

# زمان بندی خط مونتاژ جریان کارگاهی دومرحله‌ای با در نظر گرفتن اثر کهولت در زمان پردازش، محدودیت دسترسی به کارها و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه عادلہ رزقی<sup>۱</sup>، جواد رضائیان\*<sup>۲</sup>

۱. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران

۲. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران

(تاریخ دریافت: ۹۵/۱۰/۱۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۶/۰۳/۲۳، تاریخ تصویب ۹۶/۰۴/۱۳)

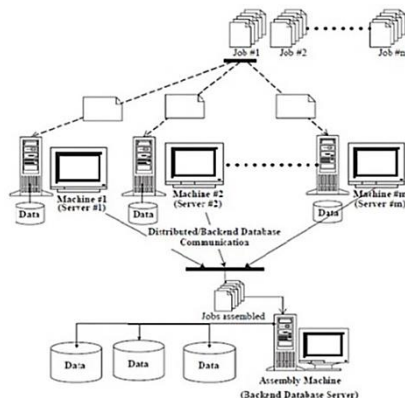
## چکیده

رقابت بین‌المللی و توانایی پاسخ به تغییرات بازار از ویژگی‌های کلیدی در طراحی سیستم کارآمد تولیدی است. جریان کارگاهی مونتاژ دومرحله‌ای، سیستمی ترکیبی است که در آن قطعات مختلف بر روی ماشین‌های موازی به صورت غیرمستقل تولید می‌شود. این سیستم روشی است که برای تولید طیف وسیعی از کالاها با مونتاژ و ترکیب قطعات مختلف به کار می‌رود. در این تحقیق مسئله زمان بندی خط جریان مونتاژ دومرحله‌ای با در نظر گرفتن اثر استهلاک ماشین‌ها و فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات بررسی شده است. برای مسئله مورد نظر ابتدا یک مدل ریاضی عدد صحیح ارائه شده است. همچنین با حل یک نمونه کوچک عملکرد آن نمایش داده و تحلیل حساسیت‌های مختلف برای آن ارائه شده است. برای حل در ابعاد متوسط و بزرگ نیز الگوریتم‌های فرا ابتکاری HGA و HPSO دریافت شده است که به ترتیب ترکیبی از الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم تجمع پرندگان هستند. تنظیم پارامترهای دو الگوریتم نیز با استفاده از روش آماری تاگوچی انجام شده است. نتایج دو الگوریتم نشان می‌دهد الگوریتم HPSO در مقایسه با الگوریتم HGA، از نظر به دست آوردن پاسخ‌های با کیفیت تر (بر اساس سنجۀ مقدار تابع هدف) در مسائلی با ابعاد بزرگ کیفیت بیشتری دارد.

**واژه‌های کلیدی:** اثر استهلاک، الگوریتم ژنتیک، زمان بندی خط جریان مونتاژ دومرحله‌ای، شبیه‌سازی تبرید، نگهداری و تعمیرات.

## مقدمه

در محیط جریان مونتاژ دومرحله‌ای، تسهیلات تولیدی در دو مرحله پردازش می‌شود. مرحله اول شامل چندین ماشین موازی است و مرحله دوم تنها یک ماشین مونتاژ دارد. جریان مونتاژ دومرحله‌ای در کلاس محیط‌های جریان کارگاهی قرار می‌گیرد. در این محیط، هدف یافتن توالی کارهاست؛ زیرا کارها با همان توالی که وارد مرحله اول می‌شوند، به ماشین مونتاژ در مرحله دوم تخصیص می‌یابند. در شکل ۱ کلیات محیط جریان مونتاژ دومرحله‌ای نشان داده شده است [۲].



شکل ۱. زمان بندی جریان مونتاژ دومرحله‌ای [۳]

با توجه به پیشرفت روزافزون صنعت، منابع موجود مانند ماشین‌آلات، نیروی انسانی و سایر تسهیلات برای پاسخ‌گویی به صنایع، حالت بحرانی به خود می‌گیرند. زمان بندی بر روی چنین منابع بحرانی، موجب ارتقای کارایی، بهره‌وری و در نهایت سودآوری بیشتر صنایع می‌شود. به طور معمول زمان بندی با توجه به اهدافی نظیر دستیابی به موعدهای تعهد شده، کمینه سازی زمان کار در جریان ساخت و موجودی کار در جریان ساخت، بیشینه سازی خروجی و بهره‌برداری بیشتر از مراکز کاری انجام می‌شود.

با توجه به اینکه اجزای تولید مورد نظر اغلب در خط تولید به صورت جداگانه ساخته شده، و در مرحله نهایی مونتاژ می‌شوند، زمان بندی محیط خط جریان مونتاژ دومرحله‌ای<sup>۱</sup> در مسائل دنیای واقعی بسیار مهم است، همچنین در نظر گرفتن اثر استهلاک و به کارگیری روش‌های نگهداری و تعمیرات به منظور جلوگیری توقف تولید از ملزومات مراکز تولیدی به شمار می‌آید. [۱]

مبتنی بر تکرار<sup>۵</sup> است، در این استهلاک تعداد صحیحی از کارهای پردازش شده تاکنون، مدنظر قرار می‌گیرد. نوع دیگری از استهلاک، رویکرد مجموع زمان پردازش است که در آن به زمان پردازش تمام کارهایی که تاکنون انجام شده توجه می‌شود.

گفتنی است هر یک از این رویکردها اعتبار کافی دارند. در رویکرد مبتنی بر تکرار فرض می‌شود که استهلاک براساس زمان پردازش عملیات مستقل مثل آماده‌سازی و تنظیم ماشین‌آلات رخ می‌دهد. این فرض در مواقعی که زمان پردازش کارها اساساً خودکار و با ماشین و بدون دخالت انسان انجام شود، جنبه کاربردی خواهد داشت [۱۰].

دارلی یانگ [۹] با استفاده از فرمول زیر، اثر استهلاک را در محیط‌های زمان‌بندی فرموله کرد که در آن  $p_i = 1, 2, \dots, n$  زمان پردازش عادی کار،  $t_{ir}$  و  $p_{ir}$  زمان پردازش کار  $t_{ir}$  در موقعیت  $r$ ام است.

$$p_{ir} = p_i * r^\alpha$$

با در نظر گرفتن معادله بالا، زمان پردازش کارها با افزایش تکرار بیشتر می‌شود؛ یعنی استهلاک صرفاً براساس تعداد کارهای مستقل از زمان پردازش آن افزایش می‌یابد. این فرمول تقریبی از چگونگی تأثیر استهلاک روی زمان پردازش کارها ارائه می‌دهد. رویکرد دیگری که در آن، زمان پردازش به موقعیت انجام کار در توالی وابسته است به صورت زیر است:

$$p_{ir} = p_i + b.r$$

پیچیدگی مطرح شده در محیط زمان‌بندی خط جریان مونتاژ، با در نظر گرفتن اثر استهلاک و کمینه کردن هزینه‌های مربوط به زودکرد و دیرکرد، همچنین هزینه‌های مربوط به نگهداری و تعمیرات، پیچیدگی بیشتری دارند. به طور کلی می‌توان بیشتر مسائل دنیای واقعی را که در آن تولید محصول به مرحله مونتاژ نیازمند است در حوزه مسائل خط جریان مونتاژ جای داد. اهمیت این مسئله سبب ایجاد انگیزه برای حذف مفروضات ساده‌ساز و نزدیکی هرچه بیشتر مدل‌سازی مسئله، با در نظر گرفتن اثر استهلاک به دنیای واقعی می‌شود، اما تاکنون هیچ پژوهش منتشر شده‌ای نبوده است که هم‌زمان مفروضات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، اثر کهولت در زمان پردازش و محدودیت دسترسی به کارها را مدنظر قرار داده باشد.

در ادامه، مسئله در قالب یک مدل ریاضی، مدل‌سازی و

گفتنی است نگهداری و تعمیرات ماشین‌آلات یا ابزارآلات در یک کارگاه سبب می‌شود آن‌ها در وضعیت عملیاتی مناسب نگه داشته شوند (نگهداری و تعمیرات سبب افزایش در دسترس‌پذیری سیستم می‌شود) و هزینه‌های سیستم به علت جلوگیری از شکست‌های غیرمنتظره کاهش می‌یابد [۳].

از جمله پژوهش‌ها در این زمینه می‌توان به پژوهش بریچی<sup>۲</sup> و همکاران [۴] اشاره کرد که از الگوریتم‌های بهینه‌سازی دودفه *NSGAI, WSGA* برای زمان‌بندی تولید و نگهداری در مسئله ماشین‌های موازی استفاده کردند، هدف آنان حداقل کردن زمان تکمیل نهایی با در نظر گرفتن محدودیت دسترسی به سیستم تولیدی بوده است. در مسائل زمان‌بندی کلاسیک، زمان پردازش کارها ثابت فرض می‌شود. در صورتی که واقعیت زمان پردازش کار ممکن است به موقعیت آن در توالی وابسته باشد [۵]، این پدیده اثر یادگیری<sup>۳</sup> یا اثر استهلاک<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. در فضای یادگیری کارهایی با توالی‌های دورتر، زمان پردازش کمتر و کارهایی با توالی‌های دورتر در فضای استهلاک، زمان طولانی‌تری دارند.

شایان ذکر است که نخستین مطالعات زمان‌بندی با در نظر گرفتن اثر استهلاک را موشیو [۶] ارائه کرد، همچنین گوردون و همکاران [۷] مسائل متنوعی از زمان‌بندی یک ماشین را مطالعه کردند و دریافتند که زمان پردازش یک کار به موقعیت انجام آن کار در توالی یا زمان شروع آن وابسته است. از پژوهش‌های اخیر در این زمینه می‌توان به مقاله مزدگیر و همکاران [۸] اشاره کرد. در این تحقیق، مسئله خط جریان مونتاژ با چند ماشین مونتاژ در ایستگاه دوم در نظر گرفته شد که هدف آن حداقل کردن مجموع وزنی زمان تکمیل نهایی و کل زمان تکمیل کارها بود، همچنین زمان‌های آماده‌سازی وابسته به توالی در نظر گرفته شد.

عامل مؤثر دیگر در جریان تولید، عملیات نگهداری و تعمیرات، یعنی انجام فعالیت‌های بازرسی، بازدید، تنظیم، تعویض و تعمیر قطعات و ماشین‌آلات است که به صورت دوره‌ای و برنامه‌ریزی شده انجام می‌شود. باید توجه داشت هدف از این فعالیت‌ها جلوگیری از توقف‌های پیش‌بینی نشده ماشین‌آلات و تجهیزات، و کاهش تعمیرات اساسی است.

شایان ذکر است که نخستین نوع استهلاک، استهلاک

- اثر استهلاک با توجه به تعداد کارهایی که ماشین انجام می‌دهد محاسبه می‌شود.
- نرخ استهلاک هر ماشین مشخص و ثابت است.

#### اندیس‌ها

$i: i = 1, 2, \dots, n$  اندیس مربوط به کار؛

$j: j = 1, 2, \dots, n$  اندیس مربوط به توالی انجام کار؛

$r: r = 1, 2, \dots, n$  اندیس مربوط به جایگاه انجام کار؛

$g: g = 0, 1, \dots, n-1$  اندیس مربوط به عملیات

نگهداری و تعمیرات که مقدار صفر مربوط به PM

فرضی ابتدای هر ماشین است. حداکثر دفعات انجام

PM نیز با  $n-1$  برابر است.

$h: h = 1, 2, \dots, m$  اندیس مربوط به ماشین.

#### پارامترها

پارامترهای مدل عبارت‌اند از:

$\alpha_i$ : جریمه دیرکرد کار  $i$  به ازای هر واحد زمان؛

$d_i$ : موعد تحویل کار  $i$ ؛

$R_i$ : زودترین زمان ممکن برای شروع پردازش کار  $i$ ؛

$t_h$ : زمان مورد نیاز برای انجام عملیات تعمیر و نگهداری بر

روی ماشین  $h$

$F_h$ : هزینه انجام عملیات نگهداری و تعمیرات روی ماشین  $h$ ؛

$p_{ih}$ : زمان انجام کار  $i$  روی ماشین  $h$ ؛

$a_{ih}$ : نرخ استهلاک ماشین  $h$  به ازای کاری که در جایگاه  $i$

انجام می‌شود.

$M$ : یک عدد بزرگ دلخواه.

#### متغیرهای تصمیم

$T_i$ : مدت زمان دیرکرد کار  $i$  به موعد تحویل آن؛

$C_{ijh}$ : زمان تکمیل کار  $i$  که در توالی  $j$  روی ماشین  $h$

انجام می‌شود؛

$CC_i$ : زمان تکمیل کار  $i$  در بخش اول؛

$x_{ij}$ : اگر کار  $i$  در توالی  $j$  انجام شود، متغیر باینری برابر

۱ است؛ در غیر این صورت با صفر برابر است؛

$y_{ijrgh}$ : اگر کار  $i$  در توالی  $j$  در موقعیت  $r$  بعد از عملیات

نگهداری  $g$  روی ماشین  $h$  انجام شود، متغیر باینری

برابر ۱ است؛ در غیر این صورت برابر صفر است.

$z_{gh}$ : اگر عملیات نگهداری  $g$  روی ماشین  $h$  انجام شود،

متغیر باینری برابر ۱ است.

تشریح شده است. در بخش سوم، اعتبارسنجی مدل ارائه، و در ادامه رویکرد حل با استفاده از الگوریتم ژنتیک ترکیبی و الگوریتم تجمع ذرات ترکیبی آورده شده است. در بخش بعدی، به تنظیم پارامترها و تحلیل و بررسی نتایج محاسباتی پرداخته می‌شود. در نهایت، در بخش آخر، نتیجه گیری و ارائه پیشنهادها آتی بیان شده است.

#### تشریح مسئله و مدل‌سازی ریاضی

در این بخش، مسئله مورد نظر به همراه فرضیات، پارامترها، متغیرها و مدل برنامه‌ریزی ریاضی مسئله معرفی می‌شوند.

#### بیان مسئله و فرضیات مدل

با توجه به اهمیت موضوع زمان‌بندی و تعیین توالی بهینه کارها در محیط خط مونتاژ جریان کارگاهی دومرحله‌ای، در این بخش به ارائه مدل ریاضی برای این نوع مسائل با در نظر گرفتن هم‌زمان نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، اثر کهولت در زمان پردازش و محدودیت دسترسی به کارها پرداخته می‌شود. گفتنی است هدف ارائه این مدل حداقل کردن هزینه‌های مربوط به دیرکرد و هزینه‌های نگهداری و تعمیرات است.

عمده فرضیات مسئله به شرح ذیل عنوان می‌شود:

- تمامی کارها در ابتدای دوره برنامه‌ریزی در دسترس نیستند.
- انقطاع در انجام کارها مجاز نیست.
- هر ماشین در لحظه نمی‌تواند بیشتر از یک کار را پردازش کند.
- مرحله اول دارای  $m-1$  ماشین متفاوت موازی، و مرحله دوم شامل یک ماشین است که بخش‌های انجام شده در قسمت قبل را مونتاژ می‌کند.
- می‌توان کارها را بین دو کارگاه معلق نگه داشت. ظرفیت این انبارها نامحدود فرض شده است.
- زمان‌های حمل و نقل ناچیز بوده یا در زمان انجام در نظر گرفته شده است.
- با انجام فرایند بر روی کارها ابزارهای مورد استفاده در ماشین‌ها مستهلک، و از سرعت آن‌ها کاسته می‌شود.
- ابزارها به دنبال تعمیرات و نگهداری، به شرایط ابتدایی خود بازمی‌گردند.

ارائه مدل

مدل مورد نظر به شرح زیر است:

$$CC_i \geq \sum_{j=1}^n C_{ijh}$$

$$i = 1, \dots, n, h = 1, \dots, m-1 \quad (14)$$

$$C_{ijh} \geq CC_i + p_{ih} * (1+r * a_{ih}) - (1-y_{ijrh}) * M$$

$$i, j, r = 1, \dots, n, g = 0, \dots, n-1, h = m \quad (15)$$

$$T_i \geq C_{ijh} - d_i \quad i, j = 1, \dots, n, \forall h = m \quad (16)$$

$$y_{ijrh} * z_{gh} * x_{ij} \in \{0, 1\}$$

$$i, j, r = 1, \dots, n, g = 0, \dots, n-1, h = 1, \dots, m \quad (17)$$

$$C_{ijh}, CC_i \geq 0 \quad i, j = 1, \dots, n, h = 1, \dots, m \quad (19)$$

معادله ۱ نشان دهنده تابع هدف است که بخش اول آن مجموع جریمه دیرکردها و بخش دوم آن مجموع هزینه‌های نگهداری و تعمیرات را محاسبه می‌کند. در محدودیت ۲ درمی‌یابیم که هر کار فقط در یک توالی انجام می‌شود. محدودیت ۳ مشخص می‌کند که در هر توالی فقط باید یک کار انجام شود. در محدودیت ۴ می‌بینیم که همه ماشین‌ها به رعایت توالی انجام کارها ملزم هستند. محدودیت ۵ نشان می‌دهد که در هر جایگاه روی هر ماشین فارغ از تعداد دفعات تعمیراتی که بر ماشین مورد نظر انجام شده است، حداکثر یک کار انجام می‌شود. در محدودیت ۶ ملزم شده است که پس از هر نگهداری و تعمیر، حداقل یک کار در سیستم برای پردازش موجود باشد تا تعمیر بهبود یافته برنامه‌ریزی نشود و در نتیجه هزینه تعمیر بر سیستم تحمیل نگردد. محدودیت ۷ بیان می‌کند، در صورتی عملیات  $g$  نگهداری روی یک ماشین انجام می‌شود که عملیات  $g-1$  روی آن ماشین انجام شده باشد. در محدودیت ۸ مشخص می‌شود که اگر عملیات نگهداری انجام نشود، هیچ‌کاری در موقعیت پس از آن عملیات قرار نمی‌گیرد. محدودیت ۹ تعیین می‌کند در صورتی یک کار در جایگاه  $r$  قرار می‌گیرد که جایگاه  $r-1$  (جایگاه پیش از آن) تهی نباشد. در محدودیت‌های ۱۰ و ۱۱ این الزام به وجود می‌آید که اولویت  $j$  همیشه پس از اولویت  $j-1$  انجام شود.

محدودیت ۱۲ و ۱۳ حداقل مقدار زمان تکمیل کارها را در بخش اول تعیین می‌کند. در محدودیت ۱۴ نیز حداقل مقدار زمان تکمیل کار  $i$  در بخش اول مشخص می‌شود. محدودیت

$$Min Z = \sum_{i=1}^n \alpha_i T_i + \sum_{h=1}^M \sum_{g=1}^{n-1} F_h Z_{gh} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{r=1}^n \sum_{g=0}^{n-1} y_{ijrh} = x_{ij} \quad i, j = 1, \dots, n, h = 1, \dots, m \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_{ijrh} \leq 1 \quad g = 0, \dots, n-1, h = 1, \dots, m, r = 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_{ij1gh} = z_{gh} \quad g = 0, \dots, n-1, h = 1, \dots, m \quad (6)$$

$$z_{gh} \leq z_{g-1h} \quad g = 1, \dots, n-1, h = 1, \dots, m \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{r=1}^n y_{ijrh} \leq z_{gh} * M \quad g = 0, \dots, n-1, h = 1, \dots, m \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_{ijrh} \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_{ij(r-1)gh} \quad g = 0, \dots, n-1, h = 1, \dots, m, r = 2, \dots, n \quad (9)$$

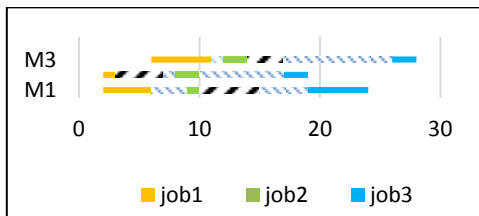
$$\sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^{r-1} y_{ij+1rgh} \leq (1-y_{ijrh}) * M \quad i, r = 1, \dots, n, g = 0, \dots, n-1, h = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n-1 \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^n \sum_{g=1}^{g-1} y_{ij+1rgh} \leq (1-y_{ijrh}) * M \quad i, r = 1, \dots, n, g = 0, \dots, n-1, h = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n-1 \quad (11)$$

$$C_{ijh} \geq R_i + p_{ih} * (1+r * a_{ih}) - (1-y_{ijrh}) * M \quad i, j, r = 1, \dots, n, g = 0, \dots, n-1, h = 1, \dots, m \quad (12)$$

$$C_{ijh} \geq \sum_{i=1}^n C_{i(j-1)h} + p_{ih} * (1+r * a_{ih}) + y_{ij1gh} * t_h - (1-y_{ijrh}) * M \quad i, r = 1, \dots, n, j = 2, \dots, m, g = 0, \dots, n-1, h = 1, \dots, m \quad (13)$$

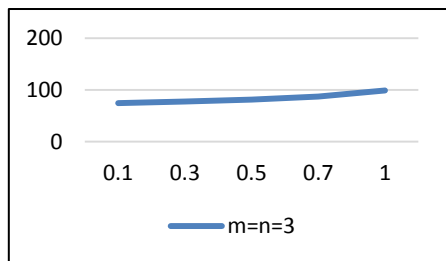
در شکل ۲ توالی انجام کارها روی ماشین ها نمایش داده می شود. نواحی هاشورخورده کم رنگ نشان دهنده زمان بیکاری ماشین ها، و نواحی هاشورخورده پر رنگ انجام فعالیت های PM را روی ماشین ها نشان می دهد.



شکل ۲. نمودار گانت

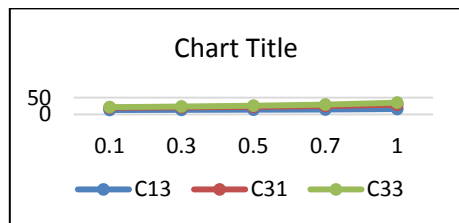
### اثر استهلاک بر مدل پیشنهادی

در این بخش اثر استهلاک بر مقدار تابع هدف و زمان تکمیل کارها نشان داده شده که به ترتیب در نمودارهای ۳ و ۴ آمده است. در هر دو نمودار با در نظر گرفتن مثال عددی ارائه شده در بخش قبل، تنها مقدار استهلاک در هر بار متغیر در نظر گرفته شده و سایر پارامترها ثابت فرض شده است، همچنین مقدار عددی استهلاک برای تمامی کارها بر روی تمامی ماشین ها مقدار ثابتی است.



شکل ۳. نمودار اثر استهلاک بر مقدار تابع هدف برای  $m=n=3$

در نمودار ۳ مشاهده می شود که با افزایش استهلاک وارد شده از کار به ماشین، مقدار تابع هدف افزایش می یابد و در نتیجه هزینه دیرکرد، نگهداری و تعمیرات به سیستم تحمیل می شود.



شکل ۴. نمودار اثر استهلاک بر زمان تکمیل کاره

۱۵ حداقل مقدار زمان تکمیل کارها را در بخش دوم تعیین می کند. محدودیت ۱۶ میزان دیرکرد از موعد تحویل هر کار را نشان می دهد. در محدودیت ۱۷ متغیرهای باینری، و در محدودیت ۱۸ متغیرهای نامنفی مشخص می شود.

### اعتبارسنجی مدل ارائه شده

در این بخش به منظور صحت گذاری مدل ارائه شده و تصدیق صحت عملکرد آن، مسئله ای در اندازه بسیار کوچک تولید، و با نرم افزار لینگو حل می شود، همچنین با توجه به اینکه یکی از موضوعات مهم این پژوهش اثر کهولت بر زمان پردازش و در نهایت مقادیر تابع هدف است، در بخش بعد نیز اثر این فاکتور تحلیل می شود. مسئله ای که باید بررسی شود، شامل ۳ کار، ۳ ماشین و پارامترهای ورودی مسئله به شرح زیر است:

زمان پردازش			
$P(i,j)$	$M1$	$M2$	$M3$
Job(1)	۱	۲	۲
Job(2)	۴	۱	۵
Job(3)	۵	۲	۲
اثر استهلاک			
$a(i,j)$	$M1$	$M2$	$M3$
Job(1)	۰/۸	۰/۱	۰/۷
Job(2)	۰/۹	۰/۸	۰/۷
Job(3)	۰/۶	۰/۹	۰/۷

زمان دسترسی:  $R=8$  2 14، زمان تعمیر:  $t=5$  4 3، هزینه تعمیر:  $f=10$  8 10، موعد تحویل:  $D=3$  4 16 و هزینه دیرکرد:  $\alpha=4$  4 1. در نتیجه، حل مسئله فوق توالی مناسب برای رسیدن به بهترین هدف  $J_2-J_1-J_3$  است. خروجی های مسئله نیز شامل زمان تکمیل کارها روی ماشین ها، انجام فعالیت های نگهداری و تعمیرات و مقدار تابع هدف به صورت زیر است:

زمان تکمیل کار			
$C(i,j)$	$M1$	$M2$	$M3$
Job(1)	۱۰	۱۰	۱۴
Job(2)	۶	۳	۱۱
Job(3)	۲۴	۱۹	۲۸
PM			
$M1$	۱۰		
$M2$	۱۰		
$M3$	۱۰		

مقدار تابع هدف = ۸۵

	$f_1$	$f_2$	$f_3$
$M_1$	0.21	0.76	0.19
$M_2$	0.64	0.48	0.93
$M_3$	0.52	0.82	0.34

شکل ۵. ساختار کروموزوم پیشنهادی

۲. تولید جمعیت پاسخ‌های اولیه؛
۳. تعیین تابع مناسبت؛
۴. تعیین سیاست انتخاب؛
۵. تعیین عملگرهای ژنتیکی.

### ۱. تقاطع

به منظور اجرای عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای هر بخش از کروموزوم، از ماتریس راهنما استفاده می‌شود که ابعادش با ابعاد آن بخش مربوط برابر است. باید توجه داشت این ماتریس راهنما درایه‌های باینری دارد (شکل ۶)

والد ۱	ماتریس راهنما	فرزند ۱																											
<table border="1"> <tr><td>0.21</td><td>0.51</td><td>0.08</td></tr> <tr><td>0.94</td><td>0.35</td><td>0.87</td></tr> <tr><td>0.64</td><td>0.71</td><td>0.26</td></tr> </table>	0.21	0.51	0.08	0.94	0.35	0.87	0.64	0.71	0.26	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	0	1	0	1	0	0	1	1	1	<table border="1"> <tr><td>0.63</td><td>0.51</td><td>0.73</td></tr> <tr><td>0.94</td><td>0.52</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>0.64</td><td>0.71</td><td>0.26</td></tr> </table>	0.63	0.51	0.73	0.94	0.52	0.12	0.64	0.71	0.26
0.21	0.51	0.08																											
0.94	0.35	0.87																											
0.64	0.71	0.26																											
0	1	0																											
1	0	0																											
1	1	1																											
0.63	0.51	0.73																											
0.94	0.52	0.12																											
0.64	0.71	0.26																											
والد ۲		فرزند ۲																											
<table border="1"> <tr><td>0.63</td><td>0.46</td><td>0.73</td></tr> <tr><td>0.19</td><td>0.52</td><td>0.12</td></tr> <tr><td>0.26</td><td>0.91</td><td>0.66</td></tr> </table>	0.63	0.46	0.73	0.19	0.52	0.12	0.26	0.91	0.66		<table border="1"> <tr><td>0.21</td><td>0.46</td><td>0.08</td></tr> <tr><td>0.19</td><td>0.35</td><td>0.87</td></tr> <tr><td>0.26</td><td>0.91</td><td>0.66</td></tr> </table>	0.21	0.46	0.08	0.19	0.35	0.87	0.26	0.91	0.66									
0.63	0.46	0.73																											
0.19	0.52	0.12																											
0.26	0.91	0.66																											
0.21	0.46	0.08																											
0.19	0.35	0.87																											
0.26	0.91	0.66																											

بخش اول والد اول	0.16	0.91	0.82	0.59
بخش اول والد دوم	0.27	0.49	0.73	0.32
ماتریس راهنما	0	1	1	0
بخش اول فرزند اول	0.16	0.49	0.73	0.59
	0.27	0.49	0.73	0.59

شکل ۶. عملگر ژنتیکی تقاطع

### ۲. جهش

در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی این عملگر نیز برای هر دو بخش کروموزوم متفاوت است. برای بخش اول از روش معکوس‌سازی استفاده می‌شود؛ به این صورت که پس از انتخاب تصادفی دو ستون، درایه‌های بین این دو از آخر به اول مرتب می‌شود (شکل ۷).

در شکل ۴، سه کار برای نمونه در نظر گرفته شده و اثر ازدیاد استهلاک در هر بار بر روی زمان تکمیل کارها محاسبه شده است.

### روش‌های حل فرا ابتکاری

به دلیل وجود پیچیدگی ساختاری که در حل مسئله زمان‌بندی خط جریان مونتاژ دومرحله‌ای وجود دارد و  $N_p$  hard بودن آن [۱]، استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های فرا ابتکاری برای حل این مسئله ضروری است که در این پژوهش الگوریتم ژنتیک<sup>۴</sup> (GA) و الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات (PSO)<sup>۵</sup> به صورت ترکیبی با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA)<sup>۶</sup> استفاده شده‌اند (HGA, HPSO). در این دو ترکیب، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید نقش تقریباً یکسانی دارد؛ به این صورت که در هر دو روش، در هر تکرار الگوریتم اصلی یک‌بار اجرا می‌شود و به دنبال پاسخ‌های مناسب‌تر در اطراف بهترین پاسخ هر تکرار است. در روش HGA، در هر تکرار الگوریتم ژنتیک بهترین پاسخ بر اساس تابع برازش تعیین، و الگوریتم SA برای یافتن همسایگی‌های بهتر بر روی آن اجرا می‌شود. به صورت مشابه، در الگوریتم HPSO در هر تکرار الگوریتم تجمع ذرات با اجرای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بر روی Gbest همسایگی‌های آن را بررسی می‌کند.

### الگوریتم ژنتیک

#### ۱. تعیین ساختار کروموزوم

در الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش هر کروموزوم از دو بخش تشکیل می‌شود که بخش اول آن توالی ورود کارها را به سیستم جریان کارگاهی نشان می‌دهد. این بخش از یک بردار به طول  $N$  (تعداد کارها) تشکیل شده که درایه‌های آن اعداد حقیقی در بازه [۰ و ۱] است. بخش دوم کروموزوم به عملیات نگهداری و تعمیرات مربوط است، این بخش از یک ماتریس با ابعاد  $(M$  و  $N-1)$  تشکیل شده که درایه‌های آن مقادیر حقیقی در بازه [۰ و ۱] است. هر سطر به یک ماشین، و هر ستون آن به اولویت مربوط است. مقدار بزرگ‌تر از ۰.۵ برای هر درایه نشان‌دهنده آن است که بعد از کارکردن در اولویت مربوط روی ماشین مورد نظر، عملیات نگهداری و تعمیرات انجام می‌شود (شکل ۵).

$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$
0.25	0.41	0.11	0.37

درایه‌های جدید بررسی می‌شود، چنانچه مقدار هریک از آن‌ها از صفر کمتر بود با صفر، و چنانچه مقدار آن‌ها بیش از یک بود با مقدار یک جایگزین می‌شود.

### الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

به دلیل حساسیت زمان بندی تعمیرات و نگهداری پیشگیرانه، از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به صورت ترکیبی استفاده شده است. گفتنی است این الگوریتم بر مبنای جست و جوی محلی، و برای بررسی محلی پاسخ‌ها در دو الگوریتم ارائه شده استفاده شده است. در الگوریتم شبیه‌سازی ترکیب شده، جست و جوی محلی تنها در بخش پاسخ‌ها که به عملیات نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بر روی ماشین‌ها مربوط است، اعمال می‌شود. منشأ این الگوریتم و انتخاب معیار پذیرش در آن به فرایند فیزیکی تبرید برمی‌گردد. در علم فیزیک مواد تغلیظ شده، تبرید فرایند گرمایی برای دست یافتن به حالات کم انرژی یک جسم در حمام گرم است.

### تنظیم پارامتر

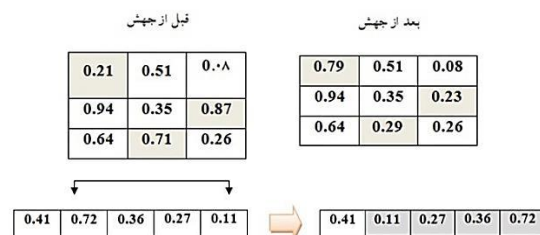
کارایی الگوریتم‌های فرا ابتکاری به تنظیم صحیح پارامترهای آن وابسته است. باید توجه داشت که روش‌های آماری متنوعی برای طراحی آزمایش‌ها مطرح شده است، اما با در نظر گرفتن اینکه استفاده از رویکرد جامعی مثل آزمایش‌های عاملی کامل، همواره کارایی لازم را ندارند و با افزایش تعداد عامل‌های بررسی شده انجام محاسبات پیچیده و فوق العاده زمان بر است، از روش تاگوچی [۱۲] برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها استفاده شده است. در این روش ویژگی‌های کیفی مقادیر اندازه‌گیری شده از آزمایش‌ها، به نسبت سیگنال به نویز (S/N) تبدیل می‌شود.

با توجه به اینکه تابع هدف از جنس هزینه است، فرمول ذیل برای اندازه‌گیری نسبت‌های S/N تاگوچی کاربرد دارد.

$$S / N \text{ ratio} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right)$$

### تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های پیشنهادی

در این تحقیق فاکتورهای کنترلی روش تاگوچی شامل پارامترهای الگوریتم‌هاست. سطوح فاکتورهای الگوریتم‌های HGA و HPSO به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ مشخص، و هریک برای مسائل بزرگ و کوچک نمایش داده شده است:



شکل ۷. عملگر ژنتیکی جهش

قدم ۶. ارزیابی فرزندان؛  
 قدم ۷. جست و جوی محلی؛  
 قدم ۸. تعیین معیار توقف.  
 شرط توقف پیشنهادی در این پژوهش تکرارهای الگوریتم یا همگراشدن آن است.

### الگوریتم بهینه‌سازی تجمع ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یکی از مهم‌ترین الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند است که در حوزه هوش جمعی<sup>۹</sup> جای می‌گیرد. این الگوریتم را نخستین بار کندی و ابرهات<sup>۱۰</sup> [۱۴] با الگو گرفتن از رفتار اجتماعی حیواناتی مانند ماهی یا پرندگان که به صورت گروهی زندگی می‌کنند معرفی کردند. با توجه به اینکه قوانین منطقی خاصی بر نحوه رفتار موجودات اجتماعی حاکم است، پرندگان تنها با تنظیم حرکت فیزیکی خود با اجتناب از تصادف به دنبال غذا می‌گردند. به طور تئوری هر پرنده به عنوان یکی از اعضای گروه، از تجربه‌های قبلی خود و تجربه‌های سایر پرندگان برای یافتن غذا بهره می‌برد. ایده اصلی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات همین تسهیم اطلاعات بین اعضای گروه است [۱۵].

مراحل این الگوریتم به صورت زیر است:

قدم ۱. ایجاد جمعیت اولیه؛  
 قدم ۲. تعیین اندازه تابع هدف؛  
 قدم ۳. تعیین بهترین موقعیتی که هر عضو تاکنون به دست آورده و بهترین موقعیتی که تاکنون در جمع به دست آمده است؛

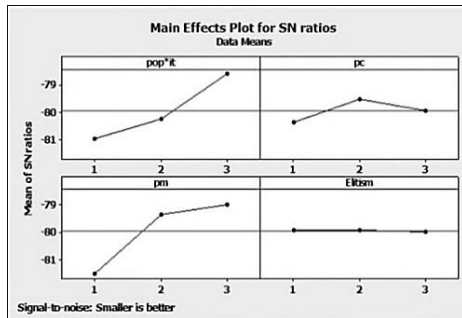
قدم ۴. به روز رسانی موقعیت و سرعت هر عضو؛

قدم ۵. بررسی شرط توقف.

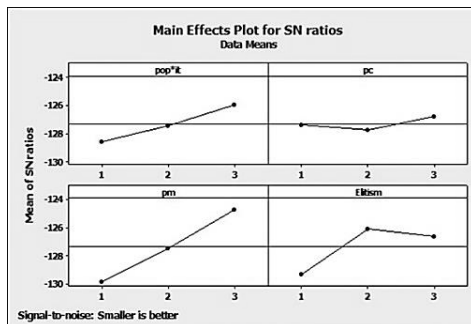
در این الگوریتم نیز نحوه نمایش جواب‌ها و رمزگشایی آن‌ها در الگوریتم تجمع ذرات ارائه شده مشابه الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود و پس از حرکت ذرات مقادیر

جدول آرایه‌های متعامد با توجه به درجه آزادی مربوط به دو الگوریتم مطابق جدول ۳ برای HGA، و جدول ۴ برای HPSO است.

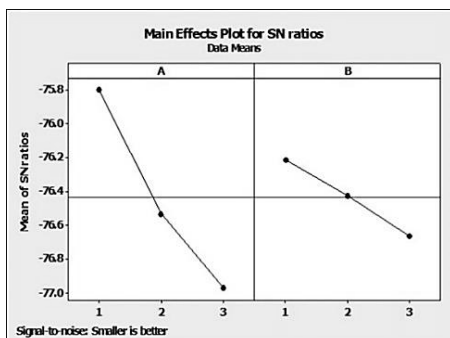
نمودارهای S/N برای الگوریتم‌های موردنظر به صورت‌های زیر است:



شکل ۸. نمودار نرخ S/N توابع هدف در الگوریتم HGA در مسائل کوچک



شکل ۹. نمودار نرخ S/N توابع هدف در الگوریتم HGA در مسائل بزرگ



شکل ۱۰. نمودار نرخ S/N توابع هدف در الگوریتم HPSO در مسائل کوچک

با توجه به اشکال ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱ سطوح بهینه برای الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی تجمیع ذرات ترکیبی برابر با مقادیر زیر است:

جدول ۱. فاکتورهای الگوریتم HGA به همراه سطوح آن‌ها

فاکتورها	سطوح در مسائل کوچک		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
Pop*it	۵۰*۱۸۰	۶۰*۱۵۰	۹۰*۱۰۰
Pc	۰,۷۵	۰,۸۵	۰,۹۵
Pm	۰,۰۵	۰,۱	۰,۱۵
Elitism	۰,۰۶	۰,۰۸	۰,۱

فاکتورها	سطوح در مسائل بزرگ		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
Pop*it	۵۰*۶۰۰	۱۰۰*۳۰۰	۱۵۰*۲۰۰
Pc	۰,۸	۰,۹	۰,۹۵
Pm	۰,۱	۰,۱۵	۰,۲
Elitism	۰,۰۷	۰,۰۹	۰,۱

جدول ۲. فاکتورهای الگوریتم HPSO به همراه سطوح آن‌ها

فاکتورها	سطوح در مسائل کوچک		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
Pop*it	۵۰*۱۸۰	۶۰*۱۵۰	۹۰*۱۰۰
$\omega$	۰,۷۵	۱	۱,۲۵

فاکتورها	سطوح در مسائل بزرگ		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
Pop*it	۵۰*۶۰۰	۱۰۰*۳۰۰	۱۵۰*۲۰۰
$\omega$	۰,۹	۱	۱,۵

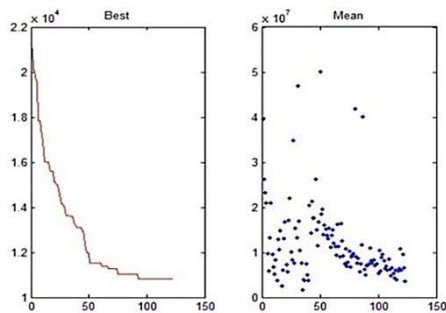
جدول ۳. آرایه متعامد  $L9 (3^4)$

ردیف	الف	ب	ج	د
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۲	۲	۲
۳	۱	۳	۳	۳
۴	۲	۱	۲	۳
۵	۲	۲	۳	۱
۶	۲	۳	۱	۲
۷	۳	۱	۳	۲
۸	۳	۲	۱	۳
۹	۳	۳	۲	۱

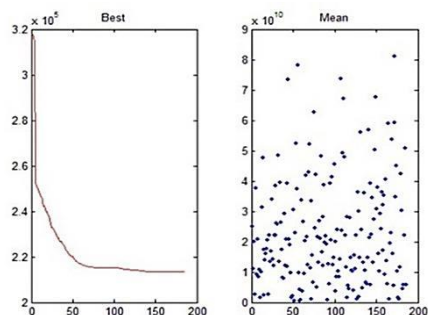
جدول ۴. آرایه متعامد  $L9 (3^2)$

ردیف	الف	ب
۱	۱	۱
۲	۱	۲
۳	۱	۳
۴	۲	۱
۵	۲	۲
۶	۲	۳
۷	۳	۱
۸	۳	۲
۹	۳	۳

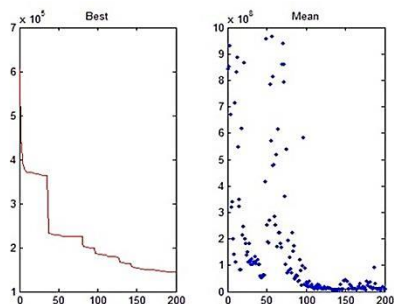




شکل ۱۳. نمودار همگرایی HPSO پیشنهاد شده برای مسئله n=2 m=6



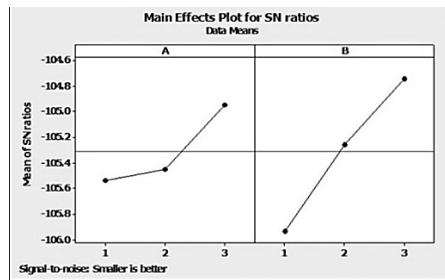
شکل ۱۴. نمودار همگرایی HGA پیشنهاد شده برای مسئله n=80, m=8



شکل ۱۵. نمودار همگرایی HPSO پیشنهاد شده برای مسئله n=80, m=8

**ارزیابی الگوریتم‌ها**

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی، مسائل نمونه استاندارد طرح شدند. زمان‌های پردازش براساس روش پیشنهادی پژوهش ترابزاده و زندیه [۱۱]، و زمان تعمیر، اثر استهلاک، هزینه دیرکرد، زمان دسترسی و موعد تحویل نیز با توجه به پژوهش پیشنهادی سو و همکارانش بیان شده است [۱۳]. در این بخش نتایج به دست آمده از اجرای الگوریتم‌های پیشنهادی از نظر مقدار تابع هدف و زمان حل، با هم و نیز با روش دقیق با استفاده از برنامه لینگو مقایسه می‌شوند. مسائل در دو دسته کوچک و بزرگ مطابق جدول ۶ طرح شده‌اند. در مسئله ۴ که برنامه لینگو در ۱ ساعت قادر به ارائه پاسخ بهینه



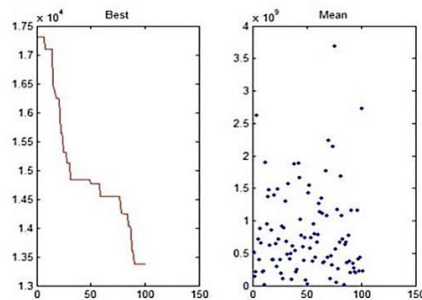
شکل ۱۱. نمودار نرخ S/N تابع هدف در الگوریتم HPSO در مسائل بزرگ

جدول ۵. سطوح بهینه پارامترها

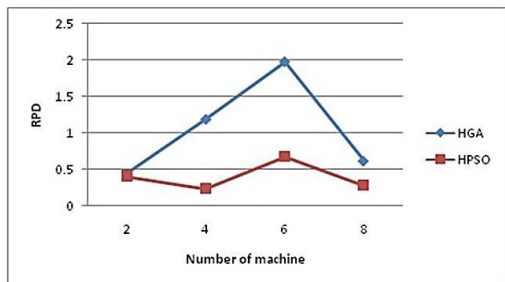
روش حل	فاکتورها	سطح بهینه
مسائل کوچک	Pop*it	۹۰*۱۰۰
	Pc	۰,۸۵
	Pm	۰,۱۵
	Elitism	۰,۰۶
مسائل بزرگ	Pop*it	۱۵۰*۲۰۰
	Pc	۰,۹۵
	Pm	۰,۲
	Elitism	۰,۰۹
مسائل کوچک	Pop*it	۵۰*۱۸۰
	$\omega$	۰,۷۵
مسائل بزرگ	Pop*it	۱۵۰*۲۰۰
	$\omega$	۱,۵

**نمودار همگرایی**

به منظور اعتبارسنجی فرایند الگوریتم‌های پیشنهاد شده، متوسط و بهترین مقدار، تابع هدف در نمودار همگرایی مطابق شکل‌های ۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵ برحسب شماره تکرارها رسم شده است. با توجه به شکل ۱۲، همگرایی در نمودار مربوط به الگوریتم HPSO، از HGA بهتر است.

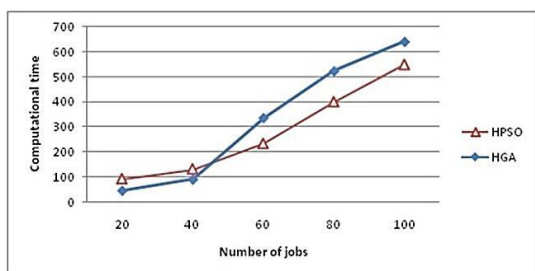


شکل ۱۲. نمودار همگرایی HGA پیشنهاد شده برای مسئله n=2 m=6



شکل ۱۷. تأثیر تعداد ماشین بر شاخص RPD

در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ زمان حل مسائل به‌وسیله دو الگوریتم پیشنهادی مقایسه شده است. با توجه به شکل ۱۸، در مسائل با تعداد کار ۲۰ و ۴۰، الگوریتم HPSO برای حل مسئله به مدت‌زمان بیشتری نیاز دارد، اما با افزایش تعداد کارها، زمان حل الگوریتم HGA در مقایسه با الگوریتم HPSO به‌طور صعودی افزایش می‌یابد، همچنین مطابق شکل ۱۹ دو الگوریتم در مسائل ۲ ماشین و ۴ ماشین به مدت‌زمان مساوی به حل مسئله می‌پردازند، اما با افزایش تعداد ماشین‌آلات، الگوریتم HPSO به مدت‌زمان کمتری برای مسئله نیازمند است.



شکل ۱۸. تأثیر تعداد کارها بر زمان حل مسئله

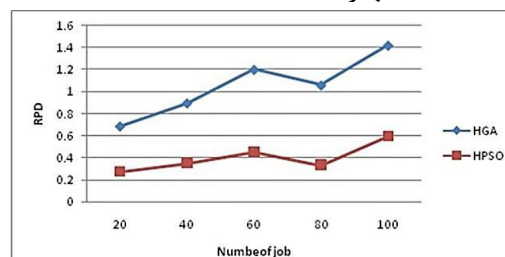
نهایی برای آن‌ها نبود، بهترین پاسخ در طی این زمان به‌عنوان جواب نهایی در نظر گرفته شد. برای مسائل ۵ به بعد، برنامه لینگو نتوانست هیچ پاسخی در مدت‌زمان تعیین‌شده ارائه کند، این موضوع با (\*) نمایش داده شده است، همچنین به‌منظور مقایسه دو الگوریتم، شاخص انحراف از جواب بهینه (RPD) به‌کار رفته است.

$$RPD_{ij} = \frac{(Alg_{sol})_{ij} - Min_{sol}}{Min_{sol}} * 100$$

### تحلیل داده‌ها

در شکل ۱۶ تأثیر تعداد کارها در مقایسه با شاخص RPD نمایش داده شده است. با توجه به شکل، الگوریتم HPSO در مقایسه با الگوریتم HGA، در تمام مسائل ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ عملکرد بهتری کار دارد.

در شکل ۱۷، روند تغییرات خطای دو الگوریتم پیشنهادی برحسب تعداد ماشین‌آلات موجود در مرحله مونتاژ مقایسه شده است. نتایج محاسباتی بیان می‌کند که دو الگوریتم در مسائل ۲ ماشین، رفتار یکسانی دارند و در مسائل ۴، ۶ و ۸ ماشین، کیفیت الگوریتم HPSO در مقایسه با HGA بهتر است.



شکل ۱۶. تأثیر تعداد کارها بر شاخص RPD

جدول ۶. مسائل آزمایشی طراحی شده و نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌ها

ردیف	تعداد ماشین کار	جواب بهینه			انحراف از جواب بهینه			میانگین زمان (ثانیه)		
		lingo	HPSO	HGA	lingo	HPSO	HGA	Lingo	HPSO	HGA
۱	۳	۱۰۰۸	۱۰۰۸	۱۰۰۸	.	.	.	۲	۴,۲۱۶	۴,۱۸۶
۲	۴	۹۱۰	۹۱۰	۹۱۰	.	.	.	۵۳۷	۲,۸۷۶	۱,۸۴۳
۳	۴	۱۶۶۵	۱۶۶۵	۱۶۶۵	.	.	.	۱۵۹۹	۴,۲۷۶	۳,۲۷۴
۴	۵	۳۷۹,۳۷۴	۲۴۷۸	۲۱۸۱	۵,۵۳۲	۴,۷۴۹	۰	۱h	۷,۰۸۹	۵,۸۴۱
۵	۲۰	*	۲۶۴۲,۴۷	۳۰۹۵	*	۰,۵۴۶۳	۰,۸۱۱	*	۱۴,۰۶	۴,۲۵
۶	۲۰	*	۷۰,۷۷,۳۳	۱۰,۷۲۸,۶۷	*	۰,۲۴۳۶	۰,۸۸۵۲	*	۴۱,۲۱	۱۲,۲۴
۷	۲۰	*	۱۳۴۸۲,۳	۲۱۴۱۷,۶۷	*	۰,۱۰۷۲	۰,۷۵۸۹	*	۱۱۱,۷۳	۳۷,۹۶
۸	۲۰	*	۱۸۹۴۰	۲۰,۴۹۹,۶۷	*	۰,۱۹۴۳	۰,۲۹۲۶	*	۲۰۱,۰۸	۱۲۵,۴۲
۹	۴۰	*	۴۴۸۴,۳۳	۴۲۳۶	*	۰,۵۰۶۸	۰,۴۲۳۴	*	۲۳,۲۸	۹,۱۷
۱۰	۴۰	*	۱۳۷۴۱,۷	۲۴۱۱۰,۶۷	*	۰,۱۳۶	۰,۹۹۳۱	*	۸۵,۲۱	۲۹,۸۱
۱۱	۴۰	*	۲۲۶۷۲,۷	۵۴۸۵۷,۶۱	*	۰,۲۰۸۷	۱,۹۲۴۵	*	۱۷۲,۷۱	۸۷,۰۴

جدول ۶. مسائل آزمایشی طراحی شده و نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌ها

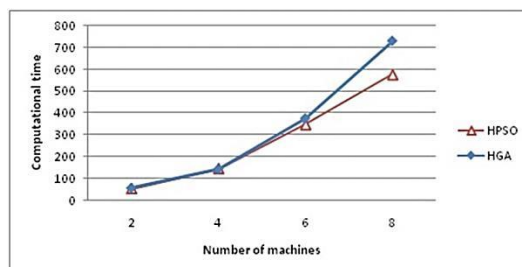
*	۲۴۵,۴۲	۲۳۲,۸۸	*	۰,۵۴۹۷	۰,۳۴۹۳	*	۷۹۳۶۹,۷	۶۳۹۸۱,۶۷	۸	۴۰	۱۲
*	۲۷,۷۵	۱۹,۷۹	*	۰,۳۵۱۹	۰,۶۱۲۸	*	۶۵۸۶,۶۷	۷۵۵۷,۳۳۳	۲	۶۰	۱۳
*	۷۵,۵۴	۶۰,۳۷	*	۰,۱۱۷۵	۱,۳۴۸۴	*	۳۳۶۸۰,۳	۷۰۷۵۶	۴	۶۰	۱۴
*	۲۷۲,۹	۴۲۶,۷۶	*	۰,۸۳۳۲	۱,۶۱۹۸	*	۵۸۷۳۰,۳	۸۳۹۳۰,۳۳	۶	۶۰	۱۵
*	۵۵۵,۸۶	۸۳۸,۸۴	*	۰,۵۱۹۵	۱,۲۲۶۶	*	۱۸۹۶۰,۳	۲۷۷۸۲۹,۳	۸	۶۰	۱۶
*	۷۸,۲۱	۱۰۸,۸۵	*	۰,۴۴۴۶	۰,۳۳۷۱	*	۸۷۴۵,۳۳	۷۴۸۹,۳۳۳	۲	۸۰	۱۷
*	۲۱۵,۰۴	۳۰۰,۵	*	۰,۵۱۹۱	۱,۳۴۵۸	*	۲۶۸۴۳,۳	۶۱۴۵۹	۴	۸۰	۱۸
*	۵۵۹,۱۴	۶۳۰,۹۳	*	۰,۳۲۷۱	۲,۴۴۴	*	۴۳۵۵۶,۳	۳۳۶۳۷۰	۶	۸۰	۱۹
*	۷۴۴۴,۵۸	۱۰۵۱,۷۶	*	۰,۰۴۴۸	۰,۲۱۳۹	*	۳۵۳۷۴۱	۴۱۰۹۹۹,۳	۸	۸۰	۲۰
*	۱۲۳,۳۶	۱۴۲,۸۶	*	۰,۲۰۳۲	۰,۱۲۰۵	*	۱۵۱۴۴,۳	۱۴۱۰۴,۳۳	۲	۱۰۰	۲۱
*	۳۱۲,۸۶	۳۱۵,۰۴	*	۰,۱۸۱۶	۱,۳۵۶۵	*	۸۱۳۳۲,۷	۱۶۲۱۹۸	۴	۱۰۰	۲۲
*	۶۱۷,۱۹	۷۰۰,۲۲	*	۱,۹۰۱۷	۳,۱۱۴۶	*	۱۹۷۶۰,۱	۴۸۰۱۹۷,۷	۶	۱۰۰	۲۳
*	۱۱۳۷,۷۲	۱۴۰۴,۹۴	*	۰,۰۹۱۴	۱,۰۹۴۸	*	۶۸۲۲۷۶	۷۱۵۷۰۰,۷	۸	۱۰۰	۲۴
*	۲۸۰,۶۹	۳۲۶,۷۹	*	۰,۴۰۱۴۲	۱,۰۵۳۶۳	*	۹۳۰۱۳	۱۴۱۵۹۱			میانگین

می‌شود که مسائل حل شده در دو الگوریتم، یکسان باشد تا مقایسه دو الگوریتم، عادلانه و درست صورت بگیرد، به همین دلیل، از بیان سایر پارامترهای مسئله خودداری شده است؛ به عبارت دیگر سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته شده‌اند. البته باید توجه داشت که برای همین دسته از مسائل، سنجه RPD نیز در شکل ۱۳ بررسی شده که تحلیل براساس این سنجه در متن مقاله ارائه شده است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

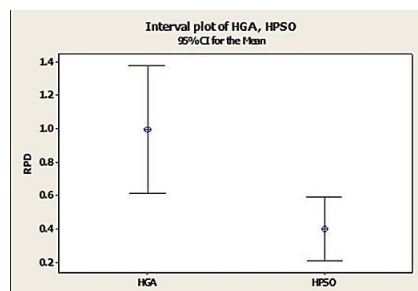
در این پژوهش، مسئله زمان بندی خط جریان مونتاژ دومرحله‌ای با در نظر گرفتن اثر استهلاک ماشین و به کارگیری روش‌های نگهداری و تعمیرات، به منظور جلوگیری از توقف تولید مراکز تولیدی و حداقل سازی جریمه تأخیر بررسی شده است. در ادامه، با معرفی مسئله و ارائه مفروضات موجود در فضای حل آن، یک مدل ریاضی خطی عدد صحیح برای حل مسئله ارائه شده تهیه شده است. با توجه به NP-hard بودن مسئله و افزایش نمایی زمان حل آن با افزایش ابعاد مسئله این مدل ریاضی قادر به حل در ابعاد واقعی آن نیست؛ بنابراین، برای حل مسئله در ابعاد متوسط و بزرگ، دو روش فرا ابتکاری ترکیبی HGA و HPSO طراحی شده است. با بررسی و تحلیل روش‌های ارائه شده و حل نمونه‌های کوچک، همچنین دریافت خروجی آن، صحت مدل ریاضی تأیید شد. نتایج محاسباتی نیز نشان می‌دهد عملکرد الگوریتم HPSO هم از نظر زمان حل و هم کیفیت جواب در مقایسه با الگوریتم HGA بهتر است. گفتنی است این پژوهش از چند جهت قابلیت گسترش دارد:

۱. به منظور نزدیک تر شدن به دنیای واقعی می‌توان اثر استهلاک را با توجه به مدت زمان کارکرد ماشین و



شکل ۱۹. تأثیر تعداد ماشین آلات بر زمان حل مسئله

برای تحلیل بیشتر نتایج، نمودار میانگین به همراه فواصل LSD برای دو الگوریتم در شکل ۲۰ نشان داده شده است. با مشاهده نتایج درمی‌یابیم که برتری آماری الگوریتم HPSO در مقایسه با HGA بیشتر است و اختلاف معناداری بین آن‌ها وجود دارد.



شکل ۲۰. نمودار میانگین و فواصل LSD (سطح اطمینان ۹۵ درصد) برای الگوریتم‌های HGA, HPSO

به طور خلاصه، براساس شکل‌های ۱۵ و ۱۶، الگوریتم HGA برای رسیدن به پاسخی بهینه به زمان حل بیشتری (در اغلب موارد) نیاز دارد، که این مسئله نشان‌دهنده کارایی کمتر این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم HPSO است. همچنین بدیهی است این مقایسه در شرایطی تفسیر

در افزایش زمان و هزینه‌های تولید بررسی کرد.  
۳. اثر یادگیری مورد دیگری است که می‌توان برای  
نزدیک‌شدن مسئله به دنیای واقعی آن را بررسی کرد.

جنس موادی که ماشین بر روی آن‌ها عملیات انجام  
می‌دهد در نظر گرفت.  
۲. می‌توان بررسی شکست ماشین را به‌عنوان عاملی اساسی

## منابع

1. Potts, C. N. et al. (1995). "The two-stage assembly scheduling problem: complexity and approximation", *Operations Research*, Vol. 43, No. 2, PP. 346–355.
2. Al-Anzi, F. S. and Allahverdi, A. (2006). "A hybrid tabu search heuristic for the two-stage assembly scheduling problem", *International Journal of Operational Research*, Vol. 3, No. 2, PP.109-119.
3. Al-Anzi, F. S., and Allahverdi, A. (2009). "Heuristics for a two stage assembly flow shop with criteria of maximum lateness and makespan", *Computers and Operations Research*, Vol. 36, No. 9, PP. 2682-2689.
4. Berrichi, A. et al. (2008). "Bi-objective optimization algorithms for joint production and maintenance scheduling: Application to the parallel machine problem", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 20, No. 4, PP. 389–400.
5. Bachman, A. and Janiak, A. (2004). "Scheduling jobs with position-dependent processing times", *Journal of Operational Research Society*, Vol. 55, No. 3, PP. 257-264.
6. Mosheiov, G. (2001). "Parallel machine scheduling with a learning effect", *Operational Research Society*, Vol. 52, No. 10, PP. 1165-1169.
7. Gordon, V. S. et al. (2008). "Single machine scheduling models with deterioration and learning: handling precedence constraints via priority generation", *Journal of Scheduling*, Vol.11, No. 5, PP.357-370.
8. Mozdgir, A. et al. (2013). "Two stage assembly flow-shop scheduling problem with non-identical assembly machines considering set up times", *International Journal of Production Research*, Vol. 51, No.12, PP. 3625-3642.
9. Yang Dar-Li. et al. (2012). "Unrelated parallel-machine scheduling with aging effects and multi-maintenance activities", *Computers and Operations Research*, Vol. 39, No. 17, PP.1458-1464.
10. Salehi Mir, M.S, and Rezaeian J. (2016). "A robust hybrid approach based on particle swarm optimization and genetic algorithm to minimize the total machine load on unrelated parallel machines", *Applied Soft Computing*, Vol. 41, PP. 488-504.
11. Torabzadeh, E., and Zandieh, M. (2010). "Cloud theory-based simulated annealing approach for scheduling in the two-stage assembly flow shop", *Advances in Engineering Software*, Vol. 41, No.10-11, PP. 1238-1243.
12. Yaser Z. et al. (2015). "Minimization of makespan for the single batch-processing machine scheduling problem with considering aging effect and multi-maintenance activities", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, No. 9, PP.1879-1892.
13. Chou-Jung H. et al. (2013). "Unrelated parallel-machine scheduling problems with aging effects and deteriorating maintenance activities", *Information Sciences*, Vol. 253, PP.163-169.
14. Behnam Vahedi N., Fattahia p, and Ramezani R.(2013). "Hybrid firefly-simulated annealing algorithm for the flow shop problem with learning effects and flexible maintenance activities", *International Journal of Production Research*, Vol. 51, No. 12, PP.3501-3515.
15. Abdollahpour S., and Rezaeian J. (2015). "Minimizing makespan for flow shop scheduling problem with intermediate buffers by using hybrid approach of artificial immune system", *Applied Soft Computing*, Vol. 28, PP. 44-56.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1. Two Stage Assembly Flowshop
2. Berrichi
3. Learning Effect
4. Aging Effect
5. Position Base Learning
6. Genetic Algorithm
7. Particle Swarm Optimization
8. Simulated Annealing
9. Swarm Intelligence
10. Kennedy & Eberhart