

مدیریت تولید و عملیات، دوره هفتم، شماره (۱)، پیاپی (۱۲)، بهار و تابستان ۱۳۹۵

دریافت: ۹۱/۵/۳ پذیرش: ۹۲/۶/۲

صص: ۱۳۶-۱۲۱

## رویکرد شبیه‌سازی در حل مسأله زمان‌بندی ماشین‌های موازی پردازشگر دسته‌ای با زمان‌های احتمالی

ایمان رستگار<sup>۱\*</sup>، راشد صحرائیان<sup>۲</sup>، فرشید سمائی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه شاهد، تهران، ایران، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، اداره کل بنادر و دریانوردی استان هرمزگان، بندرعباس، ایران

### چکیده

در این مقاله، مسأله زمان‌بندی ماشین‌های موازی پردازشگر دسته‌ای با هدف حداقل کردن حداکثر زمان تکمیل کارها بررسی می‌شود. نوآوری این پژوهش، به کارگیری زمان‌های پردازش و در دسترس بودن کارها به صورت احتمالی است. در تحقیقات پیشین اثبات شده است که مسأله مورد بررسی دارای پیچیدگی سخت است. بنابراین، از روش‌های ابتکاری برای حل مسأله استفاده می‌شود. مسأله مورد مطالعه، دو مرحله تصمیم‌گیری دارد. در مرحله اول ابتدا کارها به دسته‌هایی طبقه‌بندی می‌شوند و در مرحله بعد، دسته‌های به دست آمده به ماشین‌های موازی تخصیص می‌یابند. در این مقاله، از دو روش ابتکاری برای ایجاد دسته‌ها و از سه روش ابتکاری برای ترتیب دهی توالی دسته‌ها استفاده خواهد شد. به علت احتمالی بودن زمان‌های پردازش و در دسترس بودن کارها، با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی، ۱۰۰۰۰ نمونه مسأله به صورت تصادفی تولید می‌شود. ۶ حالت ترکیبی روش‌های ابتکاری با حل نمونه مسائل به دست آمده از شبیه‌سازی مقایسه می‌شوند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که ترکیب روش‌های ابتکاری MBF در فاز اول و روش ERT-LPT در فاز دوم از کارایی بهتری در رسیدن به جواب‌های مناسب برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: زمان‌بندی، ماشین‌های موازی، پردازش دسته‌ای، روش‌های ابتکاری، شبیه‌سازی

## ۱- مقدمه

دسترس بودن کارها و محدود بودن ظرفیت تعداد کارها در هر دسته است.

از مزایای چیدمان موازی ماشین‌ها در یک ایستگاه کاری این است که احتمال توقف در برنامه‌ریزی تولید کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، در شرایطی که از یک ماشین در ایستگاه کاری استفاده شود، خرابی این ماشین موجب توقف خط تولید خواهد شد. در حالی که اگر در این ایستگاه از چند ماشین به طور موازی استفاده شود، برنامه تولید متوقف نخواهد شد و احتمال رسیدن به ظرفیت تولید افزایش خواهد یافت (Uzsoy, 1995). با توجه به اهمیت موضوع، ایستگاه‌های کاری با ماشین‌های موازی در صنایع مدرن رایج شده است و مورد توجه بیشتر محققان قرار گرفته است (Mönch, Fowler, Dauzère- Pérès, Mason, & Rose, 2011).

یکی از موارد مهمی که صنعتگران در بیشتر ایستگاه‌های کاری با آن مواجه هستند، زمان غیر قطعی کارها است که مستقیم یا غیر مستقیم بر روی زمان تکمیل محصول تأثیر دارد. در اکثر مطالعات انجام شده بر روی مسائل زمان‌بندی، زمانها به طور قطعی و معین (در ابتدای دوره زمان‌بندی) فرض شده است، در حالی که در دنیای واقعی این زمانها ممکن است به طور تصادفی تغییر یابند. در نتیجه، در نظر گرفتن زمانها به صورت احتمالی، مطالعات پیشین را به واقعیت نزدیکتر خواهد کرد. در این مقاله، زمانها پردازش و زمانهای در دسترس به صورت متغیرهای تصادفی با تابع توزیع یکنواخت محاسبه می‌شوند. ساختار این مقاله به صورت زیر است. در بخش ۲ پژوهش‌های حوزه مسائل

زمان‌بندی شامل برنامه‌ریزی و اولویت‌دهی فعالیت‌هایی است که لازم است به ترتیب عملیات انجام شوند. به بیان دیگر، زمان‌بندی ابزاری است که استفاده از منابع در دسترس را بهینه می‌کند. در مسائل زمان‌بندی، با تخصیص مناسب مجموعه‌ای از کارها به مجموعه‌ای از ماشین‌ها و تعیین اولویت‌دهی و زمان‌های فعالیت‌ها، بهره‌وری از منابع مانند اپراتورها و ماشین‌ها حداکثر می‌گردد (Pinedo, 2012). در بیشتر سیستم‌های زمان‌بندی سعی می‌شود، کل هزینه‌ها کاهش یابد. هزینه‌های تولید از مهمترین هزینه‌هایی است که با کاهش زمان کل تولید یعنی بیشترین زمان تکمیل کارها در یک سیستم زمان‌بندی به دست می‌آید.

در مسائل زمان‌بندی، نسل جدیدی از پردازش کارها به صورت پردازش همزمان دسته‌ای در محیط‌های صنعتی ایجاد شده است که موجب کاهش زمان‌های آماده‌سازی، هزینه‌های حمل و نقل و زمان عملیات پردازش کارها می‌شود. در این نوع پردازش کارها با توجه به محدودیتی که برای اندازه هر دسته وجود دارد، تعداد محدودی کار تا جایی که از ظرفیت دسته تجاوز نکند در دسته قرار می‌گیرند و روی ماشین پردازشگر دسته‌ای پردازش می‌شوند.

مسئله مورد پژوهش در این مقاله، زمان‌بندی و توالی کارها در یک محیط تک ایستگاهی با  $m$  ماشین موازی مشابه است. کارها در قالب دسته‌هایی تقسیم‌بندی می‌شوند و هر دسته به طور مستقیم روی یکی از ماشین‌ها پردازش می‌شود و از ایستگاه خارج می‌شود. محدودیت‌های اصلی این مسئله، زمان در

بهرتر عمل می‌کند و یک حد عملکردی بدترین حالت را برای یکی از آنها به کار بردند.

(Chang, Damodaran\*, & Melouk, 2004) یک الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تیرید (SA) را برای مسأله زمان‌بندی ماشین‌های موازی پردازشگر دسته‌ای ارائه نمودند و نتایج آن را با نتایج حاصل از حل کننده CPLEX مقایسه نمودند که نتیجه این شد که الگوریتم فراابتکاری کارآیی بهتری در شاخص‌های زمان‌های محاسبات و کیفیت حل برای مسائل با ابعاد بزرگ در تعداد ماشین‌های موازی و کارهای تشکیل دهنده خواهد داشت. (Koh\*, Koo, Ha, & Lee, 2004) مسأله زمان‌بندی ماشین‌های پردازشگر دسته‌ای موازی را بررسی کردند که (۱) اندازه کارها از هم متفاوت بودند، (۲) هر کار متعلق به یک خانواده بود و (۳) خانواده همه کارها دارای زمان پردازش یکسانی بودند. در این پژوهش، زمان پردازش برای یک دسته از کارها، تنها به خانواده کارها در دسته بستگی دارد و به تعداد کارهای دسته یا اندازه ظرفیت دسته، وابسته نیست. سه معیار عملکردی در این مقاله در نظر گرفته شده است: مجموع زمان تکمیل، زمان تکمیل وزن‌دهی شده کل، زمان تکمیل آخرین کار روی آخرین ماشین. به علت پیچیدگی سخت مسأله مورد بررسی، روش‌های ابتکاری برای هر نوع از معیارهای عملکردی پیشنهاد و یک الگوریتم فراابتکاری ژنتیک بر پایه تکنیک به کار رفته در مقاله (C.-S. Wang & Uzsoy, 2002) توسعه داده شده است. عملکرد روش‌های ابتکاری پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک نیز با هم مقایسه گردید.

زمان‌بندی در محیط ماشین‌های موازی با فرض پردازش دسته‌ای مرور می‌شود. در بخش ۳ مسأله تعریف و مفروضات مسأله مورد مطالعه بررسی می‌شوند. در بخش ۴ روش‌های ابتکاری برای حل مسأله شرح داده می‌شوند. رویکرد خاص شبیه‌سازی توسعه داده شده در بخش ۵ ارائه می‌شود. مقایسه کارایی عملکرد روش‌های ابتکاری با استفاده از رویکرد شبیه‌سازی در بخش ۶ شرح داده خواهد شد و نتیجه‌گیری و پیشنهادها و تحقیقات آتی نیز در بخش ۷ ارائه می‌شود.

## ۲- مرور ادبیات

محیط ماشین‌های موازی از محیط‌های مهم در مسائل زمان‌بندی است که در پژوهش‌های زمان‌بندی ماشین‌های پردازشگر تکی بسیار مورد توجه بوده است و از اهمیت زیادی برخوردار است. اما در زمینه محیط ماشین‌های موازی با ماشین‌های پردازشگر دسته‌ای، به ندرت پژوهش صورت گرفته است. در این محیط ماشین‌های پردازش دسته‌ای به صورت موازی چیدمان می‌گردند و کارها در قالب دسته‌ها به صورت همزمان پردازش می‌شوند.

(Chandru, Lee, & Uzsoy, 1993) یک روش ابتکاری نسبت حریصانه (GR) و یک روش ابتکاری کوتاه‌ترین زمان پردازش دسته پر (FBSPT) برای مسأله ماشین‌های پردازشگر دسته‌ای تک ماشین و موازی یکسان ارائه دادند به طوری که زمان تکمیل کل را حداقل کند. آنها پیشنهاد دادند که الگوریتم GR از الگوریتم FBSPT در شاخص‌های کیفیت جواب و توزیع‌های زمان پردازش در مسائل مختلف

زمان‌بندی غیر تأخیری به وسیله دو قاعده زمان‌بندی ساده ارائه نمودند.

(Kashan, Karimi, & Jenabi, 2008) با هدف حداقل کردن حداکثر زمان تکمیل کارها روی ماشین‌های پردازشگر دسته‌ای موازی، پژوهش دیگری را بررسی کردند. آنها ابتدا یک حد پایین برای حداکثر زمان تکمیل بهینه ارائه کردند. سپس روش ابتکاری پیشنهاد کرده که دسته‌ها طبق این قاعده از کارهای موجود تشکیل می‌شوند. ایده اصلی در این روش بر این اساس است که کارها با زمان پردازش بالاتر در دسته‌های یکسان اجرا گردند. که یک طرح شدنی دسته‌ها را از طریق حداقل کردن به طور همزمان ظرفیت باقیمانده دسته می‌سازد:

(۱) همه کارها به  $L$  دسته به صورت تصادفی تخصیص داده می‌شود (بدون در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت).

$$L = \frac{\sum S_j}{B} \quad (1)$$

(۲) اگر طرح تقسیم دسته‌ها شدنی باشد روش متوقف می‌شود در غیر این صورت به گام سوم می‌رود.

(۳) یک دسته با ظرفیت تجاوز شده انتخاب و بزرگترین زمان پردازش دسته کار با بزرگترین زمان پردازش در آن انتخاب می‌شود.

(۴) اگر کار انتخاب شده در هر دسته موجود (این دسته‌ها را به عنوان مجموعه  $K$  فرض شود) نبود یک دسته جدید ایجاد می‌شود و به آن کار انتخاب شده را تخصیص می‌دهیم سپس ظرفیت دسته‌های ایجاد شده بررسی می‌شود تا اگر مجموع حداقل دو دسته

(Xu & Bean, 2007) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح برای حداقل کردن زمان تکمیل کل و یک الگوریتم ژنتیکی که شیوه نمایش جواب آن بر پایه مقادیر تصادفی است برای ماشین‌های پردازشگر موازی غیریکسان ارائه کردند. (Malve & Uzsoy, 2007) مسأله حداقل کردن حداکثر تاخیر کارها روی ماشین‌های پردازشگر دسته‌ای موازی که کارها به صورت پویا به ایستگاه کار می‌رسند را بررسی کردند. آنها بر مبنای روش ابتکاری زودترین زمان تحویل، یک روش ابتکاری پیشنهاد کرده و بر مبنای این روش ابتکاری، دو روش ابتکاری در محیط ماشین‌های موازی توسعه دادند. سپس بر مبنای این دو روش ابتکاری دو الگوریتم ژنتیک پیشنهاد کردند که هر دو عملکرد بسیار خوبی را نشان دادند، با این تفاوت که الگوریتم دوم ۵۰٪ زمان بیشتر صرف می‌کند.

(Shao et al., 2008) یک رویکرد حل بر پایه شبکه‌های عصبی با فرض زمان‌های در دسترس صفر در نظر گرفتند. آنها نتایج خود را با روش‌های ابتکاری BFLPT<sup>۳</sup> و FFLPT<sup>۴</sup> مقایسه نمودند. (Chung, Tai, & Pearn, 2009) یک مدل ریاضیاتی و ۳ روش ابتکاری برای حداقل کردن زمان تکمیل کل تحت زمان در دسترس غیر صفر ارائه دادند. در کار بعدی همین گروه رویکردی ترکیبی ارائه شد که در آن دسته‌ها ابتدا تشکیل و سپس زمان‌بندی انجام می‌شد. برای تشکیل دسته‌ها از روش ابتکاری تأخیری که لی و همکارانش در سال ۱۹۹۹ برای مسأله تک ماشین ارائه شده بود استفاده کردند و برای زمان‌بندی دسته‌ها روی ماشین‌های موازی دو

الگوریتم ژنتیک پیشنهاد کردند. همچنین، در این پژوهش یک الگوریتم برنامه‌ریزی پویای چند مرحله‌ای، کارها را برای هر ماشین دسته‌بندی می‌کند.

(Damodaran, Vélez-Gallego, & Maya, 2011)

یک روش جستجوی تطبیقی تصادفی حریصانه برای کمینه کردن حداکثر زمان تکمیل کارها روی ماشین‌های پردازشگر دسته‌ای که به طور موازی قرار گرفته‌اند، با فرض زمان آماده بودن برای کارها ارائه کردند. در این مسأله، زمان آماده بودن دسته برابر با طولانی‌ترین زمان آماده بودن کارهای داخل دسته است. روش ابتکاری پیشنهادی‌شان عملکرد بهتری در مقایسه با یک حد پایین و چند روش ابتکاری موجود در پژوهش‌های پیشین داشت. در ادامه، روش (Damodaran & Velez-Gallego, 2010) ابتکاری دیگری برای کمینه کردن حداکثر زمان تکمیل کارها روی ماشین‌های پردازشگر دسته‌ای موازی ارائه کردند. روش ابتکاری پیشنهادی با استفاده از تعدادی مسأله نمونه با چند روش ابتکاری پیشنهادی در پژوهش‌های پیشین از جمله همان روش ابتکاری تحقیق قبلی‌شان مقایسه شد که عملکرد بهتری در مقایسه با آنها داشت. (Chiang, Cheng, & Fu, 2010) یک الگوریتم ممتیک (MA) برای مسأله زمان‌بندی ماشین‌های پردازشگر دسته‌ای موازی با ویژگی‌های ابعاد اندازه‌های کاری واحد و یکسان و خانواده‌های کار ناسازگار و ورود کارها به صورت پویا ایجاد کردند. همچنین، یک طرح کدگذاری جدید برای جستجوی همزمان تشکیل دسته‌های بهینه و زمان‌بندی بهینه روی ماشین‌آلات در روش MA پیاده‌سازی کردند. با مقایسه آن با الگوریتم اولیه MA به این نتیجه رسیدند که در

کمتر مساوی  $S$  شود آنها با هم ترکیب شوند تا زمانی که یک طرح شدنی دسته‌سازی به وجود بیاید.

(۵) اگر در میان دسته‌های در  $K$  تعدادی دسته وجود دارد که زمان پردازش دسته، طولانی‌تر از زمان پردازش کار انتخاب شده باشد، کار انتخاب شده در یکی از دسته‌های  $r$  با کمترین ظرفیت باقیمانده قرار می‌گیرد، در غیر این صورت کار انتخابی در یک batch شدنی در  $k$ ، با بیشترین زمان پردازش قرار می‌گیرد ( $r$  زیرمجموعه  $k$  است).

بر مبنای این روش ابتکاری، یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی توسعه دادند. الگوریتم پیشنهادی با یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید موجود در پژوهش‌های پیشین مقایسه شد که عملکرد بهتری در مقایسه با آن داشت.

( Damodaran, Hirani, & Velez-Gallego, )

(2009) یک الگوریتم ژنتیک برای حداقل کردن زمان تکمیل ماشین‌های پردازش دسته‌ای موازی ارائه کردند. آنها نتایج خود را با رویکرد فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید پیشنهاد شده در مقاله (Chang et al., 2004) و الگوریتم ژنتیک بر پایه کدگذاری عدد تصادفی (RKGA) (Xu & Bean, 2007) و حل کننده CPLEX مقایسه نمودند. الگوریتم ژنتیک ارائه شده داموداران در پیدا کردن جواب‌های خوب بسیار موثرتر بود. (H.-M. Wang & Chou, 2010) یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی برای کمینه کردن حداکثر زمان تکمیل کارها روی ماشین‌های پردازشگر دسته‌ای موازی ارائه کردند که زمان آماده بودن برای کارها در نظر گرفته شده است. سپس برای حل مدل، یک الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و یک

شاخص‌های کیفیت حل و اثر بخشی محاسباتی مزیت بالاتری دارد.

(Chang et al., 2004) مدل ریاضی برای مسأله مورد مطالعه، در حالتی که محدودیت زمان در دسترس در نظر گرفته نشده، معرفی کردند. در ادامه (Chung et al., 2009) مدل ریاضی با در نظرگیری محدودیت زمان در دسترس ارائه دادند که (Velez Gallego, 2009) با تغییر مدل ریاضی آنرا با در نظرگیری جایگاه دسته‌ها روی هر ماشین ارائه دادند.

با توجه به بررسی پژوهش‌های مرتبط در زمینه ماشین‌های موازی پردازشگر دسته‌ای، پژوهشی که در آن، زمان‌های پردازش و در دسترس به طور احتمالی در مسأله در نظر گرفته شوند، بررسی نشده‌اند که مقاله حاضر در ادامه تحقیق (Chung et al., 2009)، به توسعه رویکرد شبیه سازی در حالت شرایط احتمالی برای پارامترهای مسأله می‌پردازد و از ۶ روش حل ابتکاری به منظور حل مسأله مورد مطالعه استفاده می‌شود.

### ۳- تعریف مسأله

در ابتدای دوره زمان بندی  $n$  کار  $\{j_1, j_2, \dots, j_n\}$  با مشخصات زمان پردازش  $P_j$ ، زمان در دسترس  $r_j$  و اندازه‌ی کار  $S_j$  وجود دارند. این کارها با توجه به زمان در دسترس بودنشان وارد ایستگاه کاری می‌شوند که در آن ایستگاه  $m$  ماشین مشابه به طور موازی قرار دارد. منظور از ماشین‌های یکسان موازی این است که همه ماشین‌ها دارای ظرفیت یکسان پردازش هستند و با سرعت برابر، دسته‌ها را پردازش می‌کنند. هر ماشین دارای حداکثر ظرفیت پردازش همزمان  $B$  واحد کار در قالب یک دسته است.

بنابراین، کارها باید قبل از پردازش روی ماشین‌ها، در دسته‌های  $(k: 1, 2, \dots, b)$  قرار بگیرند، به طوری که مجموع اندازه کارهای داخل دسته از ظرفیت ماشین کمتر یا مساوی باشند. سپس دسته‌ها در صورت بیکار بودن ماشین به هر کدام از آنها تخصیص می‌یابند. هر دسته بعد از پردازش ایستگاه را ترک می‌کند و جای خود را به دسته بعدی می‌دهد. در این مسأله، اندازه هر کار با توجه به تعداد سفارشی از محصول است که مشتری تقاضا می‌کند. زمان پردازش دسته، حداکثر زمان پردازش از میان زمان‌های پردازش کارهای داخل دسته است و زمان آماده به پردازش هر دسته برابر با حداکثر زمان در دسترس از میان زمان‌های در دسترس کارهای دسته است.

مسأله مورد مطالعه شامل دو مرحله است. در مرحله اول با توجه به کارهای موجود، دسته‌ها تشکیل می‌شود. هر دسته با توجه به این که مستقیماً روی ماشین پردازش می‌شود، دارای ظرفیت برابر با اندازه ظرفیت ماشین است. پس، استفاده از روش‌های ابتکاری در ساخت دسته‌ها، تأثیر بالایی در کیفیت حل نهایی دارد. در مرحله دوم، دسته‌های ساخته شده ابتدا به ماشین‌های موازی موجود تخصیص می‌یابد سپس روی هر ماشین دسته‌ها به ترتیب و قاعده‌ای مرتب می‌شود تا تابع هدف مورد نظر که در این مقاله حداکثر زمان تکمیل است، بهینه گردد.

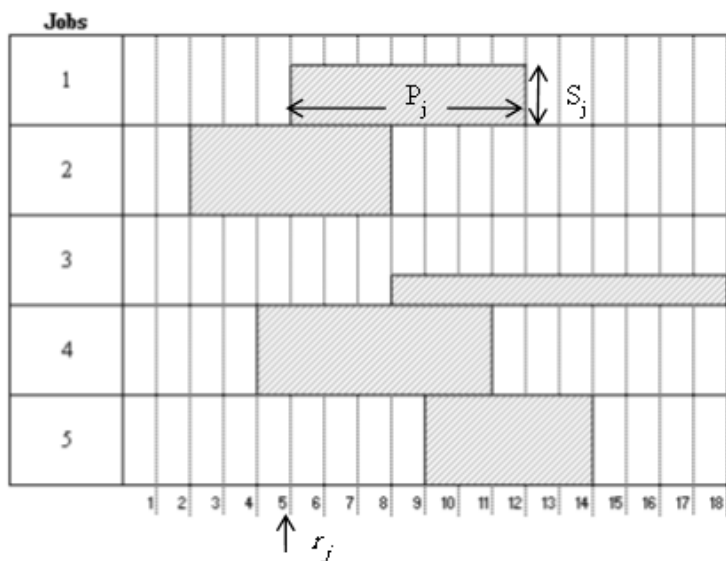
### ۳-۱- ویژگی‌های مسأله مورد نظر

- هر کار دارای اندازه  $(s)$ ، زمان پردازش  $(p)$  و زمان در دسترس بودن  $(r)$  دلخواه است و همه مقادیر احتمالی هستند.

مثال: در جدول ۱ اطلاعات مربوط به ۵ کار برای زمان‌بندی روی ۲ ماشین موازی پردازشگر دسته‌ای ارائه شده است. شکل ۱ نمایش گرافیکی از داده‌های جدول ۱ نشان می‌دهد. هر مستطیل یک کار را نشان می‌دهد. طول مستطیل تشبیهی از زمان پردازش هر کار و ارتفاع مستطیل تشبیهی از اندازه کار است. محور افقی بیان‌کننده زمان در دسترس کارها است. ظرفیت اندازه‌ای هر دسته ۷ واحد است. نمودار گانت زمان‌بندی شدنی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این مثال دو دسته تشکیل می‌شود و مقدار  $C_{max}$  برابر با ۱۹ واحد زمانی است. اجرای هر دسته در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- داده‌های مربوط به ۵ کار در نمونه مسأله

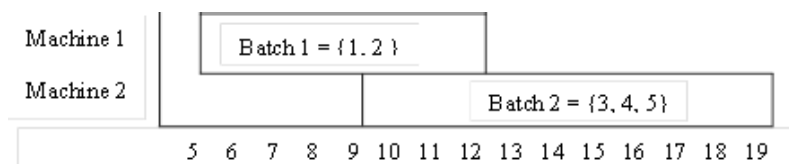
کارها	۱	۲	۳	۴	۵
زمان پردازش ( $P_j$ )	۷	۶	۱۰	۷	۵
زمان در دسترس ( $r_j$ )	۵	۲	۸	۴	۹
اندازه کار ( $S_j$ )	۲	۳	۱	۳	۳



شکل ۱- نمایش مسأله

- تعداد ماشین‌ها حداقل ۲ و حداکثر  $m$  است.
- ظرفیت هر دسته طوری فرض می‌شود که مجموع اندازه کارهای تشکیل‌دهنده آن از  $B$  بیشتر نگردد.
- فرض می‌شود هیچ کاری وجود ندارد که اندازه آن به تنهایی از ظرفیت دسته بزرگتر باشد.
- زمانی که پردازش دسته شروع شود، کارها نمی‌توانند از دسته حذف یا اضافه شوند.
- ماشین‌ها دارای ظرفیت پردازش  $B$  و یکسان هستند.
- همه‌ی ماشین‌ها، پردازشگر دسته‌ای هستند.
- تقدم و تأخر مجاز نیست.
- خرابی ماشین مجاز نیست.

در ادامه برای شرح بهتر مسأله، مثالی ساده ارائه می‌شود که در آن ۵ کار با مقادیر قطعی پارامترهای زمان در دسترس، زمان پردازش و اندازه برای هر کار فرض می‌شود. در این مدل، منظور از ابعاد یا اندازه کار ( $S_j$ ) مقدار سفارشی است از طرف مشتری که برای کار  $j$ -ام تقاضا می‌شود.



شکل ۲- نمودار گانت یک زمانبندی شدنی برای مسأله با ۵ نمونه کار

#### ۴- روش های حل

به طور کلی به منظور حل مسائل و به دست آوردن جواب های مناسب، از ۳ رویکرد اصلی شامل روش های دقیق، روش های ابتکاری و روش های فراابتکاری استفاده می شود. روش های دقیق مانند شاخه و کران و برنامه ریزی پویا اغلب در نرم افزارهای بهینه سازی تعبیه شده اند. این روش ها با پیچیده تر شدن مدل، کارایی خود را در پیدا کردن نقطه بهینه در زمان مناسب از دست می دهند. رویکرد دوم روش های ابتکاری است که در طی ۵۰ سال اخیر برای حل مسائل پیچیده کاربرد داشته است. این روش ها در مسائل پیچیده جواب نزدیک به بهینه را در زمان مناسبی به دست می آورند.

روش های ابتکاری عبارتند از معیارها، روش ها یا اصولی که مطابق با ساختار هر مسأله ایجاد می شوند. خاصیت روش های ابتکاری خوب در این است که ابزار ساده ای برای تشخیص خط مشی های بهتر ارائه دهند. با وجود این، تشخیص خط مشی های اثربخش را تضمین نمی کنند، ولی اغلب به صورت شرط کافی این تضمین را فراهم می کنند. بیشتر مسائل پیچیده نیازمند ارزیابی تعداد انبوهی از حالت های ممکن برای تعیین یک جواب دقیق هستند. روش های ابتکاری با استفاده از روش هایی که نیازمند ارزیابی های کمتر هستند و جواب هایی که در زمانی

مناسب ارائه می کنند، نقشی اثربخش در حل چنین مسائلی دارند (عالم تبریز و همکاران، ۱۳۸۷).

با توجه به پیچیدگی مدل مورد مطالعه در این مقاله، از روش های ابتکاری در دو بخش تشکیل دسته و ترتیب دهی دسته ها روی ماشین ها استفاده شده است. ترکیب های مختلف از روش های ابتکاری در دو بخش اشاره شده، تاثیر بسیاری در جواب های به دست آمده دارند. در این قسمت دو روش ابتکاری برای تشکیل دسته و ۳ روش ابتکاری برای ترتیب دهی دسته ها به طور خلاصه شرح داده می شود.

#### ۴-۱- روش های تشکیل دسته

هدف از تشکیل دسته ها این است که با توجه به ظرفیت مشخص دسته ها تا حد امکان تعداد دسته ها حداقل و منابع موجود به حداکثر بهره وری برسند.

#### ۴-۱-۱- روش ابتکاری نخستین تناسب طراحی<sup>۷</sup> شده

(MFF)

(Velez Gallego, 2009) این روش را برای مسأله زمان بندی ماشین های پردازشگر دسته ای موازی در شرایطی که زمان در دسترس  $(T_j)$  غیر صفر است ارائه کرد. قدم های این روش به صورت زیر است:

(۱) ابتدا کارها به ترتیب غیر کاهشی زمان در دسترس مرتب می شوند (اگر زمان در دسترس چند کار



۲) نخستین کار در لیست به اولین دسته تخصیص می‌یابد.

۳) کار کاندید  $J$  که در لیست بالاتر است روی دسته‌ای که بیشترین محتویات را دارد یعنی دسته‌ای که حجم باقیمانده ظرفیت آن برای تخصیص کار، کمترین است به شرط عدم تجاوز از ظرفیت دسته جایگذاری می‌شود.

۴) برای بقیه کارها در لیست هم به ترتیب، قدم ۳ اجرا می‌شود تا همه‌ی کارها به دسته‌ها تخصیص یابند.

#### ۴-۲- روش‌های ترتیب دسته‌ها<sup>۱۰</sup>

پس از این که دسته‌ها تشکیل شد، مسأله به مسأله ماشین موازی پردازش تکی کاهش می‌یابد که با توجه به پیچیدگی سخت مسأله، از روش‌های ابتکاری یا فراابتکاری برای حل آن می‌توان استفاده کرد.

سه روشی که ولز در سال ۲۰۰۹ ارائه کرد به اختصار شرح داده می‌شود.

۴-۲-۱- روش ابتکاری زودترین زمان در دسترس بودن<sup>۱۱</sup> (ERT)

دسته‌ها به ترتیب زودترین زمان در دسترس دسته‌ها مرتب می‌شوند. سپس به هر دسته، آن ماشینی که آزاد است تخصیص می‌یابد.

۴-۲-۲- روش ابتکاری زودترین زمان در دسترس بودن-طولانی‌ترین زمان پردازش (ERT-LPT)

دسته‌ها به ترتیب غیرکاهش‌ی زمان در دسترس هر دسته منظم می‌شوند. تا زمانی که حداقل زمان

برابر باشد، از قاعده LPT<sup>۸</sup> برای اولویت دادن استفاده می‌شود).

۲) نخستین کار در لیست به اولین دسته تخصیص یابد.

۳) کار بعدی در لیست به شرطی به این دسته اضافه شود که مطابق رابطه ۲، شرط تجاوز نکردن از ظرفیت دسته رعایت گردد. یعنی اندازه کار کاندید برای ورود به دسته، از مقدار باقیمانده ظرفیت دسته باید کوچکتر یا مساوی باشد. در غیر این صورت دسته جدید تشکیل می‌شود و کار کاندید، به آن تخصیص می‌یابد.

$$S_j \leq B - \sum S_k \quad (2)$$

$k$  کارهای تعلق یافته به دسته و  $B$  اندازه ظرفیت دسته است.

۴) برای بقیه کارها در لیست، قدم ۳ اجرا می‌گردد تا همه‌ی کارها به دسته‌ها تخصیص یابند.

۴-۱-۲- روش ابتکاری بهترین تناسب طراحی شده<sup>۹</sup> (MFD)

این روش را (Velez Gallego, 2009) برای مسأله زمان‌بندی ماشین‌های پردازشگر دسته‌ای موازی ارائه کرده است. قدم‌های این روش به صورت زیر است:

۱) کارها را به ترتیب غیر کاهش‌ی زمان در دسترس مرتب می‌شود (اگر زمان در دسترس چند کار برابر باشد، از قاعده LPT برای اولویت دادن استفاده می‌شود).

هموار تعدیل شده یا دیگر روش‌های پیش‌بینی یا داده‌کاوی استفاده کرد.

در دو روش ابتکاری تشکیل دسته، زمان در دسترس و اندازه کارها مشخص شده سپس دسته‌بندی صورت می‌گیرد. ولی به هنگام استفاده از قاعده LPT از میانگین زمان پردازش استفاده می‌شود. در سه روش ابتکاری اکثر محاسبات بر پایه زمان پردازش صورت می‌گیرد، در نتیجه از میانگین زمان پردازش در محاسبات استفاده می‌شود.

جدول ۲- روش‌های ابتکاری

نام روش ابتکاری	فاکتور تعیین کننده	کد اختصاصی
ERT	$r_j$	S1
ERT-LPT	$r_j - P_j$	S2
LECT	$P_j$	S3
MBF	$r_j$	B1
MFF	$P_j$	B2

#### ۵- شبیه‌سازی

با پیدایش کامپیوتر در دهه ۵۰ و ۶۰ میلادی، پژوهشگران شروع به استفاده از زبان‌های برنامه‌نویسی معمول مانند FORTRAN برای شبیه‌سازی سیستم‌های پیچیده کردند. این رویه بسیار قابل انعطاف اما پر زحمت و مستعد خطا بود (Kelton, Sadowski, & Sturrock, 2004).

مدل‌های شبیه‌سازی از لحاظ منطقی معمولاً پیچیده هستند و دارای فعل و انفعال‌های متقابل بسیاری در بین عناصر سیستم هستند. بیشتر این فعل و انفعال‌ها

در دسترس ماشین‌ها بزرگتر یا مساوی حداکثر زمان در دسترس دسته‌ها باشد، دسته‌ها مطابق قاعده LPT به نخستین ماشین در دسترس تخصیص می‌یابند. از این زمان به بعد، دسته‌ها به نخستین ماشین طبق قاعده LPT تخصیص می‌یابد.

#### ۴-۲-۳- روش ابتکاری طولانی‌ترین زودترین زمان تکمیل<sup>۱۲</sup> (LECT)

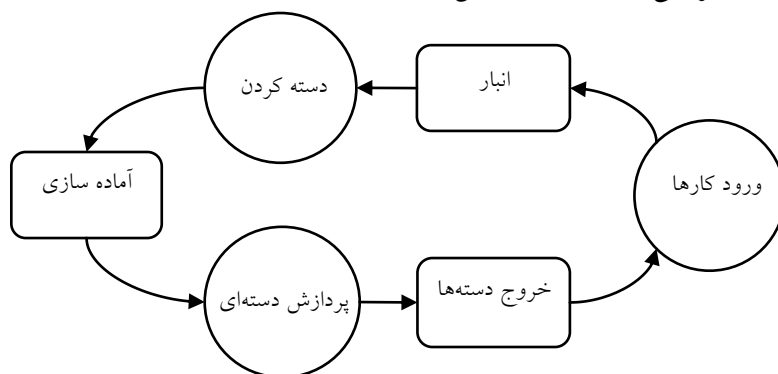
برای هر دسته، مقدار  ${}^{13}C_b$  بر اساس رابطه  $C_b = R_b + P_b$  محاسبه می‌شود. در این رابطه  $P_b$  معرف زمان پردازش هر دسته و  $R_b$  معرف زمان در دسترس هر دسته است. پس از محاسبه  $C_b$ ، دسته‌ها، مطابق ترتیب غیر افزایشی  $C_b$  مرتب می‌شوند و هر دسته به نخستین ماشین در دسترس تخصیص می‌یابد.

جدول ۲ فاکتور تعیین کننده در روش‌های ابتکاری، به همراه کد اختصاصی هر روش را نشان می‌دهد. در ادامه از ترکیب کدهای اختصاصی به منظور نام گذاری روش‌های ترکیبی استفاده می‌شود. برای مثال روش B1S2 به این معناست که از روش دسته‌بندی MBF و توالی ERT-LPT استفاده شده است.

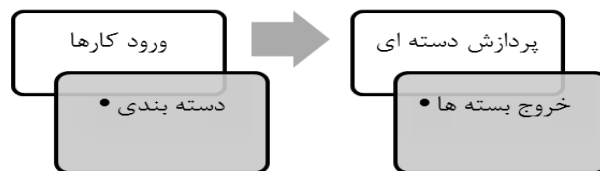
۴-۳- به کارگیری زمان احتمالی در روش‌های ابتکاری با توجه به احتمالی بودن پارامترها، از میانگین تابع توزیع آنها در محاسبات مورد نیاز در انواع روش‌های ابتکاری استفاده می‌شود. این رویه یکی از معمول‌ترین و ساده‌ترین راه‌کارها برای استفاده روش‌های قطعی در مسائل احتمالی هستند، که مبتنی بر اطلاعات و داده‌های پیشین ثبت شده است. به جای استفاده از روش میانگین ساده می‌توان از تکنیک‌های دیگری همچون روش پیش‌بینی نمو

تکنیک حوادث یا عملیات سیستم به صورت توالی از عملیات نمایش داده می‌شود. هر رخداد در یک لحظه به تغییر در حالت سیستم منجر می‌شود ( Stewart, 2004).

روش‌های زیادی برای انجام شبیه‌سازی رویداد گسسته مانند روش‌های مبتنی بر رویداد، مبتنی بر فعالیت و فرآیند سه‌فازی ارائه شده است ( Pidd, 1998). رویه شبیه‌سازی ارائه شده در این مقاله، مبتنی بر فعالیت است که نهادهای مدل، مطابق با تعریف (Kelton et al., 2004) کارها هستند و ماشین‌ها منابع سیستم هستند. نمودار فعالیت مدل شبیه‌سازی شده در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳- نمودار فعالیت



شکل ۴- فرآیند شبیه‌سازی

دوم دسته‌ها روی ماشین‌های موازی پردازش می‌شوند. شکل ۴ مدل پایه از رویه دو‌فازی فرآیند شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد.

در حین برنامه به طور پویا تغییر می‌کنند. این وضعیت موجب شده است که پژوهشگران، زبان‌های برنامه‌نویسی مخصوص شبیه‌سازی مانند GPSS را ایجاد و توسعه دهند.

مدل مورد بررسی در این مقاله، بسیار پیچیده است و چارچوب آن منطبق با زبان‌های برنامه‌نویسی معمول شبیه‌سازی و یا برنامه‌های سطح بالای شبیه‌سازی مثل Arena نیست. بنابراین، در این مقاله رویه شبیه‌سازی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی MATLAB انجام شده است.

رویه شبیه‌سازی ارائه شده بر اساس تکنیک شبیه‌سازی گسسته-پیشامد که یکی از پرکاربردترین رویه‌های شبیه‌سازی است طراحی شده است. در این

برای شبیه‌سازی یک رویه دو‌فازی طراحی شده است که در فاز اول کارها به طور تصادفی تولید و مطابق دو روش ابتکاری دسته‌بندی می‌شوند. در فاز

## ۶- نتایج محاسباتی

زمان پردازش و زمان در دسترس بودن کارها بر اساس توزیع یکنواخت محاسبه شده‌اند، زیرا واریانس بالای توزیع یکنواخت متضمن این است که نتایج شبیه‌سازی برای مقایسه روش‌های ابتکاری تحت شرایط کاملاً یکسان اجرا شود (Weng, Lu, & Ren, 2001).

شش نوع نمونه مسأله بر اساس رویه پیشنهادی ولز (۲۰۰۹) تعریف شده است. مشخصات مسائل در جدول ۳ آورده شده است. طبق هر نوع نمونه مسأله، ۱۰۰ مسأله تولید و روش‌های ابتکاری دسته‌بندی و توالی روی آنها اعمال شده است. سپس برای هر مورد ۱۰۰۰۰ بار عملیات شبیه‌سازی انجام شده است. تعداد تکرار یا اجرای شبیه‌سازی بر اساس به دست آوردن فاصله اطمینان خوب طبق رویه (Banks & Carson) محاسبه شده است. ابتدا، تعداد تکرار برای بزرگ‌ترین مسأله محاسبه و سپس به منظور یکسان سازی رویه، برای مسائل کوچک نیز اعمال شده است.

در جدول ۳ مشخصات نمونه مسائل تصادفی تولید شده آمده است. جدول ۴ میانگین عملکرد نسبی هر یک از روش‌های ترکیبی را نمایش می‌دهد. عملکرد نسبی روش  $k$  با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$RP_k = \frac{C_k}{C_{\min}} \quad (3)$$

که  $C_k$  حداکثر زمان تکمیل روش  $k$  و  $C_{\min}$  حداقل حداکثر زمان تکمیل بین تمام شش روش ترکیبی است. هر چه روش ابتکاری ترکیبی عملکرد بهتری داشته باشد، عدد به دست آمده به یک نزدیکتر خواهد شد.

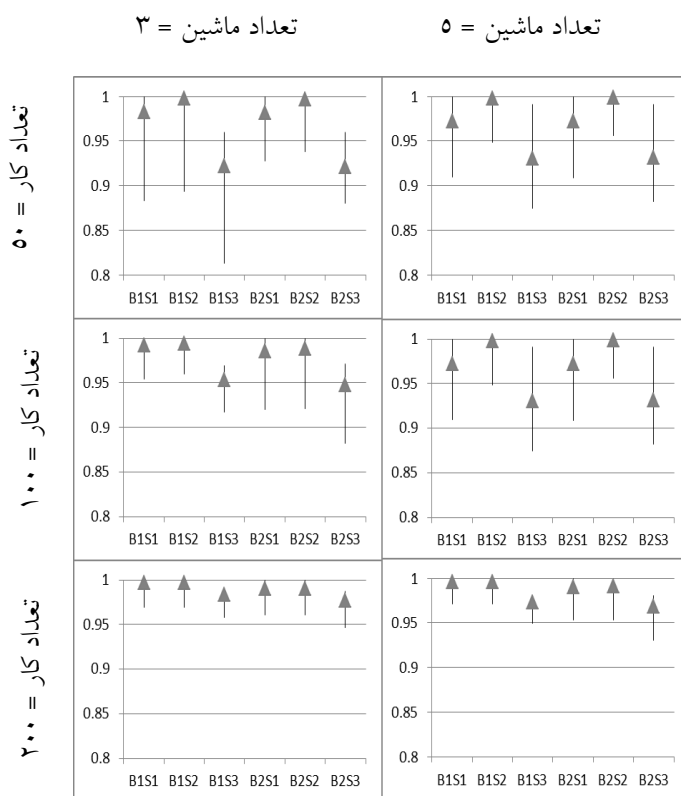
شکل ۵ عملکرد نسبی هر یک از روش‌های ترکیبی را به صورت نمودار سهام نمایش می‌دهد. هر خانه، تعداد ماشین و تعداد کار مشخص شده در سطر و ستون را نمایش می‌دهد. در این نمودار، هر خانه حاوی ۶ خط به نمایندگی از روش ابتکاری ترکیبی است. بالا و پایین هر خط، بیشترین و کمترین مقدار معیار است و میانگین معیار روی خط مشخص شده است.

در هر نمودار سهام، هر خانه حاوی ۶ خط به نمایندگی از روش ابتکاری ترکیبی است. بالا و پایین هر خط، بیشترین و کمترین مقدار معیار است و میانگین معیار روی خط مشخص شده است.

جدول ۳- انواع نمونه مسأله تصادفی

مسأله	تعداد ماشین	تعداد کار
۱	۳	۵۰
۲	۳	۱۰۰
۳	۳	۲۰۰
۴	۵	۵۰
۵	۵	۱۰۰
۶	۵	۲۰۰

برای بررسی رفتار مدل، آنالیز حساسیت روی نمونه مسأله چهارم انجام شده است. شکل ۶ حساسیت میزان احتمالی بودن زمان فرآیند عملیات را نمایش می‌دهد. همانگونه که از شکل مشخص است، روش دوم ابتکاری توالی بهترین عملکرد را دارد و روش ابتکاری دسته‌بندی نوع اول کارایی اندک بهتری از روش ابتکاری دسته‌بندی دوم دارد.



شکل ۵- نمودار سهام عملکرد نسبی روش‌های ابتکاری ترکیبی

#### ۷- نتیجه گیری

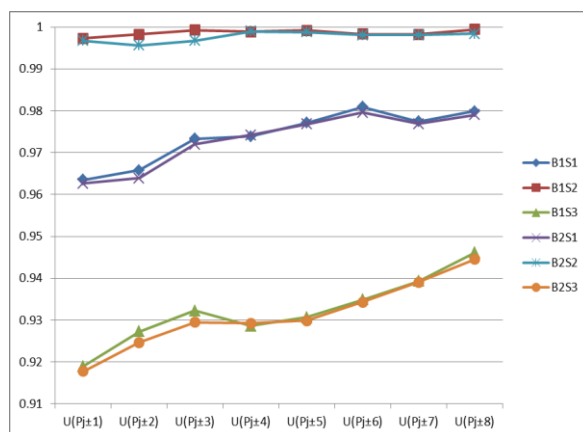
بالاتری در به دست آوردن جواب‌های مناسب در نمونه مسائل ایجاد شده دارند.

در ادامه تحقیق انجام شده و در تحقیقات آتی به منظور واقعی‌تر شدن مسأله می‌توان مفروضات جدیدی در مدل در نظر گرفت که شامل بررسی سایر مقیاس‌های عملکردی مانند متوسط زمان‌های تکمیل کارها یا حداکثر زمان جریان تولید، توسعه مدل در حالت چند ایستگاهی به صورت جریان کارگاهی و اضافه کردن فرض‌های خرابی ماشین‌ها، زمان آماده سازی وابسته به توالی، سیستم‌های حمل و نقل و آماده سازی گروهی هستند.

در این مقاله، مسأله زمان‌بندی ماشین‌های پردازشگر دسته‌ای موازی با پارامترهای احتمالی و با هدف حداقل کردن حداکثر زمان تکمیل، بررسی شده است. به منظور تعیین کاراترین روش حل ابتکاری در مسأله فوق، ۵ روش ابتکاری در دو فاز از ساختار مسأله شامل فازهای تشکیل دسته از کارهای موجود و تعیین توالی دسته‌ها روی هر ماشین تشریح گردید. سپس با رویکرد شبیه‌سازی، کاراترین ترکیب روش‌های ابتکاری در دو فاز مشخص شده است. نتیجه محاسبات نشان از این دارد که روش MBF در فاز اول و روش ERT-LPT در فاز دوم، کارایی

جدول ۴- نتایج محاسباتی

روش ابتکاری ترکیبی						نمونه مسأله
B1S1	B1S2	B1S3	B2S1	B2S2	B2S3	n×M
۰٫۹۲۱۹۳۹	۰٫۹۹۷۷۲۹	۰٫۹۸۲۲۷۴	۰٫۹۹۶۳۸۴	۰٫۹۸۱۲۹۵	۰٫۹۲۱۴۲۴	۵۰×۳
۰٫۹۵۳۴۰۲	۰٫۹۹۴۲۹۹	۰٫۹۹۱۸۱۹	۰٫۹۸۸۰۱۱	۰٫۹۸۵۷۳۱	۰٫۹۴۷۴۶۶	۱۰۰×۳
۰٫۹۸۳۱۸۲	۰٫۹۹۷	۰٫۹۹۶۸۱۸	۰٫۹۹۰۰۰۶	۰٫۹۹۰۰۰۶	۰٫۹۷۶۴۹	۲۰۰×۳
۰٫۹۳۰۵۸۷	۰٫۹۹۸۱۳۲	۰٫۹۷۱۸۲۸	۰٫۹۹۸۶۸۷	۰٫۹۷۲۲۲۲	۰٫۹۳۱۱۱۷	۵۰×۵
۰٫۹۳۴۴۶۸	۰٫۹۹۸۵۹۷	۰٫۹۷۳۶۴۳	۰٫۹۹۸۸۸۷	۰٫۹۷۳۵۲۸	۰٫۹۳۳۹۸۵	۱۰۰×۵
۰٫۹۷۳۲۵۶	۰٫۹۹۶۰۷۷	۰٫۹۹۵۳۹۹	۰٫۹۹۰۹۱۸	۰٫۹۹۰۲۵۱	۰٫۹۶۸۱۲۵	۲۰۰×۵
۰٫۹۴۹۴۷۲	۰٫۹۹۶۹۷۲	۰٫۹۸۵۲۹۷	۰٫۹۹۳۸۴۶	۰٫۹۸۲۱۷۲	۰٫۹۴۶۴۳۵	میانگین



شکل ۶- تحلیل حساسیت برای زمان فرآیند عملیات

Chang, P-Y, Damodaran\*, P, & Melouk, S. (2004). Minimizing makespan on parallel batch processing machines. *International Journal of Production Research*, 42(19), 4211-4220.

Chiang, Tsung-Che, Cheng, Hsueh-Chien, & Fu, Li-Chen. (2010). A memetic algorithm for minimizing total weighted tardiness on parallel batch machines with incompatible job families and dynamic job arrival. *Computers & Operations Research*, 37(12), 2257-2269.

Chung, SH, Tai, YT, & Pearn, WL. (2009). Minimising makespan on parallel batch processing machines with non-identical ready time and arbitrary job sizes.

#### منابع

عالم تبریز. الف، زندیه. م، محمدرحیمی. ع. ر، ۱۳۸۹.

الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی ترکیبی.

شابک: ۴-۲۱۷-۳۸۸-۹۷۸-۹۶۴. نشر اشرافی.

Banks, J, & Carson, JS. II, Nelson, BL, and Nicol, DM (2005). *Discrete-event system simulation*.

Chandru, Vijaya, Lee, C-Y, & Uzsoy, Reha. (1993). Minimizing total completion time on batch processing machines. *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 31(9), 2097-2121.

- (2011). A survey of problems, solution techniques, and future challenges in scheduling semiconductor manufacturing operations. *Journal of Scheduling*, 14(6), 583-599.
- Pidd, Michael. (1998). Computer simulation in management science.
- Pinedo, Michael L. (2012). *Scheduling: theory, algorithms, and systems*: Springer Science & Business Media.
- Shao, Hao, Chen, Hua-Ping, Huang, George Q, Xu, Rui, Cheng, Ba-yi, Wang, Shuan-shi, & Liu, Bo-wen. (2008). *Minimizing makespan for parallel batch processing machines with non-identical job sizes using neural nets approach*. Paper presented at the Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on.
- Stewart, Robinson. (2004). Simulation—The practice of model development and use. *Hoboken, NJ: John Wiley & Sons*.
- Uzsoy, Reha. (1995). Scheduling batch processing machines with incompatible job families. *International Journal of Production Research*, 33(10), 2685-2708.
- Velez Gallego, Mario Cesar. (2009). Algorithms for scheduling parallel batch processing machines with non-identical job ready times.
- Wang, Cheng-Shuo, & Uzsoy, Reha. (2002). A genetic algorithm to minimize maximum lateness on a batch processing machine. *Computers & Operations Research*, 29(12), 1621-1640.
- Wang, Hui-Mei, & Chou, Fuh-Der. (2010). Solving the parallel batch-processing machines with different release times, job sizes, and capacity limits by metaheuristics. *Expert Systems with Applications*, 37(2), 1510-1521.
- Weng, Michael X, Lu, John, & Ren, Haiying. (2001). Unrelated parallel machine scheduling with setup consideration and a total weighted completion time objective. *International journal of production economics*, 70(3), 215-226.
- International Journal of Production Research*, 47(18), 5109-5128.
- Damodaran, Purushothaman, Hirani, Neal S, & Velez-Gallego, Mario C. (2009). Scheduling identical parallel batch processing machines to minimise makespan using genetic algorithms. *European Journal of Industrial Engineering*, 3(2), 187-206.
- Damodaran, Purushothaman, & Velez-Gallego, Mario C. (2010). Heuristics for makespan minimization on parallel batch processing machines with unequal job ready times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9-12), 1119-1128.
- Damodaran, Purushothaman, Vélez-Gallego, Mario C, & Maya, Jairo. (2011). A GRASP approach for makespan minimization on parallel batch processing machines. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(5), 767-777.
- Kashan, Ali Husseinzadeh, Karimi, Behrooz, & Jenabi, Masoud. (2008). A hybrid genetic heuristic for scheduling parallel batch processing machines with arbitrary job sizes. *Computers & Operations Research*, 35(4), 1084-1098.
- Kelton, WD, Sadowski, RP, & Sturrock, DT. (2004). *Simulation with Arena*, 3rd: McGraw-Hill Higher Education, Massachusetts, USA.
- Koh\*, Shie-Gheun, Koo, Pyung-Hoi, Ha, Jae-Won, & Lee, Woon-Seek. (2004). Scheduling parallel batch processing machines with arbitrary job sizes and incompatible job families. *International Journal of Production Research*, 42(19), 4091-4107.
- Malve, Sujay, & Uzsoy, Reha. (2007). A genetic algorithm for minimizing maximum lateness on parallel identical batch processing machines with dynamic job arrivals and incompatible job families. *Computers & Operations Research*, 34(10), 3016-3028.
- Mönch, Lars, Fowler, John W, Dauzère-Pérès, Stéphane, Mason, Scott J, & Rose, Oliver.

Paper presented at the Computational Intelligence in Scheduling, 2007. SCIS'07. IEEE Symposium on.

Xu, Shubin, & Bean, James C. (2007). *A genetic algorithm for scheduling parallel non-identical batch processing machines.*

پی نوشت

---

- 1 -Greedy ratio
- 2 -Full batch short processing time
- 3 -Best fit long processing time
- 4 -First fit long processing time
- 5 -Random key genetic algorithm
- 6 -Memetic algorithm
- 7 Modified First fit
- 8- Long processing time
- 9 Modified fit decreasing
- 10 Scheduling Rules
- 11 Earliest ready time
- 12 Longest earliest completion time
- 13 Completion time