوع دسته بندی ممنوع[7] از بازگشت یک کار جابجا شده مانند i به ماشین k در چند مرحله بعدی با توجه به اندازه لیست ممنوع[8] جلوگیری میکند. باید توجه کرد که اندازه لیست ممنوع تعداد تکرار هایی است که یک بردار ممنوع باقی می‌ماند. این مستلزم آن است که تمامی بردارهایی که در مرحله بعد تولید میشوند از نظر ممنوع بودن چک شوند.

۴-۱-۵. قانون اصلاح تنور ممنوع[9]

تنور ممنوع تعداد تکرارهایی است که یک بردار ممنوع باقی می‌ماند. بعد از این که یک حرکت روی فضای جواب انجام شد، چند مرحله جواب تازه عبور شده از مشاهده مجدد در مجموعه جواب منع می‌شود. بر اساس این ایده کارهایی که در مرحله آخر جابجا شده‌اند، از بازگشت مجدد روی همان ماشین با توجه به طول لیست ممنوع باز داشته می‌شوند. به منظور اجرای تنور ممنوع در عمل یک شمارنده برای بردارهای ممنوع تعریف شده است. این شمارنده بعد از هر تکرار یک شماره به شمارنده‌ی آن کار می‌افزاید و بعد از این که این شمارنده به اندازه لیست ممنوع رسید آن کار از تنور ممنوع خارج می‌شود.

۴-۱-۶. معیار خاتمه

عملیات جستجوی ممنوع زمانی متوقف می‌شود که تابع هدف برای تکرار متوالی ثابت بماند. این امر توسط (23) نشان داده شده است. این معیار قبل از اینکه فرایند جستجو شروع شود با توجه به اندازه لیست ممنوع و اندازه مسئله تعیین می‌شود. اینجا فرض شده است که فرایند اگر بعد از ۲۵ تکرار متوالی بهبود نیابد متوقف می‌شود.

۴-۲. روش جستجوی بهینه ذرات در محیط ماشین‌های موازی

در بخش قبلی به انطباق روش جستجوی ممنوع در محیط ماشین های موازی پرداخته شد. در این بخش به انطباق روش جستجوی بهینه ذرات روی مسئله ماشینهای موازی می‌پردازیم. همانطور که میدانیم روش جستجوی بهینه ذرات روشی است پیوسته، که به منظور استفاده از آن در محیط‌های گسسته، می-

[1] *Unoutsourced Job Swap-Uni-Direction(UJS-UD)*
[2] *MakeSpan*
[3] *Unoutsourced Job Swap-Bi-Direction(UJS-BD)*
[4] *Outsourced Job Swap-Uni-Direction(OJS-UD)*
[5] *Diversification*
[6] *Tabu classification and restriction*
[7] *Tabu classification*
[8] *Tabu List Size*
[9] *Tabu Tenure Modification Rule*

[Downloaded from www.iust.ac.ir on 2026-06-17]

بایست این روش را برای محیط‌های گسسته طراحی کرد. در این بخش به طراحی روش جستجوی بهینه ذرات در محیط ماشین-های موازی می‌پردازیم.

۴-۲-۱. نمایش جواب

همانطور که میدانید در ماشینهای موازی کارها می‌بایست روی تعدادی ماشین انجام شوند. برای این منظور به ارائه روش نمایش جواب در محیط ماشینهای موازی پرداخته‌ایم. در این نمایش نواری به تعداد کارها در نظر گرفته میشود و سپس به ازای هر کار یک ماشین در درایه متناظر آن کار در نظر گرفته می‌شود. این نوع نمایش این امکان را به ما میدهد که با تغییر عدد موجود در یک درایه به تغییر ماشین بپردازیم. و به منظور نمایش کارهای برونسپاری شده بجای شماره ماشین از عدد صفر استفاده می‌کنیم. شکل نمایش دهنده نمونه‌ای از این روش نمایش جواب است.

۱	۰	۳	۰	۲	۲	۳	۲	۳	۱

شکل ۲. نمایش جواب روش جستجوی بهینه ذرات در محیط ماشین های موازی

همانطور که در شکل بالا می‌بینید یک توالی با ۱۰ کار و ۳ ماشین نمایش داده شده‌است. کارهایی که عدد تخصیص داده شده به آنها بین ۱و ۳ می‌باشند نمایانگر شماره ماشین تخصیصی به آن است و کارهایی که عدد تخصیص یافته به آن عدد ۰ است، برونسپاری می‌شود.

۴-۲-۲. تولید جواب اولیه

از آنجایی که روش بهینه سازی ذرات روشی است که بر اساس جمعیت جواب اولیه کار می‌کند لذا در این بخش می‌بایست به ارائه روشی بپردازیم که بتواند جمعیتی جواب اولیه بسازد. لذا در این بخش سعی به ارائه روشهای متفاوت برای ایجاد جواب اولیه بپردازیم

روش اول:

همانطور که ملاحظه فرمودید در بخش روش جستجوی ممنوع به ارائه روش ایجاد جواب اولیه پرداختیم. از آنجایی که روش جستجوی ممنوع نیاز به تک جواب اولیه دارد، لذا در روش ایجاد جواب اولیه در آن بخش به ایجاد تک جواب اولیه پرداختیم. لذا بر مبنای این روش به ایجاد جواب اولیه می‌پردازیم. برای این منظور تک جواب اولیه بدست آمده در روش جستجوی ممنوع را در نظر میگیریم. سپس با ایجاد تغییرات جزئی در این جواب به ایجاد جواب هایی دیگر می‌پردازیم. برای این منظور بین ۵ تا ۱۵ درصد از کارهای این جواب را به طور اتفاقی انتخاب میکنیم. سپس این کارها را به ماشینهایی که بیکاری بیشتری دارند تخصیص یا اینکه برونسپاری می‌کنیم.

روش دوم:

در این روش کارهایی را که کمترین زمان پردازش را دارند در داخل پردازش کنیم و تعدادی از کارهایی را که بیشترین زمان پردازش را دارند، برونسپاری می‌کنیم.

روش سوم:

در این روش کارهای با بیشترین هزینه برونسپاری را در داخل پردازش میکنیم و کارهایی را که کمترین هزینه برونسپاری را دارد برونسپاری میکنیم. حداکثر تعداد کارهای برونسپاری شده در این روش عبارت است از سه برابر تعداد کارها تقسیم بر تعداد ماشین می‌باشد.

روش چهارم:

این روش به طور رندوم به ایجاد جواب اولیه می‌پردازد. در این روش تخصیص کار به ماشین یا برونسپاری شدن آن از هیچ قائده ای پیروی نمی‌کند.

باید توجه داشت که در تمامی روشهای بالا هزینه برونسپاری کل از بودجه برونسپاری بیشتر نشود.

۴-۲-۳. تولید جواب همسایه

به منظور تولید جواب همسایه، روش PSO راهکاری دارد که توسط آن به ایجاد فضای همسایگی می‌پردازد. این راهکار عبارت است از تعیین مکان ذره با توجه به مکان فعلی ذره و بهینه موضعی و سراسری. این راهکار در زیر آورده شده است.

$$V_d^{t+1} = wV_d^t + c_1 r_1 (Plocal_d^t - x_d^t) + c_2 r_2 (Pglobal_d^t - x_d^t) \quad (۱)$$

$$X_d^{t+1} = X_d^t + V_d^{t+1} \quad (۲)$$

با توجه به فرمولهای (۱) و (۲) واضح است که نمی توان آنها را در محیط گسسته به کار برد لذا می‌بایست با استفاده از مکانیزمی این حالت پیوسته را قابل استفاده در محیط گسسته نمود. برای این منظور به تعدیل فرمولهای (۱) و (۲) پرداخته‌ایم تا بتوان از آنها در فضای گسسته استفاده کرد.

[Downloaded from www.iust.ac.ir on 2026-06-17]

$$V_d^{t+1} = V_d^t \overset{+}{O} \left(\left(R_1 \overset{\times}{O} \left(Plocal_d^t \overset{-}{O} X_d^t \right) \right) \overset{+}{O} \left(R_2 \overset{\times}{O} \left(Pglobal_k^t \overset{-}{O} X_k^t \right) \right) \right) \quad (۳)$$

$$X_d^{t+1} = X_d^t \overset{+}{O} V_d^{t+1} \quad (۴)$$

برای این منظور به ایجاد سه اپراتور جمع، ضرب و تفریق می‌پردازیم تا بتوان به ایجاد روش جستجوی بهینه ذرات بپردازیم.

اپراتور جمع ($\overset{+}{O}$): این اپراتور دو توالی را دریافت می‌کند. کارهایی را که وضعیت مشابه دارند عیناً کپی می‌کند. سپس برای سایر کارها تک تک به بررسی کارها می‌پردازد. برای هر کار، وضعیت یکی از توالی‌ها را به عنوان خروجی در نظر می‌گیرد. با توجه به محاسبات انجام شده به نظر می‌رسد که اگر با احتمال ۰،۶ وضعیت توالی دوم را به عنوان خروجی در نظر بگیریم به خروجی بهتری برسیم.

اپراتور تفریق ($\overset{-}{O}$): این اپراتور دو توالی را دریافت می‌کند. کارها را به ترتیب بررسی می‌کند. در صورتی که وضعیت کار در دو توالی متفاوت باشد، توالی اول را به عنوان خروجی درنظر می‌گیرد. در صورتی که وضعیت در هر دو یکی باشد، این کارها را بر اساس روش اول تولید جواب اولیه می‌چینند.

اپراتور ضرب ($\overset{\times}{O}$): این اپراتور یک آرایه $1 \times M$ متشکل از ارقام صفر و یک و از طرف دیگر یک توالی را دریافت می‌کند. در صورتی که مقدار آرایه یک باشد وضعیت کار عیناً کپی می‌کند و در صورتی که مقدار صفر داشته باشد، وضعیت کار را معکوس می‌کند.

بدین ترتیب که اگر کار در داخل انجام شود تبدیل به وضعیت برونسپاری می‌شود و درصورتی که برونسپاری شده باشد تبدیل به وضعیت پردازش در داخل می‌شود. به منظور پردازش در داخل کارها زمان C_{Max} کارهای موجود را در نظر بگیرید سپس ماشینهای با زمان بیکاری بیشتر را با کارهایی که بیشترین زمان پردازش دارند، پر کنید. احتمال یک بودن در این فرایند ۹۵٪ در نظر گرفته شده است.

۴-۲-۴. معیار خاتمه

روش جستجوی بهینه ذرات در صورتی که برای تعداد تکرار خاصی ثابت باقی بماند و بهبود نیابد متوقف می‌شود. در این تحقیق فرض بر این است که در صورتی که برای ۲۵ توالی متوالی تابع هدف بهبود نیافت الگوریتم متوقف میشود.

۵. نتایج عددی

همانطور که در فصل‌های قبلی دیدید به ارائه مدل ریاضی و مدل متاهیوریستیک جهت حل مسئله زمانبندی با امکان برونسپاری در محیط‌های ماشین موازی پرداختیم. در این فصل سعی می‌شود که با ارائه‌ی نتایج عددی کارائی روش‌های متاهیوریستیک را نشان دهیم.

به منظور سنجش کارایی روش‌های ارائه شده، ایجاد مسئله آزمایش[1] جدایی ناپذیر است. در زیر به ارائه پارامترهای مسئله می‌پردازیم.

زمان پردازش:

$$p_i \sim Gamma(average(50), divertion(20))$$

زمان تحویل:

$$l_i \sim Gamma(average(10), divertion(10))$$

هزینه برونسپاری:

$$o_i \sim Gamma\left(average\left(\frac{\sum_{j=1}^{n} p_j}{1+K}\right), 10\right)$$

بودجه برونسپاری

$$B \sim Unif\left(0.8 \times \left(\frac{\sum_{j=1}^{n} o_j}{K}\right), 1.25 \times \left(\frac{\sum_{j=1}^{n} o_j}{K}\right)\right)$$

در بالا همانطور که می‌بینید به منظور تولید مسئله آزمایش از تابع توزیع گاما و یکنواخت استفاده کردیم.

زمان پردازش از تابع گاما با میانگین ۵۰ و انحراف معیار ۲۰ تولید کردیم. زمان l_i با استفاده از تابع گاما با میانگین ۱۰ و انحراف ۱۰ تولید می‌شود. با توجه به اینکه به منظور برونسپاری این امکان وجود دارد که به چند کاندیدای مختلف بتوان کارها را برونسپاری کرد و لذا میانگین زمان آن و همچنین انحراف معیار آن با توجه به تعدد کاندیدا کمتر است. مقدار هزینه برونسپاری نیز به منظور ایجاد تعادل در سیستم از توزیع گاما با میانگین زمان انجام فرایند در هر ماشین و انحراف معیار ۱۰ استفاده کردیم. مقدار بودجه برونسپاری نیز با توجه به این که $\frac{\sum_{j=1}^{n} o_j}{K}$ بخشی از کل هزینه برونسپاری است در نزدیکی این محدوده تعریف شده است. مسئله مورد نظر را به سه قسمت تقسیم کرده‌ایم: مسائل کوچک با ۱۰-۲۰یا ۳۰ کار، مسائل متوسط با ۵۰ و ۷۵ کار و مسائل بزرگ با ۱۰۰ کار پرداخته‌ایم .در روش

[1] *Test Problem*

[Downloaded from www.iust.ac.ir on 2026-06-17]

جستجوی ممنوع به منظور اینکه پارامترهای مسئله را تعیین کنیم در ابتدا به حل مسئله با ابعاد کوچک پرداختیم. بنابراین با انجام محاسبات روی مسائل کوچک با پارامترهای مختلف بهترین مقدار پارامتر انتخاب و برای کل مسئله مورد استفاده قرار گرفته است. لذا اندازه لیست ممنوع با توجه به محاسبات مقدار ۷ تعیین شده است. همچنین مقدار احتمال‌های اپراتورها نیز به صورت زیر تعیین شده است.

P_{OMS} =0.1; P_{OJSU} =0.5; P_{OJSB} =0.2; P_{UJSU} =0.1; P_{UJSB} =0.1

از طرف دیگر مسئله ماشین‌های موازی با استفاده از روش بهینه سازی ذرات نیز مورد بررسی قرار گرفته است. در روش بهینه سازی ذرات نیز مشابه روش جستجوی ممنوع به حل مسائل کوچک با پارامترهای متفاوت پرداختیم و بهترین پارامترها را برای حل کل مسئله به کار برده‌ایم. با توجه به این محاسبات مقادیر پارامترها به شرح زیر تعیین شده‌اند. به منظور تولید جواب اولیه ۴۵٪ حل‌های اولیه را از روش اول، ۲۰٪ را از روش دوم، ۲۵٪ را از روش سوم و ۱۰٪ را از روش چهارم تولید کرده ایم. با توجه با این که روش اول تولید جواب اولیه به طور همزمان هم هزینه برونسپاری و زمان پردازش را در نظر میگیرد، جواب‌هایی با کیفیت بالاتر تولید می کند و تعیین ضریب بالاتر برای این روش در پیش محاسبات موید این ادعا است. به منظور تعیین تعداد ذره مناسب محاسباتی با ۱۰۰، ۱۲۵ و ۱۵۰ ذره انجام داده‌ایم. با توجه به اینکه در این محاسبات۱۵۰ ذره بهترین خروجی را دارد، لذا تعداد ذرات ۱۵۰ ذره در نظر گرفته شده است.

مسائل آزمایش با کامپیوتر با پردازشگر۲٫۲۶ GHz و 3Gb رم مورد بررسی قرار گرفته است. مدل ریاضی با Lingo 8.0 کد شده است و همچنین مدل متاهیوریستیک در محیط Mathlab2008b کد شده است.

با توجه به اینکه مسئله مورد بررسی هم با مدل ریاضی و هم با روشهای متاهیوریستیک مورد بررسی و حل قرار گرفته است، می‌توان به بررسی میزان انحراف روشهای متاهیوریستیک از جواب بهینه پرداخت.

به منظور مقایسه مسئله مورد نظر فاکتور Gap تعریف شده است این فاکتور که به صورت $((O_{M-Heu} - O_{OPT})/O_{OPT}) \times 100$ تعریف شده است، عبارت است از اختلاف تابع هدف متاهیوریستیک و مقدار بهینه تقسیم بر مقدار تابع هدف بهینه.

جدول الی جدول نشان‌دهنده خلاصه‌ای از مقادیر Gap و همچنین زمانهای مورد نیاز برای حل هر کدام از این روشها برای مقادیر δ=0.25,0.5,0.75 می‌باشد.

جدول ۳. نتایج عددی با $\delta = 0.25$

$\delta = 0.25$	Tabu Search				PSO				Optimum method	
Number of jobs	Aver. Gap(%)	Max. Gap(%)	Aver. time(sec)	Max. time(sec)	Aver. Gap(%)	Max. Gap(%)	Aver. time(sec)	Max. time(sec)	Aver. time(sec)	Max. time(sec)
۱۰	۸٫۵۲%	۱۲٫۵۴%	۱٫۲۴	۱٫۶۷	۳٫۸۳%	۶٫۳۸%	۲٫۱۳	۴٫۱۵	۱	۱
۲۰	۷٫۴۲%	۱۳٫۹۵%	۳٫۷۸	۴٫۲۳	۲٫۴۱%	۳٫۱۷%	۳٫۱۴	۴٫۸۵	۳۲۳	۴۳۸
۳۰	۴٫۳۷%	۱۱٫۷۲%	۵٫۲۱	۶٫۸۴	۳٫۴۱%	۵٫۱۰%	۷٫۲۹	۱۳٫۴۲	۱۵۲۳	۱۸۶۴
۵۰	۳٫۷۵%	۷٫۳۱%	۱۰٫۶۲	۱۳٫۵۸	۲٫۷۶%	۲٫۸۴%	۱۲٫۳۶	۲۳٫۱۹	۴۲۸۵	۵۸۶۶
۷۵	۲٫۳۱%	۶٫۳۷%	۲۴٫۶۹	۲۶٫۸۳	۰٫۹۵%	۱٫۷۹%	۳۷٫۱۹	۴۱٫۲۳	۶۳۸۹	۷۳۲۷
۱۰۰	۰٫۸۳%	۳٫۶۶%	۷۶٫۴۷	۸۱٫۵۹	۰٫۴۹%	۰٫۷۳%	۷۷٫۲۵	۱۳۳٫۲۰	۲۴۶۴۹	۳۵۸۴۶

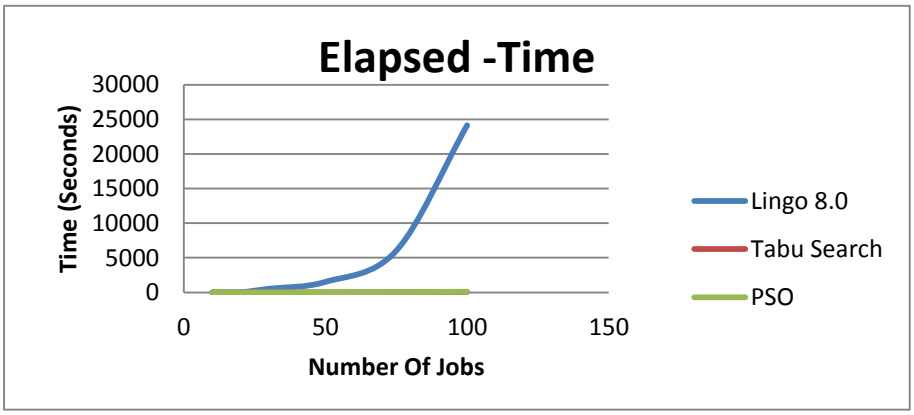
جدول۴. نتایج عددی با $\delta = 0.5$

$\delta = 0.5$	Tabu Search				PSO				Optimum method	
Number of jobs	Aver. Gap(%)	Max. Gap(%)	Aver. time(sec)	Max. time(sec)	Aver. Gap(%)	Max. Gap(%)	Aver. time(sec)	Max. time(sec)	Aver. time(sec)	Max. time(sec)
۱۰	۶٫۹۳%	۱۲٫۴۳%	۱٫۷۵	۲٫۳۷	۳٫۱۱%	۲٫۶۲%	۳٫۲۸	۴٫۲۷	۱	۱
۲۰	۳٫۴۷%	۱۲٫۴۳%	۳٫۲۴	۵٫۲۴	۱٫۷۳%	۲٫۵۸%	۴٫۰۹	۵٫۰۶	۳۷۳	۴۵۱
۳۰	۴٫۷۴%	۶٫۸۵%	۵٫۴۳	۷٫۴۸	۱٫۳۰%	۱٫۹۴%	۹٫۶۸	۱۱٫۹۲	۱۷۴۳	۱۹۲۵
۵۰	۳٫۴۱%	۷٫۳۴%	۱۱٫۷۵	۱۵٫۸۵	۱٫۷۹%	۲٫۴۰%	۱۷٫۸	۲۰٫۱۳	۴۲۷۵	۵۷۲۴
۷۵	۱٫۶۳%	۵٫۵۳%	۲۵٫۸۴	۳۰٫۴۹	۰٫۴۵%	۰٫۶۷%	۳۹٫۸۲	۶۷٫۳۵	۷۲۹۱	۹۳۷۱
۱۰۰	۰٫۶۲%	۲٫۶۵%	۷۸٫۳۹	۹۰٫۷۵	۰٫۶۲%	۱٫۱۷%	۹۷٫۲۳	۱۶۳٫۰۹	۲۷۲۳۱	۳۱۴۲۰

[Downloaded from www.iust.ac.ir on 2026-06-17]

جدول۵.نتایج عددی با $\delta = 0.75$

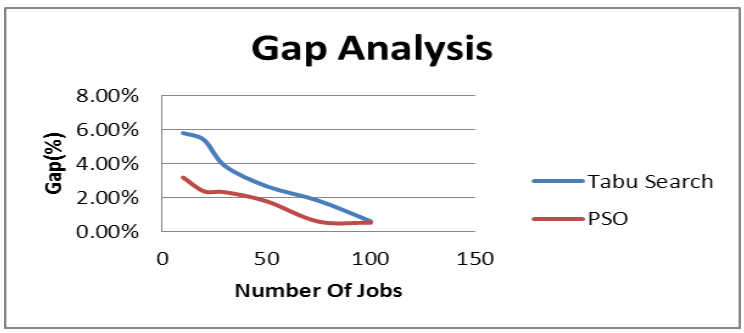
$\delta = 0.75$	Tabu Search				PSO				Optimum method	
Number of jobs	Aver. Gap(%)	Max. Gap(%)	Aver. time(sec)	Max. time(sec)	Aver. Gap(%)	Max. Gap(%)	Aver. time(sec)	Max. time(sec)	Aver. time(sec)	Max. time(sec)
۱۰	۴.۵۹%	۸.۸۲%	۲.۳۷	۴.۲۸	۴.۶۹%	۵.۴۱%	۳.۵۹	۶.۷۶	۱	۱
۲۰	۴.۲۸%	۸.۹۴%	۳.۵۸	۶.۶۳	۳.۱۲%	۵.۸۴%	۶.۲۸	۶.۶۳	۴۱۲	۴۷۶
۳۰	۲.۷۴%	۸.۹%	۷.۴۵	۸.۳۱	۲.۹۴%	۴.۳۸%	۱۲.۲۹	۱۷.۴۱	۱۹۲۰	۲۰۷۲
۵۰	۲.۳۸%	۱۰.۴۳%	۱۴.۳۰	۱۸.۴۸	۱.۸۴%	۲.۸۲%	۲۱.۰۸	۳۳.۷۸	۴۸۱۴	۵۷۵۹
۷۵	۲.۹۴%	۶.۱۰%	۲۷.۹۳	۳۴.۹۲	۰.۶۹%	۰.۹۲%	۴۹.۹۶	۷۰.۰۴	۸۳۹۷	۹۱۳۸
۱۰۰	۰.۸۹%	۲.۶۹%	۹۱.۷۴	۱۰۵.۱۱	۰.۴۲%	۰.۸۱%	۱۰۴.۵۹	۱۷۰.۴۶	۲۸۰۳۸	۳۴۸۷۲



شکل ۳. زمان حل مسئله ماشین های موازی با امکان برونسپاری

همانطور که از جداول بالا مشخص است میزان اختلاف تابع هدف روشهای متاهیوریستیک و مقدار بهینه مدل ریاضی، با افزایش ابعاد مسئله کاهش می‌یابد. همچنین با توجه به اینکه روش جستجوی بهینه ذرات نسبت به روش جستجوی ممنوع به طور متوسط جوابهایی با ۱.۵۶٪ کیفت بهتر ارائه می کند، به نظر می‌رسد که استفاده از روش جستجوی بهینه ذرات نسبت به روش جستجوی ممنوع مناسبتر و منطقی‌تر باشد. به منظور روشن‌تر شدن مسئله در زیر به نمایش زمان‌های حل مسئله با روشهای مختلف پرداخته‌ایم. شکل نشان دهنده زمان صرف شده برای مسائل با ابعاد مختلف می‌باشد. همانطور که دیده می‌شود زمانی که برای حل مسئله به طور دقیق مورد نیاز است با افزایش تعداد کارها به شدت افزایش می‌یابد.

این در حالی است که زمان مورد نیاز برای حل مسئله از طریق روش متاهیوریستیک تغییر چندانی نمی‌کند. با توجه به زمان صرف شده استفاده از روش متاهیوریستیک کاملاً معقول به نظر می‌رسد. اختلاف ذکر شده هنگامی که تعداد کارها بیشتر می‌شود بسیار مشهودتر است به طوری که حل مسئله با ابعاد بزرگتر از ۱۰۰ با استفاده از روش دقیق کاری غیر معقول به نظر می‌رسد. البته میزان کیفیت جواب نیز می‌بایست در انتخاب نوع روش حل مد نظر قرار گیرد. البته با توجه به اینکه کیفیت روشهای متاهیوریستیک ارائه شده در این تحقیق با افزایش ابعاد مسئله بهبود می‌یابد، می‌توان برای مسائل با ابعاد بزرگ از روشهای متاهیوریستیک استفاده نمود. این امر در شکل نشان داده شده است.



شکل ۴. آنالیز انحراف از جواب دقیق

[Downloaded from www.iust.ac.ir on 2026-06-17]

همچنین به منظور اثبات کارایی روش هیوریستیک مورد استفاده برای ایجاد جواب اولیه به ایجاد مسائل نمونه با ابعاد ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کار پرداخته ایم. به منظور سنجش کارایی این روش به فاکتور زیر تعریف شده‌است.

$$((O_{without\ heuristic} - O_{with\ heuristic})/O_{with\ heuristic}) \times 100$$

نشان دهنده اختلاف مقدار تابع هدف با و بدون روش هیوریستیک تقسیم بر تابع هدف با مقدار روش هیوریستیک است. جدول نشان دهنده Gap جواب اولیه می‌باشد.

جدول ۵. تاثیر روش هیوریستیک در تولید جواب اولیه در روش های TS و PSO

	Tabu Search						PSO					
	$\delta = 0.25$		$\delta = 0.5$		$\delta = 0.75$		$\delta = 0.25$		$\delta = 0.5$		$\delta = 0.75$	
Number of jobs	Aver. Gap(%)	Max. Gap(%)	Aver. Gap(%)	Max. Gap(%)	Aver. Gap(%)	Max. Gap(%)	Aver. Gap(%)	Max. Gap(%)	Aver. Gap(%)	Max. Gap(%)	Aver. Gap(%)	Max. Gap(%)
۲۰	۳۶.۷۲%	۵۲.۶۱%	۴۰.۶۸%	۵۱.۲۹%	۳۹.۶۳%	۴۸.۷۰%	۱۶.۷۵%	۲۷.۸۳%	۱۲.۰۵%	۱۸.۶۹%	۲۱.۴۳%	۲۸.۷۰%
۵۰	۵۱.۲۷%	۶۳.۲۶%	۵۸.۹۳%	۶۶.۲۸%	۵۵.۸۰%	۶۲.۷۲%	۲۱.۵۹%	۲۸.۹۴%	۱۸.۹۸%	۲۱.۴۸%	۱۴.۵۶%	۲۲.۷۳%
۱۰۰	۵۴.۱۹%	۶۳.۶۴%	۵۷.۹۶%	۶۴.۷۰%	۴۸.۸۳%	۵۹.۴۹%	۲۸.۳۸%	۳۲.۰۴%	۲۳.۹۰%	۳۱.۴۲%	۲۳.۸۶%	۲۹.۰۵%
۲۰۰	۶۱.۲۵%	۶۷.۶۳%	۶۰.۷۵%	۶۷.۸۳%	۶۲.۹۸%	۷۱.۷۴%	۲۵.۹۳%	۲۸.۸۵%	۳۳.۴۸%	۳۹.۵۴%	۲۵.۹۰%	۲۸.۴۲%

مراجع

[۱] حاج شیر محمدی، علی، "مدیریت و کنترل پروژه"، مرکز انتشارات واحد صنعتی اصفهان، ۱۳۷۸.

[۲] طارقیان، حامد رضا، "برنامه ریزی و کنترل پروژه-مفاهیم و روش ها"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۸.

[۳] راهنمای گستره دانش مدیریت پروژه"، مؤسسه مدیریت پروژه PMI، ترجمه: ذکایی آشتیانی، محسن، حسینی، سید حسین، چاپ سوم، ۲۰۰۴.

[4] Bowman R. A., "*Sensitivity Curves for Effective Project Management*", Naval Research Logistics (NRL), Vol. 50, No. 5, 2003, pp. 481-497.

[5] Van Slyke R.M., "*Monte carlo methods and the PERT problem*", Vol. 11, 1963, PP. 839-860.

[6] Williams T.M., "*Criticality in stochastic networks*", Journal of the Operational Research society, Vol. 43, 1992, PP. 353-357.

[7] Cho J.G. & Yum B.J., "*An uncertainty performance measure of activities in PERT networks*", International Journal of Production Research, Vol. 35, No. 10, 1997, PP. 2737-2758.

[8] Elmaghraby S.E., Fathi Y., & Taner M.R., "*On the sensitivity of project variability to activity mean duration*", International Journal of Production Economics, Vol. 62, 1999, PP. 219-232.

[9] Bowman R.A., "*Due date-based metrics for activity importance in stochastic activity networks*", Annals of Operations Research, Vol. 102, 2001, PP. 39-48.

[10] Williams F.E. "*PERT Completion Times Revisited*", Informs Transactions of Education, Vol. 6, No. 1, 2005, PP. 21-34.

[11] Schuyler J., *Risk and Decision Analysis in Projects*, Project Management Institute, 2nd edition, June 2001.

[12] Lewis J.P., *Mastering Project Management: Applying Advanced Concepts to System Thinking, Control Evaluation, Resource Allocation*, McGraw-Hill, 2nd edition, 2008.

[13] Ghattas R.G. & Mckee S.L., *Practical Project Management*, Prentice Hall, 2001.

[14] Nicholas J.M., *Project Management for business and Engineering Principles and practice*, Butterworth-Heinemann, 2nd edition, 2004.

[15] Moder J.J., Philips C.R., Davis E.W., *Project Management with CPM, PERT and Precedence Diagramming*, Van Nostrand, New York, 1983.

[Downloaded from www.iust.ac.ir on 2026-06-17]