

مدلسازی و حل زمانبندی سیستم تولید کارگاهی در شرایط عدم انتظار سفارشات جهت کمینه سازی حداکثر زمان تکمیل: رویکرد تجزیه توالی سفارشات و جدول‌بندی زمانی

هادی مختاری^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۰۳	<p>شرط عدم انتظار در مسأله‌ی زمانبندی تولید کارگاهی، حالت خاصی از مسأله‌ی عمومی زمانبندی سیستم تولید کارگاهی است که در آن هیچ زمان انتظاری بین فرآیندها و هیچ انقطاعی در حین فرآیندهای کارها، مجاز نمی‌باشد. عبارت دیگر، از زمانی که اولین فرآیند هر کار شروع شود، تا زمان تکمیل آن کار، هیچ توقفی وجود ندارد. در ادبیات مسائل زمانبندی، این مسأله به عنوان یک مسأله‌ی قویاً NP-hard معروف شده است. لذا ارایه راه‌حل برای این مسأله به عنوان یک زمینه تحقیقاتی در ادبیات مسایل زمانبندی مورد توجه قرار دارد. رویکردهایی که جهت حل این مسأله ارائه شده است عموماً مسأله‌ی اصلی را به دو زیرمسأله‌ی تعیین توالی کارها و جدول‌بندی زمانی تجزیه می‌کنند. در این تحقیق، ما پس از بررسی و تحلیل رویکردهای مبتنی بر الگوریتم ژنتیک جهت حل این مسأله، به ارائه‌ی یک روش جدید می‌پردازیم. بعد از معرفی مسأله‌ی اصلی و رویکردهای حل آن، به بررسی و تحلیل رویکردهای حل آن پرداخته و نقاط ضعف و قوت آن‌ها را ارزیابی می‌نمائیم. در نهایت بر اساس پیشنهاداتی که جهت بهبود کیفیت جواب‌های حاصل از رویکردهای حل ارائه خواهد شد، یک الگوریتم ژنتیک با کارایی نسبی بالا پیشنهاد می‌شود. در نهایت مقایسات انجام شده با رویکردهای متداول ادبیات بر روی مسایل نمونه، کارایی رویکرد پیشنهادی را مورد بررسی و تحلیل قرار می‌دهد.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۱۸	
واژگان کلیدی:	
زمانبندی، عدم انتظار، بهینه‌سازی، رویکرد تجزیه، الگوریتم‌های فراابتکاری.	

۱- مقدمه

باید یک مسیر خاص و از پیش تعیین شده‌ای را از میان ماشین‌ها طی نماید. علاوه بر این یک ماتریس $n \times m$ که بیانگر زمان فرآیندهای کارهاست، به عنوان ورودی به مسأله داده شده است. به منظور برقراری محدودیت عدم انتظار در این مسأله، به محض اینکه اولین فرآیند هر کار شروع شد، باید کلیه‌ی فرآیندهای آن بدون هیچ انتظاری بین ماشین‌ها و هیچ انقطاعی حین فرآیندها، به اتمام برسد. در واقع مسأله‌ی زمانبندی سیستم تولید کارگاهی در حالت عدم انتظار، حالت خاصی از مسأله‌ی زمانبندی سیستم تولید

مسأله‌ی زمانبندی سیستم تولید کارگاهی در حالت عدم انتظار^۲ یک مسأله‌ی زمانبندی را معرفی می‌نماید که در آن یک محدودیت جدید به مسأله‌ی عمومی زمانبندی سیستم تولید کارگاهی اضافه شده است. این محدودیت جدید بیان می‌نماید که هیچ کدام از کارها نمی‌توانند هیچ زمان انتظاری را تحمل کنند مگر روی ماشین اول. یک مجموعه از n کار (J_1, J_2, \dots, J_n) و m ماشین (M_1, M_2, \dots, M_m) داده شده است، به نحوی که هر کار

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Mokhtari_ie@kashanu.ac.ir

۱. مدیر گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی، دانشگاه سراسری کاشان

۲ No-wait Jobs Shop

جزء مسائل سخت بهینه‌سازی محسوب می‌شود. ادبیات مربوط به این مسأله قابل تقسیم به دو حیطه می‌باشد: (۱) پیچیدگی محاسباتی مسأله (۲) رویکردهای حل مسأله. بر اساس اطلاعات نویسنده‌ی این تحقیق، فقط تعداد محدودی تحقیق، مرتبط با روش‌های حل برای این مسأله ارائه شده است. در مورد روش‌های دقیق حل، تنها یک الگوریتم شاخه و کران در ادبیات توسعه داده شده است [۲]. علاوه بر این چندین روش فراابتکاری مانند گذارش شبیه‌سازی شده [۳]، جستجوی ممنوعه [۴]، جستجوی همسایگی متغیر^۲ [۵]، الگوریتم ژنتیک [۶]، جستجوی محلی [۷]، ترکیب الگوریتم ژنتیک و گذارش شبیه‌سازی شده [۸] و همچنین الگوریتم ژنتیک ترکیبی [۹] برای این مسأله پیشنهاد شده است. مختاری و همکارانش [۱۰-۱۱] به بررسی مسأله عدم انتظار با در نظر گرفتن برنامه ریزی ظرفیت تولید و با مدل‌سازی یکپارچه پرداختند.

۲- مدل ریاضی و رویکردهای حل مسأله

همان‌طوری که مطرح شد، مسأله‌ی مطروحه در این تحقیق، در ادبیات مسائل زمان‌بندی کاملاً مشخص بوده و به همین دلیل بعضاً مقالاتی که در این زمینه ارائه می‌شوند، حتی مدل ریاضی آن را هم مطرح نمی‌کنند (بدلیل مشخص بودن در ادبیات). مدل ریاضی‌ای که از این مسأله قابل ارائه است، بسته به نوع تعریف متغیرها قابل فرمولبندی است. در این تحقیق نیز جهت معرفی مسأله، ابتدا پارامترها را تعریف نموده و سپس مدل‌بندی آن را ارائه می‌دهیم.

پارامترهای مسأله:

n	تعداد کارها
m	تعداد ماشین‌ها
J_i	کار شماره‌ی i ام
M_k	ماشین شماره‌ی k ام
n_i	تعداد فرآیندهای J_i
O_{ij}	زمان فرآیند کار J_i
p_{ij}	زمان فرآیند O_{ij}

کارگاهی عمومی است که در آن هیچ زمان انتظار و انقطاعی برای کارها مجاز نمی‌باشد. بعبارت دیگر تفاوت بین زمان تکمیل همه‌ی کارها و زمان شروع آن‌ها باید دقیقاً برابر با مجموع زمان کلیه‌ی فرآیندهای آن باشد. هدف از مسأله پیشنهادی بررسی و مدلسازی مسأله زمانبندی سفارشات دریافتی یک تولیدکننده در محیط تولید کارگاهی با در نظر گرفتن شرایط عدم انتظار است. همان‌طوریکه اشاره شد در این حالت مدلسازی بایستی به نحوی صورت گیرد که هیچگونه تاخیری در پردازش عملیات مختلف یک سفارش چه در بین مراحل تولید (ماشینها) و چه در حین پردازش صورت نگیرد. عدم انتظار در بین مراحل تولید با محدودیت‌های مدل قابل اعمال است و در مورد عدم انتظار در حین پردازش که تحت عنوان عدم انقطاع (Preemption) معروف است نیاز به فرض جدیدی نیست و در حالت پایه مدل‌های زمانبندی در این حالت مدل‌سازی می‌شوند. چنین محدودیتی معمولاً به دو دلیل زیر رخ می‌دهد:

- (۱) ویژگی‌ها و نیازمندی‌های طبیعی تکنولوژی مورد استفاده برای انجام فرآیندها، مانند زمانبندی در تولید فولاد، صنایع شیمیایی و پتروشیمی و سیستم‌های تولید و نگهداری غذا که در آن‌ها هرگونه زمان انتظاری می‌تواند به کارآیی و کیفیت فرآیند تولید صدمه وارد نماید.
- (۲) عدم وجود فضای لازم جهت ذخیره‌سازی مواد (موجودی) در جریان ساخت مانند زمانبندی در محیط‌های پیشرفته تولیدی که از سیاست‌های تولید بهنگام استفاده می‌شود.

در ادبیات مسائل زمانبندی، عموماً مسأله‌ی زمانبندی سیستم تولید کارگاهی در حالت عدم انتظار با تابع هدف C_{max} در نظر گرفته شده است و همچنین نشان داده شده است که این مسأله حتی با دو ماشین، یک مسأله‌ی قویاً NP-hard می‌باشد. هال و اسریسکانداراجا [۱] ادبیات مسائل در حالت عدم انتظار را مرور کرده و همچنین نشان دادند که مسأله‌ی فوق مخصوصاً برای ابعاد بزرگ مسأله،

² Variable Neighborhood Search (VNS)

¹ Just in Time (JIT)

زمانبندی سیستم تولید کارگاهی در حالت عدم انتظار تولید می‌شوند.

(۲) مسأله‌ی تعیین جدول زمانی^۲ که در آن مجموعه‌ای شدنی از زمان‌های شروع عملیات بر اساس توالی کارهایی که در مسأله‌ی توالی کارها ایجاد شد، تولید می‌شود. نکته‌ی حائز اهمیت در این زیر مسأله این است که، از آنجائیکه محدودیت عدم انتظار همه‌ی کارها را محدود می‌کند به اینکه یک موجودیت یکپارچه روی تمام فرآیندهای خود باشند، لذا زمان شروع کلیه‌ی فرآیندهای هر کار از روی زمان شروع عمل اول آن کار قابل محاسبه است. بنابراین در مسأله‌ی جدول‌بندی زمانی، فقط کافی است که زمان شروع کارها (زمان شروع اولین فرآیند کارها) به عنوان خروجی محاسبه شوند.

قابل استنباط است که مجموعه‌ی دو زیرمسأله‌ی فوق، می‌توانند یک جواب شدنی برای مسأله‌ی اصلی تشکیل دهند. بطوریکه زیرمسأله‌ی اول توالی کارها را تعیین نموده و دومین زیرمسأله زمان شروع هر کار را محاسبه می‌نماید. ما در این تحقیق به بررسی و تحلیل نقاط ضعف و قوت رویکردهایی که در ادبیات بر اساس الگوریتم ژنتیک به حل مسأله‌ی حاضر می‌پردازند، خواهیم پرداخت. بر اساس نگرش جامعی که به مسأله پیدا می‌کنیم سعی می‌نمائیم زمینه‌هایی را جهت تحقیقات آتی در راستای بهبود مسأله‌ی فوق‌الذکر در دو حیطة‌ی مدل‌بندی و روش‌های حل ارائه دهیم. همچنین با بکارگیری نقاط قوت و رفع نقاط ضعف این دو رویکرد، روش حل جدیدی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه خواهیم داد.

۳- الگوریتم ژنتیک برای مسأله‌ی زمانبندی

سیستم تولید کارگاهی در حالت عدم انتظار

الگوریتم ژنتیک که نخستین بار بر اساس نظریه‌ی داروین ارائه شد یکی از روش‌های جستجوی تصادفی است که بطور

E_{ij} جفت فرآیندهای کار J_i و J_j که باید روی ماشین‌های یکسان انجام شوند

P_{ij} زمان تجمعی فرآیندهای کار J_i شامل فرآیند J_j $(\sum_{k=1}^j p_{ik})$

M یک عدد مثبت بزرگ

متغیر تصمیم:

t_{ij} زمان شروع O_{ij}

مدل ریاضی مسأله با توجه به پارامترهای تعریف شده و به منظور کمینه کردن C_{max} بصورت زیر فرمول‌بندی می‌شود.

$$\begin{aligned} & \min C_{max} \\ \text{s.t. } & t_{ij} + p_{ij} = t_{i(j+1)} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, \\ & j = 1, 2, \dots, n_i - 1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & t_{ik} - t_{jl} \geq p_{jl} - M \times Z_{ikjl} \\ & t_{jl} - t_{ik} \geq p_{ik} - M \times (1 - Z_{ikjl}) \\ & j < i \quad \text{for all } (l, k) \in E_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & t_{in_i} + p_{in_i} \leq C_{max} \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \\ & C_{max} \geq 0 \quad t_{ij} \geq 0 \quad Z_{ikjl} = 0, 1 \end{aligned} \quad (3)$$

بطوریکه در آن تابع هدف، کمینه کردن زمان تکمیل کل کارها است. مجموعه‌ی محدودیت‌های (۱) تضمین می‌نماید که کلیه‌ی کارها بدون هیچ زمان انتظاری از شروع تا تکمیل پیش بروند. محدودیت‌های (۲) از ایجاد تداخل بین فرآیندهای جفت کارهایی که می‌بایست روی یک ماشین صورت گیرند، جلوگیری می‌نماید. همچنین مجموعه‌ی محدودیت‌های (۳) کارها را محدود می‌نمایند به اینکه زمان تکمیل آن‌ها از C_{max} تجاوز ننمایند.

در بین رویکردهای حلی که برای مسأله‌ی مطروحه در این تحقیق ارائه شده‌اند، موفق‌ترین آن‌ها روش‌هایی بوده‌اند که مسأله‌ی اصلی را به دو زیرمسأله تقسیم نموده‌اند.

(۱) مسأله‌ی تعیین توالی کارها که در آن مجموعه-

ای از توالی کارها با داشتن یک مسأله‌ی

² Timetabling

¹ Sequencing

تشکیل نسل بعدی

(۵) توقف الگوریتم بعد از اینکه شرط خاصی محقق

شد

در بخش بعدی به ارزیابی دو رویکرد، با استفاده از ۵ قدم

اصلی بالا می‌پردازیم.

۳-۱- رویکرد حل بریزوئلا و همکارانش

تمرکز اصلی الگوریتم ژنتیک که توسط بریزوئلا و همکارانش [۶] ارائه شد بر نحوه‌ی کد کردن جواب‌های مسأله و همچنین تکنیک رمزگشایی^۳ استوار می‌باشد. در این تحقیق جواب‌های مسأله‌ی عدم انتظار بصورت یک ترتیبی از کارها کد شده است. به عبارت دیگر، در این نوع کدبندی، هر کاری که جلوتر قرار دارد، زودتر زمانبندی می‌شود. ایده‌ی دوم در این مقاله مربوط به نحوه‌ی رمزگشایی جواب‌ها یعنی تعیین زمان شروع کارها می‌باشد. به این منظور در این مقاله، یک الگوریتم رمزگشایی ارائه شده است که اساس آن بر تعریف بازه‌های زمانی بیکاری ماشین‌ها و پیدا کردن بهترین زمان انجام کارها بر اساس بازه‌های زمانی تعریف شده است، به نحوی که محدودیت عدم انتظار برای هیچ کاری نقض نشود. این الگوریتم در هر مرحله به ترتیب کارها را انتخاب نموده (از روی توالی‌ای که الگوریتم ایجاد می‌نماید) و با توجه به بازه‌های بیکاری ماشین‌ها سعی می‌نماید کارها را در زودترین زمان ممکن برنامه‌ریزی نماید. بعد از اینکه هر کار تخصیص داده شد، بازه‌های بیکاری ماشین‌ها بروز شده و کار بعدی در توالی انتخاب می‌شود. این رویه تا زمانی ادامه خواهد داشت که زمان شروع همه‌ی کارها تعیین شده باشد.

۳-۲- تحلیل رویکرد بریزوئلا و همکارانش: نقاط

ضعف و قوت

جهت تحلیل بیشتر رویکرد ارائه شده، از چارچوبی که در بخش قبل برای حالت عمومی الگوریتم ژنتیک ارائه شد، استفاده می‌کنیم. برای قدم اول که نوع کد کردن جواب را

گسترده جهت حل مسائل پیچیده‌ی بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم به عنوان یک روش فراابتکاری از فرآیند زاد و ولد در طبیعت الهام گرفته شده است. نوعاً در این روش یک جمعیت تصادفی اولیه تولید شده و عملگرهای احتمالی به عنوان پایه‌های فرآیند تکامل، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طریق دو عملگر جابجایی^۱ و جهش^۲، الگوریتم جواب‌های تولید شده را به سمت جواب بهینه هدایت می‌نماید. اما اینکه بتوان فرآیندی را تعریف کرد تا الگوریتم به چنین جوابی همگرا شود، جزء یکی از موضوعات مهم در طراحی این الگوریتم‌ها محسوب می‌شود. همچنین در یک الگوریتم ژنتیک، یک بخش مهم، ارزیابی جواب‌های تولید شده از طریق تابع برازش است. جواب‌های با مقادیر برازش بهتر، از احتمال بالاتری برای تولید نسل برخوردار می‌باشند.

در سال‌های اخیر الگوریتم ژنتیک بطور مؤثری جهت حل مسائل زمانبندی مورد استفاده قرار گرفته است. از این رو در این تحقیق، ما به بررسی مقایسه‌ای و تحلیلی دو رویکردی که بر اساس این الگوریتم برای حل مسأله‌ی زمانبندی سیستم تولید کارگاهی در حالت عدم انتظار ارائه شده‌اند، می‌پردازیم. قبل از ارزیابی دو روش، ابتدا با ارائه‌ی قدم‌های اصلی‌ای که در هر الگوریتم ژنتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد، سعی می‌کنیم یک چارچوب کلی جهت ارزیابی دو مقاله ارائه دهیم. این چارچوب که در زیر ارائه می‌شود، مبنای تحلیل و مقایسه‌ی دو مقاله خواهد بود:

(۱) کد کردن جواب (ارائه‌ی روشی جهت نمایش

جواب‌های مسأله)

(۲) تنظیم مناسب پارامترهای الگوریتم (اندازه‌ی

جمعیت، تعداد نسل‌ها، نرخ جابجایی و جهش و

غیره)

(۳) ارائه‌ی روشی جهت تولید جواب‌های اولیه و

انتخاب والدین

(۴) اعمال عملگرهای جابجایی و جهش (و غیره) و

³ Decoding

¹ Crossover

² Mutation

تأثیرات بسزایی در کیفیت تولید نسل‌های بعدی خواهد داشت.

در مقاله‌ی مورد بررسی، عملگر ODX جهت جابجایی مورد استفاده قرار گرفته است. این عملگر قسمتی از فرزند را از طریق انتخاب تصادفی یک زیررشته از والد اول و بقیه‌ی آن را از طریق والد دوم تعیین می‌نماید. الگوریتم این عملگر در متن مقاله آورده شده و همچنین در ادبیات الگوریتم ژنتیک قابل مطالعه است. برای عملگر جهش نیز در این مقاله، از یک جهش ساده‌ی تصادفی که جای دو عنصر از جواب را به تصادف جابجا می‌کند، استفاده شده است. در مورد نحوه‌ی تشکیل نسل بعدی مطرح شده است که به محض اینکه عملگرها روی والدین اعمال می‌شوند، از بین والدین و فرزندان متولد شده، دو تا از بهترین‌ها به نسل بعدی منتقل می‌شوند. این رویکرد جهت تشکیل نسل بعدی، در ظاهر شامل بهترین جوابهاست، اما در ادبیات الگوریتم ژنتیک مطرح شده است که این روش در انتخاب، میزان تنوع جواب‌ها را کاهش می‌دهد و ممکن است که الگوریتم در بهینه‌ی محلی گرفتار شود، چرا که ممکن است فرزندان بدتر از والدین بوده و دائماً همان والدین به نسل بعد منتقل شوند و الگوریتم با همان جواب‌های اولیه خاتمه یابد.

در قدم پنجم چارچوب کلی، شرط خاتمه مطرح شده است. در این مقاله تعداد مشخصی از تکرار (تعداد نسل‌ها) به عنوان شرط خاتمه‌ی الگوریتم در نظر گرفته شده است.

۳-۳- رویکرد حل پن و هانگ

ایده‌ی اصلی در این مقاله، ارائه‌ی یک الگوریتم ژنتیک ترکیبی^۱ با استفاده از بکارگیری یک عملگر جدید در کنار دو عملگر جابجایی و جهش است. این عملگر جدید از طریق جدا نمودن بخشی از جواب و برخورد با آن بخش به عنوان یک زیر مسأله از مسأله‌ی اصلی، عمل می‌نماید. بعد از این جداسازی، زیرمسأله‌ی بدست آمده به یک مسأله‌ی فروشنده‌ی دوره‌گرد غیرممتقارن تبدیل شده و با استفاده از

مطرح می‌کند، همانطوریکه مطرح شد، این مقاله از توالی کارها جهت نمایش جواب‌ها استفاده می‌نماید. قدم دوم مطرح می‌نماید که پارامترهای الگوریتم می‌بایست تنظیم شوند تا بیشترین کارایی را جهت همگرایی به جواب بهینه در یک دوره‌ی زمانی کوتاه‌تر ایجاد نماید. از این منظر، این مقاله هیچ نوع تحلیل را در این زمینه ارائه نمی‌نماید که از جمله نقاط ضعف آن محسوب می‌شود. قدم سوم نوع تولید جواب‌های اولیه را بیان می‌کند. بطوریکه مفصلاً در ادبیات مطرح شده است، کیفیت جواب‌های اولیه تأثیر خیلی زیادی بر دقت جواب‌های نهایی که توسط الگوریتم حاصل می‌شود، دارد. حساسیت الگوریتم‌های فراابتکاری به جواب‌های اولیه یکی از مباحثی است که در ادبیات بسیار مورد تأکید قرار گرفته است. بطور کلی دو روش زیر جهت تولید جواب‌های اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرند:

(۱) تولید تصادفی جواب‌ها

(۲) استفاده از الگوریتم‌های ابتکاری

در مقایسه با الگوریتم‌های ابتکاری، روش تولید تصادفی نه تنها به زمان بیشتری برای رسیدن به جواب بهینه نیاز دارد، بلکه در روش تصادفی، احتمال رسیدن به جواب بهینه هم کاهش می‌یابد. با اطلاع به اهمیت این موضوع، روشی که جهت تولید جواب‌های ابتدائی الگوریتم در مقاله‌ی آقای بریزوئلا و همکارانش [۶] ارائه شده است، روش تولید تصادفی است که یک رویکرد در مقابل رویکرد الگوریتم ابتکاری محسوب می‌شود. از طرف دیگر، قانداً اگر ما بهترین والدین از لحاظ کیفیت جواب‌ها را جهت عمل تولید مثل انتخاب نمائیم، به جواب‌های با کیفیت بهتری خواهیم رسید. با این وجود، در این مقاله از روش انتخاب تصادفی برای والدین استفاده کرده است که جزء نقاط ضعف آن محسوب می‌شود. قدم چهارم، عملگرهای جابجایی و جهش را مطرح می‌نماید. دامنه‌ی وسیعی از عملگرها، جهت این دو نوع عملیات در ادبیات مسائل زمانبندی مطرح شده است. از آنجائی که تولید نسل از والدین از طریق اعمال این عملگرها صورت می‌گیرد، لذا مسلماً نحوه‌ی تعریف آن‌ها

^۱ Hybrid Genetic Algorithm (hGA)

در مقایسه با والدین، بهترین فرزند متولد شده به نسل بعد منتقل می‌شود. گاهی اوقات فرزندان متولد شده بدتر از والدین هستند، حتی در این حالت هم جهت جلوگیری از همگرایی زودرس و گرفتاری در بهیمنگی محلی، فرزندان به نسل بعد منتقل می‌شوند. این مکانیزم به امکان رسیدن به جوابهای بهتر در تکرارهای آتی از طریق جوابهای اولیه ولو بدتر در تکرارهای اولیه توجه نموده و لذا عملکرد الگوریتم را در مقایسه با رویکردهای سنتی بهبود می بخشد. در این روش، همانند رویکرد قبلی، تعداد مشخصی از نسل‌ها، به عنوان شرط توقف الگوریتم در نظر گرفته شده است.

۳-۵- مقایسه‌ی دو رویکرد

همانطوریکه در بخش‌های تحلیل دو رویکرد مطرح کردیم، به منظور ارزیابی این دو الگوریتم که جهت حل مسأله‌ی زمانبندی سیستم تولید کارگاهی در حالت عدم توقف مطرح شده‌اند، از یک چارچوب کلی که الگوریتم‌های ژنتیک بر اساس آن ارائه می‌شوند، استفاده نمودیم. در این راستا و با استفاده از این چارچوب به مقایسه‌ی دو رویکرد در جدول ۱ می پردازیم.

همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، دو رویکرد در ۷ پارامتر از ۹ پارامتر تشکیل دهنده‌ی الگوریتم ژنتیک، مشابه هم هستند. در واقع الگوریتم پن و هانگ [۹] به عنوان بهبودی بر الگوریتم بریزونلا و همکارانش [۶] ارائه شده است. کما اینکه نویسندگان این مقاله هم بر این مطلب در بخش‌های مختلف مقاله‌ی خود صحه می‌گذارند. مقایسه‌ی این دو مقاله از لحاظ کیفیت جواب‌ها، این مسأله را تأیید می‌نماید. نویسندگان مقاله‌ی دوم، در بخش انتهایی مقاله، به بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی خود با الگوریتم قبلی می‌پردازند. در این بخش مجموعه‌ای از مثال‌های معروف در ادبیات با ابعاد بزرگ و کوچک بکار گرفته شده است و دو الگوریتم (GA و hGA) برای این مثال‌ها اجرا شده‌اند. نتایج حاصله نشان می‌دهد که hGA [۹] و GA [۶] برای مثال‌های کوچک ($n \leq 10$) عملکرد مشابهی دارند، ولی برای مثال‌های بزرگ hGA تقریباً به اندازه‌ی ۳-۲ درصد

یک الگوریتم ابتکاری حل می‌شود. عمده‌ی ایده‌ی جدید پیشنهاد شده در این تحقیق، بکارگیری مسأله‌ی فروشنده-ی دوره گرد برای حل مسأله‌ی زمانبندی سیستم تولید کارگاهی در حالت عدم انتظار نیست، چرا که این روش قبلاً در ادبیات به تفصیل برای حل این مسأله پیشنهاد شده بود [۱۲]. بلکه تمرکز اصلی در این مقاله، بکارگیری روش فروشنده‌ی دوره گرد برای یک زیر مسأله از مسأله‌ی اصلی به عنوان یک عملگر جدید برای الگوریتم ژنتیک است. لذا ما در این تحقیق، به تحلیل تبدیل مسأله اصلی به مسأله‌ی فروشنده‌ی دوره گرد نمی‌پردازیم. بلکه به نتایج آن در مقایسه با رویکرد آقای بریزونلا و همکارانش [۶] می‌پردازیم.

۳-۴- تحلیل رویکرد پن و هانگ: نقاط ضعف و قوت

در این رویکرد نیز، همانند رویکرد قبلی از توالی کارها، جهت نمایش جواب‌ها استفاده شده است. همچنین نویسندگان مقاله مطرح کرده‌اند که بدلیل عدم وجود الگوریتم ابتکاری جهت مسأله‌ی اصلی در ادبیات، از روش تولید تصادفی، برای جواب‌های اولیه استفاده کرده‌اند. رویکردی که در مقاله‌ی قبلی هم بکار گرفته شد.

در این مقاله هم، هیچ روشی جهت تنظیم مناسب پارامترهای الگوریتم، ارائه نشده و مقادیر پارامترها بصورت دستی تنظیم شده است. نویسندگان مقاله مطرح کرده‌اند که از آنجائیکه بریزونلا و همکارانش [۶] نتایج خوبی از بکارگیری ODX بعنوان عملگر جایجایی گزارش کرده‌اند، لذا آنها نیز در کار خود از این نوع جایجایی استفاده کرده‌اند. همچنین از رویکرد توسعه داده شده توسط بریزونلا و همکارانش [۶] برای رمزگشایی جواب‌ها در این تحقیق استفاده شده است. مشابه مقاله قبلی، انتخاب تصادفی والدین جهت تولید مثل در این مقاله پیشنهاد شده است. اما در مورد نحوه‌ی تشکیل نسل بعدی (انتخاب برای نسل بعدی از میان والدین و فرزندان) در این تحقیق از استراتژی elite یا elitist استفاده شده است. در این استراتژی، جهت حفظ تنوع جواب‌ها، بدون در نظر گرفتن کیفیت فرزندان

این استراتژی جهت انتخاب والدین در الگوریتم جدید استفاده می‌شود.

(۴) علاوه بر پیشنهادات فوق که در مقام مقایسه‌ی دو الگوریتم مطرح کردیم، می‌توان پیشنهاد سازنده‌ی دیگری را هم که می‌تواند تأثیرات عمیق‌تری بر جواب‌ها داشته باشد، برای هر دو مقاله ارائه داد. همانطوریکه در بخش توصیف مسأله مطرح شد، بطور کلی روش‌های حل مسأله‌ی زمانبندی سیستم تولید کارگاهی در حالت عدم انتظار، به دو زیرمسأله‌ی تعیین توالی کارها و جدول‌بندی زمانی قابل تقسیم هستند. همانطوریکه مطرح شد، دو رویکرد GA و hGA از توالی کارها برای نمایش جواب‌ها استفاده می‌کردند و بعد از تولید جواب‌ها از یک الگوریتم رمزگشایی، زمان شروع کارها را از روی توالی کارها استخراج می‌کردند. بنابراین می‌توان بدنه‌ی اصلی الگوریتم ژنتیک را همان زیرمسأله‌ی تعیین توالی کارها و الگوریتم رمزگشایی را زیر مسأله‌ی جدول‌بندی زمانی تعبیر کرد. همانطوریکه قبلاً مطرح شد، کیفیت جواب‌های بدست آمده برای مسأله، به کیفیت روش‌های بکارگرفته شده برای هر دو زیرمسأله برمی‌گردد. لذا یکی از پیشنهادات تأثیرگذار در بهبود عملکرد این دو الگوریتم، بکارگیری الگوریتم‌های معروف جدول‌بندی مانند جدول‌بندی ارتقاء یافته^۲ [۱۳] و جدول‌بندی بودن تأخیر^۳ [۱۴] که در ادبیات مسائل عدم انتظار مطرح هستند، بجای الگوریتم رمزگشایی و یا حتی توسعه‌ی روشی با دقت بیشتر برای تعیین جدول زمانی است. در این تحقیق، ما از پرکاربردترین این الگوریتم‌ها که همان جدول‌بندی بدون تأخیر است، بجای الگوریتم ساده‌ی رمز گشایی، استفاده می‌نمائیم.

بهتر از GA عمل می‌کند. همچنین یک تحلیل همگرایی نیز نشان می‌دهد که الگوریتم hGA در یک دوره‌ی زمانی کوتاه‌تری نسبت به الگوریتم GA به جواب همگرا می‌شود.

۳-۶- روش حل پیشنهادی بر اساس نقط قوت و ضعف دو رویکرد پیشین

در این بخش، یک رویکرد جدید مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه می‌دهیم که بر اساس نقاط ضعف و قوت دو رویکرد ارائه شده در ادبیات، سعی در بهبود آن‌ها دارد. ویژگی‌های روش پیشنهادی در مقایسه با دو روش قبلی بصورت زیر قابل دسته‌بندی است.

(۱) همان‌طوری که قبلاً ذکر شد، یکی از مسائل مهم که نقشی اساسی در بهبود عملکرد روش‌های فراابتکاری ایفا می‌کند، تنظیم مناسب پارامترهاست. موضوعی که هیچ کدام از دو رویکرد به آن نپرداخته‌اند. در رویکرد پیشنهادی ما، از طریق بکارگیری یک تکنیک طراحی آزمایشات یعنی^۱ RSM، مقدار مناسب پارامترها تعیین می‌شود، بجای اینکه پارامترها بصورت دستی تنظیم شوند.

(۲) در هر دو روش، انتخاب والدین بصورت تصادفی است. بدیهی است که انتخاب والدین با کیفیت بالاتر، نقش مهمی در بهبود جواب‌ها و همگرایی زودتر الگوریتم خواهد داشت. لذا پیشنهاد می‌شود از روش‌های مبتنی بر مقدار برازش مانند سیاست انتخاب چرخ رولت، جهت انتخاب والدین استفاده شود.

(۳) بنظر می‌رسد سیایت elite که توسط رویکرد hGA جهت تشکیل نسل‌های بعدی بکار گرفته شد، نسبت به استراتژی انتخاب بهترین جواب از بین فرزندان و والدین که در GA ارائه شد، منجر به جواب با کیفیت بهتر و جلوگیری از همگرایی زودرس و عدم بهینگی محلی خواهد شد. لذا از

³ Non-delay Timetabling

¹ Response Surface Methodology

² Enhanced Timetabling

جدول ۱- بررسی مقایسه‌ای دو رویکرد الگوریتم ژنتیک

رویکرد	رویکرد بریزونلا و همکارانش	رویکرد بن و هانگ
نوع نمایش جواب (Coding)	توالی کارها (Job Permutation)	توالی کارها (Job Permutation)
تنظیم پارامترها (Parameter tuning)	عدم ارائه‌ی روشی جهت تنظیم پارامترها	عدم ارائه‌ی روشی جهت تنظیم پارامترها
تولید جواب‌های اولیه (Initial solution)	تصادفی	تصادفی
انتخاب والدین (Parent selection)	تصادفی	تصادفی
عملگر جابجایی	ODX	ODX
عملگر جهش	جابجایی تصادفی ساده	جابجایی تصادفی ساده
سایر عملگرها	-	عملگر ترکیبی
تشکیل نسل بعدی (انتخاب جواب‌های تولید شده)	انتخاب بهترین جواب از بین والدین و فرزندان	استراتژی elite
توقف الگوریتم	حداکثر تکرار	حداکثر تکرار

۴- اعتبارسنجی مدل

در این قسمت به ارزیابی عملکرد رویکرد پیشنهادی جهت اعتبارسنجی رویکرد پیشنهادی می‌پردازیم. به این منظور از یک روش سیستماتیک، جهت ایجاد مثال‌های استاندارد در ابعاد کوچک و بزرگ استفاده می‌نمائیم.

جدول ۲- فاکتورها و گزینه‌هایی ممکن جهت تولید مسائل استاندارد

ردیف	فاکتور	گزینه‌های ممکن
۱	تعداد کارها (n)	$n=\{10,20\}$
۲	تعداد ماشین‌ها (m)	$m=\{5,10\}$
۳	ماتریس زمان پردازش کارها	تصادفی
۴	تعداد فرآیندهای کارها (n_i)	$m \leq$ تصادفی

۴-۱- تولید مسائل استاندارد

همان‌طوری که مطرح شد، به منظور ارزیابی رویکرد پیشنهادی برای مسأله‌ی زمانبندی سیستم تولید کارگاهی در حالت عدم انتظار، کلاس‌های متفاوتی از مسائل در این بخش تولید می‌شود. داده‌های مورد نیاز برای تشکیل مثال-هایی از این مسأله در قالب فاکتورها و گزینه‌های ممکن در هر کدام از آن‌ها، بصورت جدول ۲ قابل دسته‌بندی هستند. فاکتورها و گزینه‌های ممکن در هر کدام از آن‌ها، بصورت جدول ۲ قابل دسته‌بندی هستند.

به منظور تولید مثال‌های استاندارد از مسأله‌ی زمانبندی سیستم تولید کارگاهی در حالت عدم انتظار، فقط کافی است که به تعداد مثال‌های مورد نیاز، مراحل جدول ۲ را اجرا نمائیم.

جدول ۳- نتایج مقایسه روش‌ها

مسأله	ابعاد مسأله		شاخه و حد (C_{max})	روش پیشنهادی		دقت	
	m	n		بهترین C_{max}	متوسط C_{max}	مقدار	درصد
۱	۵	۱۰	۶۴	۸۷,۲۲	۶۹	۵	۰,۰۷۸۱۳
۲	۵	۱۰	۷۲	۸۴,۹۸	۷۲	۰	۰
۳	۱۰	۱۰	۱۲۴	۱۴۹,۵۰	۱۳۵	۱۱	۰,۰۸۸۷۱
۴	۱۰	۱۰	۱۴۳	۱۶۷,۴۱	۱۴۹	۶	۰,۰۴۱۹۶
۵	۵	۲۰	۱۹۱	۲۴۰,۹۰	۲۰۴	۱۳	۰,۰۶۸۰۶
۶	۵	۲۰	۱۶۸	۲۱۶,۸۴	۱۷۹	۱۱	۰,۰۶۵۴۸
۷	۱۰	۲۰	۲۹۵	۳۵۰,۰۱	۳۰۹	۱۴	۰,۰۴۷۴۶
۸	۱۰	۲۰	۲۴۳	۲۷۳,۳۵	۲۵۴	۱۱	۰,۰۴۵۲۷
۹	۱۰	۲۰	۳۱۸	۳۴۶,۵۰	۳۳۰	۱۲	۰,۰۳۷۷۴
۱۰	۱۰	۲۰	۳۰۷	۳۲۱,۶۲	۳۲۱	۱۴	۰,۰۴۵۶
متوسط			۱۹۲,۵	۲۲۳,۸۳۳	۲۰۲,۲	۹,۷	۰,۰۵۱۸۴

۴-۲- نتایج ارزیابی مقایسه‌ای

به منظور ارزیابی جواب‌های بدست آمده از الگوریتم تکاملی پیشنهادی، جواب‌های حاصل از نرم افزار بهینه‌سازی LINGO 8.0 مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حقیقت LINGO قادر به حل مسائل بهینه‌سازی غیرخطی شامل متغیرهای صحیح و پیوسته^۱ با استفاده از الگوریتم شاخه و حد^۲ است. به منظور تولید مسائل استاندارد، با استفاده از رویه‌ی توصیف شده در بخش قبل به تعداد ۵ مثال با ابعاد کوچک ($n = 40$) و ۵ مثال با ابعاد بزرگ ($n = 80$) تولید می‌شود. از طرف دیگر، به دلیل ماهیت تصادفی رویکرد تکاملی پیشنهادی، جواب‌های بدست آمده در چندین تکرار برای یک مثال خاص، یکسان نمی‌باشد. به همین دلیل، برای هر مثال، ۳۰ بار الگوریتم پیشنهادی اجرا شده و نتایج حاصل ثبت شده‌اند. نتایج حاصل از مقایسه در جدول ۳ آمده است.

همان‌طوری که در جدول ۳ نمایش داده شده است، تفاوت در کارایی رویکرد پیشنهادی در مقایسه با روش شاخه و

حد برای ۱۰ مثال تولید شده در ابعاد گوناگون، بطور متوسط ۵,۱۸ درصد است. این مقدار کم نشان‌دهنده‌ی دقت مناسب روش پیشنهادی بوده و قابلیت اطمینان خوب آن را در مقایسه با روش‌های دیگر نمایش می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مسأله‌ی زمانبندی سیستم تولید کارگاهی در حالت عدم انتظار مورد بررسی قرار گرفت. بعد از تعریف مسأله و مدل‌بندی ریاضی آن، به بیان ساختار رویکردهای موفق جهت حل آن پرداختیم. اکثر روش‌های حل که برای این مسأله ارائه شده‌اند، از دو زیر مسأله‌ی تعیین توالی کارها و جدول‌بندی زمانی تشکیل شده‌اند. همچنین مطرح شد که به منظور رسیدن به جواب‌های با کیفیت مطلوب، توجه به هر دو زیرمسأله و ارائه‌ی الگوریتم‌های کارا برای هر دو لازم است. در این راستا، ما در این تحقیق به بررسی رویکردهای ارائه شده مبتنی بر الگوریتم ژنتیک جهت حل این مسأله پرداختیم. بعد از ارائه‌ی اجمالی ایده‌های اصلی مقالات، به تحلیل و ارزیابی آن‌ها پرداخته و سپس آن‌ها را

² Branch and Bound

¹ Mixed Integer Programming

می‌توان به امکان بکارگیری رویکردهای فراابتکاری دیگر که توانایی فرار از بهینه محلی و جلوگیری از همگرایی زودرس را با مکانیزم‌هایی دارند اشاره کرد تا با مقایسه دقیقتر به ارزیابی عملکرد رویکردهای حل پرداخت. همچنین مدل ریاضی در شرایط عدم انتظار در محیط‌های پیشرفته‌تر تولیدی همچون Open Shop و Flow Shop نیز قابل بحث و بررسی است.

با هم مقایسه نمودیم. نقاط ضعف و قوت این رویکردها به همراه پیشنهاداتی جهت بهبود آن‌ها به عنوان مبنایی جهت ارائه‌ی یک الگوریتم ژنتیک بر اساس روش‌های قبلی قرار گرفت. روش پیشنهادی ما با استفاده از مثال‌هایی که بصورت سیستماتیک تولید شدند، مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج شبیه‌سازی، کارکرد مناسب آن را در مقایسه با روش شاخه و حد نمایش می‌دهد. به عنوان پیشنهادات آتی

۶- مراجع

- [1] Hall, N. G., and Sriskandarajah, C. (1996), "A Survey of Machine Scheduling Problems with Blocking and no-wait in Process", *Operations Research*, Vol. 44, pp. 510-525.
- [2] Mascis, A., and Pacciarelli, D., (2002), "Job-Shop Scheduling with Blocking and no-Wait Constraints", *European Journal of Operational Research*, Vol. 143, pp. 498-517.
- [3] Raaymakers, W. H. M., and Hoogeveen, J. A. (2000), "Scheduling multipurpose batch process industries with no-wait restrictions by simulated annealing", *European Journal of Operational Research*, Vol. 126, pp. 131-151.
- [4] Macchiaroli, R., Mole, S., Riemma, S., and Trifilietti, L., (1996), "Design and Implementation of a Tabu Search Algorithm to Solve the no-Wait Job-Shop Scheduling Problem". In *Proceeding of the CESA'96*, Lille.
- [5] Schuster, C., and Framinan, J.M., (2003), "Approximative Procedures for no-Wait Job Shop Scheduling", *Operations Research Letters*, Vol. 31, pp. 308-18.
- [6] Brizuela, C. A., Zhao, Y., and Sannomia, N., (2001), "No-Wait and Blocking Job-Shops: Challenging Problems for GA's", In *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, Tucson, Arizona, USA.
- [7] Zhu, J., Li, X., and Wang, Q., (2009), "Complete Local Search with Limited Memory Algorithm for no-Wait Job Shops to Minimize Makespan", *European Journal of Operational Research*, Vol. 198, pp. 378-386.
- [8] Wang, L., and Zheng, D., (2001), "An Effective Hybrid Optimization Strategy for Job-Shop Scheduling Problems", *Computers & Operations Research*, Vol. 28, pp. 585-96.
- [9] Pan, J. C.-H., and Huang H.-C., (2009), "A Hybrid Genetic Algorithm for no-Wait Job Shop Scheduling Problems", *Expert Systems with Applications*, Vol. 36, pp. 5800-5806.
- [10] Mokhtari, H., Abadi, INK and Zegordi, SH., (2011), "Production capacity planning and scheduling in a no-wait environment with controllable processing times: An integrated modeling approach", *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, pp. 12630-12642.
- [۱۱] مختاری، هادی، نخعی کمال آبادی، عیسی و امین ناصری محمدرضا، (۱۳۹۲)، "مدلسازی و حل تحلیلی مسأله برنامه ریزی ظرفیت و زمانبندی تولید یکپارچه: استخراج کران پائین و طراحی یک الگوریتم شاخه و کران کارا"، *مجله علمی-پژوهشی مهندسی صنایع و مدیریت تولید*، دوره ۲۴، شماره ۲، صفحه ۱۳۹-۱۱۸.
- [12] Goyal, S. K., (1975), "Job-Shop Sequencing Problem with no Wait in Process", *International Journal of Production Research*, Vol. 13, pp. 197-206, 197.
- [13] Framinan, J.M., and Schuster, C., (2006), "An Enhanced Timetabling Procedure for the no-Wait Job Shop Problem: A Complete Local Search Approach", *Computers & Operations Research*, Vol. 331, pp. 1200-1213.
- [14] Schuster, C., (2006), "No-Wait Job Shop Scheduling: Tabu Search and Complexity of Subproblems", *Mathematical Methods of Operations Research*, Vol. 63, pp. 473-491.