

# الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات برای تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی یکپارچه در محیط تولیدی جریان کارگاهی

رضا رمضانیان<sup>۱\*</sup>، محسن شفیعی نیک‌آبادی<sup>۲</sup> و سحر فلاح‌صنمی<sup>۳</sup>  
<sup>۱</sup> استادیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
<sup>۲</sup> استادیار دانشکده اقتصاد و مدیریت دانشگاه سمنان  
<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده اقتصاد و مدیریت دانشگاه سمنان

(تاریخ دریافت ۹۱/۸/۷ - تاریخ دریافت روایت اصلاح‌شده ۹۲/۱۱/۲۸ - تاریخ تصویب ۹۳/۴/۷)

## چکیده

هدف این پژوهش مطالعه سیستم‌های تولیدی چندمحصولی و چنددوره‌ای در محیط جریان کارگاهی است؛ طوری که محدودیت‌های تولید و توالی عملیات به صورت یکپارچه لحاظ شود. مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای مسئله پیشنهاد می‌شود. تابع هدف شامل هزینه‌های تولید، موجودی، کمبود، و راه‌اندازی است. با توجه به پیچیدگی زیاد محاسباتی، الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات برای حل پیشنهاد می‌شود. جهت بررسی کارایی الگوریتم، دو روش بر پایه برنامه‌ریزی عدد صحیح، که به صورت تکرارشونده با ایجاد مدل‌های کوچک‌تر به حل مدل می‌پردازد، پیشنهاد و نتایج با هم مقایسه می‌شود. به علاوه، روش تاگوجی برای تنظیم پارامترهای روش فراابتکاری به کار می‌رود. الگوریتم‌های حل موردنظر ترکیبی شدن و نزدیک‌به‌بهینه از برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی می‌یابند. نتایج، بر مجموعه‌ای از مسائل با اندازه‌های مختلف، کارایی روش فراابتکاری را نسبت به حل دقیق و روش‌های ابتکاری ثابت می‌کند. متوسط مقدار هدف برای روش‌های PSO<sup>۱</sup>، ابتکاری ۱، و ابتکاری ۲ به ترتیب ۹۸،۲۱، ۱۰۴،۲۰، و ۱۰۸،۲۹ (×۱۰<sup>۳</sup>) است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی یکپارچه، روش ابتکاری بر پایه برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط، سیستم تولیدی چندمرحله‌ای، مدل‌سازی ریاضی

## مقدمه

ضعف برنامه‌ریزی تولید سلسله‌مراتبی غلبه کند، یک مدل برنامه‌ریزی کارگاهی و زمان‌بندی یکپارچه در محیط کارگاهی در نظر گرفت و رویکرد تجزیه‌ای را به کار برد که بین حل یک مسئله برنامه‌ریزی با توالی ثابت محصولات روی ماشین‌ها و یک مسئله زمان‌بندی کارگاهی برای برنامه تولید انتخاب‌شده ثابت تغییر می‌کرد. انور و نقی [۲] یک روش دوفازی برای تعیین اندازه دسته و زمان‌بندی یکپارچه برای محیط کارگاهی برای افق برنامه‌ریزی تک‌دوره‌ای پیشنهاد کردند. کیم و همکاران [۳] یک مسئله برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی، برای ترکیب کردن محصولات با ساختار سلسله‌مراتبی، نظیر آنچه در برنامه‌ریزی نیازمندی مواد وجود دارد، در نظر گرفتند و به حل این مسئله پرداختند. یکی دیگر از روش‌هایی که برنامه‌ریزی تولید و

برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی به دو سطح تصمیم‌گیری مختلف تعلق دارد. برنامه‌ریزی تولید در سطح میان‌مدت و زمان‌بندی در سطح کوتاه‌مدت است. با توجه به ارتباطات درونی سطوح مختلف زنجیره تأمین، تبدلات زیادی بین تصمیمات اتخاذشده در گروه‌های مختلف زنجیره تأمین وجود دارد. برای دستیابی به جواب‌های بهینه جامع باید بین وظایف مختلف برنامه‌ریزی وابستگی درونی در نظر گرفته شود.

یکی از روش‌های دستیابی به برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی استفاده از رویکرد تکرارشونده است. روش تکرارشونده تلاش می‌کند چرخه اطلاعات از زیرمسئله‌های زمان‌بندی به سوی مسئله سطح بالاتر حرکت کند و بازخوردی از زیرمسئله سطح پایین برای مسئله سطح بالا به وجود آید. لازار [۱]، برای اینکه بر

جدیدی پیشنهاد کردند که اجازه چندین راه‌اندازی را در هر دوره می‌داد. آن‌ها برای مدل‌سازی مسئله، تعدادی مشخص و داده‌شده برای راه‌اندازی در هر دوره فرض کردند.

بوشکول و همکاران [۸] مروری بر تحقیقات چهار دهه اخیر درباره مسئله تعیین اندازه انباشته پویای محدودیت‌دار ارائه کردند. آن‌ها در مرور خود بر تعیین اندازه دسته چندسطحی با محدودیت (MLCLSP)<sup>۷</sup> متمرکز شدند. MLCLSP مدلی با ظرف زمانی بزرگ است. مسائل تعیین اندازه انباشته در محیط تولیدی چندسطحی با ظرف زمانی کوچک شامل مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی گسسته (MLDLSP) [۹] و متناسب (MLPLSP) [۱۰] و جامع (MLGLSP) [۱۱] است. مدل‌های MLDLSP و MLPLSP، هم‌زمان، امکان تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی را دارند. اما تعداد محصولاتی که امکان تولید در هر دوره را دارند محدود است. بنابراین، MLGLSP که فاندل و استمانهگن [۱۱] آن را پیشنهاد کردند تلاش می‌کند با استفاده از یکپارچه‌کردن مزایای MLPLSP و MLCLSP، بر پایه تجزیه دوره‌های بزرگ‌تر به تعداد ثابت دوره‌های کوچک‌تر، به مدل‌سازی مسئله بپردازد. با توجه به پیچیدگی محاسباتی بالای مدل، فقط مسائل با اندازه‌های بسیار کوچک قابلیت حل بهینه با این مدل را دارند. محمدی و همکاران [۱۲] مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی چندسطحی با راه‌اندازی‌های وابسته به توالی را در نظر گرفتند و مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را، که برای هر دوره به تعداد محصولات راه‌اندازی در نظر می‌گیرد، برای مدل‌سازی مسئله ارائه کردند. مدل‌سازی آن‌ها تعمیم مدل پیشنهادی کلارک و کلارک [۷] است. با توجه به اینکه در مدل‌سازی آن‌ها تعدادی مشخص و داده‌شده برای راه‌اندازی در هر دوره فرض می‌شود، پیچیدگی محاسباتی افزایش می‌یابد. همچنین، محمدی و همکاران [۱۳] دو رویکرد الگوریتمیک برای حل مثال‌هایی با اندازه بزرگ برای این مسئله در محیط جریان کارگاهی جای‌گشتی با محدودیت ظرفیت پیشنهاد کردند. محمدی [۱۴] رویکردی مشابه با فاندل و استمانهگن [۱۱] برای مسئله تعیین اندازه انباشته و

زمان‌بندی را به صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد برنامه‌ریزی مسائل تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی هم‌زمان است. در پیشینه پژوهش دو شیوه مدل‌سازی پایه برای مسائل تعیین اندازه انباشته پویا، شامل مدل‌های با ظرف زمانی بزرگ و مدل‌های با ظرف زمانی کوچک، وجود دارد. در مسائل ظرف زمانی کوچک ابتدا دوره زمانی بزرگ‌تر به دوره‌های کوچک‌تر تجزیه و سپس مدل‌سازی انجام می‌شود. این شیوه به شدت بر پیچیدگی مسئله می‌افزاید. در مدل‌های با ظرف زمانی کوچک معمولاً فرض می‌شود در هر دوره یک یا حداکثر دو محصول ممکن است تولید شود. مدل‌های این حوزه تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی را یکپارچه می‌کنند. مدل‌های با ظرف زمانی بزرگ در پیشینه پژوهش اجازه تولید محصولات گوناگون را در یک دوره می‌دهند؛ اما توالی تولید این محصولات را مشخص نمی‌کنند. مسئله تعیین اندازه انباشته با محدودیت منابع (CLSP)<sup>۲</sup> مدلی با ظرف زمانی بزرگ است. مسائل تعیین اندازه دسته با ظرف زمانی کوچک شامل مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی گسسته (DLSP)<sup>۳</sup>، مسئله تعیین اندازه انباشته و راه‌اندازی پیوسته (CSLP)<sup>۴</sup>، مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی متناسب (PLSP)<sup>۵</sup>، و مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی جامع مدلی جامع است. مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی جامع مدلی جامع است که مدل‌های ارائه‌شده پیشین را با حالت‌های خاص دربرمی‌گیرد. در این مدل، افق زمانی متناهی به  $T$  (ظرف زمانی بزرگ) دوره شکسته می‌شود؛ طوری که هر دوره با ظرف زمانی بزرگ ( $t$ ) نیز به یک مجموعه دوره‌های با ظرف زمانی کوچک ( $s$ ) تقسیم می‌شود. در هر دوره با ظرف زمانی کوچک فقط یک محصول می‌تواند تولید شود [۴]. GLSP به وسیله درکسل و کیمس [۵] و فلیچمن و میسر [۶] به صورت تک‌مرحله‌ای، چندمحصولی، تک‌ماشینی با هزینه‌های راه‌اندازی وابسته به توالی با ظرف زمانی کوچک، اما بدون در نظر گرفتن زمان‌های راه‌اندازی و همچنین کمبود، پیشنهاد شد. کلارک و کلارک [۷] GLSP را در حالت ماشین‌های موازی در نظر گرفتند و مدل‌سازی

مراکز کاری مختلف، که به صورت سری چیدمان یافته‌اند، پردازش می‌شود.

- تقاضای محصولات نهایی شناخته شده است.
- در سیستم تولیدی مورد مطالعه کمبود مجاز است.
- راه‌اندازی وابسته به توالی است.
- در یک دوره یک جزء نمی‌تواند تولید شود تا زمانی که پردازش جزء پیش‌نیازی آن خاتمه یابد.
- ماشین‌ها نمی‌توانند در یک زمان بیش از یک عملیات را انجام دهند. در هر زمان هر محصول فقط بر یک ماشین پردازش می‌شود.

### اندیس‌ها و پارامترها

تعداد محصولات مختلف (مجموعه انواع محصولات)؛	$N$
تعداد ماشین‌آلات (مجموعه ماشین‌آلات)؛	$M$
تعداد دوره‌ها (مجموعه دوره‌های تولید)؛	$T$
ظرفیت مصرفی ماشین $m$ برای تولید یک واحد از آیتم $j$ ؛	$b_{jm}$
ظرفیت موجود ماشین $m$ در دوره $t$ ؛	$C_{mt}$
تقاضا برای آیتم $j$ در دوره $t$ ؛	$d_{jt}$
هزینه پردازش یک واحد محصول $j$ در دوره $t$ ؛	$p_{jt}$
هزینه نگهداری یک واحد محصول $j$ در دوره $t$ ؛	$h_{jt}$
هزینه کمبود یک واحد محصول $j$ در دوره $t$ ؛	$BC_{jt}$
زمان راه‌اندازی وابسته به توالی، اگر عملیات راه‌اندازی از محصول $i$ به محصول $j$ روی ماشین $m$ انجام شود؛	$S_{ijm}$
هزینه راه‌اندازی وابسته به توالی؛	$w_{ijm}$
موجودی برای محصول $j$ در آغاز افق برنامه‌ریزی تولید.	$I_{j0}$

### متغیرهای تصمیم

میزان تولید محصول $j$ تولیدشده در دوره $t$ ؛	$X_{jt}$
تعداد موجودی برای محصول $j$ در دوره $t$ ؛	$I_{jt}$
میزان کمبود برای محصول $j$ در دوره $t$ ؛	$B_{jt}$
زمان شروع پردازش محصول $j$ بر ماشین $m$ در دوره $t$ ؛	$SO_{jmt}$

زمان‌بندی یکپارچه در محیط جریان کارگاهی انعطاف‌پذیر به کار برد. اخیراً، رمضانیان و همکاران [۱۵] یک مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی یکپارچه در سیستم تولیدی جریان کارگاهی بدون جای‌گشتی با محدودیت ظرفیت و راه‌اندازی وابسته به توالی را مطالعه کردند. آن‌ها مدلی ریاضی را با کارایی بالاتر برای این مسئله پیشنهاد کردند و دو روش ابتکاری را بر پایه برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای حل مسئله مورد نظر توسعه دادند.

در این پژوهش، مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی یکپارچه در سیستم تولیدی چندمحصولی و چنددوره‌ای در محیط جریان کارگاهی جای‌گشتی با محدودیت منابع و راه‌اندازی وابسته بی‌توالی عملیات در نظر گرفته می‌شود و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط جدید، با رویکرد ظرف زمانی بزرگ، برای فرموله کردن آن پیشنهاد می‌شود که قابلیت برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی را به صورت هم‌زمان دارد. با توجه به پیچیدگی محاسباتی بسیار زیاد مسئله مورد بررسی، برای حل آن یک الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات استوار و دو روش ابتکاری بر پایه برنامه‌ریزی عدد صحیح با چارچوب افق غلطان پیشنهاد می‌شود. این پژوهش به صورتی که در پی می‌آید سازماندهی شد. در بخش ۲ مسئله مورد بررسی تعریف و مدل ریاضی پیشنهادی با جزئیات کامل تشریح می‌شود. جزئیات روش‌های حل ابتکاری و فراابتکاری در بخش ۳ فراهم می‌آید؛ همچنین در آن پارامترهای روش فراابتکاری PSO، با استفاده از طرح تاگوچی، تنظیم می‌شود. در بخش ۴ طرح آزمایش، شامل تولید داده‌ها و نتایج محاسباتی، ارائه می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری‌ها در بخش پایانی برای خلاصه کردن نوآوری‌های مقاله می‌آید.

### مدل‌سازی مسئله

در این زیربخش مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط پیشنهادی برای مسئله ارائه می‌شود.

### فرضیات، پارامترها، متغیرهای تصمیم

- هر محصول به تعدادی عملیات نیاز دارد که بر

متغیر باینری ( $=1$ )، اگر محصول  $z$  در دوره  $t$  پردازش شود؛ در غیر این صورت ( $=0$ ).

 $Z_{jt}$ 

زمان خاتمه پردازش محصول  $z$  بر ماشین  $m$  در دوره  $t$

 $CO_{jmt}$ 

متغیر راه‌اندازی وابسته به توالی ( $=1$ )، اگر عملیات راه‌اندازی از محصول  $i$  به محصول  $j$  در دوره  $t$  انجام پذیرد؛ در غیر این صورت ( $=0$ ).

 $Y_{ijt}$ 

### مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی مختلط

در این زیربخش، مدل ریاضی پیشنهادی با جزئیات کامل ارائه می‌شود.

$$\text{Min} \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} p_{jt} \cdot X_{jt} + \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} h_{jt} \cdot I_{jt} + \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} BC_{jt} \cdot B_{jt} + \sum_{i \in J} \sum_{j \in J} \sum_{m \in M} \sum_{t \in T} w_{ijm} \cdot Y_{ijt} \quad (1)$$

s.t.

$$I_{j(t-1)} - B_{j(t-1)} + X_{jt} - I_{jt} + B_{jt} - d_{jt} = 0 \quad \forall j \in N, t \in T \quad (2)$$

$$X_{jt} \leq \text{big}M \cdot Z_{jt} \quad \forall j \in N, t \in T \quad (3)$$

$$CO_{jmt} \leq C_{mt} \quad \forall j \in N, m \in M, t \in T \quad (4)$$

$$CO_{jmt} = SO_{jmt} + b_{jm} \cdot X_{jt} \quad \forall j \in N, m \in M, t \in T \quad (5)$$

$$SO_{jmt} \geq CO_{j(m-1)t} \quad \forall j \in N, t \in T, m = 2, \dots, M \quad (6)$$

$$SO_{jmt} \geq CO_{imt} + S_{ijm} \cdot Y_{ijt} - \text{big}M \cdot (1 - Y_{ijt}) \quad \forall i, j \in N, i \neq j, m \in M, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{i \in J, i \neq j} \sum_{i \in J} Y_{ijt} \geq \sum_{j \in J} Z_{jt} - 1 \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{i \in J, i \neq j} Y_{ijt} \leq Z_{jt} \quad \forall j \in N, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{i \in J, i \neq j} Y_{jit} \leq Z_{jt} \quad \forall j \in N, t \in T \quad (10)$$

$$X_{jt}, I_{jt}, B_{jt}, CO_{jmt}, SO_{jmt} \geq 0; I_{j0} = 0 \quad \forall j \in N, m \in M, t \in T \quad (11)$$

$$Y_{ijt}, Z_{jt} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N, t \in T \quad (12)$$

محصول قرار گرفته در موقعیت قبل از آن بر همان ماشین و زمان راه‌اندازی رخ دهد. محدودیت‌های ۸ تا ۱۰ توالی محصولات در محیط تولیدی در نظر گرفته شده را تعیین می‌کنند. طبق محدودیت‌های ۹ و ۱۰، توالی عملیات، چنانچه محصول  $z$  در دوره  $t$  تولید شود، شامل محصول مورد نظر است.

### روش‌های حل

روش حل ابتکاری بر پایه چارچوب افق غلطان

اصول رویه افق غلطان

استفاده از رویکرد ابتکاری افق غلطان، برای مسائل MIP بزرگ، پیچیدگی محاسباتی را به طور قابل توجهی، با جایگزین کردن متغیرهای باینری با پیوسته برای دوره‌های دورتر، کاهش می‌دهد. بنابراین، این

تابع هدف ۱ برای حداقل کردن هزینه‌های تولید، نگهداری، کمبود، و راه‌اندازی ارائه می‌شود. محدودیت ۲ محدودیت بالانس جریان برای تأمین تقاضا برای هر محصول در هر دوره است. محدودیت ۳ رابطه بین تولید برنامه‌ریزی شده و متغیر باینری راه، که نشان می‌دهد محصول  $z$  در دوره  $t$  تولید می‌شود یا نه، تعریف می‌کند. محدودیت ۴ محدودیت ظرفیت برای هر ماشین در هر دوره است. محدودیت ۵ رابطه بین زمان شروع و زمان تکمیل پردازش برای محصولات تولیدی برنامه‌ریزی شده است. محدودیت ۶ مجبور می‌کند شروع پردازش تأمین محصول برنامه‌ریزی شده زمانی رخ دهد که پردازش این محصول بر ماشین قبل خاتمه یافته باشد. محدودیت ۷ وادار می‌کند شروع پردازش یک کار بر یک ماشین مشخص پس از تکمیل شدن

## روش‌های ابتکاری

در این پژوهش، دو روش ابتکاری بر پایه چارچوب تکرار شونده، که در بالا تشریح شد، برای حل به کار می‌رود. تفاوت این دو روش فقط در بخش سیاست مقداردهی ثابت به متغیرهای بخش آغازین است.

### • روش ابتکاری ۱ (H1)

بخش آغازین: متغیرهای تصمیم بخش اول به صورت کامل مقداردهی و ثابت می‌شوند.

بخش مرکزی: شامل یک دوره و مسئله به صورت کامل در نظر گرفته شده و شامل متغیرهای باینری نیز هست.

بخش پایانی: متغیرهای باینری و محدودیت  $\gamma$  مرتبط با بخش پایانی با توجه به سیاست ساده‌سازی آزاد شده‌اند.

### • روش ابتکاری ۲ (H2)

بخش آغازین: فقط متغیرهای تصمیم باینری این بخش مقداردهی و ثابت می‌شوند. بنابراین، در هر دوره مقادیر تولید و زمان‌های شروع و پایان هر کار بر هر ماشین آزادند و می‌توانند در طول الگوریتم تعیین شوند. بخش مرکزی و پایانی: مشابه روش ابتکاری ۱ است.

## الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات پیشنهادی

در این بخش الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات (PSO) برای مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان بندی یکپارچه در محیط جریان کارگاهی جای گشتی پیشنهاد می‌شود. قبل از ارائه الگوریتم پیشنهادی، روش فراابتکاری PSO ابتدایی معرفی می‌شود.

رویکرد حتی زمانی که همه پارامترها به طور کامل شناخته شده‌اند مفید است [۷، ۱۲، ۱۶].

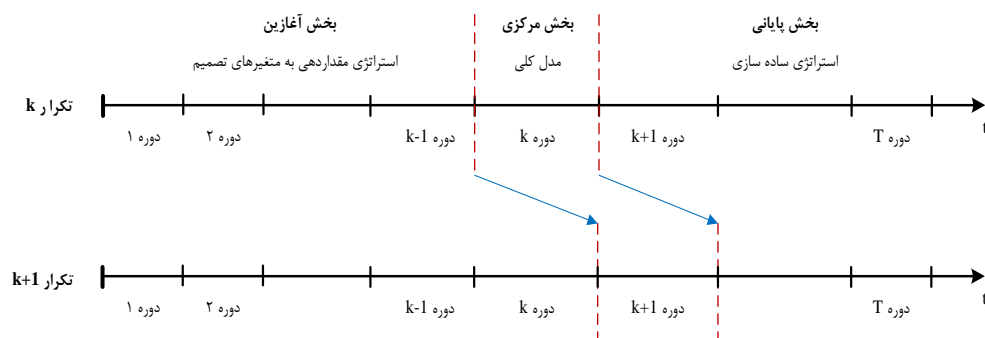
مطابق چارچوبی که مرس و فونتان [۱۶] ارائه کردند، در هر گام رویه تکرار شونده افق برنامه‌ریزی به سه بخش آغازین و مرکزی و پایانی تقسیم می‌شود. برای هر تکرار مشخص  $k$ :

• بخش آغازین شامل  $(k-1)$  دوره است. در این بخش، با توجه به تکرارهای قبل الگوریتم، متغیرهای تصمیم به صورت جزئی یا کامل مطابق استراتژی ثابت کردن متغیرهای تصمیم مقداردهی می‌شوند.

• بخش مرکزی فقط شامل دوره برنامه‌ریزی  $k$ ام است؛ طوری که مسئله برای این دوره به صورت کامل در نظر گرفته می‌شود. در این بخش همه متغیرهای باینری مرتبط با این دوره برنامه‌ریزی در مدل به صورت باینری لحاظ می‌شوند.

• بخش پایانی شامل دوره‌های باقی مانده از دوره  $k+1$  تا دوره  $T$  است که مطابق سیاست ساده‌سازی انتخاب و ساده می‌شوند. با توجه به میزان کاهش پیچیدگی در بخش پایانی، مطابق روش ساده‌سازی انتخاب شده، مسائل با اندازه‌های بزرگ‌تر در زمان محاسباتی معقول حل می‌شوند.

در پایان هر تکرار  $k$ ، برای اینکه سه بخش تعریف شده الگوریتم وارد تکرار جدید شود، یک دوره غلط داده می‌شود. رویه مورد نظر زمانی که تکرار  $T$ ام انجام شود متوقف می‌شود. همان‌طور که مشخص است، آخرین تکرار الگوریتم همه متغیرهای تصمیم را در کل افق برنامه‌ریزی تعیین می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱. نمایش رویه تکرار شونده جهت حل مسئله بر پایه رویکرد افق غلطان

## پیشینه روش PSO

الگوریتم PSO را ابتدا ابرهات و کندی در سال ۱۹۹۵ معرفی کردند [۱۷]. PSO یک الگوریتم جست و جوی بر پایه جمعیت است که بر شبیه سازی رفتار اجتماعی پرندگان و زنبورها و ماهیها منطبق است. شبیه سازی جست و جوی پرندگان برای غذا نشان می دهد اعضای گروه برای پیدا کردن غذا سرعتشان را با دو فاکتور بهترین تجربه خودشان و بهترین تجربه اعضای دیگر تعیین می کنند [۱۸]. هر ذره در گروه با استفاده از موقعیت و سرعت تعریف می شود. به طور کلی، موقعیت ذره نشان دهنده جواب مسئله بهینه سازی و سرعت نشان دهنده فاصله و جهت جست و جوست که حرکت ذرات را راهنمایی می کند. برای یافتن جواب بهینه، هر ذره حرکت خود را بر اساس دانش خود و همسایگانش تنظیم می کند. شی و ابرهات این دو قسمت را به ترتیب جزء ادراکی و جزء اجتماعی نامیدند [۱۹]. همچنین هر ذره سرعتش را بر اساس سرعت جاری، بهترین مکان مشاهده شده برای ذره (pbest)، و بهترین مکان جست و جوشده از سوی گروه (gbest) به روزرسانی می کند. در این بخش، مؤلفه های مختلف الگوریتم PSO تشریح می شود. روش تاگوچی نیز برای تنظیم پارامترهای الگوریتم استفاده می شود.

## الگوریتم PSO پیشنهادی

مشخصه های مختلف الگوریتم پیشنهادی برای حل مسئله مورد نظر تشریح می شود.

### • طرح نمایش جواب

طراحی الگوریتم PSO برای مسئله مورد نظر به طرح نمایش مناسب، برای نشان دادن مشخصه های جواب،

نیاز دارد. در این پژوهش ساختار کلی نمایش جواب استفاده شده برای راه اندازی PSO در شکل ۲ می آید. این ساختار شامل دو بخش I و II است. برچسب های I و II به ترتیب اندازه انباشته و زمان بندی را نشان می دهند. مقدار هر ژن در بخش I نشان دهنده میزان محصولات ( $x_{jt}$ ) یا همان اندازه انباشته محصول  $z$  برای دوره  $t$  است. با توجه به اینکه محیط جریان کارگاهی جای گشتی مطالعه شده است، توالی کارها بر همه ماشینها در هر دوره یکسان است. ژن های هر سطر در بخش II توالی محصولات را در هر دوره نشان می دهد.  $P_{[jt]}$  نشان می دهد در دوره  $t$  کدام محصول باید در موقعیت  $z$ ام بر همه ماشینها پردازش شود.

### • جمعیت اولیه

رویکردهای متفاوت، مانند تولید تصادفی، می تواند برای تولید جمعیت اولیه استفاده شود. این جوابها می توانند به صورت شدنی یا نشدنی ایجاد شوند. عموماً، می توان یک جواب نشدنی را با استفاده از یک رویه اصلاح کننده، که محدودیت های مدل را برای تضمین تأمین این محدودیتها چک می کند، به نزدیک ترین جواب شدنی یا یک جواب شدنی دلخواه تبدیل کرد [۲۰]. یکی از رویه های ساده قابل استفاده جمع و تفریق کردن مقادیری است برای ژنهایی که به نشدنی بودن جواب منجر می شوند.

برای تولید بخش I جمعیت اولیه یک جواب برابر با مقدار تقاضاها قرار می گیرد و باقی مانده جمعیت به صورت تصادفی تولید می شود. توالی اولیه جوابها نیز با استفاده از ترتیب کوتاه ترین زمان پردازش (SPT) [۲۱] و رویه NEH [۲۲] با احتمال یکسان به دست می آید.

دوره		موقعیت						
مجموعه I	$x_{11}$	$x_{12}$	...	$x_{1T}$	$P_{[11]}$	$P_{[21]}$	...	$P_{[N1]}$
	$x_{21}$	$x_{22}$	...	$x_{2T}$	$P_{[12]}$	$P_{[22]}$	...	$P_{[N2]}$
	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮	...	⋮
	$x_{N1}$	$x_{N2}$	...	$x_{NT}$	$P_{[1T]}$	$P_{[2T]}$	...	$P_{[NT]}$
	I				II			

شکل ۲. نمایش جواب

**الگوریتم PSO**

جمعیت اولیه تولید (اندازه انباشته  $(x)$  و توالی (Seq) محصولات) و پارامترهای الگوریتم تنظیم شود. انجام بده.

برای هر ذره  $i$

ارزیابی برازندگی ذره

تعیین  $p_i^{k+1}$  (pbest)

$$p_i^{k+1} = \begin{cases} p_i^k & \text{if } f(X_i^{k+1}) \geq f(p_i^k) \\ X_i^{k+1} & \text{if } f(X_i^{k+1}) < f(p_i^k) \end{cases}$$

پایان

تعیین  $g_i^{k+1}$  (gbest)

$$g_i^{k+1} = \arg \max_i f(p_i^k)$$

برای هر ذره  $i$

برای هر ذره  $j$

به‌روزرسانی سرعت با استفاده از رابطه:

$$V_i^{k+1} = w.V_i^k + c_1.r_1.(p_i^k - X_i^k) + c_2.r_2.(g_i^k - X_i^k)$$

(طوری که  $k$  نشان‌دهنده شماره تکرار،  $c_1$  و  $c_2$  مقادیر ثابت مثبت، و  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی

یکنواخت در بازه  $0$  و  $1$  است. در عمل،  $c_1r_1 + c_2r_2 \leq 4$ .  $w$ ،  $p_i^k$ ،  $X_i^k$ ،  $V_i^k$  به ترتیب

سرعت و موقعیت ذره، وزن اینرسی، pbest و gbest هستند.)

پایان

به‌روزرسانی مکان ذره با استفاده از رابطه:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1}$$

تولید همسایه Seq<sup>n</sup> برای Seq

استفاده از ساختار همسایگی منتخب از SO، InsO، و InvO برای تولید Seq<sup>n</sup>

پایان

تا زمانی که معیار توقف تأمین نشده است.

ثابت بهترین جواب پیدا شده

**شکل ۳. رویه الگوریتم PSO**

- **همسایگی برای زمان‌بندی**
- در این تحقیق، برای تولید یک جواب جدید از جواب جاری برای بخش II (زمان‌بندی)، سه ساختار همسایگی متفاوت اپراتور تعویض (SO)، اپراتور جاسازی (InsO)، و اپراتور معکوس (InvO) استفاده می‌شود. در اپراتور تعویض (SO) موقعیت دو محصول انتخاب شده به صورت تصادفی در جواب جاری با یکدیگر تعویض می‌شوند. در اپراتور جاسازی (InsO) یک محصول انتخاب و به صورت تصادفی در یک موقعیت تصادفی در جواب جاری جاسازی می‌شود. در اپراتور معکوس (InvO) محصولات بین دو موقعیت انتخاب شده به صورت تصادفی در جواب جاری معکوس می‌شوند.
- **شرط توقف**
- الگوریتم PSO تا زمانی که شرط توقف تأمین شود ادامه می‌یابد. در این پژوهش تعداد تکرار (NI) از قبل تعیین و برای شرط توقف استفاده می‌شود. رویه خلاصه شده برای الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات در شکل ۳ می‌آید.
- **تنظیم پارامترها**
- **روش تاگوچی**
- انتخاب مناسب پارامترها نقش بسیار مهمی در کارایی روش‌های فراابتکاری دارد. در این پژوهش، برای تعیین سطح مناسب هر پارامتر، روش تاگوچی استفاده شد.

الگوریتم PSO پیشنهادی در نرم افزار MATLAB R2011a کدنویسی شد و همه تست‌ها بر رایانه‌ای با ویژگی‌های Intel Core i3، پردازشگر 2.53 GHz، و حافظه موقت 4 GB اجرا شد.

#### • تنظیم پارامترهای روش حل

فاکتورهای کنترلی الگوریتم PSO پیشنهادی و سطوح مختلف آن‌ها در جدول ۱ می‌آید. تست‌های اولیه نشان می‌دهد سطوح مختلف در نظر گرفته شده برای فاکتورها، در مقایسه با دیگر مقادیر، نتایج بهتری تولید می‌کند. مطابق تعداد فاکتورها و سطوح مختلف آن‌ها، طرح تاگوچی  $L_{18}$  برای تنظیم پارامترها استفاده می‌شود. یک مجموعه ۵×۱۰×۳ (۲×۳) خواهد بود. درصد انحراف نسبی بزرگ تولید و هر مسئله پنج بار برای رسیدن به داده‌های قابل اطمینان تر حل می‌شود. در طرح عاملی کامل، تعداد آزمایش‌های مورد نیاز ۲۱۸۷۰۰  $= 5 \times 10 \times 3 \times 2 \times 3$  خواهد بود. درصد انحراف نسبی (RPD) به منزله یک معیار عملکرد رایج برای مقایسه روش‌ها به کار می‌رود. RPD به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$RPD = \left( \frac{OF_i - OF_{min}}{OF_{min}} \right) \times 100 \quad (14)$$

طوری که  $OF_i$  و  $OF_{min}$  به ترتیب بهترین جواب پیداشده و مقدار هدف به دست آمده برای تلاش  $i$ ام است.

برای تست اهمیت آماری فاکتورهای کنترل از آنالیز واریانس استفاده می‌شود. جدول‌های ۲ و ۳ آنالیز واریانس مرتبط با نرخ سیگنال به نویز و متوسط RPD را در سطح اطمینان ۹۰ درصد نشان می‌دهند. مقادیر نرخ S/N و RPD در شکل‌های ۴ و ۵ می‌آید. با توجه به جدول ۲، از نظر نرخ سیگنال به نویز تعداد تکرار الگوریتم، ضریب جزء ادراکی، و ساختار جست‌وجوی همسایگی اثر مهمی بر عملکرد الگوریتم PSO پیشنهادی دارند. همچنین، با توجه به جدول ۳، از نظر میانگین RPD، تعداد تکرار، تعداد ذرات، حد بالای وزن اینرسی، ضریب جزء ادراکی، و ساختار جست‌وجوی همسایگی اثر مهمی بر عملکرد روش حل دارند. طبق این جدول‌ها و شکل‌ها، به ترتیب ۲۰۰، ۲۵، ۱، ۱، و

این روش بر پایه ماکزیم کردن معیار عملکرد، که نرخ سیگنال به نویز<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، به منظور تعیین سطوح بهینه فاکتورهای مؤثر در محاسبات، است [۲۳]. به طور کلی، روش تاگوچی به صورتی است که در پی می‌آید [۲۴]:

- برای هر آزمایش نرخ سیگنال به نویز و جدول آنالیز واریانس مشخصه‌های کیفیت آن محاسبه می‌شود.
  - برای فاکتورهایی که اثر مهمی بر نرخ سیگنال به نویز دارند، سطحی که نرخ سیگنال به نویز بالاتری دارد به منزله سطح بهینه فاکتور انتخاب می‌شود.
  - فاکتوری که اثر مهمی بر نرخ سیگنال به نویز ندارد، اما بر میانگین پاسخ اثر مهمی دارد، سطح با مقدار هدف بهتر انتخاب می‌شود.
- برای فاکتورهایی که اثر مهمی بر دو نرخ سیگنال به نویز و میانگین پاسخ ندارند، سطح با مقیاس اقتصادی به منزله مقدار بهتر برای الگوریتم در نظر گرفته می‌شود.

در این پژوهش درصد انحراف نسبی (RPD)<sup>۲</sup> به مثابه متغیر پاسخ با «مقدار کمتر بهتر» استفاده می‌شود. بنابراین، نرخ سیگنال به نویز باید «مقدار بیشتر بهتر» باشد. نرخ سیگنال به نویز به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$\eta_j = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (13)$$

طوری که  $i, j$  و  $n$  به ترتیب نشان‌دهنده تعداد آزمایش، مقدار پاسخ (RPD در این پژوهش)، و تعداد تکرارهاست.

#### • تولید داده‌ها و پارامترها

پارامترهای مورد نیاز برای مسئله مورد بررسی مطابق رویکرد محمدی و همکاران [۱۲] از توزیع‌های یکنواخت زیر استخراج می‌شود.

$$b_{jm} \approx U(1.5, 2), \quad d_{jt} \approx U(0, 150), \quad h_{jt} \approx U(0.2 \times M, 0.4 \times M), \quad p_{jt} \approx U(1.5 \times M, 2 \times M), \\ BC_{jt} \approx U(2 \times M, 3 \times M), \quad w_{ijm} \approx U(35, 70), \quad S_{ijm} \approx U(35, 70) \text{ and } C_{mt} \approx U(a, b), \quad a = 300N + 200(m-1), \quad b = 300N + 300(m-1).$$



پاسخ ندارند. بنابراین، سطح با مقیاس اقتصادی به ترتیب ۵ درصد، ۱، و ۴ به منزله مقدار انتخاب شده برای الگوریتم در نظر گرفته می‌شود.

Invers سطح بهینه و منتخب فاکتورهای NI،  $w_{max}$ ،  $N_p$ ،  $C_1$  و NS هستند. فاکتورهای حد پایین وزن اینرسی ضریب جزء اجتماعی و حد بالای سرعت فاکتورهای هستند که اثر مهمی بر نرخ سیگنال به نویز و میانگین

جدول ۱. فاکتورها و سطوح آنها

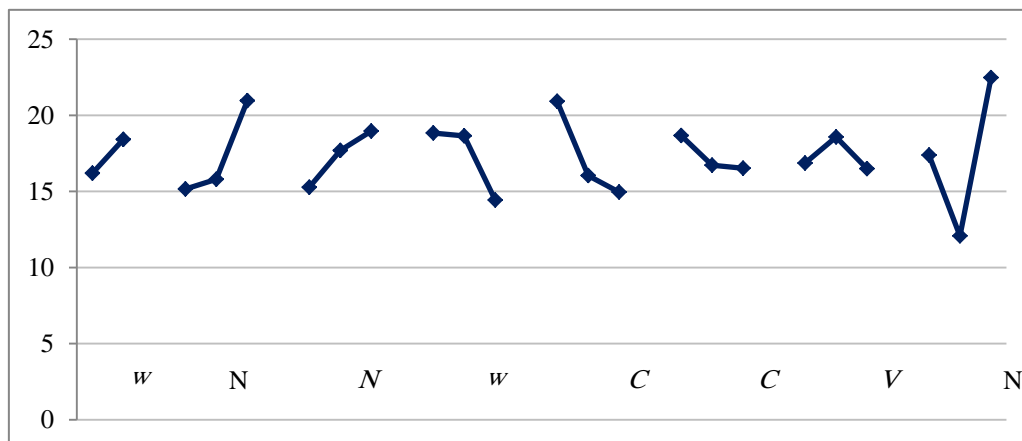
فاکتور	علامت	تعداد سطح	مقدار
تعداد تکرار الگوریتم	NI	۳	۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰
تعداد ذرات	$N_p$	۳	۵، ۱۵، ۲۵
حد بالای سرعت	$V_{max}$	۳	۲، ۴، ۶
حد بالای وزن اینرسی	$w_{max}$	۳	۱، ۱.۵، ۲
حد پایین وزن اینرسی	$w_{min}$	۲	$w_{max} / ۵$ ، $w_{max} / ۲$
ضریب جزء ادراکی	$C_1$	۳	۱، ۱.۵، ۲
ضریب جزء اجتماعی	$C_2$	۳	۱، ۱.۵، ۲
ساختار جست‌وجوی همسایگی برای زمان‌بندی	NS	۳	Swap, Insert, Invers

جدول ۲: تحلیل واریانس نرخ سیگنال به نویز

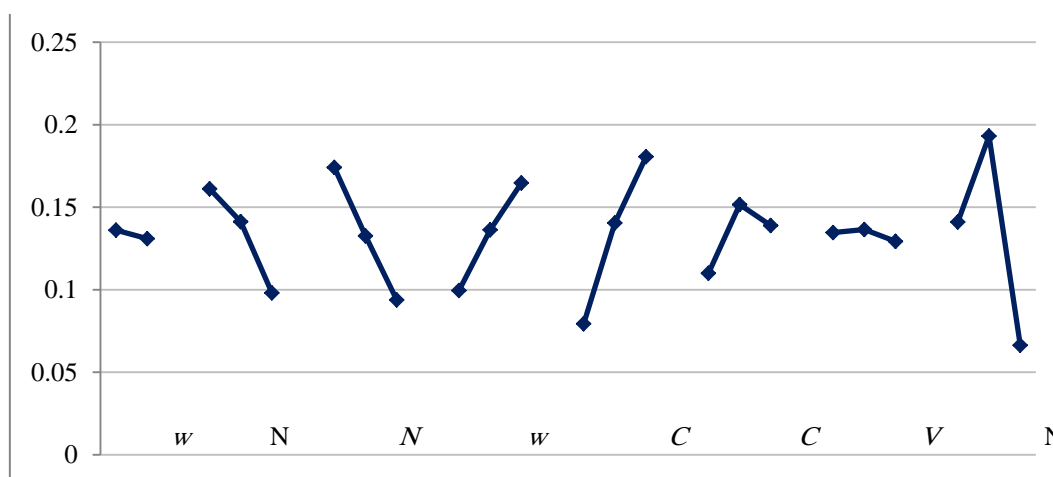
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-value
$w_{min}$	۱	۲۲/۱۶	۲۲/۱۶	۲۲/۱۶۳	۳/۶۰	۰/۱۹۸
NI	۲	۱۲۱/۲۹	۱۲۱/۲۹	۶۰/۶۴۳	۹/۸۴	۰/۰۹۲
$N_p$	۲	۴۲/۱۸	۴۲/۱۸	۲۱/۰۸۸	۳/۴۲	۰/۲۲۶
$w_{max}$	۲	۷۴/۷۱	۷۴/۷۱	۳۷/۳۵۳	۶/۰۶	۰/۱۴۲
$C_1$	۲	۱۲۱/۰۸	۱۲۱/۰۸	۶۰/۵۴۰	۹/۸۲	۰/۰۹۲
$C_2$	۲	۱۶/۹۶	۱۶/۹۶	۸/۴۸۰	۱/۳۸	۰/۴۲۱
$V_{max}$	۲	۱۴/۸۵	۱۴/۸۵	۷/۴۲۴	۱/۲۰	۰/۴۵۴
NS	۲	۳۲۴/۲۸	۳۲۴/۲۸	۱۶۲/۱۳۹	۲۶/۳۱	۰/۰۳۷
Residual Error	۲	۱۲/۳۳	۱۲/۳۳	۶/۱۶۳		
Total	۱۷	۷۴۹/۸۲				

جدول ۳: تحلیل واریانس برای میانگین RPD

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P-value
$w_{min}$	۱	۰/۰۱۲۵	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۶۲	۰/۱۸	۰/۷۱۲
NI	۲	۰/۰۱۹۴	۰/۰۱۹۴	۰/۰۰۹۷	۹/۶۳	۰/۰۹۴
$N_p$	۲	۰/۰۱۲۸	۰/۰۱۲۸	۰/۰۰۶۴	۱۴/۹۸	۰/۰۶۳
$w_{max}$	۲	۰/۰۳۱۲	۰/۰۳۱۲	۰/۰۱۵۶	۹/۸۹	۰/۰۹۲
$C_1$	۲	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۵۴	۰/۰۰۲۷	۲۴/۱۰	۰/۰۴۰
$C_2$	۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱	۴/۲۰	۰/۱۹۲
$V_{max}$	۲	۰/۰۴۸۷	۰/۰۴۸۷	۰/۰۲۴۴	۰/۱۳	۰/۸۸۵
NS	۲	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۶	۳۷/۶۵	۰/۰۲۶
Residual Error	۲	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۶		
Total	۱۷	۰/۰۱۲۵				



شکل ۴. میانگین نرخ  $S/N$  در هر سطح برای تنظیم پارامترهای الگوریتم PSO



شکل ۵. منحنی اثر اصلی برای مقادیر RPD برای تنظیم پارامترهای الگوریتم

## نتایج محاسباتی

شد. همچنین روش PSO پیشنهادی در نرم‌افزار MATLAB R2011(a) برنامه‌نویسی شد.

به منظور ارزیابی عملکرد روش‌های حل، مسائل با اندازه‌های کوچک با استفاده از نرم‌افزار GAMS به صورت دقیق حل می‌شوند و نتایج روش‌های پیشنهادی با آن مقایسه می‌شود. نتایج روش‌های ابتکاری و PSO پیشنهادی در جدول ۴ می‌آید. مطابق جدول ۴ و شکل ۶، الگوریتم PSO پیشنهادی برای مسائل با اندازه کوچک قابلیت دستیابی به جواب بهینه را دارد و عملکرد آن نسبت به روش‌های ابتکاری بهتر است. برای مسائل کوچک متوسط درصد اختلاف از حل دقیق برای الگوریتم PSO پیشنهادی، روش

در این بخش عملکرد روش‌های ابتکاری و فراابتکاری پیشنهادی در پیدا کردن جواب‌های با کیفیت خوب ارزیابی می‌شود. بدین منظور، بیست و دو مسئله تولید شده به صورت تصادفی، با اندازه‌های مختلف، که در اندازه کوچک و متوسط و بزرگ دسته‌بندی شده‌اند، انتخاب می‌شوند. برای هر اندازه مسئله پنج مثال به صورت تصادفی تولید و متوسط نتایج به منزله معیار ثبت می‌شود. پارامترهای مورد نیاز از توزیع‌های یکنواخت تشریح شده در زیربخش تولید داده‌ها و پارامترها برای روش تاگوچی استخراج می‌شود.

مدل دقیق پیشنهادی و روش‌های حل تکرارشونده بر پایه MIP به کمک نرم‌افزار GAMS کدنویسی و حل

عملکرد بهتری دارد. متوسط مقدار هدف به دست آمده برای روش‌های PSO، ابتکاری ۱، و ابتکاری ۲ به ترتیب ۹۸،۲۱، ۱۰۴،۲۰، و ۱۰۸،۲۹ ( $\times 10^3$ ) است. همان‌طور که از میانگین نتایج مشخص است، روش فراابتکاری PSO پیشنهادی نسبت به روش ابتکاری ۱ و ۲ به ترتیب ۱۰،۳ درصد و ۶،۱ درصد به هزینه کل کمتر منتج می‌شود. البته، این عملکرد بهتر در زمان حل بیشتر اما قابل قبول به دست می‌آید.

ابتکاری H1، و روش ابتکاری H2 به ترتیب برابر ۰،۳۴ درصد، ۱،۶۹ درصد، و ۰،۸۶ درصد است. همان‌طور که در جدول ۴ و شکل ۷ مشاهده می‌شود، میزان تابع هدف حاصل از الگوریتم PSO پیشنهادی از میزان تابع هدف حاصل از روش‌های ابتکاری H1 و H2 کمتر است. بنابراین، روش ابتکاری PSO پیشنهادی برای این مسئله عملکرد بهتری دارد. روش ابتکاری H2 نیز در مقایسه با روش ابتکاری H1

جدول ۴: مقایسه نتایج بدست آمده برای مسائل ( $10^3$ )

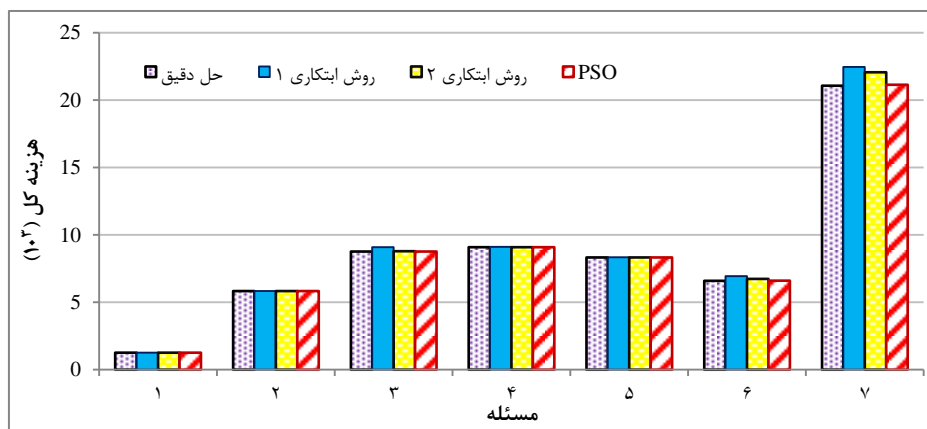
شماره	دسته	اندازه مسئله (N.M.T)	حل دقیق		روش ابتکاری ۱		روش ابتکاری ۲		روش PSO	
			مقدار هدف	زمان حل (s)	مقدار هدف	زمان حل (s)	مقدار هدف	زمان حل (s)	مقدار هدف	زمان حل (s)
۱	اندازه کوچک	۲،۲،۲	۲۶/۱	۵۴/۰	۱/۲۶	۰/۳۵	۱/۲۶	۰/۶۴	۱/۲۶	۶/۸۰
۲		۳،۳،۳	۸۴/۵	۳۵/۱۱	۵/۸۴	۰/۶۶	۵/۸۴	۰/۶۱	۵/۸۴	۱۷/۷۷
۳		۴،۴،۴	۷۶/۸	۰۴/۲۳	۹/۰۸	۰/۵۷	۸/۷۹	۱/۱۲	۸/۷۶	۴۱/۸۷
۴		۳،۳،۵	۰۸/۹	۶۷/۴۱	۹/۱۱	۱/۴۴	۹/۰۸	۱/۹۹	۹/۰۸	۲۵/۳۳
۵		۳،۵،۳	۳۳/۸	۵۲/۵۵	۸/۳۴	۰/۸۲	۸/۳۳	۱/۲۱	۸/۳۳	۲۰/۲۸
۶		۵،۳،۳	۶۰/۶	۴۹/۷۹	۶/۹۴	۰/۹۰	۶/۷۳	۱/۳۰	۶/۶۱	۳۴/۳۷
۷		۵،۵،۵	۰۶/۲۱	۵۳/۱۳۸	۲۲/۴۶	۱/۱۸	۲۲/۰۶	۱/۹۷	۲۱/۱۴	۷۲/۷۶
۸	اندازه متوسط	۵،۵،۷	---	---	۳۲/۱۳	۱۲/۰۵	۳۱/۸۱	۱۳/۱۹	۳۱/۴۲	۱۰۱/۶۴
۹		۵،۷،۵	---	---	۲۹/۸۸	۱۳/۰۶	۲۹/۴۴	۱۳/۸۹	۲۹/۱۰	۹۱/۷۹
۱۰		۵،۵،۱۰	---	---	۴۲/۹۸	۱۳/۲۱	۴۱/۸۶	۱۴/۹۶	۴۰/۳۱	۱۴۶/۶۳
۱۱		۵،۱۰،۵	---	---	۴۴/۶۲	۱۰/۷۷	۴۲/۷۰	۱۱/۸۹	۴۱/۵۸	۱۱۹/۹۰
۱۲		۷،۵،۵	---	---	۳۶/۱۲	۱۲/۱۰	۳۲/۶۴	۸۳/۱۲	۲۹/۵۰	۱۳۵/۱۹
۱۳		۷،۷،۷	---	---	۶۸/۲۶	۱۳/۲۱	۶۳/۹۲	۱۴/۹۸	۶۱/۶۶	۲۳۴/۶۵
۱۴		۷،۷،۱۰	---	---	۷۶/۶۴	۲۱/۹۲	۷۳/۱۲	۲۵/۳۴	۷۰/۳۸	۳۳۹/۱۹
۱۵		۷،۱۰،۷	---	---	۸۷/۶۰	۲۰/۲۹	۸۵/۸۱	۲۳/۱۲	۸۲/۳۵	۳۰۷/۰۳
۱۶		۱۰،۵،۵	---	---	۴۹/۳۷	۱۷/۵۵	۴۴/۶۲	۱۸/۹۱	۴۵/۴۲	۲۷۳/۰۵
۱۷		۱۰،۷،۷	---	---	۹۷/۶۱	۱۹/۷۹	۹۲/۶۹	۲۳/۶۷	۸۸/۵۵	۴۷۷/۱۱
۱۸	اندازه بزرگ	۱۰،۱۰،۱۰	---	---	۱۷۹/۰۱	۹/۱۱	۱۷۵/۳۶	۱۰۳/۲۹	۱۷۰/۶۰	۹۱۶/۳۰
۱۹		۱۰،۱۰،۱۵	---	---	۲۹۹/۶۱	۵۴۹/۶۱	۲۸۵/۱۴	۵۸۳/۴۳	۲۷۶/۳۵	۱۲۳۰/۷۰
۲۰		۱۰،۱۵،۱۰	---	---	۲۸۷/۱۹	۵۵۹/۳۸	۲۸۱/۱۹	۵۸۱/۳۴	۲۷۴/۶۵	۱۱۳۱/۷۰
۲۱		۱۵،۱۰،۱۰	---	---	۳۲۵/۹۱	۴۸۱/۹۷	۲۹۸/۲۱	۵۱۶/۸۱	۲۵۷/۰۱	۱۲۸۲/۸۰
۲۲		۱۵،۱۵،۱۵	---	---	۶۶۲/۳۸	۶۸۶/۵۸	۶۵۱/۸۷	۸۱۵/۱۴	۶۰۰/۶۵	۱۵۱۵/۹۱
میانگین			---	---	۱۰۸/۲۹	۸۳/۰۰	۱۰۴/۲۰	۱۲۶/۴۶	۹۸/۲۱	۳۸۷/۳۹

## نتیجه گیری

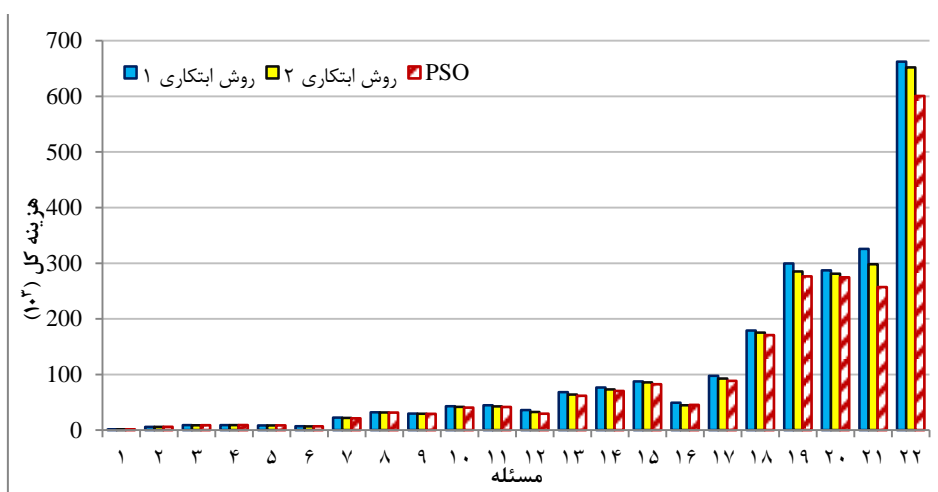
در این پژوهش یک سیستم تولیدی چندمحصولی و چنددوره‌ای در محیط جریان کارگاهی جای‌گشتی با محدودیت منابع در نظر گرفته شد. یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط جدید با رویکرد ظرف زمانی بزرگ برای مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی یکپارچه پیشنهاد شد که قابلیت برنامه‌ریزی تولید و زمان‌بندی را به صورت هم‌زمان دارد. هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های تولید، موجودی، کمبود، و راه‌اندازی است. با توجه به پیچیدگی محاسباتی بسیار زیاد مسئله مورد بررسی، برای حل آن یک الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات و دو روش ابتکاری بر پایه برنامه‌ریزی عدد صحیح با چارچوب افق غلطان پیشنهاد شد. روش تاگوچی برای تنظیم پارامترهای روش فراابتکاری به کار رفت.

نتایج محاسباتی بر مجموعه‌ای از مسائل با اندازه‌های مختلف تولیدشده، به صورت تصادفی، نشان داد روش PSO پیشنهادی نسبت به دو روش ابتکاری عملکرد بهتری دارد. متوسط مقدار هدف به دست آمده برای روش‌های PSO، ابتکاری ۱، و ابتکاری ۲ به ترتیب ۹۸/۲۱، ۱۰۴/۲۰، و ۱۰۸/۲۹ ( $\times 10^3$ ) است. این عملکرد بهتر در زمان حل بیشتر به دست می‌آید.

برای مطالعات آتی روی این موضوع، می‌توان سایر فرضیات موجود در مسئله تعیین اندازه انباشته و زمان‌بندی، مانند فضای بافر محدود بین ایستگاه‌های کاری و محدودیت‌های حمل‌ونقل درون کارخانه، را در نظر گرفت و مدل پیشنهادی را توسعه داد. لحاظ کردن عدم قطعیت موجود در سیستم‌های تولیدی یکی دیگر از محیط‌های باز برای تحقیقات است.



شکل ۶. مقایسه نتایج روش‌های PSO، ابتکاری، و حل دقیق برای مسائل با اندازه کوچک



شکل ۷. مقایسه نتایج روش‌های ابتکاری برای مسائل با اندازه متوسط و بزرگ

## مراجع

- 1- Lasserre, J. B. (1992). "An integrated model for job-shop planning and scheduling." *Management Science*, Vol. 38, No. 8, 1201–1211.
- 2- Anwar, M. F. and Nagi, R. (1997). "Integrated lot-sizing and scheduling for just-in-time production of complex assemblies with finite set-ups." *International Journal of Production Research*, Vol. 35, 1447–1470.
- 3- Kim, H., Jeong, H. -I., and Park, J. (2008). "Integrated model for production planning and scheduling in a supply chain using benchmarked genetic algorithm." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 39, 1207–1226.
- 4- Karimi, B., Fatemi Ghomi, S. M. T., and Wilson, J. M. (2003). "The capacitated lot sizing problem: A review of models and algorithms." *Omega*, Vol. 31, No. 5, 365–378.
- 5- Drexl, A. and Kimms, A. (1997). "Lot sizing and scheduling, survey and extensions." *European Journal of Operational Research*, Vol. 99, No. 2, 221–235.
- 6- Fleischmann, B. and Meyr, H. (1997). "The General Lotsizing and Scheduling Problem." *OR Spektrum*, Vol. 19, No. 1, 11-21.
- 7- Clark, A. R. and Clark, S. J. (2000). "Rolling-horizon lot-sizing when setup times are sequence-dependent." *International Journal of Production Research*, Vol. 38, No. 10, 2287–2308.
- 8- Buschkühl, L., Sahling, F., Helber, S., and Tempelmeier, H. (2010). "Dynamic capacitated lot-sizing problems: a classification and review of solution approaches." *OR Spectrum*, Vol. 32, 231–261.
- 9- Kimms, A. (1996). "Multi-level, single-machine lotsizing and scheduling (with initial inventory)." *European Journal of Operational Research*, Vol. 89, No. 1, 86–99.
- 10- Kimms, A. and Drexl, A. (1998). "Some insights into proportional lotsizing and scheduling." *Journal of the Operational Research*, Vol. 49, No. 11, 1196-1205.
- 11- Fandel, G. and Stammen-Hegene, C. (2006). "Simultaneous lot sizing and scheduling for multi-product multi-level production." *International Journal of Production Economics*, Vol. 104, No. 2, 308–316.
- 12- Mohammadi, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., Karimi, B., and Torabi, S. A. (2010). "Rolling-horizon and fix-and-relax heuristics for the multi-product multi-level capacitated lotsizing problem with sequence-dependent setups." *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 21, 501–510.
- 13- Mohammadi, M., Karimi, B., Fatemi Ghomi, S. M. T., and Torabi, S. A. (2010). "A new algorithmic approach for capacitated lot-sizing problem in flow shops with sequence-dependent setups." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 49, 201–211.
- 14- Mohammadi, M. (2010). "Integrating lotsizing, loading, and scheduling decisions in flexible flow shops." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 50, 1165–1174.
- 15- Ramezani, R., Saidi-Mehrabad, M., and Teimoury, E. (2013). "A mathematical model for integrating lot-sizing and scheduling problem in capacitated flow shop environments." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, 347–361.
- 16- Merece, C. and Fonton, G. (2003). "MIP-based heuristics for capacitated lotsizing problems." *International Journal of 1 - Production Economics*, Vol. 85, No. 1, 97–111.
- 17- Eberhart, R. and Kennedy, J. (1995). *A New Optimizer Using Particles Swarm Theory. Proc. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science* (Nagoya, Japan), IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 39-43.
- 18- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). *Particle Swarm Optimization. IEEE Conference on Neural Networks*, (Perth, Australia), Piscataway, NJ, IV, 1942-1948.
- 19- Shi, Y. and Eberhart, R. C. (1998). *A modified particle swarm optimizer. In Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 69–73.

- 20- Chinneck, J. W. (2008). *Feasibility and Infeasibility in Optimization: Algorithms and Computational Methods*. Springer Science+Business Media, New York.
- 21- Pinedo, M. (2008). *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*, springer, 3th edition.
- 22- Nawaz, M., Ensore Jr, E., and Ham, I. (1983). "A heuristic algorithm for the m-machine, n job flowshop sequencing problem." *OMEGA International Journal Management Science*, Vol. 11, 91-95.
- 23- Taguchi, G., Chowdhury, S., and Taguchi, S. (2000). *Robust engineering*. McGraw-Hill, New York.
- 24- Jeff Wu, C. F. and Hamada, M. (2002). *Experiments: Planning analysis and parameter design optimization*. Wiley.
- 25- Phadke, M. S. (1989). *Quality engineering using robust design*. USA: Prentice-Hall.

### واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Particle Swarm Optimization
  - 2- Capacitated Lot-sizing Problem
  - 3- Discrete Lot-sizing and Scheduling Problem
  - 4- Continuous Setup Lot-sizing Problem
  - 5- Proportional Lot-sizing and Scheduling Problem
  - 6- General Lot-sizing and Scheduling Problem
  - 7- Multi-level
  - 8- Relative Percentage Deviation
  - 9- Signal-to-noise ratios-S,N
-