

## حل مسأله زمان‌بندی شبکه هوشمند چندکارخانه‌ای در محیط تولید کارگاهی با استفاده از الگوریتم آزادسازی لاگرانژ بهبودیافته

نعیمه باقری راد<sup>۱</sup>، جواد بهنامیان<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲. دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

### خلاصه

در این مقاله مسأله زمان‌بندی زمان‌آنی شبکه تولید چندعاملی در محیط کارخانه‌های هوشمند با سیستم تولیدی کارگاهی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این سیستم تولیدی هوشمند، تعدادی کارخانه با مالکیت مستقل برای تشکیل یک شبکه تولید چندعاملی که شبکه تولید مجازی نیز نامیده می‌شود به یکدیگر ملحق می‌شوند. در چنین شبکه‌ای، هر کارخانه روی منافع خود تمرکز دارد و با یکدیگر از طریق به اشتراک‌گذاری اطلاعاتی چون خرابی ماشین‌ها و جابه‌جایی کارها در ارتباط هستند. بنابراین می‌توان بیان کرد که مطالعه مسأله زمان‌بندی توزیع‌شده در محیط کارخانه‌های هوشمند امری مهم است و تأثیر به‌سزایی در کسب نتایج مطلوب و ایده‌آل خواهد داشت. در ابتدا، یک مدل دوهدفه برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ارائه می‌شود؛ سپس یک رویکرد جهت حل مسأله پویای زمان‌بندی زمان‌آنی پیشنهاد می‌گردد. با توجه به کاربردهای موفق الگوریتم آزادسازی لاگرانژ در حل مسائل مختلف، در این تحقیق جهت حل مسأله از الگوریتم آزادسازی لاگرانژ بهبودیافته استفاده می‌شود. برای بررسی عملکرد الگوریتم آزادسازی لاگرانژ پیشنهادی، نتایج حاصل از آن با حل مدل اصلی توسط روش اپسیلون محدودیت تقویت شده مقایسه گردید. نتایج حاصل شده نشان داد الگوریتم آزادسازی لاگرانژ پیشنهادی عملکرد بهتری نسبت به روش اپسیلون محدودیت تقویت یافته را دارد.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۱/۱۲/۲۳

پذیرش ۱۴۰۲/۰۳/۲۹

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

زمان‌بندی زمان‌آنی

کارخانه‌های نسل ۴/۰

تولید چندکارخانه‌ای

سیستم چندعاملی

آزادسازی لاگرانژ

### ۱. مقدمه

ادغام فن‌آوری‌های جدید در بخش تولید، زمینه را برای ایجاد "کارخانه آینده" فراهم کرده است. این سیستم‌ها از فناوری‌های ارتباطی و دیجیتال‌سازی برای نظارت بر سیستم فیزیکی استفاده می‌کنند. با توجه به این فناوری‌ها کارخانه‌ها می‌توانند چابک‌تر، انعطاف‌پذیرتر و پاسخگوتر باشند. در چنین شرایطی، اپراتور غالباً ناظر بر مجموعه‌ای از منابع تولید هوشمند است و توسط پایانه‌های اختصاصی آن‌ها را پشتیبانی می‌کند [۱]. برای پشتیبانی از تحقق این الگوی جدید برخی از فعالیت‌ها مورد نیاز است. به‌طور خاص، سفارشی‌سازی انبوه در زمان‌های کوتاه منجر به مسائلی چون شناخت کمیت و نوع تقاضا، گردش

محصولات و نوسانات آن‌ها و افزایش اختلال در مدل تولید به‌دلیل تنوع زیاد محصولات تولیدی و کوتاه شدن چرخه‌ی عمر آن‌ها می‌شود. با توجه به پیشرفت‌های چشم‌گیر در سال‌های اخیر، زمان‌بندی در صنعت ۴/۰ هنوز در آغاز تحقیقات خود است [۲]. ایوانف و همکاران<sup>۲</sup> [۳] برای اولین بار مسائل زمان‌بندی در صنعت ۴/۰ را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها بر نقش اطلاعات زمان‌آنی جهت کاهش پیچیدگی مسائل زمان‌بندی Np-hard تأکید داشتند. هدف این صنعت انعطاف-پذیری، شخصی‌سازی و چابکی بیش‌تر سیستم‌های تولیدی است. به‌عنوان مثال، کارخانه هوشمند آئودی در بادن-وورتمبرگ<sup>۳</sup> یک سیستم مونتاژ بسیار انعطاف‌پذیر براساس استفاده از وسایل نقلیه

2. Ivanov et al  
3. Baden-Württemberg

\* نویسنده مسئول: جواد بهنامیان  
تلفن: ۰۸۱-۳۸۲۹۲۵۰۵؛ پست الکترونیکی: [Behnamian@Basu.ac.ir](mailto:Behnamian@Basu.ac.ir)

دسترسی از یک نقطه ثابت زمانی شروع و در یک نقطه زمانی پایان می‌یابد؛ اما در محدودیت‌های دسترسی نامعین زمان شروع دوره نامعین می‌باشد. به‌صورت کلی دو علت برای عدم دسترسی ماشین‌ها در سیستم‌های تولیدی وجود دارد: خرابی ماشین یا ازکارافتادگی و تعمیرات و نت پیشگیرانه. در مدل پیشنهادی فرض شده است عدم دسترسی ماشین‌ها به‌علت خرابی است. خرابی ماشین بدین معنی است که ماشین به‌دلایلی چون تعمیر یا انجام عملیات تعمیر و نگهداری برای مدتی از دسترس خارج می‌شود. سه سیاست در برخورد با عدم دسترسی ماشین‌ها به‌دلایل خرابی و تعمیرات و نگهداری وجود دارد: ادامه پردازش کار<sup>۴</sup>، ادامه پردازش جزئی کار<sup>۵</sup> و پردازش ازسرگیری مجدد کار [۷]. در هر سه سیاست انقطاع عملیات مجاز است. در استراتژی اول (ادامه پردازش کار) پردازش کار بعد از اتمام دوره عدم دسترسی ماشین، بدون جریمه و اتلاف زمان ادامه می‌یابد [۸]. در استراتژی ادامه پردازش جزئی بعد از پایان دوره عدم دسترسی به صورت جزئی (از میانه نه از ابتدا) شروع می‌شود [۷]. در این استراتژی باید درصدی از پردازش‌هایی که قبل از دوره عدم دسترسی انجام شده بود مجدداً انجام گیرد. در استراتژی پردازش ازسرگیری مجدد کار بعد از دسترس بودن ماشین، پردازش کار از ابتدا انجام می‌شود [۹]. در مدل پیشنهادی محدودیت عدم دسترسی از نوع نامعین و استراتژی برخورد با این محدودیت از نوع ادامه پردازش کار فرض شده است. با بررسی‌های پژوهش‌های حاضر در این زمینه در سال‌های اخیر مشاهده شد که روش‌های حل مختلفی برای مسائل زمان بندی پویا پیشنهاد شده است؛ اما هیچ کدام از الگوریتم‌آزادسازی لاگرانژ استفاده نکرده‌اند. لذا در این مقاله برای اولین بار از این الگوریتم به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در حل مسائل پیچیده استفاده شده است.

ساختار این مقاله به‌شرح ذیل است: در بخش ۲ به مرور ادبیات و پیشینه تحقیق مسأله پرداخته می‌شود. در بخش ۳، مسأله مورد بررسی تشریح و مدل ریاضی مسأله ارائه می‌گردد. در بخش ۴ الگوریتم آزادسازی لاگرانژ و ساختار آن شرح داده می‌شود. در بخش ۵ نتایج محاسباتی مسائل نمونه و اعتبارسنجی روش حل پیشنهادی ارائه می‌گردد. نتیجه‌گیری از کار و تحقیقات آتی نیز در بخش ۶ ارائه می‌شود.

## ۲. مرور ادبیات

در سال‌های اخیر مسائل زمان بندی پویا توجه محققین بسیاری را به خود جلب کرده است. بسیاری از رویکردهای زمان بندی مجدد در محیط‌های مختلف تولیدی از جمله سیستم‌های تولید تک‌ماشین [۱۰]، ماشین‌های موازی [۱۱]، جریان کارگاهی، تولید کارگاهی و سیستم‌های تولید انعطاف پذیر توسعه یافته‌اند. هدف در این بخش بررسی روش‌های حل مسائل زمان بندی پویا در محیط تولید کارگاهی است. بدین منظور در ذیل برخی از مطالعات انجام شده در این حوزه آورده شده است.

هالووی و نلسون [۱۲] در سال ۱۹۷۴، برای اولین بار مسأله زمان

هدایت خودکار را پیاده‌سازی کرده است. در صنعت ۴/۰، سیستم‌های تولیدی در سطح هوشمند به‌روز می‌شوند. تولید هوشمند از دستیابی به فناوری‌های پیشرفته اطلاعات و ساخت برای دستیابی به فرآیندهای تولید انعطاف پذیر، هوشمند و قابل تنظیم استفاده می‌کند. در این مقاله سعی شده است ویژگی‌هایی از این صنعت نظیر برخط بودن، مشارکت، اشتراک‌گذاری اطلاعات، داده‌های زمان آنی و انعطاف پذیری در نظر گرفته شود. امروزه زمان بندی تولید در محیط تولید چندکارخانه‌ای به‌عنوان مسأله زمان بندی توزیع شده بیان گردیده است. با توسعه فرهنگ همکاری در تولید محصولات مختلف در چند کارخانه، مسأله زمان بندی توزیع شده برای استفاده بهتر از منابع، افزایش بهره‌وری و سود، کاهش هزینه‌های تولید، کاهش ریسک مدیریت و افزایش کیفیت محصول بسیار مفید است. لذا می‌توان بیان کرد که امروزه یک محیط تولید چندکارخانه‌ای اهمیت بیشتری پیدا کرده است. در چند سال اخیر، تولید در محیط توزیع شده در شبکه تولید چندکارخانه‌ای جزء جذاب‌ترین موضوعات می‌باشد [۴]. بنابراین ساختار شرکت‌ها از پیکربندی‌های ساده به توزیع شده در حال تغییر هستند.

برای حفظ شرایط رقابت پذیری در بازار جهانی، کارخانه‌ها تصمیم به ایجاد شبکه تولید متشکل از چندین کارخانه می‌نمایند. داشتن عکس‌العمل‌های سریع‌تر و بهتر در مقابل تغییرات از دیگر انگیزه‌های اصلی تولیدکنندگان در جهت توسعه کارخانه‌ها از طریق ایجاد شبکه‌های قدرتمند تولید است. از دیگر مزایای ایجاد شبکه‌های تولیدی آن است که اعضاء می‌توانند در مواقع نیاز به سرعت و به‌صورت کارا منابع تولیدی در دسترس خود را در جهت تولید هرچه بهتر کارها در سرتاسر شبکه به اشتراک بگذارند [۵]. مشارکت کارخانه‌ها در شرایط اضطرار یکی از عوامل هوشمندسازی سیستم‌های تولیدی است که با انعطاف-پذیری و اشتراک‌گذاری اطلاعات به‌صورت موقت سعی می‌کند سفارش‌ها را به‌سرعت در اختیار سفارش‌دهنده قرار دهد. یکی از تأثیرات مهم ایجاد چنین شبکه‌هایی در دسترس بودن منابع ارزان‌تر، توانایی تولید بالاتر و مواجهه سریع‌تر با تغییرات موجود است. همچنین از دیگر فواید ایجاد چنین سیستم‌هایی، عدم توقف کل روند تولید در صورت خرابی یکی از عوامل است، چراکه در حالت تولید متمرکز در یک کارخانه وقوع توقف در تولید اجتناب‌ناپذیر بوده و ممکن است به بهای از دست رفتن کل سفارش تولید گردد [۶]. در این شبکه تولیدی فرض شده است اگر کارخانه‌ای از اعضای شبکه به‌دلایلی چون خرابی ماشین، غیبت اپراتورهای متخصص و ... نتواند تعهدات خود را انجام دهد از طریق اشتراک‌گذاری اطلاعات با کارخانه‌های دیگر می‌تواند مقدار تولید محصولات خود را به آن‌ها واگذار کند.

یک مدل زمان بندی واقعی باید محدودیت‌های دسترسی به ماشین را در نظر بگیرد. در نظر گرفتن محدودیت‌های عدم دسترسی منجر به کاهش تعداد برنامه‌های زمان بندی و پایداری برنامه ایجاد شده می‌شود. به‌طور معمول محدودیت‌های دسترسی قطعی به دو دسته طبقه بندی می‌شوند: معین، نامعین. در محدودیت‌های دسترسی معین دوره عدم

5. Semi resumption (S-R)

4. Resumable(R)

توزیع شده<sup>۱۰</sup> را پیشنهاد دادند. وانگ و همکاران [۲۷] یک روش زمان-بندی پویا مبتنی بر یادگیری تقویتی عمیق<sup>۱۱</sup> جهت حل مسأله زمان-بندی تولید کارگاهی پیشنهاد کردند. لو و همکاران [۲۸] یک رویکرد یادگیری تقویتی عمیق بهبودیافته<sup>۱۲</sup> را جهت حل مسأله زمان‌بندی پویا پیشنهاد کردند. خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در جدول (۱) آورده شده است. براساس بررسی‌های صورت گرفته در جدول فوق، مقالات از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری استفاده کرده‌اند. با توجه به کاربردهای موفق الگوریتم آزادسازی لاگرانژ در حل مسائل مختلف، در این تحقیق برای اولین بار، جهت حل مسأله مورد مطالعه یک الگوریتم آزادسازی لاگرانژ بهبودیافته پیشنهاد شده است.

### ۳. بیان مسأله

مسأله مورد مطالعه شامل دومرحله است. مرحله زمان‌بندی در سطح کارخانه‌ها و مرحله زمان‌بندی زمان آبی با در نظر گرفتن داده‌های زمان آبی (اشتراک گذاری اطلاعات، ورود کارهای جدید و خرابی ماشین‌ها). ورودی مرحله اول اطلاعات سفارش‌ها است که شامل زمان‌های پردازش، تعداد کارها، موعدهای تحویل، سرعت ماشین‌آلات در هر کارخانه و ... است؛ که به‌صورت استاتیک به مدیریت مرحله اول داده می‌شود. خروجی مرحله اول فرآیند سفارش هر روز می‌باشد که ترتیب و تخصیص انجام کارها در کارخانه‌ها را مشخص می‌کند. در ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط برای این مرحله ارائه می‌گردد. کارخانه‌ها در شبکه‌های چندعاملی به دنبال آن هستند که سود خود را مستقل از سایر کارخانه‌ها به حداکثر مقدار برسانند. لذا در این مسأله دو هدف کمینه کردن دوره ساخت و مصرف انرژی کل به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده است.

هر کارخانه ناهمسان با سیستم تولید کارگاهی متعلق به یکی از اهداف (عامل) معرفی شده می‌باشد. در شبکه تولید ایجاد شده کارخانه-ها دارای ساختار موازی هستند. جهت نشان دادن این نکته از دو نماد  $G_1$  و  $G_2$  استفاده می‌شود.  $G_1$  شامل کارخانه‌هایی می‌شود که به دنبال کمینه کردن دوره ساخت هستند.  $G_2$  شامل کارخانه‌هایی می‌شود که تابع هدف آن‌ها مصرف انرژی کل می‌باشد. هر کار  $i$  بر روی ماشین  $i$  دارای زمان پردازش  $PS_{r,i}$  و هر ماشین  $i$  در کارخانه  $f$  دارای سرعت  $v_{if}$  می‌باشد. وقتی که کار  $i$  پردازش می‌شود، در کارخانه  $f$  زمان  $PS_{i,f}/V_{i,f}$  مورد نیاز است تا آن کار تکمیل گردد. اگر یک کار در کارخانه خودش پردازش نشود، زمان پردازش آن برابر است با  $PS_{i,f}/V_{i,f} + 2tr_{f,q}$ . در این مسأله ماشین  $i$  در کارخانه  $f$  دارای فعالیت نت با زمان پردازش  $Pr_{r,i,f}$  می‌باشد که باید زمان تکمیل این فعالیت در پنجره زمانی  $[ET_{r,i,f}, LT_{r,i,f}]$  قرار گیرد.

بندی تولید کارگاهی پویا را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها یک روش ابتکاری چندمرحله‌ای برای حل این مسأله را پیشنهاد کردند. فانگ و اکی [۱۳] فرض کردند که زمان آماده‌سازی وابسته به توالی است. آن‌ها یک استراتژی افق زمانی غلتکی جهت حل مسأله زمان‌بندی تولید کارگاهی پویا را پیشنهاد کردند. همچنین آن‌ها یک الگوریتم ترکیبی مبتنی بر الگوریتم  $GA$  و قوانین توزیع برای حل مسأله را پیشنهاد کردند. ادیبی و همکاران [۱۴] برای این مسأله یک شبکه عصبی مصنوعی با اهداف بیکاری و دوره ساخت را پیشنهاد کردند. نتایج محاسباتی نشان داد که رویکرد پیشنهادی دارای بالاترین اثربخشی و کارایی می‌باشد. با توجه به پیچیدگی مسأله، سرکارا و همکاران [۱۵] یک الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه مبتنی بر یادگیری<sup>۶</sup> را پیشنهاد کردند. جهت تحلیل سیستم در هنگام خرابی، از دو پارامتر میانگین زمان بین خرابی‌ها<sup>۷</sup> و میانگین زمان تعمیر<sup>۸</sup> استفاده کردند. ژانگ و وانگ [۱۶] یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر الگوریتم  $ACO$  و سیستم‌های چندعاملی را جهت حل این مسأله را پیشنهاد کردند. وانگ و همکاران [۱۷] یک الگوریتم ژنتیک بهبودیافته برای کمینه کردن دوره ساخت را پیشنهاد کردند. همچنین آن‌ها برای جلوگیری از قرار گرفتن راه‌حل در بهینه محلی از یک استراتژی نخبه‌گرا و یک استراتژی بهبود تنوع جمعیت استفاده کردند. شن و یائو [۱۸] یک الگوریتم تکاملی چندهدفه برای مسأله تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر پویا را پیشنهاد کردند. آن‌ها عملکرد الگوریتم پیشنهادی را با سه الگوریتم دیگر مقایسه کردند. نتایج نشان داد الگوریتم پیشنهادی دارای عملکرد بهتری می‌باشد. ژانگ و همکاران [۱۹] یک روش برنامه‌ریزی دولایه مبتنی بر نظریه بازی برای مسأله زمان‌بندی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر را پیشنهاد کردند. ژانگ و همکاران [۲۰] یک روش زمان‌بندی مجدد و یک الگوریتم هوشمند ترکیبی برای این مسأله را پیشنهاد کردند. جهت بهبود الگوریتم پیشنهادی، آن‌ها یک روش ابتکاری که ترکیبی از الگوریتم‌های  $GA$  و  $TS$  می‌باشد را مطرح کردند. گائو و همکاران [۲۱] یک الگوریتم گسسته جایا برای مسأله زمان‌بندی مجدد  $FJSP$  را پیشنهاد کردند.

ون و کائو [۲۲] جهت حل مسأله یک الگوریتم بهبودیافته کلونی مورچه<sup>۹</sup> را نیز توسعه دادند. کونداکچی و کولاک [۲۳] یک الگوریتم  $GA$  ترکیبی برای مسأله زمان‌بندی پویا با هدف کمینه کردن دوره ساخت را پیشنهاد کردند. وانگ و همکاران [۲۴] یک رویکرد بهینه سازی تئوری بازی با بی‌نهایت تکرار را جهت حل مسأله زمان‌بندی  $FJSP$  پیشنهاد کردند. وانگ و همکاران [۲۵] جهت حل مسأله زمان-بندی تولید کارگاهی یک الگوریتم  $PSO$  در حالت پویا را پیشنهاد کردند. وانگ و همکاران [۲۶] یک رویکرد مبتنی بر تئوری بازی تکاملی جهت حل مسأله زمان‌بندی زمان آبی تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر و

10. Distributed and flexible job shop real-time scheduling  
11. Dynamic scheduling method based on deep reinforcement learning (DRL)  
12. An improved deep reinforcement learning method

6. Multi-objective teacher learning-based optimization algorithm (MOTLBO)  
7. Mean Time Between Failures (MTBF)  
8. Mean Time To Repair (MTTR)  
9. Ant Colony Algorithm (ACA)

به شرایط مسأله می‌تواند شامل یک تا چندین مرحله باشد. خروجی مرحله دوم نیز زمان بندی مجدد کارها با در نظر گرفتن داده‌های زمان آنی رخ داده در روز قبل و داده‌های باقیمانده از مرحله قبل است. ورودی مرحله زمان بندی زمان آنی، شامل دو بخش است، اولین بخش کارهای باقیمانده و وضعیت ماشین‌های دوره قبل ( $T-1$ ) و بخش دوم شامل کارهای جدید و وضعیت ماشین‌های در دوره فعلی ( $T$ ). در این مرحله افق تولیدی به چند دوره  $T$  با واحد زمان یکروزه تقسیم می‌شود. هر دوره  $T$  شامل یک شیفت کاری ۸ ساعت می باشد و به چند دوره کوچک  $t$  تقسیم بندی می‌شود. به طور معمول واحد زمان  $t$  یک ساعت در نظر گرفته شده است. با دریافت داده‌های زمان آنی از طریق سیستم های RFID در دوره‌های کوچکتر ( $t$ ) و ابتدای دوره  $T$ ، مجدد زمان بندی در ابتدای هر دوره  $T$  انجام می‌گردد. مفروضات مدل در مرحله اول به شرح ذیل است:

- در هر زمان هر کار حداکثر بر روی یک ماشین پردازش می‌شود و هر ماشین می‌تواند تنها یک کار را پردازش کند.
- تعدادی کار مستقل وجود دارد که در زمان ۰ در دسترس هستند و زمان پردازش کارها بر روی ماشین‌ها از قبل مشخص می‌باشد.
- قطع کردن عملیات کارها مجاز نیست، مگر در زمانی که ماشین خراب شود.
- ظرفیت بافر بین ماشین‌ها بی‌نهایت در نظر گرفته شده است.
- زمان‌های بارگیری و تخلیه بارها در زمان حمل و نقل در نظر گرفته شده است.
- تعداد نامحدودی وسیله نقلیه بین کارخانه‌ها برای جابه‌جایی کارها وجود دارد.
- تعداد حمل و نقل با کیفیت، ظرفیت، زمان و هزینه مشابه نامحدود است.
- زمان‌های آماده‌سازی در زمان پردازش در نظر گرفته شده است.
- محدودیت دسترسی از نوع قطعی و نامعین است.
- سیاست پردازش ادامه پردازش کار است.
- قطع کردن عملیات تعمیرات مجاز نمی‌باشد.
- پارامترها و متغیرهای مدل به شرح ذیل است.

**اندیس‌ها، مجموعه‌ها و پارامترها**

$n$	تعداد کارهایی که باید زمان بندی شوند.
$m$	تعداد ماشین
$F$	تعداد کارخانه‌ها
$f$	اندیس کارخانه ( $f=1,2,\dots,F$ )
$i,l$	اندیس ماشین ( $i,l=1,2,\dots,m$ )
$j_0$	اندیس کارهای اولیه ( $j_0=1,\dots,n$ )
$j_n$	اندیس کارهای جدید ( $j_n=n+1,\dots,N$ )
$j,k$	مجموع اندیس کارهای قدیم و جدید ( $j,k=1,2,\dots,n+1,\dots,N$ )
$r$	اندیس فعالیت نت ( $r=1,2,\dots,R_{if}$ )
$R_{if}$	تعداد کل فعالیت‌های نت روی ماشین $i$ در کارخانه $f$

**جدول (۱). خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در سیستم تولید**

کارگاهی در حالت پویا		
مقاله	سیستم تولید	روش حل
هالووی و نلسون [۱۲]	تولید کارگاهی	روش ابتکاری چندمرحله‌ای
فانگ و اکسی [۱۳]	تولید کارگاهی	استراتژی افق زمانی غلتکی
ادیبی و همکاران [۱۴]	تولید کارگاهی	شبکه عصبی مصنوعی
سرکارا و همکاران [۱۵]	تولید کارگاهی انعطاف پذیر	الگوریتم بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه مبتنی بر یادگیری
ژانگ و ونگ [۱۶]	تولید کارگاهی انعطاف پذیر	رویکرد ترکیبی مبتنی بر الگوریتم ACO و سیستم‌های چندعاملی
وانگ و همکاران [۱۷]	تولید کارگاهی انعطاف پذیر	الگوریتم ژنتیک بهبودیافته
شن و یائو [۱۸]	تولید کارگاهی انعطاف پذیر	الگوریتم تکاملی چند هدفه
ژانگ و همکاران [۱۹]	تولید کارگاهی انعطاف پذیر	رویکرد تئوری بازی
ژانگ و همکاران [۲۰]	تولید کارگاهی	الگوریتم هوشمند ترکیبی
گانو و همکاران [۲۱]	تولید کارگاهی انعطاف پذیر	الگوریتم گسسته جایا
ون و کائو [۲۲]	تولید کارگاهی	الگوریتم بهبودیافته کلونی مورچه
کونداکچی و کولاک [۲۳]	تولید کارگاهی	الگوریتم ژنتیک ترکیبی
وانگ و همکاران [۲۴]	تولید کارگاهی انعطاف پذیر	رویکرد تئوری بازی
وانگ و همکاران [۲۵]	تولید کارگاهی	الگوریتم PSO
وانگ و همکاران [۲۶]	تولید کارگاهی انعطاف پذیر و توزیع شده	رویکرد تئوری بازی تکاملی
وانگ و همکاران [۲۷]	تولید کارگاهی	رویکرد یادگیری تقویتی عمیق
لو و همکاران [۲۸]	تولید کارگاهی	رویکرد یادگیری تقویتی عمیق بهبودیافته
تحقیق حاضر	تولید کارگاهی	الگوریتم آزادسازی لاگرانژ بهبودیافته

ورودی مرحله دوم، نتایج حاصل از زمان بندی ایستا و کارهای جدید که ممکن است در حین انجام زمان بندی به دست آیند و همچنین به دلایل مختلفی ممکن است ماشین در حین انجام کار خراب شود. این اطلاعات از طریق سیستم RFID که در بخش‌های مختلف کارخانه و خط تولید قرار گرفته‌اند، به دست می‌آید. این مرحله با توجه

کار زروی ماشین $i$ در کارخانه $f$ بقرار بگیرد. ۰، در غیر این صورت.	زمان پردازش کار $Z$ بر روی ماشین $i$	$PS_{j,i}$
مقدار مصرف انرژی پردازش کار $Z$ در کارخانه $f$ بر روی ماشین $i$	سرعت ماشین $i$ در کارخانه $f$	$V_{i,f}$
مقدار مصرف انرژی پردازش کار $Z$ در کارخانه $f$ بر روی ماشین $i$	زمان جابه‌جایی کار از کارخانه $f$ به کارخانه $q$	$tr_{f,q}$
مقدار مصرف انرژی ماشین $i$ در کارخانه $f$ در زمان بیکاری	عدد مثبت بزرگ	$L$
دوره ساخت، حداکثر زمان تکمیل همه کارها	۱، اگر ماشین $i$ بلافاصله بعد از ماشین $l$ در مسیر فرآیند پردازش از کار $Z$ استفاده شود؛ ۰، در غیر این صورت.	$a_{j,i,l}$
مصرف انرژی کل برحسب کیلو وات ساعت	۱، اگر کار $Z$ ام به کارخانه $f$ سفارش داده شده باشد. در غیر این صورت ۰ می‌باشد.	$w_{j,f}$
با توجه به توضیحات فوق، بر پایه [۲۹-۳۰] مدل مسأله در مرحله زمان‌بندی براساس توالی عملیات به‌صورت ذیل تعریف می‌شود.	۱، اگر کار $Z$ بعد از مرحله زمان‌بندی مجدد به کارخانه $f$ تخصیص یابد. در غیر این صورت ۰ می‌باشد.	$y_{b,j,f}$
$Min Z_1 = TEC$	زودترین زمان تکمیل فعالیت نت $Z$ ام بر روی ماشین $i$ در کارخانه $f$	$ET_{r,i,f}$
$Min Z_2 = C_{max}$	دیرترین زمان تکمیل فعالیت نت $Z$ ام بر روی ماشین $i$ در کارخانه $f$	$LT_{r,i,f}$
Subject to:	زمان پردازش فعالیت نت $Z$ ام بر روی ماشین $i$ در کارخانه $f$	$Pr_{r,i,f}$
$\sum_{j=1}^F y_{j,f} = 1$	پنجره زمانی جهت تکمیل فعالیت نت $Z$ ام بر روی ماشین $i$ در کارخانه $f$	$[ET_{r,i,f}, LT_{r,i,f}]$
$P_{j,i,f,q} = w_{j,f} * (\frac{PS_{j,i}}{V_{i,f}}) + 2 * tr_{j,q}$	انرژی مصرفی پردازش کار $Z$ در کارخانه $f$ بر روی ماشین $i$	$E^p_{j,i,f}$
$pt_{j,i} \geq P_{j,i,f,q} * y_{j,q} - L * (1 - y_{j,q})$	انرژی مصرفی بیکاری ماشین $i$ ام در کارخانه $f$	$E^{idle}_{i,f}$
$C_{j,i} \geq pt_{j,i} + \sum_r pr_{r,i,f} * Ur_{r,i,f}$	انرژی مشترک که توسط تجهیزات عمومی کارخانه استفاده می‌شود.	$E_0$
$C_{j,i} \geq C_{k,i} + pt_{j,i} - L * (3 - X_{k,i} - y_{j,f} - y_{k,f})$	زمان شروع زمان‌بندی مجدد ماشین $Z$ ام در کارخانه $f$ با در نظر گرفتن ورود کارهای جدید (افق زمان‌بندی مجدد)	$TS_{i,f}$
$+ \sum_r pr_{r,i,f} * Ur_{r,i,f}$		
$\forall j,i,f,k < N, j > k$		
$C_{k,i} \geq C_{j,i} + pt_{k,i} - L * (2 + X_{k,i} - y_{j,f} - y_{k,f})$		
$+ \sum_r pr_{r,i,f} * Ur_{r,i,f}$		
$\forall j,i,f,k < N, j > k$		
$C_{j,i} * y_{j,f} \leq Cr_{i,f}$	متغیر باینری؛ ۱، اگر کار $Z$ بلافاصله بعد از کار $k$ بر روی ماشین $i$ پردازش شود. ۰، در غیر این صورت.	$X_{k,j,i}$
$pr_{r,i,f} + yr_{r,i,f} * L + Ur_{r,i,f} * L$	متغیر پیوسته؛ زمان تکمیل کار $Z$ روش ماشین $i$	$C_{j,i}$
$Cr_{r,i,f} \leq C_{j,i} * y_{j,f} + pt_{j,i} + (1 - yr_{r,i,f}) * L$	متغیر باینری؛ ۱، اگر کار $Z$ در کارخانه $f$ پردازش شود، در غیر این صورت ۰.	$Y_{j,f}$
$Et_{r,i,f} \leq Cr_{r,i,f} \leq Lt_{r,i,f}$	زمان پردازش کار $Z$ بر روی ماشین $i$ در کارخانه $q$ اگر در ابتدا برنامه‌ریزی شده باشد که در کارخانه $f$ انجام شود.	$P_{j,i,f,q}$
$C_{max} \geq C_{j,i} * y_{j,f}$	زمان پردازش کار $Z$ بر روی ماشین $i$ با در نظر گرفتن سرعت ماشین‌ها و جابه‌جایی کارها بین کارخانه‌ها	$Pt_{j,i}$
$C_{max}^f \geq C_{j,i} * y_{j,f}$	زمان تکمیل فعالیت نت $Z$ ام بر روی ماشین $i$ در کارخانه $f$	$Cr_{r,i,f}$
$Ec_w = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{f=1}^F E_{j,i,f}^p * \frac{pt_{j,i} * y_{j,f}}{60}$	متغیر باینری؛ ۱، اگر کار $Z$ بلافاصله بعد از فعالیت نت $r$ بر روی ماشین $i$ در کارخانه $f$ پردازش شود. ۰، در غیر این صورت.	$Yr_{r,i,f}$
$Ec_{idle} = \sum_{i=1}^m \sum_{f=1}^F \frac{(C_{max}^f - \sum_{j=1}^n pt_{j,i} * y_{j,f})}{60} * E_{i,f}^{idle}$	متغیر باینری؛ ۱، اگر فعالیت نت $r$ پردازش شود. ۰، در غیر این صورت.	$Ur_{r,i,f}$
$TEC = Ec_w + Ec_{idle} + (E_0 * C_{max}^f) / 60$		
$C_{j,i} - pt_{j,i} - \sum_r pr_{r,i,f} * Ur_{r,i,f} \geq Ts$		

جهت حل این مسأله، در ابتدا مدل مرحله زمان بندی ایستا را حل کرده و سپس نتایج آن به مراحل بعدی یعنی مراحل زمان بندی زمان آنی داده می‌شود. خروجی نتایج هر یک از این مراحل به صورت مجموعه‌ای از نقاط پارتو است. حال نیاز است برای ورود به مرحله بعد، از بین نقاط به دست آمده بر روی لایه پارتو تعدادی از آن‌ها یا تمام نقاط در نظر گرفته شود. در صورتی که تمام نقاط لایه پارتو در نظر گرفته شود، زمان اجرای مسأله بسیار زیاد خواهد شد. لذا برای جلوگیری از این حالت، از بین نقاط لایه پارتو ایجاد شده، با استفاده از روش مجموع وزنی یک نقطه در نظر گرفته می‌شود. این حلقه تا زمانی که کار جدیدی وجود نداشته باشد ادامه می‌یابد. ساختار کلی حل مسأله مورد مطالعه به ازای وزن  $0.1/0.9$  در شکل (۲) نمایش داده شده است.

برای ۱ تا مجموع  $T$  دوره، گام‌های زیر را تکرار کن؛ (واحد ۸ ساعت معادل ۴۸۰ دقیقه)

برای ۱ تا  $t=8$  گام‌های زیر را تکرار کن؛ (واحد ۱ ساعت معادل ۶۰ دقیقه)

کارهای جدید در دوره‌های موجود در هر روز ( $t$ ) را دریافت کن؛

خرابی ماشین‌ها در دوره‌های زمانی  $t$  را دریافت کن؛

بعد از بررسی‌های اولیه، مدت زمان انجام تعمیر ماشین‌ها توسط واحد تعمیر و نگهداری اعلام شود؛

زمان بندی مجدد با استفاده از مدل ارائه شده در مرحله اول در ابتدای دوره  $T$  (ابتدای هر روز کاری)، با در نظر گرفتن کارهای جدید و قدیم و کل کارهایی که به دلیل خرابی ماشین انجام نشده بودند، انجام شود؛

شکل (۱). گام‌های پیشنهادی مرحله زمان بندی زمان آنی [۳۰]

#### ۴-۱. جزئیات پیاده‌سازی الگوریتم آزادسازی لاگرانژ

حل مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح در اندازه‌های کوچک و متوسط توسط نرم افزار گمز به راحتی انجام می‌شود، اما با افزایش ابعاد مسأله، سرعت حل آن کاهش می‌یابد و حل مسائل بزرگ با این نرم‌افزار انجام نمی‌شود. با توجه به عملکرد خوب الگوریتم آزادسازی لاگرانژ، بسیاری از محققین از آن در موضوعات مختلف استفاده کرده‌اند [۳۱-۳۳]. الگوریتم آزادسازی لاگرانژ یکی از روش‌های پرکاربرد برای حل مسائل بهینه‌سازی مقید و پیچیده به خصوص مسائل برنامه‌ریزی عدد صحیح است. این روش برای اولین بار توسط هلد و کارپ جهت حل مسأله فروشنده دوره‌گرد ابداع شد [۳۴، ۳۵]. این روش یکی از روش‌هایی است که یک مسأله بهینه‌سازی مقید و مشکل را توسط یک مسأله ساده‌تر حل می‌کند. ایده اصلی الگوریتم آزادسازی لاگرانژ، آزاد کردن محدودیت‌های پیچیده مسأله و ضرب آن‌ها در ضریبی به نام ضرایب لاگرانژ و اضافه کردن آن‌ها به تابع هدف مسأله می‌باشد. به دلیل حذف برخی از قیود و بزرگ‌تر شدن ناحیه شدنی در مسأله اصلی، کران بالایی برای آن خواهد بود.

$$y_{j,f} \leq y_{j,f}^b \quad \forall j,f \quad (19)$$

$$C_{j,i}, Pt_{j,i}, P_{j,i,f,q}, C_{max}, Ec_w, Ec_{idle}, Cr_{i,f} \geq 0 \quad (20)$$

$$\forall i,j,f,r,q$$

$$Ur_{r,j,i,f}, Yr_{r,j,i,f} \quad \forall i,j,f,r \quad (21)$$

$$X_{k,j,l} \in \{0,1\} \quad \forall j < N, k > j, i \quad (22)$$

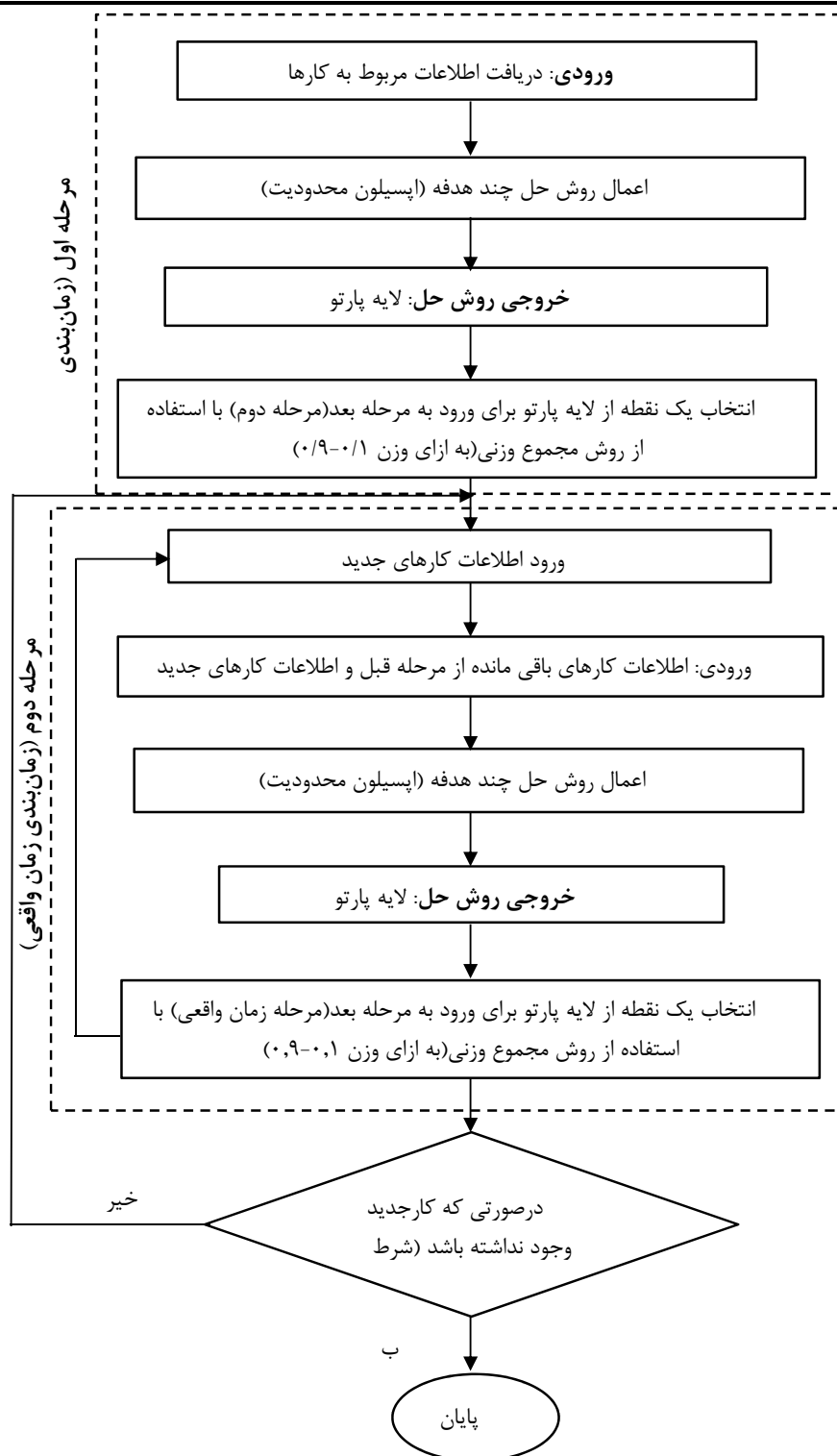
$$y_{j,f} \in \{0,1\} \quad \forall j,f \quad (23)$$

در مدل فوق معادلات (۱) و (۲) توابع هدف را بیان می‌کنند. مجموعه محدودیت (۳) مشخص می‌کند هر کار بایستی به یک کارخانه تخصیص داده شود. مجموعه محدودیت‌های (۴) و (۵) مقدار زمان پردازش هر کار را با در نظر گرفتن زمان‌های جابه‌جایی بین کارخانه‌ها وقتی به کارخانه‌ای خاص تخصیص داده می‌شود را محاسبه می‌کند. مجموعه محدودیت (۶) نشان می‌دهد زمان تکمیل یک کار بیشتر از زمان پردازش و زمان‌های انجام فعالیت نت می‌باشد. مجموعه محدودیت (۷) نشان می‌دهد یک کار حداکثر می‌تواند توسط یک ماشین در یک زمان پردازش شود. مجموعه محدودیت‌های (۸) و (۹) نشان می‌دهند یک ماشین می‌تواند حداکثر یک کار را در یک زمان پردازش کند. مجموعه محدودیت‌های (۱۰) و (۱۱) بیان می‌کنند که پردازش کارها و فعالیت‌های نت (در صورت عدم دسترسی به ماشین‌ها) با هم تداخل ندارند. محدودیت (۱۲) نشان می‌دهد که فعالیت‌های نت می‌بایستی در پنجره زمانی مشخصی تکمیل شوند. محدودیت (۱۳) دوره ساخت کارهای متعلق به عامل اول را محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۴) دوره ساخت کارهای متعلق به عامل دوم را محاسبه می‌کند. محدودیت (۱۵) و (۱۶) به ترتیب، مقدار مصرف انرژی ماشین در حالت پردازش کارها و مقدار مصرف انرژی ماشین در زمان بیکاری را نشان می‌دهند. محدودیت (۱۷) مصرف انرژی کل را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۸) نشان می‌دهد زمان شروع کارهای جدید و کارهای باقیمانده از دوره قبل بایستی بعد از افق زمان بندی مجدد باشد. محدودیت (۱۹) تضمین می‌کند کاری که در مرحله قبل از زمان بندی مجدد به کارخانه‌ای خاص تخصیص یافته است، در زمان بندی مرحله بعد نیز به همان کارخانه تخصیص می‌یابد (برای انجام باقیمانده عملیات کارها). متغیرهای مدل نیز توسط محدودیت‌های (۲۰) تا (۲۳) تعریف می‌شوند.

به طور کلی گام‌های پیشنهادی مرحله زمان بندی زمان آنی در شکل (۱) آورده شده است.

#### ۴. روش حل

در این مقاله به دلیل خلاء تحقیقاتی و نیز به دلیل کارایی الگوریتم آزادسازی لاگرانژ در حل مسائل زمان بندی در کاهش زمان حل مسأله و نزدیکی به جواب بهینه، از این الگوریتم برای حل مسأله پیشنهادی استفاده شده است. سپس، جهت بررسی عملکرد الگوریتم آزادسازی لاگرانژ پیشنهادی نتایج آن با روش اپسیلون محدودیت تقویت شده مقایسه می‌گردد.



شکل (۲). ساختار کلی روش حل مسأله مورد مطالعه [۳۰]

مقدار بهینه مسأله آزاد شده، کران پایین (کران بالایی) برای مسأله اصلی خواهد بود. یکی از موضوعات مهم در این الگوریتم یافتن بهترین ضرایب لاگرانژ است. برای تعیین این ضرایب از الگوریتم زیرگردیان<sup>۱</sup>

انتظار می‌رود حل مسأله آزاد شده آسان‌تر از حل مسأله اصلی باشد. در این روش هر جواب از مسأله آزاد شده یک کران برای جواب مسأله اصلی ارائه می‌دهد. در مسأله مینیمم‌سازی (ماکزیمم‌سازی)،

$$+ \sum_r pr_{r,i,f} * Ur_{r,i,f} - C_{k,i}$$

۲-۴. الگوریتم آزادسازی لاگرانژ بهبودیافته<sup>۱</sup>

باتوجه به نقاط ضعف فرم استاندارد این الگوریتم، در این مقاله از یک روش اصلاح شده مبتنی بر رویکرد معرفی شده توسط آلکابنه و همکاران<sup>۲</sup> استفاده شده است [۳۶]. گاهی اوقات به دلیل رفتار زیگزاگی روش زیرگردایان [۳۷]، کیفیت راه‌حل به دست آمده از الگوریتم لاگرانژ نامطلوب است. از این رو، برای جلوگیری از این رفتار، الکابنه و همکاران [۳۶] از یک روش زیرگردایان اصلاح شده برای به‌روزرسانی ضرایب لاگرانژ استفاده کردند. در این تحقیق به گفته الکابنه و همکاران، ضرایب لاگرانژ با استفاده از معادلات ذیل به‌روز می‌شوند.

$$gamma1^t_{j,i,f,k} = C_{j,i} - (C_{k,i} + pt_{j,i} - L * (3 - X_{k,j,i} - Y_{j,f} - Y_{k,f})) + \sum_r pr_{r,i,f} * Ur_{r,i,f} \quad (25)$$

$$gamma2^t_{j,i,f,k} = C_{k,i} - C_{j,i} + pt_{k,i} - L * (2 + X_{k,j,i} - Y_{j,f} - Y_{k,f}) + \sum_r pr_{r,i,f} * Ur_{r,i,f} \quad (26)$$

$$= \begin{cases} -\tau * \frac{gamma1^t_{j,i,f,k} * d1^{t-1}_{j,i,f,k}}{(d1^{t-1}_{j,i,f,k})^2} & \text{if } gamma1^t_{j,i,f,k} * d1^{t-1}_{j,i,f,k} \\ 0 & \text{other wise} \end{cases} \quad (27)$$

$$d1^t_{j,i,f,k} = gamma1^t_{j,i,f,k} + \epsilon 1^t * d1^{t-1}_{j,i,f,k} \quad (28)$$

$$u1^t_{j,i,f,k} = u1^{t-1}_{j,i,f,k} + st^t * d1^t_{j,i,f,k} \quad (29)$$

$$= \begin{cases} -\tau * \frac{gamma2^t_{j,i,f,k} * d2^{t-1}_{j,i,f,k}}{(d2^{t-1}_{j,i,f,k})^2} & \text{if } gamma2^t_{j,i,f,k} * d2^{t-1}_{j,i,f,k} \\ 0 & \text{other wise} \end{cases} \quad (30)$$

$$d2^t_{j,i,f,k} = gamma2^t_{j,i,f,k} + \epsilon 2^t * d2^{t-1}_{j,i,f,k} \quad (31)$$

$$st^t = \theta^t$$

$$* \left( \frac{UB - LB^*}{\sum_j \sum_i \sum_f \sum_k (gamma2^t_{j,i,f,k} + gamma1^t_{j,i,f,k})^2} \right) \quad (32)$$

در هر تکرار از الگوریتم پیشنهادی، ضرایب لاگرانژ براساس معادلات (۲۵) تا (۳۲) به‌روزرسانی می‌شود. در این معادلات  $st$  بیانگر اندازه گام است. همچنین اگر بعد از چندین تکرار، بهبودی در مقدار کران پایین صورت نگیرد، مقدار  $\theta$  نصف می‌شود. معیار توقف حداکثر تعداد تکرار ۵ در نظر گرفته شده است. مقادیر اولیه پارامترهای  $d1^t_{j,i,f,k}$  و  $d2^t_{j,i,f,k}$  برابر ۱ در نظر گرفته شده است. مقادیر پارامترهای  $\theta$  و  $\tau$  به ترتیب برابر با ۰/۵ و [۰ ۲] در نظر گرفته شده است.

استفاده می‌شود. این الگوریتم یکی از روش‌های رایجی است که بهترین ضرایب لاگرانژ را با روشی تکراری محاسبه می‌کند. در الگوریتم آزادسازی لاگرانژ مسأله اصلی تعیین اندازه گام است تا اطمینان حاصل شود الگوریتم به جواب بهینه همگرا می‌شود. برای غلبه بر این نیاز الگوریتم آزادسازی لاگرانژ و زیرگردایان بایکدیگر ترکیب می‌شوند.

۱-۱-۴. الگوریتم زیرگردایان

روش زیرگردایان کمک می‌کند تا با توجه به جواب مرحله قبل گام مناسب را تعیین نمود و بردار جریمه مرحله بعدی را تشکیل داد. در این الگوریتم، مسأله اصلی تعیین اندازه گام است تا اطمینان حاصل شود که الگوریتم به جواب بهینه همگرا می‌شود.

مراحل الگوریتم آزادسازی لاگرانژ به شرح ذیل است:

۱. محدودیت‌هایی که باید آزاد شوند را مشخص کنید.
۲. مقدار اولیه ضرایب لاگرانژ را برابر با صفر قرار دهید.
۳. با در نظر گرفتن ضرایب لاگرانژ، محدودیت‌هایی که آزاد شده‌اند را به تابع هدف انتقال دهید.
۴. یک راه‌حل شدنی برای مسأله اصلی پیدا کنید و مقدار تابع هدف آن را به عنوان کران بالا ( $UB$ ) در نظر بگیرید.
۵. کران پایین را برابر با منفی بی‌نهایت ( $LB = -\infty$ ) قرار دهید.
۶. اگر  $LB > LB'$  آنگاه  $LB = LB'$
۷. مسأله آزادسازی لاگرانژ را حل کنید و یک حد پایین ( $LB'$ ) جدید به دست آورید.
۸. ضرایب لاگرانژ را به‌روزرسانی کنید.

۲-۱-۴. آزاد کردن محدودیت

هر محدودیتی که برای مسأله در نظر گرفته می‌شود، مدل ریاضی را به دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌کند و نوعی سختی به مسأله اضافه خواهد کرد. الگوریتم آزادسازی لاگرانژ برای اولین بار در مسأله مورد مطالعه در این مقاله اعمال شده است. با توجه به نبود اطلاعات در مقالات گذشته، به‌طور تجربی با آزادسازی محدودیت‌های (۳)-(۸) و (۳)-(۹) مدل ریاضی این نتیجه حاصل شده است که در میان بقیه‌ی محدودیت‌ها زمان حل مسأله را کمتر می‌کند و با تعداد تکرار کمتری بهترین کران را برای مسأله فراهم می‌آورد. با ضرب کردن این محدودیت‌ها به ترتیب در ضرایب لاگرانژ  $u^l$  و  $u^2$  و اضافه کردن معادله (۲۴) به تابع هدف، مسأله لاگرانژ آزاد شده به دست خواهد آمد.

$$\sum_{j>k} \sum_i \sum_f \sum_k u^1_{j,i,f,k} (C_{k,i} + pt_{j,i} - L * (3 - X_{k,j,i} - Y_{j,f} - Y_{k,f})) + \sum_r pr_{r,i,f} * Ur_{r,i,f} - C_{j,i} \quad (24)$$

$$+ \sum_{j>k} \sum_i \sum_f \sum_k u^2_{j,i,f,k} (C_{j,i} + pt_{k,i} - L * (2 + X_{k,j,i} - Y_{j,f} - Y_{k,f}))$$



## ۵. نتایج محاسباتی

در این قسمت به منظور ارزیابی مدل ریاضی و الگوریتم پیشنهادی، ۲۰ مسأله‌ی نمونه با سایزهای کوچک و بزرگ به صورت تصادفی تولید شده است. مدل ریاضی مسأله در نرم‌افزارهای GAMS 24.1.2 و MATLAB (R2011a) تحت سیستمی با مشخصات 2GB RAM و CPU:Corei2,2 GHz اجرا شدند.

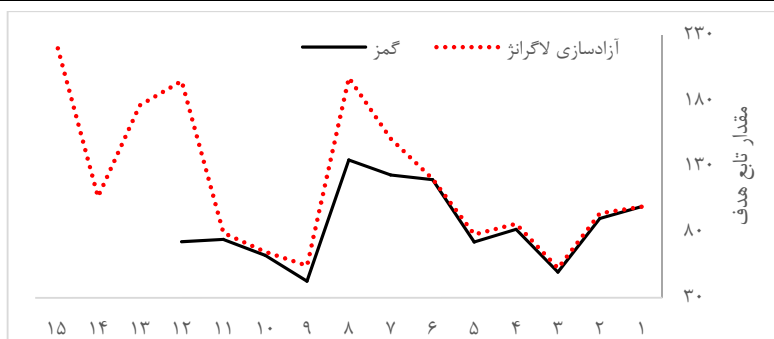
در این بخش به منظور ارزیابی الگوریتم آزادسازی لاگرانژ با مدل پیشنهادی، ۱۵ مسأله آزمایشی با ابعاد مختلف تولید و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از حل مدل اصلی توسط نرم افزار گمز و الگوریتم آزادسازی لاگرانژ در جدول (۲) نشان داده شده است. در این بخش با استفاده از نمودار به مقایسه نتایج حاصل در جدول (۲) پرداخته‌ایم. همان‌طور که مشاهده می‌شود، الگوریتم آزادسازی لاگرانژ توانسته به کرانی نزدیک به حل مدل اصلی توسط نرم‌افزار گمز دست پیدا کند (شکل (۳)). با توجه به شکل (۴) زمان اجرای الگوریتم آزادسازی لاگرانژ کمتر از حل مدل اصلی می‌باشد. لذا می‌توان بیان کرد از نظر زمان حل، الگوریتم آزادسازی لاگرانژ دارای کارایی بهتری است. به دلیل اینکه برخی از محدودیت‌ها در الگوریتم لاگرانژ آزاد شده‌اند، این روش توانسته مسائلی را حل کند که به صورت اولیه توسط گمز غیرقابل حل بوده درحالی‌که لاگرانژ توانسته یک کران مطلوب برای آن بیابد.

همچنین برای بررسی بیشتر این دو روش از آزمون‌های آماری

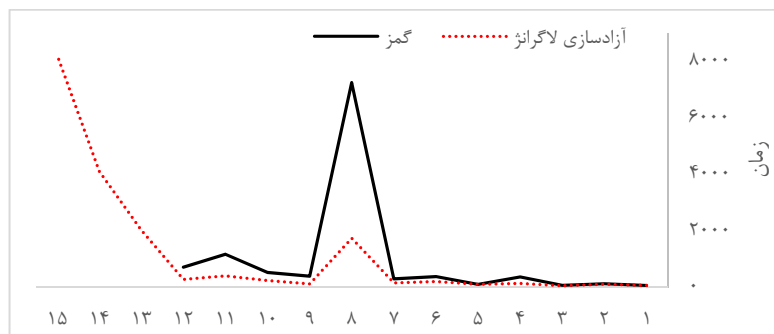
استفاده کرده‌ایم. برای بررسی نرمال بودن داده‌ها از آزمون شاپیرو ویلک در نرم‌افزار SPSS استفاده شده است. مقادیر P-value هدف هر دو الگوریتم در جدول (۳) بیشتر از ۰/۰۵ است. لذا می‌توان بیان کرد که مقادیر هدف گمز و الگوریتم آزادسازی لاگرانژ دارای توزیع نرمال می‌باشد. با توجه به برقراری آزمون نرمال مقادیر هدف نیاز است، فرض دوم یعنی تحلیل واریانس‌ها مورد بررسی قرار گیرد. جهت بررسی برابری واریانس‌ها از آزمون Levene در نرم افزار spss استفاده شده است. نتایج این آزمون در جدول (۴) نشان داده شده است. مقادیر P-value این آزمون کمتر از سطح معناداری ۰/۰۵ است. با توجه به نتایج این آزمون، واریانس وزن‌ها با یکدیگر برابر هستند. لذا می‌توان بیان کرد که مقادیر هدف دارای واریانس‌های برابر نیستند. همچنین به دلیل برقرار نبودن آزمون برابری واریانس برای مقادیر تابع هدف گمز و الگوریتم آزادسازی لاگرانژ، از آزمون ناپارمتریک کروسکال والیس استفاده شده است. نتایج این آزمون در جدول (۵) نشان داده شده است. مقدار P-value این آزمون بیشتر از مقدار ۰/۰۵ است. لذا فرض صفر رد نمی‌شود (عدم رد فرض صفر)؛ بنابراین می‌توان بیان کرد که اختلاف معناداری بین تابع هدف حل مدل اصلی با گمز و الگوریتم آزادسازی لاگرانژ وجود ندارد. از این آزمون نتیجه می‌گیریم که الگوریتم آزادسازی لاگرانژ پیشنهادی در زمان کمتری، کران مطلوبی را نسبت به حل مدل اصلی ارائه می‌دهد.

جدول (۲). مقایسه نتایج خروجی گمز و الگوریتم آزادسازی لاگرانژ

مسأله نمونه	تعداد ماشین	تعداد کارخانه	اطلاعات نمونه‌ها		تعداد کار		تابع هدف	زمان (ثانیه)	کران بدست آمده	زمان (ثانیه)
			مرحله اول	مراحل زمان‌بندی زمان آبی	مرحله اول	تعداد کارخانه				
۱	۲	۲	۲	۲	۱	۹۹/۳۴	۶۱/۹۹	۹۹/۳۴	۶۶/۸۱	
۲	۳	۳	۲	۴	۳	۹۰/۲۸	۱۲۴/۷۵	۹۴/۳	۱۰۹/۵۹	
۳	۲	۲	۳	۲	۳	۴۹/۵۷	۶۸/۳۳	۵۲/۵۳	۵۶/۲۴	
۴	۳	۳	۳	۴	۵	۸۲/۱۲	۳۶۴/۹۰	۸۶/۳	۱۳۵/۹۷	
۵	۳	۲	۴	۲	۳	۷۲/۴۰	۱۰۱/۵۷	۷۸/۲	۱۰۷/۳۹	
۶	۳	۴	۴	۴	۵	۱۱۹/۹۳	۳۷۵/۸۰	۱۲۰/۵	۲۰۵/۴۹	
۷	۳	۴	۵	۱	۳	۱۲۳/۴۵	۲۹۹/۱۰	۱۵۱/۲	۱۵۶/۵۲	
۸	۲	۳	۵	۴	۳	۱۳۴/۸۵	۷۲۴۱/۸۴	۱۹۷/۵	۱۷۳۵/۴۷	
۹	۲	۳	۶	۳	۲	۴۲/۶۳	۳۹۲/۱۶	۵۴/۴۴	۱۱۹/۱۴	
۱۰	۲	۳	۶	۴	۴	۶۲/۲۸	۵۲۶/۲۰	۶۵/۰۳	۲۳۸/۶۱	
۱۱	۳	۳	۷	۱	۳	۷۴/۴۱	۱۱۶۷/۹۵	۷۹/۳۴	۴۰۶/۶۰	
۱۲	۳	۳	۷	۳	۳	۷۲/۶۳	۷۰۹/۴۷	۱۹۵/۰	۲۸۱/۳۸	
۱۳	۲	۳	۸	۳	۲	-	-	۱۷۶/۴۵	۲۰۲۷/۲۳	
۱۴	۳	۳	۸	۴	۲	-	-	۱۰۶/۸۷	۴۱۰۸/۹۹	
۱۵	۲	۳	۹	۴	۴	-	-	۲۲۴/۶۳	۸۲۳۱/۰۹	



شکل (۳). مقایسه تابع هدف گمز و الگوریتم آزادسازی لاگرانژ



شکل (۴). مقایسه زمان‌های اجرای گمز و الگوریتم آزادسازی لاگرانژ

بوده است. مسأله مورد بررسی شامل دو مرحله است. جهت حل مرحله اول (زمان‌بندی ایستا) یک مدل ریاضی دوهدفه توسعه داده شد و سپس جهت حل مرحله دوم (زمان‌بندی زمان‌آنی) یک رویکرد پویا پیشنهاد گردید. با توجه به پیچیدگی بالای مسأله مورد بررسی، یک الگوریتم آزادسازی لاگرانژ بهبودیافته برای حل مسأله مورد مطالعه پیشنهاد گردید و نتایج آن با روش محدودیت افسیلون تقویت شده مورد مقایسه قرار گرفت. به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم آزادسازی لاگرانژ بهبودیافته، نتایج به‌دست آمده از حل ۱۵ مسأله آزمایشی با نتایج حاصل از حل مدل اصلی با روش افسیلون محدودیت بهبودیافته با استفاده از روش‌های آماری مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این آزمون نشان داد که اختلاف معناداری بین تابع هدف حل مدل اصلی و الگوریتم آزادسازی لاگرانژ وجود ندارد. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد که الگوریتم آزادسازی لاگرانژ پیشنهادی توانسته یک کران مطلوب برای مسائلی را به‌دست آورد که از طریق حل مدل اصلی نمی‌توان در مدت زمان معقول به آن دست یافت. در ادامه، پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه شده است. در نظر گرفتن حالت احتمالی و غیرقطعی برای پارامترهای مسأله، بررسی مسأله در محیط‌های تولیدی دیگر چون تولید کارگاهی انعطاف‌پذیر، جریان کارگاهی و ... همچنین پیشنهاد می‌شود روش‌های دقیق دیگر چون تجزیه بندرز، روش شاخه و کران و... ارائه و نتایج آن‌ها با رویکرد پیشنهادی مقایسه گردد.

جدول (۳). نتایج آزمون نرمال بودن شایپرو ویلک برای مقادیر تابع

هدف گمز و الگوریتم آزادسازی لاگرانژ			
منبع تغییر	w	DF	P- value
گمز	۰/۹۳۰	۱۵	۰/۲۷۶
آزادسازی لاگرانژ	۰/۹۰۲	۱۵	۰/۱۰۲

جدول (۴). نتایج آزمون برابری واریانس‌ها لاون برای مقادیر تابع

هدف گمز و الگوریتم آزادسازی لاگرانژ		
P- value	F	Equal variances
۰/۰۱۷	۰/۹۳۰	

جدول (۵). نتایج آزمون کروسکال والیس برای مقادیر تابع هدف

گمز و الگوریتم آزادسازی لاگرانژ	
Kruskal-Wallis Test	۲/۳۶۳
DF	۱
P-value	۰/۱۲۴

### ۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله به ارائه یک الگوریتم آزادسازی لاگرانژ جهت حل مسأله زمان‌بندی شبکه تولید چندعاملی توزیع شده در محیط کارخانه‌های نسل ۴/۰ مبتنی بر سیستم تولید کارگاهی پرداخته شد. در این سیستم تولیدی هوشمند، کارخانه‌ها با مالکیت مستقل تصمیم به ایجاد شبکه‌ای متشکل از چندین کارخانه، به‌نام شبکه تولید مجازی می‌نمایند. در این سیستم تولیدی هر کارخانه بر روی منافع شخصی خود متمرکز

## مراجع

- [16] S. Zhang and T. N. Wong, "Flexible job-shop scheduling/rescheduling in dynamic environment: a hybrid MAS/ACO approach," *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 11, pp. 3173–3196, 2017.
- [17] L. Wang, C. Luo, and J. Cai, "A Variable Interval Rescheduling Strategy for Dynamic Flexible Job Shop Scheduling Problem by Improved Genetic Algorithm," *Journal of Advanced Transportation*, 2017.
- [18] X.-N. Shen and X. Yao, "Mathematical modeling and multi-objective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems," *Information Sciences*, vol. 298, pp. 198–224, 2015.
- [19] Y. Zhang, J. Wang, and Y. Liu, "Game theory based real-time multi-objective flexible job shop scheduling considering environmental impact," *Journal of Cleaner Production*, vol. 167, pp. 665–679, 2017.
- [20] L. Zhang, L. Gao, and X. Li, "A hybrid intelligent algorithm and rescheduling technique for job shop scheduling problems with disruptions," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 65, 2012.
- [21] K. Gao, F. Yang, M. Zhou, Q. Pan, and P. N. Suganthan, "Flexible Job-Shop Rescheduling for New Job Insertion by Using Discrete Jaya Algorithm," *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 49, no. 5, pp. 1944–1955, 2019.
- [22] P. Wen and W. Cao, "Real-time job-shop scheduling model based on RFID," 2017, pp. 204–208.
- [23] N. Kundakcı and O. Kulak, "Hybrid genetic algorithms for minimizing makespan in dynamic job shop scheduling problem," *Computers and Industrial Engineering*, vol. 96, no. C, pp. 31–51, 2016.
- [24] J. Wang, J. Yang, Y. Zhang, S. Ren, and Y. Liu, "Infinitely repeated game based real-time scheduling for low-carbon flexible job shop considering multi-time periods," *Journal of Cleaner Production*, vol. 247, p. 119093, 2020.
- [25] Z. Wang, J. Zhang, and S. Yang, "An improved particle swarm optimization algorithm for dynamic job shop scheduling problems with random job arrivals," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 51, p. 100594, 2019.
- [26] J. Wang, Y. Liu, S. Ren, C. Wang, and W. Wang, "Evolutionary game based real-time scheduling for energy-efficient distributed and flexible job shop," *Journal of Cleaner Production*, vol. 293, p. 126093, 2021.
- [27] L. Wang et al., "Dynamic job-shop scheduling in smart manufacturing using deep reinforcement learning," *Computer Networks*, vol. 190, p. 107969, 2021.
- [28] B. Luo, S. Wang, B. Yang, and L. Yi, "An improved deep reinforcement learning approach for the dynamic job shop scheduling problem with random job arrivals," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1848, no. 1, p. 012029, 2021.
- [29] N. Bagheri Rad, J. Behnamian, "Multi-objective collaborative job shop scheduling in a dynamic environment: Non-dominated sorting memetic algorithm," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 14, p. 2657–2671, 2023.
- [1] I. E. Mouayni, G. Demesure, H. B.-E. Haouzi, P. Charpentier, and A. Siadat, "Jobs scheduling within Industry 4.0 with consideration of worker's fatigue and reliability using Greedy Randomized Adaptive Search Procedure," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 19, pp. 85–90, 2019.
- [2] B. Sokolov, D. Ivanov, and A. Dolgui, Eds., *Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing*. Springer International Publishing, 2020.
- [3] D. Ivanov, A. Dolgui, B. Sokolov, F. Werner, and M. Ivanova, "A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0," *International Journal of Production Research*, vol. 54, no. 2, pp. 386–402, 2016.
- [4] S. H. Chung, H. C. W. Lau, G. T. S. Ho, and W. H. Ip, "Optimization of system reliability in multi-factory production networks by maintenance approach," *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 6, pp. 10188–10196, 2009.
- [5] W. Shen and D. H. Norrie, "Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: A State-of-the-Art Survey," *Knowledge and Information Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 129–156, 1999.
- [6] C. Dhaenens-Flipo and G. Finke, "An Integrated Model for an Industrial Production–Distribution Problem," *IIE Transactions*, vol. 33, no. 9, pp. 705–715, 2001.
- [7] C.-Y. Lee, "Two-machine flowshop scheduling with availability constraints," *European Journal of Operational Research*, vol. 114, no. 2, pp. 420–429, 1999.
- [8] S. Wang and J. Yu, "An effective heuristic for flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 59, no. 3, pp. 436–447, 2010.
- [9] H. Allaoui and A. Artiba, "Scheduling two-stage hybrid flow shop with availability constraints," *Computers & Operations Research*, vol. 33, no. 5, pp. 1399–1419, May 2006, doi: 10.1016/j.cor.2004.09.034.
- [10] N. G. Hall and C. N. Potts, "Rescheduling for New Orders," *Operations Research*, vol. 52, no. 3, pp. 440–453, 2004.
- [11] E. Cakici, S. J. Mason, J. W. Fowler, and H. N. Geismar, "Batch scheduling on parallel machines with dynamic job arrivals and incompatible job families," *International Journal of Production Research*, vol. 51, no. 8, pp. 2462–2477, 2013.
- [12] C. A. Holloway and R. T. Nelson, "Job Shop Scheduling with Due Dates and Variable Processing Times," *Management Science*, vol. 20, no. 9, pp. 1264–1275, 1974.
- [13] J. Fang and Y. Xi, "A rolling horizon job shop rescheduling strategy in the dynamic environment," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 13, no. 3, pp. 227–232, 1997.
- [14] M. A. Adibi, M. Zandieh, and M. Amiri, "Multi-objective scheduling of dynamic job shop using variable neighborhood search," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 282–287, 2010.
- [15] M. B. S. Sreekara Reddy, Ch. Ratnam, G. Rajyalakshmi, and V. K. Manupati, "An effective hybrid multi objective evolutionary algorithm for solving real time event in flexible job shop scheduling problem," *Measurement*, vol. 114, pp. 78–90, 2018.

- system,” *Scientia Iranica*, vol. 29, no. 1, pp. 355–371, 2022.
- [34] M. Held and R. M. Karp, “The Traveling-Salesman Problem and Minimum Spanning Trees,” *Operations Research*, vol. 18, no. 6, pp. 1138–1162, 1970.
- [35] M. Held and R. M. Karp, “The traveling-salesman problem and minimum spanning trees: Part II,” *Mathematical Programming*, vol. 1, no. 1, pp. 6–25, 1971.
- [36] F. Alkaabneh, A. Diabat, and S. Elhedhli, “A Lagrangian heuristic and GRASP for the hub-and-spoke network system with economies-of-scale and congestion,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 102, pp. 249–273, 2019.
- [37] B. Guta, “Subgradient Optimization Methods in Integer Programming with an Application to a Radiation Therapy Problem,” *Technische Universität Kaiserslautern*. Accessed: 2023.
- [30] N. Bagheri Rad, J. Behnamian, “Real-time multi-factory scheduling in Industry 4.0 with virtual alliances,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 125, p. 106636, 2023.
- [31] Y. Song, W. Luo, P. Xu, J. Wei, and X. Qi, “An improved Lagrangian relaxation algorithm based SDN framework for industrial internet hybrid service flow scheduling,” *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Art. no. 1, 2022.
- [32] F. Keshavarz-Ghorbani and S. H. R. Pasandideh, “A Lagrangian relaxation algorithm for optimizing a bi-objective agro-supply chain model considering CO2 emissions,” *Ann Oper Res*, vol. 314, no. 2, pp. 497–527, 2022.
- [33] A. Hendalianpour, M. Fakhrabadi, M. S. Sangari, and J. Razmi, “A combined benders decomposition and Lagrangian relaxation algorithm for optimizing a multi-product, multi-level omni-channel distribution



DOI: 10.22084/IER.2023.27578.2121

## Solving Multi-Factory Intelligent Network Scheduling Problem in Job Shop Production Environment Using Improved Lagrangian Relaxation Algorithm

N. Bagheri Rad<sup>1</sup>, J. Behnamian<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>. PhD student in Industrial Engineering, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

<sup>2</sup>. Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

### ARTICLE INFO

#### **Article history:**

Received: 2023/3/14

Accepted 2023/6/19

#### **Keywords:**

Real-Time Scheduling

Industry 4.0

Multi-Factories Production

Multi-Agent System

Lagrangian Relaxation Algorithm

### ABSTRACT

In this paper, the problem of real-time scheduling of multi-factory production network in the smart manufacturing system with job shop environment is studied. In this smart manufacturing system, a number of independently owned factories are joined together to form a multi-agent production network, which is also called a virtual production network. In such a network, each factory focuses on its interests and communicates with each other by sharing information such as machine breakdowns and job transfers. Therefore, it can be stated that studying the problem of distributed scheduling in the environment of smart factories is important and will have a significant effect on obtaining desirable and ideal results. At first, a bi-objective mixed integer linear programming model is presented; then an approach to solve the dynamic real-time scheduling problem is proposed. Considering the successful applications of the Lagrangian relaxation algorithm in solving scheduling problems, in this research, the improved Lagrangian relaxation algorithm is used to solve the problem. To examine the performance of the proposed algorithm, its results were compared with solving the original model that was solved by the augmented epsilon constraint method. The obtained results showed that the proposed Lagrangian relaxation algorithm has a better performance than the augmented epsilon constraint method.

\* Corresponding author. J. Behnamian

Tel.:081-38292505; E-mail address: [Behnamian@Basu.ac.ir](mailto:Behnamian@Basu.ac.ir)