

# Group Scheduling with a learning effect in the cellular manufacturing system

Seyed Hessameddin Zegordi\* & Ehsan Bohlouli

Seyed Hessameddin Zegordi is an associate professor with the Department of Industrial Engineering, Tarbiat Modares University  
Ehsan Bohlouli is a M.Sc. graduate from the Department of Industrial Engineering, Tarbiat Modares University

## Keywords

Cellular manufacturing system; Group scheduling; Learning effect; Position-based learning effect; Sequence-dependent setup time

## ABSTRACT

The group scheduling problem in the cellular manufacturing system is comprised of two levels of scheduling. At the first level, the sequence of parts in each part-family is determined, and then at the second level the sequence of part-families is determined. In this paper, the flow shop group scheduling is investigated in order to minimize the makespan. In traditional group scheduling problems, the parts processing times of are assumed to be constant and independent of the job sequence. This assumption is impractical in many situations because a worker's ability and skill improve as a result of repeating the tasks, hence the part processing times decrease. This phenomenon is known as the learning effect. In this paper, a position-based learning model is used in the cellular manufacturing system in which each part processing time is dependent on its position in the parts sequence of part-family. The group scheduling problem is modeled with position-based learning effect and the part-families sequence-dependent setup times. Two different genetic algorithms and a heuristic method are developed to solve this problem and evaluated by the test problems. Numerical results obtained from evaluation of the proposed solution methods reveals that second genetic algorithm is better than other proposed methods regarding quality of the solutions..

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

# زمان بندی گروهی با در نظر گرفتن اثر یادگیری در سیستم تولید سلولی

سید حسام الدین ذگردی و احسان بهلولی

## چکیده:

مسئله زمان بندی گروهی در سیستم تولید سلولی شامل دو مرحله زمان بندی است. ابتدا در مرحله اول، توالی قطعات هر خانواده- قطعه مشخص شده و سپس در مرحله دوم، توالی خانواده- قطعات تعیین می شود. در این مقاله، مسئله زمان بندی گروهی با ساختار جریان کارگاهی با هدف کمینه سازی بیشترین زمان تکمیل کارها بررسی شده است. در مسائل زمان بندی گروهی سنتی، زمان پردازش کارها مقادیری ثابت و مستقل از توالی کارها فرض شده اند. این فرض در اکثر مواقع مناسب نیست، زیرا با تکرار انجام کار، توانایی و مهارت کارگر افزایش یافته و در نتیجه زمان

## کلمات کلیدی

سیستم تولید سلولی، زمان بندی گروهی، اثر یادگیری، یادگیری موقعیت گرا، زمان آماده سازی وابسته به توالی

تاریخ وصول: ۸۶/۸/۲۲

تاریخ تصویب: ۸۸/۲/۱۲

دکتر سید حسام الدین ذگردی، دانشیار، بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، Zegordi@modares.ac.ir  
احسان بهلولی، کارشناسی ارشد، بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ebohlouli@gmail.com

پردازش کارها کاهش می‌یابد. این پدیده با نام اثر یادگیری شناخته می‌شود. در این مقاله، از یک مدل یادگیری موقعیت‌گرا در سیستم تولید سلولی استفاده شده است که در آن زمان پردازش هر قطعه‌ی خانواده-قطعه وابسته به توالی ورود آن قطعه است. مسأله زمان‌بندی گروهی با در نظر گرفتن اثر یادگیری موقعیت‌گرا و فرض زمان آماده‌سازی وابسته به توالی خانواده-قطعات مدل‌سازی شده است. دو الگوریتم ژنتیک مختلف و یک روش ابتکاری جهت حل این مسأله توسعه داده شده و توسط مسائل آزمایشی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج عددی حاصل از ارزیابی روش‌های حل پیشنهادی، نشان‌دهنده آن است که الگوریتم ژنتیک دوم از لحاظ کیفیت جواب، از سایر روش‌های پیشنهادی بهتر است.

## ۱. مقدمه

سیستم تولید سلولی نوعی سیستم تولیدی است که در آن قطعاتی که از نظر شکل، طرح و یا روش تولید مشابهت دارند در یک گروه دسته‌بندی شده و توسط گروهی از ماشین‌آلات که در یک سلول قرار دارند تولید می‌شوند [۱].

موفقیت سیستم تولید سلولی منوط به تقسیم‌بندی درست سلولها و برنامه‌ریزی دقیق کارها است. لذا زمان‌بندی گروهی از اهمیت و جایگاه خاصی در این سیستم برخوردار است. در زمان‌بندی گروهی توالی قطعات (کارها) هر گروه (خانواده‌قطعه) شناسایی شده و در ادامه توالی گروه‌ها (خانواده‌قطعه‌ها) جهت ورود به سلولها مشخص می‌شود.

در مسائل زمان‌بندی گروهی سنتی، زمان پردازش قطعات (کارها) مقادیری ثابت و مستقل از توالی ورود قطعات به سلول فرض شده است. این فرض طی سالیان اخیر غیرکارا و نادیده گرفته شده است. چون با تکرار انجام یک کار، توانایی و مهارت کارگر افزایش یافته و زمان پردازش کار کاهش می‌یابد. این پدیده در ادبیات موضوع به نام اثریادگیری شناخته می‌شود. اثریادگیری منجر به کاهش زمان پردازش کارها شده و تأثیر مستقیمی بر تعیین توالی زمان‌بندی کارها خواهد داشت.

در این مقاله، مسأله زمان‌بندی گروهی با در نظر گرفتن اثریادگیری و زمان آماده‌سازی وابسته به توالی در سیستم تولید سلولی با ساختار جریان کارگاهی چند ماشین بررسی شده است. در این مقاله برای اولین بار مدل یادگیری دژونگ در مسأله زمان‌بندی گروهی با ساختار جریان کارگاهی چند ماشین وارد و مدل‌سازی شده و سپس مدل با استفاده از روش ژنتیک و یک روش ابتکاری حل شده است.

ابتدا در بخش ۲، مسائل زمان‌بندی با در نظر گرفتن اثریادگیری مرور شده است. در بخش ۳ مدل یادگیری مناسب انتخاب شده و یک مدل ریاضی برای این مسأله ارائه شده است. در بخش ۴ نیز روش‌های حل مدل پیشنهادی توسعه داده شده است. در بخش ۵ مسائل نمونه طراحی شده و کارایی روش‌های حل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در پایان، در بخش ۶، نتایج نهایی بیان شده و زمینه تحقیقات آتی مشخص شده است.

## ۲. ادبیات موضوع

یادگیری نقش مهمی را در محیط‌های تولیدی بازی می‌کند و اثرات یادگیری توسط مطالعات تجربی زیادی به اثبات رسیده است [۲]. فلسفه یادگیری این است که زمان و تلاش صرف شده در تکمیل یک عملیات تکرارپذیر با افزایش تعداد تکرارها کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش میزان تولید یک محصول، دانش و مهارت اپراتورها افزایش یافته و زمان پردازش کارها کاهش می‌یابد. بیکر در سال ۱۹۷۴ دو فرض را در مسأله زمان‌بندی وارد کرد که از آن بعد، این دو فرض در بیشتر مسائل زمان‌بندی به چشم می‌خورند که به شرح ذیل هستند [۳]:

- زمان پردازش کارها از قبل معلوم و مشخص هستند.
- زمان پردازش کارها مستقل از توالی انجام کارها هستند.

اما در طی سال‌های اخیر، این دو فرض به علت عدم انطباق برنامه‌ریزی تجربی با تئوری زمان‌بندی غیرکارا و نادیده گرفته شده‌اند. در واقع بسیاری از محققین با بررسی زمان‌بندی تجربی و تئوری زمان‌بندی به این نتیجه رسیدند که زمان‌های پردازش کارها، تراکم‌پذیر هستند [۳].

یک رویکرد متفاوت در کاهش زمان‌های پردازش استفاده از مفهوم یادگیری است. در واقع با اثر یادگیری مسأله زمان‌بندی واقعی‌تر می‌شود. اثریادگیری هنگامی اهمیت پیدا می‌کند که محیط تولیدی تغییر می‌کند. این تغییرات می‌تواند شامل مواردی نظیر ورود کارکنان جدید، ماشین‌آلات یا تجهیزات جدید، تغییر فرآیند کاری و یا تولید محصول جدید باشد.

در ادبیات موضوع یادگیری که در اثر تکرار عملیات مشابه بوجود می‌آید یادگیری خودکار و یادگیری که در اثر انجام فعالیت‌های مدیریتی نظیر آموزش، تغییر فرآیند تولید و غیره بوجود می‌آید، یادگیری القایی گویند. در مسائل زمان‌بندی از دو رویکرد متفاوت برای یادگیری خودکار استفاده شده است که به شرح ذیل هستند [۲]:

- رویکرد موقعیت‌گرا: در این رویکرد، یادگیری تحت تأثیر تعداد کارهایی است که تاکنون پردازش شده‌اند. این فرض برای مواردی که پردازش عملی کارها اصولاً ماشین‌محور است و

تقریباً هیچ مداخله انسانی وجود ندارد، فرض واقعی به نظر می‌رسد.

- رویکرد مجموع زمان پردازش: این رویکرد مقدار زمان پردازش کلیه کارهایی که تاکنون پردازش شده‌اند، را در نظر می‌گیرد. بنابراین این رویکرد تجربه کارگر را که از تولید و پردازش کارها بدست آمده است، دخیل می‌کند.

بیسکاپ اولین کسی بود که اثربادگیری را در مسائل زمان بندی بررسی کرد. وی از مدل یادگیری توانی سنتی موقعیت‌گرا ( $P_r, P_r = P \cdot r^a$ ) زمان پردازش کار موقعیت  $m$ ،  $\Gamma$  موقعیت کار،  $a$  شاخص یادگیری) در مسئله زمان بندی تک ماشین استفاده کرد. زمان پردازش یک کار در مدل توانی، وابسته به موقعیت آن کار است. وی نشان داد که این مسئله با هدف کمینه سازی مجموع زمان تکمیل کارها می‌تواند توسط قاعده کوتاه‌ترین زمان پردازش حل شود [۳].

موشیف نشان داد که بعضی از راه حل های شناخته شده سنتی برای مسئله زمان بندی تک ماشین با فرض در نظر گرفتن مدل یادگیری توانی معتبر نیستند. وی ثابت کرد که مسئله زمان بندی تک ماشین با هدف کمینه‌سازی بیشترین زمان تکمیل کارها و با در نظر گرفتن مدل یادگیری توانی، توسط قاعده کوتاه‌ترین زمان پردازش حل می‌شود. همچنین این مسئله با هدف کمینه‌سازی موعد تحویل مشترک می‌تواند به صورت یک مسئله تخصیص حل شود [۴].

موشیف در تحقیق دیگری نشان داد که مسئله ماشین‌های موازی با هدف کمینه سازی مجموع زمان تکمیل کارها و با در نظر گرفتن مدل یادگیری توانی را می‌توان به صورت یک مسئله تخصیص حل کرد [۵].

لی و همکارانش مسئله زمان بندی تک ماشین را با در نظر گرفتن مدل یادگیری سنتی بررسی کردند و یک الگوریتم شاخه و کران برای حل آن با هدف کمینه سازی همزمان مجموع زمان تکمیل کارها و حداکثر دیرکرد، توسعه دادند [۶].

لی و وو مدل یادگیری توانی را در مسئله جریان کارگاهی دو ماشین وارد کرده و فرض کردند که یادگیری روی هر ماشین به طور جداگانه اعمال می‌شود. آنها این مسئله را با هدف کمینه سازی مجموع زمان تکمیل کارها بررسی کرده و یک الگوریتم شاخه و کران برای آن ارائه دادند [۷].

بچمن و جانیاک نشان دادند که مسئله زمان بندی تک ماشین با هدف کمینه‌سازی زمان تکمیل موزون کارها توسط قاعده کوتاه‌ترین زمان پردازش حل می‌شود. همچنین آنها نشان دادند که این مسئله با وجود در نظر گرفتن زمان پردازش یکسان برای همه کارها با ترتیب دهی غیرافزایشی وزن کارها حل می‌شود. آنها در هر دو مسئله از مدل یادگیری توانی سنتی استفاده کردند [۸].

زاو و همکارانش از مدل یادگیری توانی در تحقیقاتشان استفاده کردند. آنها نشان دادند که مسئله زمان بندی تک ماشین با هدف کمینه سازی زمان تکمیل موزون و با فرض وجود وزن‌های سازگار کارها، می‌تواند توسط قاعده کوتاه‌ترین زمان پردازش حل شود. فرض وزن‌های سازگار در این مسئله بیانگر آن است که کاری که زمان پردازش کوچکتری دارد، وزن بیشتری دارد. همچنین آنها اثبات کردند که مسئله تک ماشین با هدف کمینه سازی حداکثر دیرکرد و با فرض موعد تحویل سازگار می‌تواند توسط قاعده زودترین موعد تحویل حل شود. فرض موعد تحویل سازگار در این مسئله نیز بیانگر آن است که کاری که زمان پردازش کوچکتری دارد، موعد تحویل آن زودتر است. آنها روی مسائل جریان کارگاهی دو ماشین نیز تمرکز کرده و نشان دادند که این مسئله با هدف کمینه‌سازی مجموع زمان تکمیل کارها و با فرض زمان پردازش یکسان برای همه کارها روی ماشین دوم و با هدف کمینه سازی بیشترین زمان تکمیل کارها می‌تواند توسط قاعده کوتاه‌ترین زمان پردازش روی ماشین اول حل شود [۹].

چن و همکارانش از مدل یادگیری توانی توسعه داده شده توسط لی و وو استفاده کردند. آنها مسئله زمان بندی جریان کارگاهی دو ماشین با هدف کمینه‌سازی مجموع موزون کل زمان تکمیل و حداکثر دیرکرد را بررسی کرده و یک الگوریتم شاخه و کران برای حل آن ارائه دادند [۱۰].

کولاماس و کیپاریسیس مسئله جریان کارگاهی دو ماشین را با مدل یادگیری توانی توسعه داده شده توسط لی و وو و با دو فرض مختلف بررسی کردند. در فرض اول زمان پردازش کارها روی ماشین اول کمتر از زمان پردازش آنها روی ماشین دوم است. در فرض دوم زمان پردازش همه کارها روی ماشین دوم وزنی از زمان پردازش کارها روی ماشین اول است. آنها نشان دادند که این مسئله با در نظر گرفتن هر یک از فرضهای فوق و با هدف کمینه‌سازی مجموع زمان تکمیل کارها و یا بیشترین زمان تکمیل کارها می‌تواند توسط قاعده کوتاه‌ترین زمان پردازش کارها حل شود [۱۱].

وانگ و ژیا نشان دادند که قاعده مشهور جانسون برای مسئله جریان کارگاهی دو ماشین و با در نظر گرفتن مدل یادگیری توانی و با هدف کمینه‌سازی بیشترین زمان تکمیل کارها لزوماً زمان بندی بهینه را ارائه نمی‌دهد [۱۲].

ایرن و گونر مدل یادگیری توانی سنتی را در مسئله زمان بندی تک ماشین وارد کرده و این مسئله را با هدف کمینه سازی مجموع دیرکردها با استفاده از الگوریتم فراابتکاری حل کردند [۱۳].

کو و یانگ زمان آماده‌سازی وابسته به توالی را با اثربادگیری موقعیت‌گرا در مسئله زمان بندی تک ماشین ترکیب کردند. آنها نشان دادند که این مسئله با هدف کمینه‌سازی مجموع زمان تکمیل کارها و با هدف کمینه‌سازی بیشترین زمان تکمیل کارها می‌تواند توسط قاعده کوتاه‌ترین زمان پردازش حل شود [۱۴].

با مقایسه مدل‌های موجود یادگیری موقعیت‌گرا، مدل دژونگ از میان مدل‌های موجود به علت داشتن دو خاصیت مهم زیر، جهت زمان‌بندی گروهی در سیستم تولید سلولی به عنوان مدل مناسب انتخاب گردید.

- تفکیک عملیات دستی و عملیات ماشینی از یکدیگر و اعمال اثریادگیری تنها روی عملیات دستی کارها.
  - سهولت در تخمین پارامترهای مدل.
- در این مدل، یک پارامتر به نام عامل تراکم‌ناپذیری وجود دارد که منجر به تفکیک عملیات ماشینی از عملیات دستی می‌شود. در نتیجه زمان پردازش ماشینی ثابت باقی مانده و تنها زمان پردازش عملیات دستی کاهش می‌یابد. حالت کلی مدل دژونگ به صورت رابطه ۱ است [۱۵]:

$$P_r = P_o (M + (1-M).r^{\alpha}) \quad (1)$$

$P_r$ : مدت زمان لازم جهت انجام عملیات در موقعیت  $r$  م.  
 $P_o$ : مدت زمان لازم جهت انجام عملیات در حالت نرمال ( بدون در نظر گرفتن موقعیت کارها).

$r$ : موقعیت انجام کار.

$\alpha$ : شاخص یادگیری یا اثریادگیری ( لگاریتم نرخ یادگیری در مبنای دو که همواره عددی منفی است).

$M$ : عامل تراکم‌ناپذیری.

با افزایش تعداد عملیات‌ها، مدت زمان انجام عملیات دستی در مدل به سمت صفر کاهش یافته و در نتیجه مدت زمان انجام کل عملیات به سمت مدت زمان پردازش ماشینی میل خواهد کرد. می‌بایست این مدل متناسب با شرایط مسأله اصلاح شود. لذا مدل اصلاح شده به صورت زیر (رابطه ۲) است:

$$P_{ijr} = P_{ij} \left( M_{ijr} + (1 - M_{ijr}) . r^{\alpha_r} \right) \quad (2)$$

با توجه به وجود مشابهت در فرآیند ساخت یا طراحی قطعات یک خانواده‌قطعه می‌توان یک اثر یادگیری منحصر به فرد برای هر خانواده‌قطعه فرض کرد [۲]. در این مدل نیز برای هر خانواده‌قطعه یک شاخص یادگیری ( $\alpha_r$ ) منحصر به فرد در نظر گرفته شده است. همچنین عامل تراکم‌ناپذیر ( $M$ ) برای هر قطعه خانواده‌قطعه روی هر یک از ماشین‌آلات نیز به طور منحصر به فرد در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲. فرضیات مدل

در این مدل با توجه به ویژگی‌ها و شرایط کاربردی در سیستم تولید سلولی، فرض‌هایی به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- گروه‌های کاری و سلول‌های تولیدی از قبل مشخص هستند.
- ۲- ماشین‌آلات تولیدی همیشه در دسترس بوده و خرابی و قطع جریان عملیات وجود ندارد.

بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که اثریادگیری تنها در مسائل زمان‌بندی تک ماشین و یا جریان کارگاهی دو ماشین بررسی شده است. همچنین در اکثر این مسائل از مدل یادگیری توانی سنتی و یا توسعه یافته آن استفاده شده است. در این مدل با تکرار انجام یک کار، زمان پردازش آن کاهش می‌یابد و این کاهش تحت تأثیر موقعیت کارها است.

عمده‌ترین مشکل مدل توانی این است که زمان عملیات ماشینی از عملیات دستی جدا نشده و یادگیری بر کل زمان پردازش اثر می‌گذارد.

### ۳. مدل پیشنهادی

این مقاله به زمان‌بندی گروهی در سیستم تولید سلولی در حالت جریان کارگاهی می‌پردازد. یکی از خلأهای مسائل زمان‌بندی گروهی در سیستم تولید سلولی در نظر نگرفتن اثر یادگیری است که با در نظر گرفتن آن در مسأله زمان‌بندی گروهی بیشتر می‌توان به شرایط واقعی نزدیک شد.

در این قسمت از برنامه‌ریزی عددصحيح صفر و یک جهت مدل‌سازی مسأله زمان‌بندی استفاده شده است. در این مدل ابتدا در مرحله اول توالی قطعات هر خانواده مشخص شده و سپس در مرحله دوم با ثابت فرض کردن توالی قطعات خانواده‌ها و مشخص شدن زمان پردازش واقعی هر قطعه روی هر ماشین، خانواده-قطعات زمان‌بندی می‌شوند. در اینجا از تابع هدف کمینه‌سازی بیشترین زمان تکمیل کارها در این مسأله استفاده شده است. کمینه کردن این هدف منجر به افزایش نرخ خروجی و سرعت فرآیند ساخت و تولید شده و در نهایت موجب رسیدن سریع محصول بدست مشتری می‌شود. لذا در مرحله اول زمان‌بندی یعنی تعیین توالی بهینه قطعات هر خانواده‌قطعه، کمینه‌سازی بیشترین زمان تکمیل قطعات هر خانواده‌قطعه به عنوان تابع هدف معرفی شده و در مرحله دوم یعنی تعیین توالی بهینه خانواده‌ها، کمینه‌سازی بیشترین زمان تکمیل خانواده‌قطعات به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است.

### ۳-۱. مدل یادگیری

جهت استفاده از اثریادگیری در مسائل زمان‌بندی از دو رویکرد اثریادگیری موقعیت‌گرا و یا اثریادگیری بر اساس مجموع زمان پردازش استفاده می‌شود. رویکرد موقعیت‌گرا در مواقعی که پردازش کارها اصولاً ماشینی‌محور است، کاربرد دارد. بنابراین با توجه به اینکه در اینجا، نوع محیط تولیدی سیستم تولید سلولی است و معمولاً در این سیستم، ماشین‌آلات نقش مهمی را در پردازش قطعات و خانواده‌قطعات بازی می‌کنند به طوری که می‌توان گفت که اغلب سلول‌ها ماشینی‌محور هستند. بنابراین در این تحقیق از رویکرد اثر یادگیری موقعیت‌گرا استفاده شده است.

$P_{ifrj}$  مدت زمان پردازش اجرایی قطعه  $i$  از خانواده قطعه  $f$  در موقعیت  $r$  روی ماشین  $j$   
 $AP_{fjr}$  مدت زمان پردازش اجرایی قطعه موقعیت  $r$ ام از خانواده قطعه  $f$  روی ماشین  $j$   
 $C_{rfj}$  زمان تکمیل قطعه ای از خانواده قطعه  $f$  که در موقعیت  $r$  روی ماشین  $j$  پردازش شود  
 $C_{max}$  بیشترین زمان تکمیل قطعات یک خانواده قطعه.  
 $CF_{max}$  بیشترین زمان تکمیل کلیه خانواده قطعه ها.  
 $CF_{k,r,j}$  زمان تکمیل قطعه موقعیت  $r$ ام از خانواده ای که در موقعیت  $k$ ام روی ماشین  $j$ ام پردازش شود. (جهت در نظر گرفتن آماده سازی)  
 از متغیرهای تصمیم ذیل به منظور مدل سازی در مسأله جدید استفاده شده که به صورت متغیر صفر و یک در نظر گرفته شده اند:

$$Y_{fk} \begin{cases} 1 & \text{اگر خانواده قطعه } f \text{ در موقعیت } k \text{ام پردازش شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$X_{ifjr} \begin{cases} 1 & \text{اگر قطعه } i \text{ از خانواده قطعه } f \text{ در موقعیت } r \text{ پردازش شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

$$Z_{gf} \begin{cases} 1 & \text{اگر خانواده قطعه } f \text{ بعد از خانواده قطعه } g \text{ پردازش شود} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases}$$

۳-۳-۱. مرحله اول مدل پیشنهادی زمان بندی گروهی

$$\text{Min } Z = C_{\max} \tag{۳}$$

$$C_{rfj} \geq \sum_{i=1}^{n_f} X_{ifjr} P_{ifrj} \quad \text{for } r = 1, j = 1 \tag{۴}$$

$$C_{rfj} - C_{r-1fj} \geq \sum_{i=1}^{n_f} X_{ifjr} P_{ifrj} \tag{۵}$$

for  $r = 2, \dots, n_f, j = 1, \dots, m$

$$C_{rfj} - C_{rfj-1} \geq \sum_{i=1}^{n_f} X_{ifjr} P_{ifrj} \tag{۶}$$

for  $j = 2, \dots, m, r = 1, \dots, n_f$

$$\sum_{r=1}^{n_f} X_{ifjr} = 1 \quad \text{for } f = 1, \dots, PF, i = 1, \dots, n_f \tag{۷}$$

$$\sum_{i=1}^{n_f} X_{ifjr} = 1 \quad \text{for } f = 1, \dots, PF, r = 1, \dots, n_f \tag{۸}$$

$$C_{\max} \geq C_{rfj} \tag{۹}$$

for  $f = 1, \dots, PF, r = 1, \dots, n_f, j = 1, \dots, m$

$$P_{ifrj} = P_{ifj} (M_{ifj} + (1 - M_{ifj}) \cdot r^{\alpha_f}) \tag{۱۰}$$

for  $f = 1, \dots, PF, i = 1, \dots, n_f, j = 1, \dots, m$   
 $\alpha_f, M_{ifj}$

۳- در صورت وجود قطعات همسان، اینگونه قطعات می بایست در یک خانواده قطعه به طور منحصر به فرد قرار گیرند.  
 ۴- زمان آماده سازی روی هر ماشین جهت هر خانواده قطعه وابسته به توالی ورود خانواده قطعه ها در سلول است.  
 ۵- آماده سازی لازم برای هر خانواده قطعه روی ماشین مستقل از وجود قطعات قابل انجام است.<sup>۱</sup>  
 ۶- زمان های آماده سازی مربوط به قطعات در هر خانواده قطعه (زمان های آماده سازی جزئی)، در زمان های تولید آنها منظور شده و به صورت مستقل در نظر گرفته نشده است.  
 ۷- زمان پردازش نرمال برای هر قطعه روی هر ماشین معلوم می باشد و زمان آماده سازی جزئی و زمان حمل و نقل بین ماشین ها هم در آن منظور شده است.  
 ۸- پردازش هر خانواده قطعه می تواند تنها در یک سلول انجام شود و در واقع هیچگونه حرکت بین سلولی وجود ندارد.  
 ۹- جهت تولید هر قطعه به یک مجموعه عملیات نیاز است که هر کدام از آنها توسط یک نوع ماشین در سلول انجام می شود.  
 ۱۰- هر خانواده قطعه می تواند یک شاخص یادگیری منحصر به فرد داشته باشد و همچنین کاهش زمان پردازش قطعات یک خانواده قطعه نیز از تابع یادگیری دژونگ<sup>۲</sup> پیروی می کند.  
 ۱۱- جهت کاهش زمان آماده سازی، هنگامی که عملیات مربوط به خانواده قطعه ای توسط ماشین شروع می شود، تا زمانی که کلیه عملیات قطعات آن خانواده قطعه توسط ماشین مورد نظر انجام نشود، عملیات خانواده دیگر روی آن ماشین شروع نمی شود.  
 ۱۲- سلول های تولیدی از ساختار جریان کارگاهی برخوردارند و ترتیب عبور قطعات از ماشین ها در هر خانواده قطعه یکسان است.

۳-۳. مدل ریاضی پیشنهادی

پارامترها و نمادهای استفاده شده در مدل سازی مسأله به شرح زیر است:

$f = 1, \dots, PF$	اندیس مربوط به شماره خانواده قطعه
$i = 1, \dots, n_f$	اندیس مربوط به شماره قطعه
$j = 1, \dots, m$	اندیس مربوط به نوع ماشین
$r = 1, \dots, n_f$	اندیس مربوط به موقعیت انجام پردازش قطعات یک خانواده قطعه
$k = 1, \dots, PF$	اندیس مربوط به موقعیت انجام پردازش خانواده قطعه
$\alpha_f$	اثر یادگیری خانواده قطعه $f$
$M_{ifj}$	نسبت عملیات ماشینی قطعه $i$ از خانواده قطعه $f$ روی ماشین $j$
$S_{gjf}$	مدت زمان آماده سازی لازم جهت خانواده قطعه $f$ که بلافاصله بعد از خانواده قطعه $g$ روی ماشین $j$ پردازش شود ( $S_{gjf} \neq 0$ )
$P_{ifj}$	مدت زمان پردازش نرمال قطعه $i$ از خانواده قطعه $f$ روی ماشین $j$

<sup>1</sup> Anticipatory Setup  
<sup>2</sup> Dejong

$$\sum_{k=1}^{PF} Y_{f,k} = 1 \quad \text{For } f = 1, \dots, PF \quad (19)$$

$$\sum_{f=1}^{PF} Y_{f,k} = 1 \quad \text{For } k = 1, \dots, PF \quad (20)$$

$$CF_{\max} \geq CF_{k,m_f,m} \quad \text{For } k = 1, \dots, PF \quad (21)$$

رابطه (۱۱) نشاندهنده تابع هدف مرحله دوم مدل است که بیشترین زمان تکمیل خانواده قطعات را کمینه می‌سازد. رابطه (۱۲) اولین خانواده قطعه را جهت پردازش در سلول مشخص می‌سازد. رابطه (۱۴) و (۱۳) از تداخل زمانی قطعات خانواده قطعه‌ای که در موقعیت اول پردازش می‌شود، جلوگیری می‌نماید به طوریکه به منظور پردازش قطعه موقعیت ۲م روی ماشین j باید پردازش این قطعه روی ماشین قبلی (j-1) و پردازش قطعه قبلی (r-1) روی این ماشین (j) به اتمام رسیده باشد.

رابطه (۱۵) توالی بقیه خانواده قطعات طوری مشخص می‌کند که زمان تکمیل خانواده قطعه‌ای که دیرتر وارد سلول شده است، از زمان تکمیل خانواده قطعه‌ای که زودتر وارد سلول شده است، بیشتر است. در این محدودیت زمان آماده‌سازی متناسب با ترتیب ورود خانواده‌ها به سلول در نظر گرفته می‌شود. رابطه (۱۶) و (۱۷) همانند رابطه (۱۴) و (۱۳) از تداخل زمانی قطعات هر یک از خانواده قطعه‌ها جلوگیری می‌کنند.

رابطه (۱۸) تضمین می‌کند که زمان آماده‌سازی متناسب با توالی خانواده‌ها در رابطه (۱۵) وارد شود. این محدودیت نشان می‌دهد که اگر خانواده قطعه g در موقعیت k-1 و خانواده قطعه f در موقعیت k پردازش شود آنگاه خانواده قطعه f بعد از خانواده قطعه g پردازش می‌شود. رابطه (۱۹) بیان می‌کند که هر خانواده قطعه تنها می‌تواند در یک موقعیت پردازش شود. رابطه (۲۰) بیان می‌کند که در هر موقعیت می‌بایست یک خانواده قطعه پردازش شود. رابطه (۲۱) نشان می‌دهد که بیشترین زمان تکمیل خانواده‌ها برابر با بزرگترین زمان تکمیل هر خانواده قطعه است.

#### ۴. روش حل مدل ریاضی پیشنهادی

مسئله زمان بندی گروهی در سیستم تولید سلولی با در نظر گرفتن زمان آماده‌سازی وابسته به توالی جزء مسائل NP-Hard است [۱۶]. با توجه به اینکه روش‌های فراابتکاری قابلیت زیادی در پیدا کردن جواب‌های خوب دارند از روش فراابتکاری ژنتیک جهت حل مسئله استفاده شده است. این روش‌ها به صورتی عمل می‌کنند که در جواب بهینه محلی متوقف نمی‌شوند و با بکارگیری استراتژی‌های مختلف سعی در خروج از نقطه بهینه محلی را دارند. در عین حال روش‌های ابتکاری با کارایی بالاتر و اقتصادی‌تر جواب‌های خوبی را ارائه می‌دهند. در این مقاله یک روش ابتکاری و دو روش فرا ابتکاری جهت حل مسئله ارائه شده است.

رابطه (۳) نشاندهنده تابع هدف مرحله اول مدل است که بیشترین زمان تکمیل قطعات هر خانواده-قطعه را کمینه می‌کند. رابطه (۴) قطعه‌ای را که در موقعیت اول می‌بایست پردازش شود، تعیین می‌کند. رابطه (۵) تضمین می‌کند که در یک خانواده قطعه، زمان تکمیل قطعه‌ی موقعیت فعلی بزرگتر از زمان تکمیل قطعه قبلی روی همان ماشین است. رابطه (۶) تضمین می‌کند که در یک خانواده قطعه، زمان تکمیل یک قطعه روی یک ماشین بزرگتر از زمان تکمیل همین قطعه روی ماشین قبلی است. رابطه (۷) نشان می‌دهد که هر قطعه (i) از خانواده قطعه تنها می‌تواند روی یک موقعیت در سلول پردازش شود. رابطه (۸) نشان می‌دهد که در هر موقعیت تنها یک قطعه می‌تواند پردازش شود. رابطه (۹) بیانگر این است که بیشترین زمان تکمیل قطعات خانواده قطعه f برابر با بیشترین زمان تکمیل قطعه موقعیت ۲م روی هر یک از ماشین‌ها است. رابطه (۱۰) زمان پردازش اجرایی هر قطعه از یک خانواده قطعه را با توجه به زمان پردازش نرمال آن قطعه، شاخص یادگیری خانواده قطعه و عامل تراکم ناپذیری هر قطعه‌ی خانواده قطعه روی هر ماشین مشخص می‌سازد.

#### ۳-۳-۲. مرحله دوم مدل پیشنهادی زمان بندی گروهی

$$\text{Min } Z = CF_{\max} \quad (11)$$

$$CF_{1,l,j} \geq \sum_{f=1}^{PF} Y_{f,l} (AP_{f,l,j} + S_{ffj}) \quad \text{For } j = 1, \dots, m \quad (12)$$

$$CF_{l,r,j} \geq CF_{l,r-1,j} + \sum_{f=1}^{PF} Y_{f,l} AP_{f,r,j} \quad (13)$$

For  $r = 2, \dots, n_f, j = 1, \dots, m$

$$CF_{l,r,j} \geq CF_{l,r,j-1} + \sum_{f=1}^{PF} Y_{f,l} AP_{f,r,j} \quad (14)$$

For  $r = 1, \dots, n_f, j = 2, \dots, m$

$$CF_{k,l,j} \geq CF_{k-1,n_f,j} + \sum_{f=1}^{PF} Y_{f,k} (AP_{f,l,j} + \sum_{g=1}^{PF} Z_{gf} S_{g,f,j}) \quad (15)$$

For  $k = 2, \dots, PF, j = 1, \dots, m$

$$CF_{k,r,j} \geq CF_{k,r,j-1} + \sum_{f=1}^{PF} Y_{f,k} AP_{f,r,j} \quad (16)$$

For  $k = 2, \dots, PF, r = 1, \dots, n_f, j = 2, \dots, m$

$$CF_{k,r,j} \geq CF_{k,r-1,j} + \sum_{f=1}^{PF} Y_{f,k} AP_{f,r,j} \quad (17)$$

For  $k = 2, \dots, PF, r = 2, \dots, n_f, j = 1, \dots, m$

$$Z_{gf} \geq Y_{g,k-1} + Y_{f,k} - 1 \quad \text{For } f, g = 1, \dots, PF, g \neq f \quad (18)$$

۴-۱. روش ابتکاری

روش های ابتکاری با توسعه مکانیزم تصمیم گیری، توالی قطعات در هر خانواده قطعه و توالی ورود خانواده ها را به سلول مشخص می کنند. اسپالر و همکاران به بررسی روش های ابتکاری مختلف جهت زمان بندی گروهی در سیستم های تولید سلولی با ساختار جریان خطی پرداخته و ۱۲ روش ابتکاری را با در نظر گرفتن آماده سازی وابسته به توالی خانواده ها و با هدف کمینه سازی بیشترین زمان تکمیل کارها ارائه دادند. نتایج نشان داد که بهترین روش ابتکاری به صورت ترکیبی از روش CDS<sup>1</sup> (جهت تعیین توالی قطعات در هر خانواده) و روش NEH اصلاح شده (جهت تعیین توالی خانواده ها به سلول ها)، است [۱۶].

با توجه به اینکه فرض کاربردی اثربادی گیری در بخش اول روش ابتکاری یعنی الگوریتم CDS جهت تعیین توالی قطعات هر خانواده در نظر گرفته نشده است. بنابراین الگوریتم CDS مورد بازبینی و اصلاح قرار گرفته و در نهایت الگوریتم CDS اصلاح شده به منظور تعیین توالی قطعات هر خانواده ارائه گردیده و در بخش دوم روش ابتکاری نیز از الگوریتم NEH اصلاح شده اسپالر جهت تعیین توالی خانواده ها استفاده شده است. روش ابتکاری فوق با نام MCMN نامگذاری گردید. در ادامه این الگوریتمها معرفی می شوند.

۴-۱-۱. الگوریتم CDS اصلاح شده

مراحل انجام الگوریتم ابتکاری CDS اصلاح شده به شرح زیر است:  
گام ۱: میزان زمان پردازش عملیات دستی را برای هر قطعه  $i$  از خانواده  $f$  محاسبه کنید.

$$O_{if} = \sum_{j=1}^m P_{ifj} \cdot (1 - M_{ifj}) \quad \text{For } i = 1, \dots, n \quad (22)$$

گام ۲: قطعه های هر خانواده را براساس ترتیب غیرکاهشی کل زمان پردازش عملیات دستی مرتب کنید و این توالی را  $SE_0$  بنامید.

گام ۳: بیشترین زمان تکمیل کارها در توالی قطعه ها در  $SE_0$  را محاسبه کنید.

گام ۴: توالی بهینه را برابر توالی  $SE_0$  ( $SE^* = SE_0$ ) قرار داده و بیشترین زمان تکمیل بهینه را برابر بیشترین زمان تکمیل کارهای  $SE_0$  ( $C_{Max}(SE^*) = C_{Max}(SE_0)$ ) و  $k=1$  قرار دهید.

گام ۵: برای توالی  $SE^*$  به ازای هر قطعه  $i$  از خانواده  $f$  و با توجه به موقعیت آن ( $r$ ) در  $SE^*$ ، مقدار  $a_i$  و  $b_i$  را محاسبه کنید.

$$a_i = \sum_{j=1}^k P_{ifj} \cdot (M_{ifj} + (1 - M_{ifj})r^{\alpha_f}) \quad (23)$$

$$b_i = \sum_{j=m-k+1}^m P_{ifj} \cdot (M_{ifj} + (1 - M_{ifj})r^{\alpha_f}) \quad (24)$$

<sup>1</sup> Campbell-Dudek-Smith

گام ۶: برای قطعاتی که  $a_i \leq b_i$  باشد، قطعات را بر اساس ترتیب غیرکاهشی  $a_i$  ها مرتب کرده و آن مجموعه را  $u$  بنامید و برای قطعاتی که  $a_i > b_i$  است، قطعات را براساس ترتیب غیرافزایشی  $b_i$  ها مرتب کرده و آن مجموعه را  $v$  بنامید. توالی جدید  $SE_t$  به صورت  $SE_t = uv$  خواهد بود.

گام ۷: برای توالی جدید  $SE_t$ ، مقادیر  $a_i$  و  $b_i$  ها را با استفاده از رابطه ۲۳ و ۲۴ محاسبه کرده و توالی جدیدی را تشکیل دهید. این عمل را آنقدر تکرار کنید تا توالی جدید دیگری ایجاد نشود.

گام ۸: بیشترین زمان تکمیل کارها را برای  $SE_t$  محاسبه کنید.  
گام ۹: اگر  $C_{Max}(SE^*) \leq C_{Max}(SE_t)$  باشد، آنگاه  $SE_t = SE^*$  قرار دهید.

گام ۱۰:  $k = k + 1$  قرار دهید. اگر  $k < m$  است، به گام پنجم بروید. در غیراینصورت  $SE^*$  را به عنوان توالی بهینه و  $C_{Max}(SE^*)$  را به عنوان بهینه زمان تکمیل کارها بپذیرید.  
گام ۱۱: اگر  $f < PF$  است آنگاه  $f = f + 1$  قرار داده و به گام ۱ بروید و در غیر اینصورت توقف کنید.

۴-۱-۲. الگوریتم NEH اصلاح شده

مراحل این الگوریتم به شرح زیر است:

گام ۱: متوسط زمان آماده سازی ( $\bar{S}_{fj}$ ) را برای هر خانواده قطعه روی هر ماشین محاسبه کنید. سپس مقدار زمان پردازش مؤثر ( $E_{fj}$ ) را محاسبه کنید.

$$\bar{S}_{fj} = \frac{\sum_{g=1}^{PF} S_{gfj}}{PF} \quad (25)$$

$$E_{fj} = \bar{S}_{fj} + \sum_{r=1}^{n_f} P_{rfj} \quad (26)$$

گام ۲: زمان بندی اولیه ( $\mu(1), \dots, \mu(PF)$ ) را طوری تشکیل دهید که به ازای همه  $r \leq (PF-1)$ ،

$$\sum_{j=1}^m E_{\mu(r),j} \geq \sum_{j=1}^m E_{\mu(r+1),j} \quad \text{باشد.}$$

گام ۳:  $r = 2$  قرار داده و  $\sigma = (\mu(1), \mu(2))$  را قرار دهید. به ازای  $0 \leq q \leq r$ ،  $\sigma = \sigma_q \sigma_{r-q}$  را بگیرید.

گام ۴:  $\mu(r+1)$  را از  $SE_0$  بگیرید. توالی های جزئی ( $r+1$ ) را توسط  $\sigma_q \mu(r+1) \sigma_{r-q}$  در حالیکه  $0 \leq q \leq r$  است، تولید کنید و مجموعه  $\omega$  را تشکیل دهید. بیشترین زمان تکمیل کارها را به ازای هر یک از اعضای مجموعه محاسبه کرده و در نهایت کمترین آن را مشخص کنید. سپس  $\sigma = \omega_z$  قرار دهید.

$$\omega = \{\omega_1, \dots, \omega_{r+1}\} = \{\sigma_q \mu(r+1) \sigma_{r-q} \mid 0 \leq q \leq r\} \quad (27)$$

کروموزم‌های انتخابی اعمال شده و جایگزین کروموزم‌های قبلی می‌شوند.

در نهایت کروموزم‌های موجود در استخر تولید مثل به همراه کروموزم‌های نخبه نسل جاری به نسل آتی منتقل شده و در صورت عدم ارضاء شرط توقف، کلیه مراحل با نسل جدید تکرار می‌شود. شرط توقف در هر دو الگوریتم ژنتیک تعداد نسل‌ها است که برای هر دو الگوریتم ۵۰ نسل در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۲-۲. الگوریتم ژنتیک دوم

یک الگوریتم ایده‌آل باید بتواند در حین انتقال از نسلی به نسل دیگر، درجه تنوع بالایی را حفظ نموده و از سوی دیگر در مقطعی که جواب‌های بهتر در حال ردیابی هستند جهش‌های ناخواسته عملگرها موجب انحراف الگوریتم نشود.

به همین منظور در الگوریتم ژنتیک دوم علاوه بر مراحل موجود در الگوریتم ژنتیک اول، از دو عملگر تنوع‌گرای و تشدیدگرایی و یک روش جستجوی محلی نیز استفاده شده است.

عملگر تنوع‌گرای به طور سیستماتیک جواب‌هایی را که تاکنون تولید نشده‌اند، ایجاد کرده و حیطة جستجو در فضای جواب را گسترش می‌دهد. این عملگر بدین صورت عمل می‌کند که فراوانی هر یک از کارها در هر موقعیت در میان کل جوابهای استخر تولید مثل را محاسبه کرده و کارهایی را که تاکنون کمتر در یک موقعیت خاص قرار گرفته‌اند، شناسایی کرده و از کنار هم قرار دادن آنها جواب متنوعی را تولید می‌کند. در صورتی که در حین ایجاد یک جواب، کاری که کمترین فراوانی را داراست در موقعیت‌های قبلی انتخاب شده باشد، کار دیگری که کمترین فراوانی را دارد، انتخاب شده و چنانچه چنین کاری موجود نباشد، این موقعیت خالی باقی می‌ماند. در پایان عملگر کارهایی را که تاکنون تخصیص داده نشده‌اند، تعیین کرده و به طور تصادفی به موقعیت‌هایی که خالی باقی مانده است، تخصیص می‌دهد.

عملگر تشدیدگرایی بر جواب‌های نخبه تأثیر گذاشته و باعث می‌شود تا جوابهایی متناسب با جواب‌های نخبه تولید شوند که در نهایت می‌تواند منجر به تولید جواب‌های بهینه محلی شود. مراحل اجرای این عملگر شبیه به عملگر تنوع‌گرای است با این تفاوت که در میان جواب‌های نخبه کارهایی را که در هر موقعیت دارای بیشترین فراوانی هستند در کنار هم قرار می‌دهد.

در الگوریتم ژنتیک دوم از روش جستجوی محلی نیز برای بهبود در بهترین جواب‌های حاصل از هر نسل الگوریتم استفاده شده است. این روش بر بهترین جواب هر نسل عمل کرده و در صورت ممکن آن را بهبود می‌دهد. این جستجو از اولین کار در بهترین جواب شروع شده و با جابجایی کارهای مجاور سمت راستی ادامه یافته و در صورت بهبود تابع هدف جواب جدید جایگزین جواب قبلی می‌شود.

$$C_{\max}(\omega_z) = \min_{1 \leq v \leq r+1} \{C_{\max}(\omega_v)\} \quad (28)$$

گام ۵: اگر  $r < PF$  است،  $r = r + 1$  قرار دهید و به گام ۴ بروید. در غیر اینصورت زمانبندی  $\sigma$  را با بیشترین زمان تکمیل کارها  $C_{\max}(\sigma)$  به عنوان جواب مسأله بپذیرید.

#### ۴-۲-۱. الگوریتم فراابتکاری ژنتیک

در این تحقیق، دو الگوریتم مختلف براساس روش ژنتیک جهت حل مسأله ارائه شده است. در هر دو الگوریتم کروموزم‌ها به گونه‌ای تعریف شده‌اند که شکل جواب مورد انتظار را بیان می‌کنند. در مرحله اول زمانبندی گروهی، کروموزم‌ها نشان دهنده اولویت قرار گرفتن قطعات هر خانواده‌قطعه و در مرحله دوم نشان دهنده اولویت قرار گرفتن خانواده‌قطعه‌ها جهت ورود به سلول هستند. طول کروموزوم نیز در مرحله اول به اندازه تعداد قطعات هر خانواده‌قطعه و در مرحله دوم به اندازه تعداد خانواده‌قطعه‌ها است.

#### ۴-۲-۱. الگوریتم ژنتیک اول

در هر دو الگوریتم جمعیت اولیه به صورت تصادفی ایجاد شده و میزان برازندگی جواب‌ها محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه مسأله زمانبندی از نوع کمینه‌سازی بوده و هدف مسأله کمینه نمودن بیشترین زمان تکمیل کارها ( $C_{\max}$ ) است.

بنابراین میزان برازندگی جواب‌های حاصله، همان معکوس تابع هدف معرفی شده در مدل ریاضی بوده و از اینرو کروموزم‌هایی که دارای بالاترین میزان برازندگی باشند به عنوان بهترین کروموزوم شناسایی می‌شوند. با توجه به مقدار انتخابی برای متغیر نخبه<sup>۱</sup>، تعدادی از کروموزوم‌ها را که میزان برازندگی آنها بهتر است، به صورت مستقیم به نسل بعدی انتقال یافته و با توجه به نرخ نگهداشت<sup>۲</sup> جواب‌های مناسب، به تعداد نرخ نگهداشت ضربدر جمعیت اولیه، بهترین کروموزوم‌های نسل موجود را انتخاب نموده و بقیه کروموزوم‌های نامناسب از نسل خارج می‌شوند. با استفاده از روش چرخ رولت وزنی، کروموزوم‌های انتخاب شده را جهت تولید مثل انتخاب کرده و با تولید فرزند از کروموزوم‌های انتخاب شده با استفاده از عملگر تقاطع LOX، استخر تولید مثل تکمیل می‌شود تا جمعیت آن به اندازه نرخ تقاطع ضربدر جمعیت اولیه گردد. در صورتی که دو والد یکسان برای تولید فرزند انتخاب شود، والد دوم حذف شده و دوباره والد دوم از بین کروموزوم‌های نگهداری شده انتخاب می‌شود.

با توجه به نرخ جهش ارائه شده، کروموزوم‌ها را به طور تصادفی از استخر تولید مثل انتخاب کرده و عملگر جهش تعویضی بر روی

<sup>1</sup> Elite

<sup>2</sup> Keep rate



## ۵. آزمایشات عددی

در این مقاله به منظور ارزیابی کارایی روش‌های حل، ابتدا مسائل نمونه طراحی و تولید شده و سپس روش‌های حل مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

## ۵-۱. مسائل نمونه

در این مقاله مطابق با تحقیق لاجندران و همکارانش در مسأله زمان‌بندی گروهی با زمان آماده‌سازی وابسته به توالی، مسائل نمونه به سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ تقسیم شده که تعداد خانواده‌ها در مسائل کوچک از توزیع یکنواخت با دامنه (2,10)، در مسائل متوسط از توزیع یکنواخت با دامنه (11,20) و در مسائل بزرگ از توزیع یکنواخت با دامنه (21,30) تولید شده است. تعداد قطعات در هر خانواده نیز از توزیع یکنواخت با دامنه (2,15) تولید شده است [۱۷]. جهت تولید زمان آماده‌سازی مطابق تحقیق اسچالر و همکاران از توزیع یکنواخت در دامنه (1,50) استفاده شده است [۱۶]. زمان پردازش هر قطعه روی هر ماشین مطابق با تحقیق ذگردی و همکاران از توزیع یکنواخت در دامنه (5,25) تولید شده است [۱۸]. در این تحقیق جهت استفاده از نرخ یادگیری مطابق تحقیق لی و همکاران از سه نرخ یادگیری ۰،۷، ۰،۸ و ۰،۹ به طور تصادفی استفاده شده است [۶].

ماشین‌آلات هر سلول نیز برای مسائل کوچک (مسائل ۲ تا ۱۰ خانواده‌قطعه) ۱۰ ماشین، مسائل متوسط (مسائل ۱۱ تا ۲۰ خانواده‌قطعه) ۲۰ ماشین و مسائل بزرگ (مسائل ۲۱ تا ۳۰ خانواده‌قطعه) ۳۰ ماشین در نظر گرفته شده است. میزان درصد عملیات ماشینی هر قطعه روی هر ماشین نیز متناسب با شرایط مسأله از توزیع یکنواخت با دامنه (0.5,0.9) تولید شده است.

## ۵-۲. روش‌های مورد ارزیابی

به منظور ارزیابی کارایی هر یک از روش‌های حل، برنامه کامپیوتری هر یک از روش‌ها با استفاده از نرم‌افزار *MATLAB7* نوشته شده و مسائل نمونه بر روی یک دستگاه رایانه پنتیوم 4 با پردازشگر *Intel* با سرعت پردازش  $3.2^+$  گیگاهرتز و حافظه‌ی جانبی (*RAM*) 1024 مگا بایت حل شده است.

جهت یافتن مقدار مناسب پارمترهای اساسی الگوریتم‌های ژنتیک یعنی میزان جمعیت اولیه، تعداد نخبه، نرخ نگهداشت و نرخ جهش، ابتدا ۱۳ سناریوی مختلف جهت الگوریتم ژنتیک اول از میزان جمعیت اولیه ۳۰، ۶۰ و ۱۰۰، نرخ تقاطع ۰،۷، ۰،۸، ۰،۹، نرخ نگهداشت ۰،۶ و ۰،۷، نرخ جهش ۰،۰۵، ۰،۰۲ و ۰،۰۱ طراحی شده است. همچنین با توجه به اینکه الگوریتم ژنتیک دوم دارای دو عملگر تنوع‌گرایی و تشدیدگرایی است بنابراین علاوه بر پارمترهای فوق دارای دو پارامتر نرخ تنوع‌گرایی یعنی درصد جواب‌های تولید شده از عملگر تنوع‌گرایی و نرخ تشدیدگرایی یعنی درصد جواب‌های

تولید شده از عملگر تشدیدگرایی است. بنابراین با در نظر گرفتن پارامترهای فوق، نرخ تنوع‌گرایی ۰،۰۵ و ۰،۱ و نرخ تشدیدگرایی ۰،۰۵ و ۰،۱، ۱۴ سناریوی مختلف برای الگوریتم ژنتیک دوم طراحی شده است. برای هر سناریوی هر الگوریتم ۱۰ مسأله مختلف حل شده و هر مسأله ۱۰ بار اجرا شده است. متوسط نتایج حاصل به عنوان نتایج نهایی منظور شده تا خطای حاصل از عملکرد تصادفی الگوریتم‌ها کاهش یابد. در ادامه فرض مساوی بودن نتایج سناریوها در الگوریتم ژنتیک اول و در الگوریتم ژنتیک دوم با استفاده از آزمون طرح بلوک‌های تصادفی شده مورد آزمایش قرار گرفت که با توجه به نتایج حاصله فرض مساوی بودن نتایج سناریوها در الگوریتم ژنتیک اول و در الگوریتم ژنتیک دوم رد شد. در نهایت به منظور فاش کردن تفاوت‌های واقعی بین سناریوها از آزمون دامنه چندگانه دانکن در هر یک از الگوریتم‌ها بهره برده شده است و سناریوی مناسب برای هر الگوریتم انتخاب شده است. مقدار پارامترها در سناریوی منتخب جهت الگوریتم ژنتیک اول و الگوریتم ژنتیک دوم به شرح جدول ۱ است.

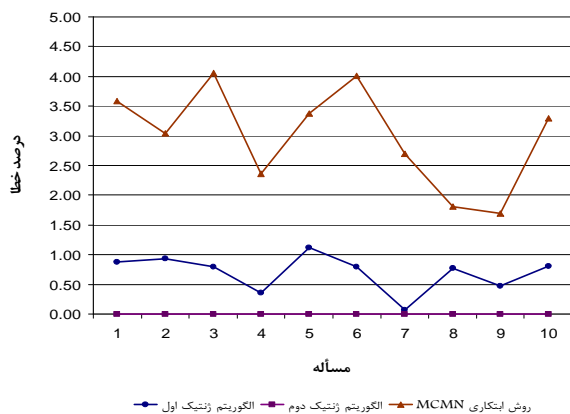
جدول ۱. پارامترهای سناریوی منتخب جهت الگوریتم‌ها

پارامترهای سناریوی منتخب	الگوریتم ژنتیک اول	الگوریتم ژنتیک دوم
جمعیت اولیه	۱۰۰	۱۰۰
نرخ نگهداشت	۰،۶	۰،۶
نرخ تقاطع	۰،۷	۰،۷
تعداد نخبه	۳۰	۳۰
نرخ جهش	۰،۰۱	۰
نرخ تشدیدگرایی	-	۰،۰۵
نرخ تنوع‌گرایی	-	۰،۰۵

پس از تعیین پارامترهای مناسب جهت الگوریتم‌های ژنتیک و طراحی مسائل نمونه به منظور مقایسه روش‌های حل ارائه شده، تعداد ۱۰ مسأله ۲ تا ۱۰ خانواده‌قطعه‌ای، ۱۰ مسأله ۱۱ تا ۲۰ خانواده‌قطعه‌ای و ۱۰ مسأله ۲۱ تا ۳۰ خانواده‌قطعه‌ای حل شده و برای پرهیز از هرگونه خطای تصادفی هر مسأله ۱۰ بار اجرا شده است و بهترین جواب در هر الگوریتم به عنوان جواب الگوریتم منظور شده است. به منظور مقایسه روش‌ها، از دو شاخص متوسط مدت زمان اجرای الگوریتم و درصد خطای جواب استفاده شده است. برای محاسبه درصد خطا از رابطه (۲۹) استفاده شده است که در این رابطه *BR* بهترین جواب حاصل از حل مسأله توسط الگوریتم‌های ارائه شده و *RA* نتیجه حاصل از حل الگوریتم مورد بررسی است.

$$RG = \frac{RA - BR}{BR} \quad (29)$$

همچنین نتایج حاصل از حل مسائل ۲۱ تا ۳۰ خانواده قطعه‌ای نشان می‌دهد که میانگین درصد خطا در الگوریتم ژنتیک اول ۰،۷ درصد، در الگوریتم ژنتیک دوم ۰،۰ درصد و در روش ابتکاری MCMN ۲،۹۹ درصد است و همچنین میانگین مدت زمان اجرا در الگوریتم ژنتیک اول ۶۴، در الگوریتم ژنتیک دوم ۸۲ و در روش ابتکاری MCMN ۰،۶۷ ثانیه است. بنابراین الگوریتم ژنتیک دوم در مسائل ۲۱ تا ۳۰ خانواده قطعه‌ای جواب‌های بهتری ارائه می‌کند.



شکل ۳. نمودار درصد خطای الگوریتم‌ها در مسائل ۲۱ تا ۳۰ خانواده قطعه‌ای

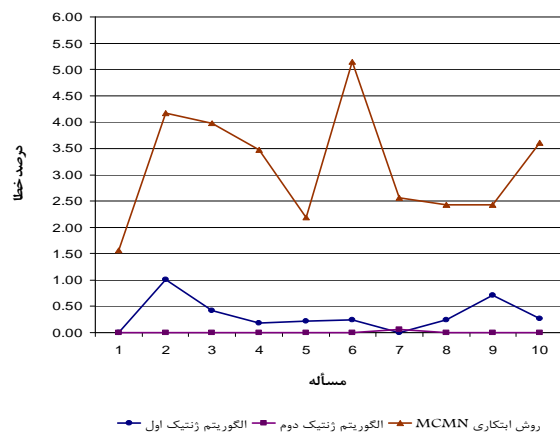
همانطور که از نتایج حل مسائل کوچک، متوسط و بزرگ مشخص می‌شود که الگوریتم ژنتیک دوم نسبت به سایر روش‌ها دارای درصد خطای کمتری است درحالی‌که روش ابتکاری MCMN دارای بیشترین درصد خطا و کمترین مدت زمان اجرا نسبت به سایر روش‌ها است.

### ۶. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از رویکرد اثربادگیری موقعیت‌گرا در مسأله زمان‌بندی گروهی در سیستم تولید سلولی استفاده شد. در ادامه مدل یادگیری دژونگ برای مسأله زمان‌بندی گروهی انتخاب شده و این مسأله با فرض ساختار جریان کارگاهی چند ماشین و با هدف کمینه‌سازی بیشترین زمان تکمیل کارها مدل‌سازی شد. به منظور حل مسأله مدل‌سازی شده، یک روش ابتکاری و دو الگوریتم ژنتیک مختلف توسعه داده شد و با تولید مسائل نمونه کارایی روش‌های حل پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج عددی حاصل از حل مسائل نمونه نشان داد که الگوریتم ژنتیک دوم از لحاظ کیفیت جواب و روش ابتکاری از لحاظ زمان حل بهتر عمل می‌کنند. در این مسأله فرض شده است که تمامی قطعات یک خانواده‌قطعه می‌توانند در یک سلول پردازش شوند. اما در بعضی مواقع در سیستم تولید سلولی نمی‌توان تمامی قطعات را در یک سلول تولید کرد بنابراین قطعات ناچار از یک سلول برای انجام عملیاتی خاص به سلول دیگری منتقل می‌شوند.

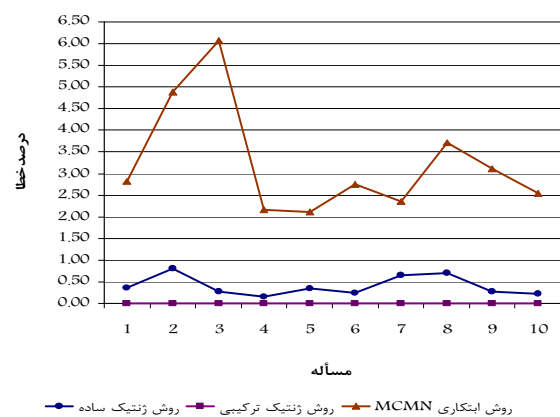
### ۵-۳. نتایج کار

نتایج حاصل از حل مسائل ۲ تا ۱۰ خانواده قطعه‌ای نشان می‌دهد که میانگین درصد خطا در الگوریتم ژنتیک اول ۰،۳۳ درصد، در الگوریتم ژنتیک دوم ۰،۰۱ درصد و در روش ابتکاری MCMN ۳،۱۶ درصد است و همچنین میانگین مدت زمان اجرا در الگوریتم ژنتیک اول ۱۶،۵، در الگوریتم ژنتیک دوم ۲۱،۲ و در روش ابتکاری MCMN ۰،۱ ثانیه است. بنابراین الگوریتم ژنتیک دوم در مسائل ۲ تا ۱۰ خانواده قطعه‌ای جواب‌های بهتری ارائه می‌کند.



شکل ۱. نمودار درصد خطای الگوریتم‌ها در مسائل ۲ تا ۱۰ خانواده قطعه‌ای

نتایج حاصل از حل مسائل ۱۱ تا ۲۰ خانواده قطعه‌ای نیز نشان می‌دهد که میانگین درصد خطا در الگوریتم ژنتیک اول ۰،۴ درصد، در الگوریتم ژنتیک دوم ۰،۰ درصد و در روش ابتکاری MCMN ۳،۲۵ درصد است و همچنین میانگین مدت زمان اجرا در الگوریتم ژنتیک اول ۴۶، در الگوریتم ژنتیک دوم ۶۳،۸ و در روش ابتکاری MCMN ۰،۲۷ ثانیه است. بنابراین الگوریتم ژنتیک دوم در مسائل ۱۱ تا ۲۰ خانواده قطعه‌ای نیز جواب‌های بهتری را ارائه می‌کند.



شکل ۲. نمودار درصد خطای الگوریتم‌ها در مسائل ۱۱ تا ۲۰ خانواده قطعه‌ای

- [14] Kuo, W., Yang, D., "Single-Machine Scheduling with Past-Sequence-Dependent Setup Times and Learning Effects", Information Processing Letters, Vol. 102, 2007, pp. 22-26.
- [15] Nanda, R., Alder, G. L., *Learning Curves: Theory and Application*, Atlanta: Industrial Engineering & Management Press, 1982.
- [16] Schaller, J.E., Gupta, J.N.D., Vakharia, A.J., "Scheduling a Flowline Manufacturing Cell with Sequence Dependent Family Setup Times", European Journal of Operational Research, Vol. 125, No. 2, 2000, pp. 324-339.
- [17] Logendran, R., Salmasi, N., Sriskandarajah, C., "Two-Machine Group Scheduling Problems in Discrete Parts Manufacturing with Sequence-Dependent Setups", Computers & Operations Research, Vol. 33, 2006, pp. 158-180.
- [18] Zegordi, S.H., Itoh, K., Enkawa, T., "A Knowledge Smulated Annealing Scheme for the Early/Tardy Flow Shop Scheduling Problem", International Journal of Production Research, Vol. 33, No. 5, 1995, pp. 1449-1466.

لذا با در نظر گرفتن امکان حرکات بین سلولی می‌توان مدل فوق را توسعه داد. در این مسأله، ساختار سلول‌ها به صورت جریان کارگاهی فرض شده است. همچنین می‌توان مسأله فوق را جهت سیستم ساخت انعطاف‌پذیر (FMS) در تحقیقات آتی توسعه داد.

### مراجع

- [1] Irani, S.I., *Handbook of Cellular Manufacturing Systems*, John Wiley & Sons Ltd, 1999.
- [2] Biskup, D., "A State-of-the-Art Review on Scheduling with Learning Effects", European Journal of Operational Research, Vol. 188, issue 2, 2008, pp. 315-329.
- [3] Biskup, D., "Single-Machine Scheduling with Learning Considerations", European Journal of Operational Research, Vol. 115, 1999, pp. 173-178.
- [4] Mosheiov, G., "Scheduling Problems with a Learning Effect", European Journal of Operational Research, Vol. 132, 2001a, pp. 687-693.
- [5] Mosheiov, G., "Parallel Machine Scheduling with a Learning Effect", Journal of the Operational Research Society, Vol. 52, 2001b, pp. 1-5.
- [6] Lee, W., Wu, C., Sung, H., "A Bi-Criterion Single-Machine Scheduling Problem with Learning Considerations", Acta Informatica, Vol. 40, 2004, pp. 303-315.
- [7] Lee W., & Wu C., "Minimizing total completion time in a two-machine flowshop with a learning effect", International Journal of Production Economics, Vol. 88, 2004, pp. 85-93.
- [8] Bachman, A., Janiak, A., "Scheduling Jobs with Position-Dependent Processing Times", Journal of the Operational Research Society, Vol. 55, 2004, pp. 257-264.
- [9] Zhao, C.-L., Zhang, Q.-L., Tang, H.-Y., "Machine Scheduling Problems with Learning Effects", Dynamics of Continuous, discrete and Impulsive Systems, Series A: Mathematical Analysis, Vol. 11, 2004, pp. 741-750.
- [10] Chen, P., Wu, C.-C., Lee, W.-C., "A bi-Criteria Two-Machine Flow Shop Scheduling Problem with a Learning Effect", Journal of the Operational Research Society, Vol. 57, 2006, pp.1113-1125.
- [11] Koulamas, C., Kyparisis, G.J., "Single-Machine and Two-Machine Flowshop Scheduling with General Learning Function", European Journal of Operational Research, Vol.178, 2007, pp. 402-407.
- [12] Wang, J., Xia, Z., "Flow-Shop Scheduling with a Learning Effect", Journal of the Operational Research Society, Vol. 56, 2005, pp. 1325-1330.
- [13] Eren, T., Guner, E., "Minimizing Total Tardiness in a Scheduling Problem with a Learning Effect", Applied Mathematical Modelling, Vol. 31, 2007, pp. 1351-1361.