ارائه یک مدل ترکیبی برای انتخاب ماشینهای موازی و زمانبندی کارها با در نظر گرفتن زمانهای آماده سازی

رضا توکلی مقدم
دانشیار گروه مهندسی صنایع- دانشکده فنی- دانشگاه تهران
tavakoli@ut.ac.ir
یاسمن خدادادگان و معید حق نویس
کارشناسی ارشد مهندسی صنایع- دانشکده فنی- دانشگاه تهران
ykhodadad@engmail.ut.ac.ir and haghnevis@engmail.ut.ac.ir
ص - پ ۱۱۳۶۵/۴۵۶۳ تهران، نمابر ۸۰۱۳۱۰۲

واژه‌های کلیدی:
ماشینهای موازی، زودکرد و دیرکرد کارها، زمان آماده سازی وابسته به توالی

چکیده:

امروزه حل مسائل چند معیاره در زمانبندی ماشین‌ها مورد توجه محققان قرار گرفته است. با توجه به مسائلی که اخیراً در زمینه زمانبندی ماشین‌ها در محیطهای تولید به موقع[1] مطرح شده است، در نظر گرفتن اهدافی مانند حداقل کردن هزینه‌های زودکرد و دیرکرد به صورت همزمان، حداقل کردن حداکثر زودکرد و دیرکرد و غیره این مسائل را به واقعیت نزدیک‌تر کرده و از طرف دیگر آنها را پیچیده‌تر ساخته است. در این مقاله مساله انتخاب و زمانبندی همزمان ماشینهای موازی با هدف حداقل کردن مجموع هزینه‌های نگهداری ماشین و هزینه‌های زودکرد و دیرکرد وزنی کارها در نظر گرفته شده است. برای هر کار زمان آماده‌سازی وابسته به توالی، هزینه‌های زودکرد و دیرکرد، موعد تحویل مجزا در نظر گرفته شده و بریدگی مجاز نمی باشد. مدل ریاضی مساله فوق ارائه شده است و از طریق نرم افزار لینگو[2] ۶ تعیین اعتبار شده است. از آنجا که مساله ماشینهای موازی یک مساله چند جمله ای سخت است، استفاده از یک رویکرد فراابتکاری برای حل مساله در ابعاد بزرگ اجتناب ناپذیر می‌باشد. در این مطالعه از رویکرد فراابتکاری الگوریتم ژنتیک استفاده شده است و نتایج محاسباتی به صورت کارآمد ارائه شده است.

[1] Just-In-Time (JIT)
2 Lingo 6.0

۱. مقدمه

امروزه مسائل توالی عملیات ماشینهای موازی با توجه به معیارهای زودکرد و دیرکرد مورد توجه محققان قرار گرفته است. در محیط کسب و کار حاضر، رقابت شرکتهای تولیدی از طریق قابلیت آنها برای پاسخگویی سریع به تغییرات سریع زمینه تجارتی و تولید محصولات با کیفیت بالاتر و هزینه های کمتر تعیین می‌شود. شرکتهای تولیدی در تلاش هستند تا این قابلیتها را از طریق اتوماسیون و مفاهیم خلاق مانند تولید به موقع (JIT)، پاسخگوی سریع[1] (QR)، تکنولوژی گروهی[2] (GT) و مدیریت کیفیت جامع[3] (TQM) بدست آورند. در محیط JIT ، شرکتها متمایل به تکمیل کارها تا حد امکان نزدیک به موعد تحویل برای اجتناب از جریمه زودکرد دارند هر انحراف از این هدف منجر به هزینه‌های زودکرد و دیرکرد می‌شود و سازمانها درصدد حداقل نمودن این هزینه‌ها می‌باشند [۱].

مسائل زمانبندی ماشینها با جریمه های زودکرد و دیرکرد بدلیل افزایش توجه به استراتژی تولید JIT در صنعت، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. با توجه به افزایش فشار به سمت سیاستهای JIT اکثر شرکتهای تولید کننده مجبور به ایجاد زمانبندی هایی هستند که نیاز مشتری را در موعد تحویل یا نزدیک به آن رفع سازد. درصورتی که یک کار قبل از موعد تحویل تکمیل شود، باید تا موعد تحویل در انبار نگهداری شده و لذا هزینه زودکرد به سیستم تحمیل می‌شود. به عبارت دیگر اگر یک کار بعد از موعد تحویل تمام شود، یک جریمه دیرکرد ناشی از نارضایتی مشتری، جریمه قراردادی یا از دست دادن اعتبار ایجاد می‌شود. جریمه های زودکرد به آن دلیل مورد توجه است که تا زمانیکه موعد تحویل مشتری فرا برسد، هزینه‌های نگهداری شامل هزینه فساد مواد (در حالتیکه کالاها فاسد شدنی هستند) به سیستم تحمیل می‌شود. هزینه‌های دیرکرد ممکن است به تخفیفهایی که به مشتری به دلیل دیرکرد داده می‌شود مربوط باشد [۲]. بدین لحاظ سیستمهای تولیدی که به موجب آن ماشینها تعدادی محصولات مختلف را پردازش می‌کنند و نیاز به زمان آماده سازی بین محصولات دارند، بسیار در صنایع تولیدی متداول است.

مطالب این مقاله به صورت زیر بررسی شده است: پس از مرور ادبیات در فصل اول، در فصل دوم به شرح جزئیات مساله و ارائه مدل می پردازیم و حل یک مثال با اندازه کوچک با استفاده از نرم افزار لینگو ۶ ارائه شده است. در فصل سوم جزئیات الگوریتم ژنتیک به کار گرفته شده و عملگرهای به کار رفته شرح داده شده است و تعدادی از مسائل حل شده با اندازه های متفاوت توسط الگوریتم ژنتیک ارائه شده است . همچنین نتایج به دست آمده مسائل با استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده در حالتی که شرایط مشابه بررسی کاو و همکاران [۳] باشد، به همان نتایج آنها دست می یابد و ضمنا با شرایط مضاعفی که در این مقاله در نظر گرفته شده است نیز نتایج حائز اهمیتی به دست آمده است. در فصل چهارم نتیجه گیری و پیشنهاداتی برای تحقیقات آتی ارائه شده است.

کاو و همکاران [۳] مساله انتخاب و زمانبندی همزمان ماشینهای موازی را در نظر گرفته‌اند که هزینه نگهداری و هزینه دیرکرد کارها را حداقل می‌کند. یک الگوریتم فراابتکاری بر اساس جستجوی ممنوع[4] (TS) برای ایجاد راه حلهای بهینه یا نزدیک به بهینه ایجاد کرده‌اند که قادر است حلهای بهینه یا نزدیک به بهینه برای مسائل با اندازه بزرگتر پیدا کند. لیکن جریمه‌های زودکرد و دیرکرد و زمانهای آماده‌سازی در نظر گرفته

[1] Quick Response
[2] Group Technology
[3] Total Quality Management
[4] Tabu Search

نشده است. بیلج و همکاران [۴]مسأله‌ای از توالی یک مجموعه کارهای مستقل با زمانهای آماده‌سازی وابسته به توالی روی یک مجموعه از ماشینهای موازی یکنواخت که کل دیرکرد حداقل شده است، در نظر می‌گیرند. کارها زمانهای ورود و موعدهای تحویل غیرمشابه دارند آنها برای حل مساله‌ای که کارها زمانهای ورود و موعدهای تحویل غیرمشابه دارند از الگوریتم جستجوی ممنوع استفاده کرده‌اند. لیاو و همکاران [۵] زمانبندی ماشینهای موازی نامرتبط با هدف حداقل کل دیرکرد وزنی را بررسی کرده‌اند. آنها با توسعه الگوریتم ازیزوگلا و گیرکا [۳] از مجموع زمان دیرکرد وزنی به جای زمان شناوری وزنی استفاده کرده‌اند و یک الگوریتم شاخه و کران برای حل مسأله ایجاد کرده‌اند. لیکن حل این مسأله از طریق الگوریتم شاخه و کران به‌طور محاسباتی به دلیل ماهیت چند جمله‌ای سخت آن غیر ممکن می باشد. آنها مسأله زمانبندی کارها روی ماشینهای مشابه موازی به‌منظور حداقل کردن کل دیرکرد درنظر گرفته‌اند. این مسأله مرتبط با زمانبندی n کار با زمانهای پردازش $P_1,P_2,\ldots,Pn$ روی m ماشین مشابه موازی می باشد و فرض می شود کلیه کارها در زمان صفر آماده برای پردازش بوده و هیچ انقطاع یا تجزیه کار مجاز نمی‌باشد .

کیپاریسیس و کولامس [۷] مسأله زمانبندی ماشینهای موازی یکنواخت را با هدف حداقل کردن حداکثر دیرکرد درنظر گرفته‌اند. در این مساله فرض شده کارها در زمان صفر آماده بوده و ماشینهای موازی، یکنواخت و انقطاع مجاز نمی‌باشد. آنها از روش توسعه قاعده زودترین موعد تحویل[1] (EDD) برای حل مساله استفاده کرده‌اند. زنگ و زینگ [۸] مساله توالی ماشینهای موازی با هدف حداقل هزینه کل ، تحت این فرضیه که هر بخشي از یك كار مي‌تواند روي دو ماشین مختلف در همان زمان پردازش شود که آن را مساله توالي ماشینهاي موازي با کارهاي قابل شکست[2] مي‌نامند ، حل نموده اند . بالکریشنن و همکاران [۲] مساله زمانبندی با هدف حداقل کردن هزینه‌های زودکرد و دیکرد بر روی ماشینهای موازی یکنواخت با سرعتهای متفاوت و زمانها آماده سازی وابسته به توالی در نظر گرفته اند. این مساله با استفاده از رویکرد تجزیه[3] برای مسائل با اندازه بزرگتر حل شده است. یولوسوی و سریفگلو [۹] مساله زمانبندی ماشینهای موازی با هدف حداقل کردن جریمه‌های زودکرد و دیرکرد را بررسی کرده‌اند. در این مساله زمان آماده‌سازی، زمان رسیدن کارها و موعد تحویل به صورت مجزا در نظر گرفته شده است. آنها از یک رویکرد الگوریتم ژنتیک به منظور حل مساله استفاده کرده‌اند.

فرضیات ارایه شده در این مقاله به شرح زیر می باشد: بسط مسئله زمان بندی ارائه شده توسط کاو و همکاران [۳] می‌باشد که معیار زودکرد نیز در تابع هدف منظور شده است و همچنین وزن تخصیص یافته به معیارهای زود کرد و دیر کرد با یکدیگر متفاوت و برای هر یک از کارها مجزا می‌باشد . ماشینهای موازی نا مرتبط در نظر گرفته شده است که با در نظر گرفتن ماشینهای موازی با سرعتهای غیر یکسان، زمانهای پردازش و آماده‌سازی برای ماشینها متفاوت است. به علاوه زمانهای آماده‌سازی وابسته به توالی در نظر گرفته شده است که مساله را به واقعیت نزدیکتر می‌گرداند. هر کار فقط روی یک ماشین پردازش می‌شود و در هر زمان هر ماشین تنها یک کار را پردازش می‌نماید. در اینجا مساله انتخاب و زمانبندی ماشینهای موازی به صورت همزمان در نظر گرفته شده است. هدف حداقل کردن هزینه نگهداری ماشین و نیز حداقل کردن جریمه‌های زودکرد و دیرکرد است. مساله حداقل کردن زودکرد و دیرکرد در شرایط برابر بودن جریمه‌ها، چند جمله‌ای سخت است. بنابراین در

[1] Earliest Due Date
[2] Split
[3] Bender's Decomposition

حالتی که جریمه‌ها نابرابر در نظر گرفته شده است نیز چند جمله‌ای سخت می‌باشد [۱۰]. یک مدل خطی برنامه‌ریزی خطی ترکیبی برای این مساله ارائه شده است. با استفاده از رویکرد الگوریتم ژنتیک مدل مزبور حل شده و نتایج حل ارائه شده است.

۲. شرح مساله و ارائه مدل

در ابتدا به معرفی نمادهای و متغیرها به کار رفته در مدل مورد نظر می‌پردازیم:

$i , j =$ اندیس کارها و کار موهومی 0 همواره در مکان اول روی یک ماشین قرار می گیرد $(i ,j =0, 1, \ldots, N)$

$k =$ اندیس ماشین $(k =1,\ldots,K)$

$C_i =$ زمان تکمیل کار i

$E_i =$ مقدار زودکرد کار i

$T_i =$ مقدار دیرکرد کار i

$d_i =$ موعد تحویل کار i

$P_{ik} =$ زمان پردازش کار i روی ماشین k $(i=1,\ldots, N \quad k=1,\ldots, K)$

$S_{ik} =$ زمان آماده سازی کار i روی ماشین j

$$x_{ijk}= \begin{cases} 1 & \text{اگر کار } j \text{ بلافاصله بعد از کار } i \text{ روی ماشین } k \text{ برود} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

$$y_{jk}= \begin{cases} 1 & \text{اگر کار } j \text{ به ماشین } k \text{ تخصیص یابد} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

$$z_k= \begin{cases} 1 & \text{اگر ماشین } k \text{ انتخاب گردد} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases}$$

با استفاده از نمادهای ارائه شده، مدل ترکیبی برای انتخاب و زمانبندی ماشینهای موازی به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^{K} \beta_k z_k + \sum_{i=1}^{N} (e_i E_i + t_i T_i) \qquad (1)$$

s.t.:

$$C_i + E_i - T_i = d_i \qquad i=1,\ldots, N \qquad (2)$$

$$\sum_{\substack{i=0\\ i\neq j}}^{N}\sum_{k=1}^{K} x_{ijk} = 1 \qquad j=1,\dots,N \qquad (3)$$

$$\sum_{\substack{i=0\\ i\neq j}}^{N} x_{ijk} = y_{jk} \qquad j=1,\dots,N \ , \ k=1,\dots,K \qquad (4)$$

$$\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{N} x_{ijk} \le y_{ik} \qquad j=1,\dots,N \ , \ k=1,\dots,K \qquad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{K} y_{ik} = 1 \qquad i=1,\dots,N \qquad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{N} x_{0jk} \le z_k \qquad k=1,\dots,K \qquad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{N} x_{0jk} > z_k - 1 \qquad k=1,\dots,K \qquad (8)$$

$$C_j - C_i + L(1-x_{ijk}) \ge P_{jk} + S_{jk} \qquad i=1,\dots,N \quad j=1,\dots,N \ , \ i\neq j \qquad (9)$$

$$C_i \ge S_{ik} \times y_{ik} + P_{ik} \times y_{ik} \qquad i=1,\dots,N \quad k=1,\dots,K \qquad (10)$$

$$Y_{ik} \ , X_{ijk} \ , z_k = 0 \ , 1 \qquad i=1,\dots,N \quad j=1,\dots,N \quad k=1,\dots,K \ , \ i\neq j \qquad (11)$$

$$C_i \ , E_i \ , T_i \ge 0 \qquad i=1,\dots,N \qquad (12)$$

عبارت (۱) تابع هدف مساله است که مجموع هزینه‌های نگهداری ماشینها، زودکرد و دیرکرد را حداقل می‌سازد. معادله (۲) محدودیت مرتبط با زمان تکمیل و زودکرد و دیرکرد می‌باشد. معادله (۳) تضمین می‌کند که هر کار تنها در یک مکان و روی یک ماشین پردازش گردد. معادله (۴) بیان می کند که اگر کار j به ماشین k تخصیص یافته باشد باید بلافاصله بعد از یکی از کارها آمده باشد (که می‌تواند بعد از کار صفر آمده باشد). عبارت (۵) به این معنی است که اگر کار i به ماشین k تخصیص یابد حداکثر یک کار می تواند بلافاصله بعد از آن بیاید. معادله (۶) ملزم می کند که هر کار تنها به یک ماشین تخصیص یابد (بریدگی مجاز نمی‌باشد). محدودیت (۷) تضمین می کند که اگر یک ماشین انتخاب نشود هیچ کاری روی آن نرود و محدودیت (۸) ملزم می‌سازد که اگر یک ماشین انتخاب شود حداقل یک کار باید به آن ماشین تخصیص یابد. محدودیت (۹) بیان می‌کند که زمان تکمیل هر کاری که بلافاصله بعد از یک کار بیاید بزرگتر و یا مساوی زمان تکمیل کار ما قبل و زمانهای پردازش و آماده‌سازی آن کار روی ماشین می‌باشد. محدودیت (۱۰) زمان تکمیل هر کار را بزرگتر یا مساوی زمانهای پردازش و آماده‌سازی کار روی ماشین قرار می‌دهد. با استفاده از داده های بدست آمده از بالکریشنن و همکاران [۲] یک مثال با اندازه کوچک با استفاده از نرم افزار لینگو ۶ حل شده است.

ضریب ماشین اول=۱ ضریب ماشین دوم=۰/۸

جدول۱- مثال حل شده با استفاده از نرم افزار لینگو ۶

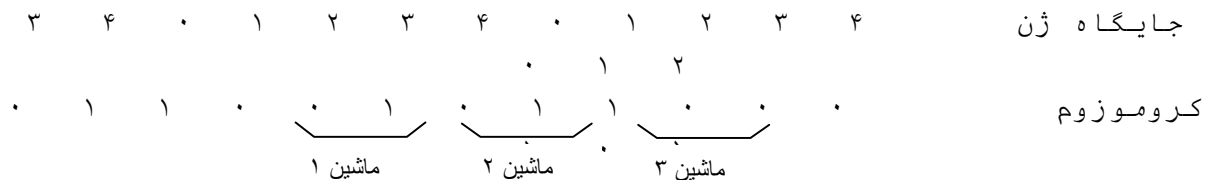
توالي	مقدار تابع هدف	تعداد ماشینها	تعداد کارها
M1: 1 - 4 M2: 2 -3	۹۳	۲	۴

۳. شرح رویکرد الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک بوسیله هولند [۱۱] از سال ۱۹۷۵ به عنوان سیستمهای انطباق مصنوعی برای شبیه‌سازی تحولات طبیعی ایجاد شده است. به دلیل کارایی و اثر بخشی در جستجوی فضاهای پیچیده به شدت برای مسائل چند جمله ای سخت به کار برده می‌شود.

در این مقاله با توجه به ماهیت پیچیده مساله، این رویکرد مدنظر قرار گرفته است. مسئله ارائه شده در این مقاله بسط مسئله زمانبندی ماشینهای موازی با هدف حداقل کل هزینه انتخاب ماشین ، زود کرد و دیر کرد وزنی می‌باشد. مسئله زمانبندی ماشینهای موازی با هدف حداقل کردن کل دیرکرد به تنهایی و یا کل زودکرد به تنهایی چند جمله ای سخت می‌باشد [۱۲]. با در نظر گرفتن معیارهای زودکرد و دیرکرد، تخصیص وزنهای نابرابر به هر یک معیارها و نیز وزنهای نابرابر به ازای هر یک از کارها و از طرف دیگر در نظرگرفتن زمانهای آماده‌سازی وابسته به توالی و وجود ماشینهای نامرتبط، مسئله به شدت پیچیده می‌شود. در این مساله با توجه به آنکه انتخاب ماشین نیز بصورت همزمان در تابع هدف در نظرگرفته شده است، پیچیدگی مسئله شدیدتر می‌شود.

استفاده از الگوریتمهای جستجوی ابتکاری امکان حل مسائل با ابعاد بزرگتر و زمان حل کمتر را فراهم می‌سازد. الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتمهای ابتکاری موفق برای جستجوی حلهای بهینه و نزدیک به بهینه برای مسائل با اندازه‌های مختلف و با زمان حل معقول به شمار می‌رود [۹]. در این مقاله از این رویکرد جهت حل مدل ارائه شده، استفاده شده است. در ابتدا کروموزوم بصورت یک رشته از ارقام صفر و یک تعریف می‌شود که اگر ژن برابر با یک باشد یعنی کار مورد نظر به ماشین مورد نظر تخصیص یافته است و اگر برابر با صفر باشد یعنی کار مورد نظر به آن ماشین تخصیص نیافته است. جایگاه هر ژن نشان دهنده شماره کار می‌باشد طول کروموزوم برابر با حاصلضرب تعداد ماشینها در تعداد کارها است و n ژن اول نشان دهنده وضعیت ماشین اول ،n ژن دوم نشان دهنده وضعیت ماشین دوم و به همین ترتیب تا آخر پیش می‌رود. وضعیت هر ماشین نشان می‌دهد که کارهایی به آن ماشین تخصیص یافته است و نیز توالی کارها به چه صورت است. در حالتیکه ۳ ماشین و ۴ کار داشته باشیم، کروموزوم به صورت شکل ۱ تعریف می‌شود که به جای ۱۲ ژن، ۱۵ ژن در نظر گرفته می‌شود که برای هر ماشین یک جایگاه صفر در نظر گرفته می‌شود و یک کار صفر به هر ماشین تخصیص می‌یابد که جهت سهولت ارائه الگوریتم می‌باشد. .همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود ، ژنهای تخصیص یافته به ماشین ۱ به ترتیب ۰، ۱، ۰ و ۱ می‌باشد و ژنهایی که برابر با ۱ می‌باشد، نمایانگر آن است که کارهای ۲ و ۴ به ماشین یک به ترتیب تخصیص یافته است. به همین ترتیب کار ۳ به ماشین ۲ و کار ۱ به ماشین ۳ تخصیص یافته است. نحوه ایجاد کروموزوم اولیه به صورت تصادفی می‌باشد که ارقام صفر و یک به صورت تصادفی ایجاد می‌شود و نحوه ایجاد ارقام باید به صورتی باشد که هر کار فقط و فقط به یک ماشین تخصیص یابد.

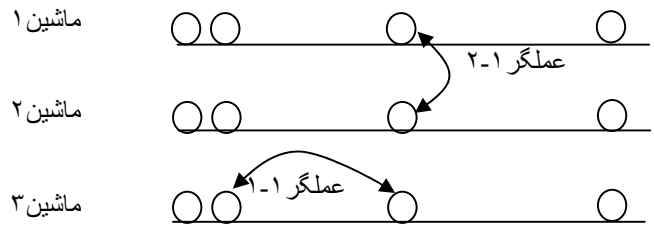


شکل ۱- تعریف کروموزوم

عملگرهایی که در این مقاله به کار رفته است به صورت زیر تعریف می‌شوند.

الف) عملگرهای جهش

- عملگر جهش کارها (۱-۱) : ابتدا یک ماشین به تصادف انتخاب و سپس دو کار به تصادف انتخاب می‌شود و جایگاه آن دو روی ماشین تعویض می‌شود. در پایان رشته به دست آمده کنترل می‌شود که هر کار تنها به یک ماشین تخصیص یافته باشد و در غیر اینصورت رشته اصلاح می‌شود (شکل ۲).
- عملگر جهش ماشینها (۱-۲) : ابتدا یک کار به تصادف انتخاب و سپس دو ماشین به تصادف انتخاب می‌شود و کار انتخاب شده بر روی دو ماشین جابه جا می‌شود. در نهایت کنترل رشته صورت می‌گیرد (شکل ۲).



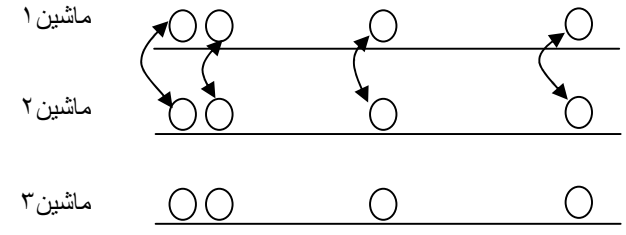
شکل ۲- نمایش عملگرهای

ب) عملگرهای تقاطع

- عملگر تقاطع ساده : عدد تصادفی r بین [1 , N*M+M] تولید می‌شود که همان طول کروموزوم است و ارقام صفر و یک از ابتدای کروموزوم تا r روی دو کروموزوم جا به جا می شود و سپس رشته‌ها کنترل می‌شود.
- عملگر تقاطع جزئی(PMX)[1] : دوعدد تصادفی بین [1 , N*M+M] تولید می‌شود که در صورت متفاوت بودن این دو عدد، ارقام صفر و یک دو کروموزوم در بین این دو عدد با یکدیگر جابه جا می‌شود و در پایان رشته کنترل می‌شود.

ج) عملگرهای جدید

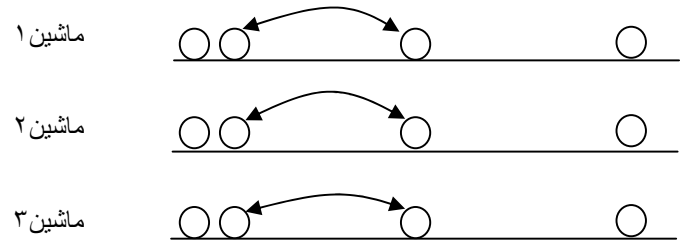
- دو ماشین به تصادف انتخاب می‌شود و کلیه ژنهای یک ماشین با ماشین دیگر معاوضه می‌شود (شکل ۳).



شکل ۳- نمایش عملگر جدید

- دو کار به تصادف انتخاب می شود ختلف هستند با کلیه ژنهای مربوط بـه کار دیگر تعویض می‌گردند (شکل ۴).

[1] Partially Crossover Method



شکل ۴- نمایش عملگر جدید

الگوریتم با استفاده از کامپیوتر پنتیوم ۴ با قدرت پردازشگر ۲/۴ توسط زبان Visual Basic 6 نوشته شده است. ابتدا با استفاده از داده‌های بدست آمده از [۳]، مسائل نمونه حل شده است (جدول ۲) که در واقع ساده شده مدل ما می‌باشد و جوابهای بهینه به دست آمده است. مدلی که در این بررسی ارائه شده است، دارای زمانهای آماده‌سازی وابسته به توالی و نیز جریمه های زودکرد نیز می‌باشد که قبل از این کاری در این زمینه انجام نشده است، به همین دلیل زمانهای آماده‌سازی وابسته به توالی از توزیع یکنواخت [۲ و ۰] و جریمه‌های زودکرد از توزیع یکنواخت [۳ و ۰] تولید شده است. مسائل جدول (۳) با فرض وجود زمانهای آماده‌سازی و نیز جریمه‌های زودکرد در مدت زمان خوبی حل شده است. جداول ۳ و ۴ حل مسائل بزرگتر با و بدون زمانهای آماده سازی و جریمه های زودکرد را نشان می‌دهد.

برای به کار گیری عملگرها، در هر تکرار یک عدد تصادفی تولید شده است که عملگر مورد استفاده را مشخص می‌کند. در جدول (۵) محاسبات یک مساله با احتمال مختلف استفاده از عملگرها ارائه شده است و تعداد تکرارهای لازم تا رسیدن به جواب بهینه مشخص شده است. داده‌های به دست آمده از جدول نشانگر آن است که احتمال کمتر استفاده از عملگرهای جهش (شکل ۴) و احتمال بیشتر برای عملگرهای تقاطع و نیز عملگر جدید (شکهای ۳ و ۴) تعداد تکرارهای کمتری برای رسیدن به حل بهینه نیاز دارد و نیز عملگر جدید پیشنهاد شده نیز با احتمال بالاتر در تکرارهای کمتری به جواب بهینه می رسد. استفاده از عملگرهای مختلف در تکرارهای مختلف مساله را از گرفتاری در یک نقطه غیر بهینه رها می‌سازد. عملگرهای جدید در چنین شرایطی بسیار خوب عمل می‌کنند.

جدول۲- حل مسائل نمونه در مطالعه [۳]

تعداد تکرار لازم	مقدار تابع هدف	توالی ماشینها	تعداد ماشینها	تعداد کارها
۵	۴۱	M2:1 - 2	۲	۲
۸	۸۱	M1: 1-2-3-4	۲	۴
۱۵	۱۰۴/۵	M2: 4 – 5 M3: 1-2-3-6	۳	۶

جدول۳- حل مسائل بزرگتر بدون زمانهای آماده سازی و جریمه های زودکرد

تعداد تکرار لازم	مقدار تابع هدف	تعداد ماشینها	تعداد کارها
۲۲	۴۱۱/۷	۴	۲۰
۲۴	۴۴۳/۵	۴	۲۵
۲۰	۴۰۳	۶	۲۵
۲۶	۴۲۹	۶	۳۰
۳۰	۴۴۷/۵	۸	۳۰
۳۸	۴۷۵	۸	۴۰

جدول ۴- حل مسائل با اندازه‌های بزرگتر با فرض وجود زمانهای آماده‌سازی و جریمه‌های زودکرد

تعداد تکرار لازم	مقدار تابع هدف	تعداد ماشینها	تعداد کارها
۲۵	۴۳۲/۵	۴	۲۰
۳۰	۴۵۴	۴	۲۵
۲۷	۴۵۹	۶	۲۵
۳۵	۴۸۵/۵	۶	۳۰
۴۰	۵۱۲	۸	۳۰
۴۸	۵۶۴	۸	۴۰

جدول ۵- مقایسه احتمال استفاده از عملگرها برای یک مساله

تعداد تکرار لازم	مقدار تابع هدف	احتمال استفاده از عملگرهای جهشی و تقاطعی و جدید	تعداد ماشینها	تعداد کارها
۲۵	۴۳۲/۵	۰/۵ و ۰/۳ و ۰/۲	۴	۲۰
۲۴	۴۳۲/۵	۰/۶ و ۰/۳ و ۰/۲	۴	۲۰
۲۶	۴۳۲/۵	۰/۳ و ۰/۵ و ۰/۲	۴	۲۰
۳۰	۴۳۲/۵	۰/۲ و ۰/۳ و ۰/۵	۴	۲۰
۲۸	۴۳۲/۵	۰/۴ و ۰/۲ و ۰/۴	۴	۲۰
۲۸	۴۳۲/۵	۰/۴ و ۰/۳ و ۰/۳	۴	۲۰
۲۷	۴۳۲/۵	۰/۳ و ۰/۲ و ۰/۵	۴	۲۰
۳۱	۴۳۲/۵	۰/۲ و ۰/۲ و ۰/۶	۴	۲۰
۳۳	۴۳۲/۵	۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۷	۴	۲۰
۳۰	۴۳۲/۵	۰/۲ و ۰/۱ و ۰/۷	۴	۲۰

۴. نتیجه گیری

در این بررسی مدل توام انتخاب ماشین و توالی کارها روی ماشینها ارائه شده است. در این مدل زمانهای آماده‌سازی وابسته به توالی و نیز جریمه‌های زودکرد و دیرکرد نابرابر برای کارها در نظر گرفته شده است و ماشینها نیز مستقل و متفاوت در نظر گرفته شده است. با ارائه یک رویکرد الگوریتم ژنتیک به همراه دو عملگر جدید، این مدل حل شده است. مدل با توجه به پیچیدگیهای زیاد در زمان بسیار کوتاه توسط الگوریتم حل می‌شود و نتایج به کار گیری این الگوریتم برای حل مسائلی که قبلا توسط افراد دیگر حل شده است و ساده شده مساله می‌باشد، نشانگر آن است که الگوریتم به خوبی عمل می‌کند و عملگرهای جدید ارائه شده توانایی الگوریتم را افزایش می‌دهد و الگوریتم با تکرارهای کمتری به جوابهای بهینه یا نزدیک به بهینه می‌رسد. با توجه به اینکه مدل ارائه شده بسیار جامع می‌باشد، الگوریتم ارائه شده قابل به کارگیری برای مسائل تک ماشینه و نیز مسائل مشابه می‌باشد و از آن جهت که در محیطهای تولید به موقع با جریمه‌های زودکرد و دیرکرد مواجه هستیم، می‌تواند کارآمد باشد. بررسی مسائلی مانند در نظر گرفتن توابع جریمه به جای جریمه‌های قطعی، توابع هزینه برای انتخاب ماشینها و نیز در نظر گرفتن مدلهای مونتاژ برای تحقیقات آتی می‌تواند حائز اهمیت باشد،

منابع و مراجع

[1] Yi, Y. and Wang, D.W., Soft computing for scheduling with batch setup times and earliness-tardiness penalties on parallel machines, Journal of Intelligent Manufacturing, 14 (3-4), 2003, 311-322.
[2] Balakrishnan, N., Kanet, J.J. and Sridharan, K., Early/tardy scheduling with sequence dependent setups on uniform parallel machines, Computers & Operations Research, 26, 1999, 127-141.
[3] Cao, D., Chen, M. and Wan, G., Parallel machine selection and job scheduling to minimize machine cost and job tardiness , Computers & Operations Research, 32 (8), 2005, 1995-2012.
[4] Bilge, U., Kıraç, F., Kurtulan, M. and Pekgün, P., A tabu search algorithm for parallel machine total tardiness problem, Computers & Operations Research, 31 (3), 2004, 397-414.
[5] Liaw, C., Lin, Y., Cheng, C. and Chen, M., Scheduling unrelated parallel machines to minimize total weighted tardiness, Computers & Operations Research, 30 (12), 2003, 1777-1789.
[6] Azizoglu, M. and Kirca, O., Tardiness minimization on parallel machines, International Journal of Production Economics, 55 (2), 1998, 163-168.
[7] Koulamas, C., and Kyparisis, J.G., Scheduling on uniform parallel machines to minimize maximum lateness, Operations Research Letters, 26 (4), 2000, 175-179.
[8] Xing, W. and Zhang, J., Parallel machine scheduling with splitting jobs, Discrete Applied Mathematics, 103, 2000, 259-269.
[9] Sivrikaya-Serifoğlu, F. and Ulusoy, G., Parallel machine scheduling with earliness and tardiness penalties, Computers & Operations Research, 26 (8), 1999, 773-787.
[10] Hall, N, Posner, M., Earliness-tardiness scheduling problems: Weighted deviation of completion times about a common due date. Operations Research, 5, 1991, 836–46.
[11] Holland, J.H., Adaptation in natural and artificial systems, 2nd ed. Cambridge MA: The MIT Press, 1992.
[12] Pinedo, M., Scheduling: Theory, algorithms, and systems, Prentice Hall, 1995
[13] Allahverdi, A., Gupta, J.N.D. and Aldowaisan, T., A review of scheduling research involving setup considerations, Omega, Int. J. Mgmt Sci., 27, 1999, 219-239.
[14] Koulamas, CP., The total tardiness problem: review and extensions. Operations Research, 42, 1994, 1025-1041.
[15] Mosheiov, G. and Oron, D., A note on the SPT heuristic for solving scheduling problems with generalized due dates, Computers & Operations Research, 31, 2004, 645–655.
[16] Sule, D.R., Industrial scheduling, PWS Publishing Company, 1997.