برنامه‌ریزی تولید خطوط مونتاژ چندمدله خودرو به کمک الگوریتم ابتکاری Tabu-SA

فرهادکلاهان[1]، علی‌رفیعی‌ثانی[2]

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

1- kolahan@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، مسئله چندهدفه برنامه‌ریزی تولید (Multiple Objective Scheduling Problem (MOSP)) یک خط مونتاژ چندمدله (Mixed Model Assembly Line (MMAL)) به همراه روش حل آن ارائه شده است. برای این منظور سه هدف مهم: الف) کمینه‌کردن مجموع جریمه عدول از تولید به موقع سفارشات، ب) کمینه‌کردن کل زمان توقف ریل حامل (Conveyor) ؛ با احتساب زمانهای آماده‌سازی ایستگاهها و ج) کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های تغذیه خارج از برنامه ایستگاههای کاری، درنظرگرفته شده است. تمامی این هزینه‌ها وزن‌دهی شده‌اند تا اهمیت نسبی پروسه‌های کاری لحاظ گردند. ساختار مسئله طرح شده بگونه‌ای است که حل سریع آن، با روشهای استاندارد حل مدلهای برنامه‌ریزی خطی مقدور نیست. بنابراین از الگوریتم ترکیبی جستجوگر Tabu-SA که تلفیقی[3] از دو جستجوگر Tabu Search (TS) و Simulated Annealing (SA) می‌باشد، برای حل این مسئله استفاده شده است. بمنظور نشان‌دادن عملکرد جستجوگر پیشنهادی، دو مثال عددی ارائه شده است. نتایج محاسباتی نشان‌دهنده سرعت بالای این جستجوگر تلفیقی و برتری کیفیت جوابهای آن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، برنامه‌ریزی تولید چندهدفه، خطوط مونتاژ انعطاف‌پذیر، Tabu-SA .

۱- مقدمه

خطوط مونتاژ چندمدله(MMAL)، خطوطی هستندکه در آنها تنوعی از مدلهای محصول که خصوصیات تولید مشابهی دارند، با تیراژ کم و تنوع زیاد مونتاژ می‌شوند. از بارزترین نمونه‌های چنین سیستمهای تولیدی، خطوط مونتاژ چندمدله صنعت خودرو را میتوان نام برد که در آنها مدلهای متفاوت خودرو با زیرساختارهای[4] مشترک ولی اجزاء مختلف (نوع موتور، گیربکس و ...) مونتاژ می‌شوند.

۱- استادیار

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد

3- Hybrid

4- Platform

برنامه‌ریزی تولید خطوط مونتاژ چندمدله خودرو به کمک الگوریتم ابتکاری Tabu-SA

فرهادکلاهان [1] **، علی‌رفیعی‌ثانی** [2]

گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

E-mail: kolahan@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، مسئله چندهدفه برنامه‌ریزی تولید (Multiple Objective Scheduling Problem (MOSP)) یک خط مونتاژ چندمدله (Mixed Model Assembly Line (MMAL)) به همراه روش حل آن ارائه شده است. برای این منظور سه هدف مهم: الف) کمینه‌کردن مجموع جریمه عدول از تولید به موقع سفارشات، ب) کمینه‌کردن کل زمان توقف ریل حامل (conveyor) ؛ با احتساب زمانهای آماده‌سازی ایستگاهها و ج) کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های تغذیه خارج از برنامه ایستگاههای کاری، درنظرگرفته شده است. تمامی این هزینه‌ها وزن‌دهی شده‌اند تا اهمیت نسبی پروسه‌های کاری لحاظ گردند. ساختار مسئله طرح شده بگونه‌ای است که حل سریع آن، با روشهای استاندارد حلِ مدلهای برنامه‌ریزی خطی مقدور نیست. بنابراین از الگوریتم ترکیبی جستجوگر Tabu-SA که تلفیقی [3] از دو جستجوگر Tabu Search (TS) و Simulated Annealing (SA) می‌باشد، برای حل این مسئله استفاده شده است. بمنظور نشان‌دادن عملکرد جستجوگر پیشنهادی، دو مثال عددی ارائه شده است. نتایج محاسباتی نشان‌دهنده سرعت بالای این جستجوگر تلفیقی و برتری کیفیت جوابهای آن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی- برنامه‌ریزی تولید چندهدفه- خطوط مونتاژ انعطاف‌پذیر- Tabu-SA .

1- مقدمه

خطوط مونتاژ چندمدله(MMAL)، خطوطی هستندکه در آنها تنوعی از مدلهای محصول‌که خصوصیات تولید مشابهی دارند، با تیراژ کم و تنوع زیاد مونتاژ می‌شوند. از بارزترین نمونه‌های چنین سیستمهای تولیدی، خطوط مونتاژ چندمدله صنعت

1- استادیار

2- دانشجوی کارشناسی ارشد

3 - hybrid

خودرو را میتوان نام برد که در آنها مدلهای متفاوت خودرو با زیرساختارهای[1] مشترک ولی اجزاء مختلف (نوع موتور، گیربکس و ...) مونتاژ می‌شوند.

امروزه تنوع‌طلبی مصرف‌کنندگان و امکان ارائه انتخابهای گوناگون در محصولاتی همچون خودرو، باعث گردیده تا مدیران اینگونه صنایع استراتژیهای تولید و مونتاژ براساس سفارش[2] را در پیش بگیرند و به سمت اجرای تفکر تولید ناب پیش روند. با این تفکر، خطوط تولید و مونتاژ این محصولات برای حجم تولید کم از هر مدل و تنوع زیاد آنها طراحی و ساخته می‌شوند.

خطوط تولید چندمدله یا انعطاف‌پذیر معمولاً از تکنولوژی بالاتری نسبت به خطوط تولید انبوه برخوردار بوده که این خود مستلزم سرمایه‌گذاری نسبتاً زیاد است. بنابراین بمنظور کاهش هزینه‌ها، برنامه‌ریزی تولیدِ اینگونه خطوط از اهمیت خاصی برخوردار است. بطور کلی منظور از برنامه‌ریزی تولید، تعیین بهینه نوع، تعداد، توالی و زمانهای تولید محصولات با توجه به منابع موردنیاز و تعهدات تولید است؛ که این امر معمولاً بمنظور کاهش هزینه‌های تولیدی و هزینه‌های عدول از تحویل به موقع سفارشات صورت می‌گیرد. برای خطوط مونتاژ چندمدله، محققان شاخصهای مختلفی را مدنظر قرار داده‌اند: کمینه‌کردن هزینه‌های عدول از تولید به موقع [1,3] ، کمینه‌کردن هزینه‌های آماده‌سازی ایستگاهها [2,3] ، کمینه‌کردن کل زمان توقف خط و زمان بیکاری کارگران [4] ، و کمینه‌کردن هزینه تغذیه خارج از برنامه ایستگاهها [5] از جمله این اهداف هستند. هر یک از این اهداف در جایگاه خود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ با این حال تاکنون مدلی جامع که مجموعه‌ای از این اهداف را بطور همزمان لحاظ نماید ارائه نشده است.

ماهیت پیچیده مدلهای چندمنظوره تولید و بزرگی مسائل واقعی در صنعت باعث شده است، روشهای حل استاندارد عموماً از کارایی وسرعت عمل لازم برای حل اینگونه مسائل برخوردار نباشند [1] . ولی امروزه با پیشرفت علم کامپیوتر، روشهای ابتکاری[3] از قبیل TS ، SA ، GAs[4] ، ACO[5] کاربرد وسیعی در حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی یافته‌اند. اصول کار این الگوریتم‌ها ایجاد و ارزیابی مرحله‌ای تعداد محدودی از جوابهای قابل قبول، جهت رسیدن به جواب بهینه در زمانهای قابل قبول است.

در این تحقیق سه هدف مهم: 1) کمینه‌کردن جریمه‌های عدول از تولید به موقع سفارشات، 2) کمینه‌کردن مجموع هزینه‌های مربوط به توقف خط با احتساب زمانهای آماده‌سازی ایستگاهها، 3) کمینه‌کردن هزینه‌های تغذیه خارج از برنامه ایستگاههای کاری بطور همزمان در نظر گرفته شده است. برای حل این مسئله الگوریتم تلفیقی Tabu-SA ، با استفاده از قابلیتهای دو روش TS و SA ، طراحی و در قالب مثالهای عددی ارائه شده است.

در ادامه، ابتدا ساختار و ویژگی‌های سیستم تولیدی بهمراه اهداف مورد نظر تشریح خواهد شد. سپس در بخش3 ، الگوریتم جستجوگرهای بکارگرفته شده و چگونگی عملکرد آنها بیان می‌شود. در بخش4 ، دو مثال عددی از مسئله تشریح‌شده فوق، حل شده و نتایج محاسباتی ارائه گردیده است.

2- تعریف مسئله

همانطور که قبلاً اشاره شد، سیستم موردنظر یک خط مونتاژ چندمدله است. ملزومات هر نوع مدل اعم از ابزارها، دستورالعملها، زمانهای مونتاژ و قطعات و زیرمجموعه‌ها می‌توانند با یکدیگر مشابه یا متفاوت باشند. همچنین زمانهای تحویل سفارشات نیز متفاوت است. ایستگاههای کاری و پرسنل آنها انعطاف‌پذیر بوده و هر ایستگاه توانایی انجام عملیات متعدد روی محصولات مختلف را داراست. با این وجود برخی از اقلام، تنها در ایستگاههای معینی پروسه‌شده و به سایر ایستگاهها نیازی ندارند. هر ایستگاه کاری دارای ظرفیت محدودی برای قطعات و پیش‌مونتاژهای مربوطه است. بنابراین در طول هر شیفت تولید، این ایستگاهها ممکن است به دفعات تغذیه شوند. تغذیه ایستگاهها در توالی‌های زمانی ثابت و یا برحسب نیاز، بصورت

1 - platform
2 - make to order & assemble to order
3 - heuristic
4 - genetic algorithms
5 - ant colony

تغذیه خارج از برنامه، با احتساب هزینه‌ای اضافی صورت می‌گیرد. با توجه به کلیات فوق، ساختار و ویژگیهای مسئله برنامه‌ریزی تولید را می‌توان بصورت زیر تشریح نمود:

1- خط مونتاژ دارای K ایستگاه با طول یکسان می‌باشد که یک ریل حامل با سرعت ثابت v_c از میان آنها می‌گذرد.
2- هر ایستگاه ظرفیت محدودی برای نگهداری قطعات و پیش‌مونتاژهای هر مدل دارد.
3- ایستگاهها در توالی‌های ثابت زمانی (پریود بارگذاری) از قطعات تغذیه می‌شوند. هزینه این تغذیه پریودیک ثابت است (مانند هزینه حرکت ریل یا هزینه دستمزد کارگران یا ...). ولی چنانچه در حین تولید نیاز به تغذیه زودتر از زمان مقرر باشد، هزینه‌ای به نام بارگذاری خارج از برنامه را بایستی درنظر گرفت.
4- یک یا چند کارگر به ایستگاه کاریِ k $(k=1,2,...,K)$ تعلق می‌گیرند که باید فقط در همان ایستگاه کار کنند.
5- زمان موردنیاز کارگران یک ایستگاه برای انجام پروسه روی هر محصول برابر مجموع زمان مونتاژ قطعات مربوطه روی آن و زمان آماده‌سازی ایستگاه برای محصول بعدی روی ریل می‌باشد.
6- چنانچه کارگران یک ایستگاه نتوانند کار خود را (مونتاژ قطعات لازم و آماده‌سازی ایستگاه) تا مرز پایینیِ ایستگاه به اتمام رسانند، ریل حامل متوقف خواهد شد. واضح است که زمان توقف حامل در هر بار برابر طولانی‌ترین زمان اضافی مورد نیاز ایستگاهها می‌باشد. توقف خط نامطلوب بوده و موجب ایجاد هزینه می‌شود.
7- بر اساس سفارشات واصله، حجم تولیداتی که می‌بایست در یک دوره زمانی تولید گردند، مشخص است و بنابراین در طی هر شیفت، تعداد M محصول از مدلهای مختلف روی ریل حامل چیده می‌شوند و از ایستگاه اول به خط مونتاژ وارد می‌شوند.

با توجه به ویژگیهای فوق، برنامه تولید مطلوب برای این مسئله شامل تعیین تعداد، نوع و توالی محصولات برای پاسخگویی به سفارشات با حداقل هزینه ممکن است. همچنین، تعداد دفعات توقف خط و زمانهای مربوطه، زمانهای تغذیه خارج از برنامه ایستگاههای کاری و زمانهای لازم برای آماده شدن محصولات هر سفارش توسط مدل ریاضی مسئله مشخص می‌شوند. برنامه تولید بگونه‌ای تدوین می‌شود که مجموع وزنی هزینه‌های توقف خط، هزینه‌های تغذیه خارج از برنامه و هزینه‌های عدول از تولید به موقع (هر دو هزینه دیرکرد و زودکرد) کمینه شود.

3- طراحی روش حل

الگوریتمهای ابتکاری، امروزه کاربرد وسیعی در حل مسائل بهینه‌سازی دارند. روش حل پیشنهادی در این تحقیق (روش Tabu-SA) تلفیقی از دو روش قدرتمند (TS) و (SA) می‌باشد. در ادامه پس از شرح اجمالی الگوریتمهای TS و SA ، روش تلفیقی پیشنهادی ارائه خواهد شد.

3- 1- جستجوگر TS

جستجوگر TS اولین بار توسط گلوور[1] در اواسط دهه 1980 برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی[2] پیشنهاد گردید[6]. الگوریتم از یک جواب قابل قبول شروع نموده و پس از تشکیل و ارزیابی جوابهای قابل قبول در همسایگی جواب فعلی به بهترین آنها حرکت می‌کند. این حرکت، قدم به قدم جستجوگر را به سمت جواب بهینه یا نزدیک به بهینه هدایت می‌کند. مشخصه بارز جستجوگر TS ، توانایی آن درگریز از جوابهای بهینه محلی است که از طبیعت قانونمند[3] آن حاصل می‌شود. مشخصه دیگر جستجوگر TS ، لیست ممنوعه[4] آن است. لیست ممنوعه شامل تعدادی مشخصی از حرکت‌های اخیر جستجوگر است، که الگوریتم اجازه رجوع به آنها را در حرکت فعلی نخواهد داشت. پس از انجام هر حرکت، جواب قبلی در بالای لیست

1 - F.Glover (1986)
2 - combinatorial optimization problems
3 - deterministic
4 - tabu list

تابو قرار گرفته و آخرین جواب موجود در لیست از آن خارج می‌شود [6]. این دنباله از جوابهای ممنوعه جستجوگر را تا حد زیادی از دور زدن و حبس شدن در بهینه‌های محلی حفاظت می‌نماید.

متداولترین مکانیزم تشکیل همسایگی در TS جابجایی دو به دو[1] است. در مسائل برنامه‌ریزی تولید و تعیین توالی محصولات، هر همسایه (جواب) جدید از جابجایی دو پروسه (یا محصول) در جواب فعلی صورت می‌گیرد. بدین صورت تعداد جواب همسایگی یک توالی با M عضو برابر $M(M-1)/2$ خواهد بود و برای هر حرکت می‌بایست این تعداد جواب، تولید و ارزیابی گردند.

3-2- جستجوگر SA

جستجوگرSA اولین بار توسط کیرک‌پاتریک[2] در سال 1982 برای حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی استفاده شد[7]. این جستجوگر نیز یک جستجوگر محلی است که مانند TS از یک جواب قابل قبول شروع می‌کند. ولی طبیعت تصمیم‌گیری‌اش در حرکت به جواب جدید با TS متفاوت است. در الگوریتم SA فقط یک همسایگی جدید بصورت تصادفی تولید و ارزیابی می‌شود. حرکت به این جواب در هر یک از دو وضعیت زیر انجام خواهد یافت: الف) جواب جدید از جواب فعلی بهتر باشد و ب) مقدار تابع احتمال حرکت[3] از یک عدد تصادفی یکنواخت (عددی تصادفی از دامنه [0,1]) بزرگتر باشد. در غیر اینصورت جستجوگر جواب جدیدی را تولید و ارزیابی خواهد نمود. مقدار تابع احتمال حرکت، P_r، در هر بار از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_r(Solution_current_{k+1} = Solution_neighbour_k) = \exp(-\frac{\Delta C}{c_k})$$

در این فرمول ΔC اختلاف مقدارتابع هدف بین جواب فعلی و جواب جدید است. اندیس k تعداد تکرارها و c_k پارامتر کنترلی موسوم به دماست. معمولاً درابتدای جستجو، مقدار دمای اولیه، c_0 ، بزرگ انتخاب می‌شود، بطوریکه الگوریتم شانس بیشتری برای حرکت داشته باشد. ولی با افزایش تعداد حرکتها این دما برطبق یک تابع زمانبندی سرمایش[4] به تدریج کم می‌شود؛ درنتیجه، احتمال انتخاب جوابهای بدتر با افزایش تعداد حرکتها کاهش می‌یابد. بعبارت دیگر، در ابتدای جستجو، نقش طبیعت تصادفی الگوریتم در پذیرش همسایگی جدید بیشتر از نقش طبیعت قطعی آن است. ولی با پیشرفت جستجو، حرکتها بیشتر براساس بهبود تابع هدف انجام شده و نقش طبیعت تصادفی الگوریتم در پذیرش جواب جدید کاهش می‌یابد. توضیح مبسوط الگوریتم‌های فوق را می‌توان در مراجع مختلف از جمله [6,7] یافت.

3-3- الگوریتم تلفیقی Tabu-SA

هر یک از دو روش TS و SA دارای نقاط قوت و ضعف خاص خود هستند. توانایی بی‌نظیر TS در گریز از بهینه‌های محلی و طبیعت قطعی و قانونمند این جستجوگر را می‌توان جزء مهمترین مزایای آن بشمار آورد. در مسائل بهینه‌سازی، بخصوص در مسائل کوچک و مراحل پایانی جستجو در مسائل بزرگ، این دو ویژگی نقش عمده‌ای در بالابردن کیفیت جواب نهایی دارند. ولی در مسائل بزرگ، حفظ طبیعت قطعی الگوریتم که از ارزیابی تمامی همسایگی‌های جواب فعلی ناشی می‌شود، باعث کندی پیشرفت و طولانی‌شدن زمان محاسبات خواهد شد. از طرفی، الگوریتم SA به دلیل ماهیت تصادفی‌اش در ارزیابی و انتخاب همسایگی‌ها از سرعت بالایی برخوردار بوده و قادر است منطقه وسیعتری از جوابهای قابل قبول را پوشش دهد. با اینحال ریسک برگشت و تکرار مسیرهای قبلی و همچنین ناتوانی آن در گریز از بهینه‌های محلی در دماهای پایین از محدودیتهای این روش هستند.

---

1 - pairwise interchange
2 - Kirkpatrick et al. (1982)
3 - transition probability
4 - cooling schedule

روش پیشنهادی Tabu-SA ترکیبی از دو روش فوق است که در طراحی آن از سرعت SA در تولید و ارزیابی همسایگی جدید و از قانونمندی و لیست ممنوعه TS در هدایت جستجوگر به سمت جواب بهینه بطور همزمان استفاده شده است.

برای این منظور، ایجاد و ارزیابی همسایگی در روش Tabu-SA ، براساس جستجوگر SA طراحی شده است. ولی، این الگوریتم به لیست ممنوعه نیز مجهز گردیده تا به مسیرهای طی شده قبلی مجدداً رجوع نشود. نکته دیگری که در طراحی الگوریتم Tabu-SA درنظر گرفته شده است، ایجاد مکانیزمی برای جلوگیری از حبس‌شدن جستجوگر در بهینه‌های محلی مراحل پایانی جستجو که دما پایین است، می‌باشد. همانطور که در بالا اشاره شد، در دماهای پایین، جستجوگر SA تنها به جوابهای جدیدی که از جواب فعلی بهتر باشند، حرکت خواهد نمود و احتمال انتخاب جوابهای بدتر بسیار کم است. در اینصورت، اگر جواب فعلی یک بهینه محلی باشد، الگوریتم ممکن است قادر به یافتن جواب بهتر در همسایگی نباشد. این مسئله باعث توقف و حبس جستجوگر در بهینه محلی خواهد شد. برای رفع این مشکل در الگوریتم جدید، اگر جستجوگر پس از تولید و ارزیابی تعداد معینی همسایگی، قادر به انتخاب هیچ از آنها نباشد، مکانیزم تشکیل و انتخاب جوابها به TS تغییر خواهد کرد تا جستجوگر از تله جواب فعلی رهایی یابد. در زیر خلاصه الگوریتم پیشنهادی بصورت گام به گام تشریح می‌شود:

گام 0: دریافت ورودیهای مسئله، پارامترهای جستجوگر و تشکیل یک برنامه تولید (جواب) قابل قبول بعنوان نقطه شروع؛

گام 1: ایجاد تصادفی یک همسایگی جدید؛

گام 2: ارزیابی و محاسبه مقدار هزینه مربوط به جواب همسایگی ایجاد شده؛

گام 3: بررسی شرایط پذیرش جواب جدید؛ اگر مقدار هزینه برنامهٔ تولید جدید، کمتر از جواب جاری است و یا احتمال پذیرش جوابی بدتر، بیشتر از یک عدد تصادفی در بازه $[0,1]$ است، جستجوگر به گام5 رجوع می‌کند و در غیر اینصورت، آن به گام1 بازگشت می‌کند و چنانچه تعداد این بازگشت‌ها از حدی بیشتر شود، جستجوگر در تله بهینه محلی گرفتار شده است؛ لذا، این بار به گام بعدی رجوع می‌کند.

گام 4: رهایی از تله بهینه محلی؛ در این گام، جستجوگر از شگرد الگوریتم TS استفاده می‌کند و به بهترین جواب در همسایگی جواب جاری حرکت می‌کند.

گام 5: بررسی وجود یا عدم وجود جواب جدید در لیست ممنوعه (تابو)؛ اگر جواب جدید در لیست ممنوعه باشد، جستجوگر به گام1 بازگشت می‌کند؛ در غیر اینصورت، آن به گام بعدی رجوع می‌کند.

گام 6: حرکت جستجوگر به جواب جدید و بهنگام کردن پارامترهای جستجوگر و جوابهای موجود در لیست ممنوعه.

گام 7: بررسی معیارهای توقف؛ اگر معیارهای توقف برقرار نباشند، جستجوگر به گام1 بازگشت می‌کند و در غیر اینصورت، آن توقف جستجو را اعلام می‌کند و خروجی‌های موردنیاز را ارائه می‌نماید.

بطورکلی، قبل از شروع جستجو می‌بایست ورودیهای مسئله و پارامترهای جستجوگر به الگوریتم داده شده و نقطه شروع مشخص شود. مراحل بعدی شامل تشکیل همسایگی جدید، بررسی شروط و به روز درآوردن پارامترهای جستجوگر می‌باشد.

4- مثالها و نتایج محاسباتی

در این بخش، ابتدا یک مثال کوچک بمنظور تشریح عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل برنامه‌ریزی تولید حل و بحث می‌شود و سپس خلاصه نتایج محاسباتی برای یک مسئله با اندازه‌های واقعی ارائه خواهد شد.

مثال1- در این مثال یک خط مونتاژ چندمدله با 3 ایستگاه کاری برای تولید 5 مدل مختلف A ، B ، C ، D و E درنظر گرفته شده است. هر مدل حداقل به 2 ایستگاه خاص نیاز دارد و ظرفیت ایستگاهها برای نگهداری قطعات نیز محدود است. این

اطلاعات بهمراه هزینه تغذیه خارج از برنامه ایستگاهها در جدول1 داده شده است. جدول2 حاوی اطلاعات مربوط بـه تعهـدات تولید (سفارشات) است که جریمه‌های عدول از تولید به موقع بین 0/5 تا 2/5 ($ بر دقیقه) درنظر گرفته شـده اسـت. در ایـن جدول بعنوان مثال از محصول A دو سفارش A1 و A2 بترتیب به تعداد 2 و 3 عدد و برای زمانهای تحویل 40 و 80 دقیقه (یـا هر واحد زمانی دیگر) وجود دارد. به این ترتیب تعداد کل تقاضا (محصولاتی تولیدی)، 20 عدد خواهد بود. زمانهای آماده‌سازی ایستگاهها 2 تا 4/5 دقیقه و زمانهای انجام هر پروسه در هـر ایسـتگاه بـین 5 تـا 10 دقیقـه درنظـر گرفتـه شـده‌انـد. تغذیـه برنامه‌ریزی شده ایستگاهها در هر 20 دقیقه یکبار انجام می‌شود. تابع هدف کـه شـامل هزینـه‌هـای وزن‌دهـی شـده دیرکـرد، زودکرد، توقف خط و تغذیه خارج از برنامه ایستگاهها می‌باشد برحسب واحد پول (مثلاً $) بیان می‌شـود. جریمـه توقـف خـط 10$ در دقیقه در نظر گرفته شده است.

مدلها	A		B		C			D		E		
ایستگاههای مورد نیاز هر مدل (k)	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1	2	3
حداکثر ظرفیت ایستگاه (عدد)	1	1	2	1	2	1	3	2	1	1	2	2
هزینه تغذیه خارج از برنامه ($)	10	15	25	30	25	30	10	20	20	20	25	20

جدول1 : تغذیه خارج از برنامه

سفارشات	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2	E1
زمان تحویل (min)	40	80	50	90	40	80	60	110	100
تعداد (عدد)	2	3	1	4	1	2	3	2	2

جدول2 : تعهدات تولید

تعداد توالی‌های ممکن (برنامه‌های تولید) برای مسئله فوق برابر عدد !9 می‌باشد، که بمنظور صحه‌گذاری دقت الگـوریتم، کلیـه حالتهای ممکن حل شده و توالی بهینه تعیین گردید. زمان صرف‌شده برای این سرشماری[1] حدود 5 ساعت و هزینه مربوط بـه برنامه تولید بهینه 857$ بدست آمد. واضح است که با بزرگ شدن مسئله، زمان لازم بـرای شـمارش توالیهـا بصـورت نمـایی افزایش خواهد یافت.

حل بهینه مسئله فوق توسط الگوریتم پیشنهادی Tabu-SA کمی بیشتر از 1 دقیقه بطول انجامید. برنامه تولید بهینه و جزئیات هزینه‌های مربوطه در جدول3 آورده شده است.

هزینه‌ها و زمانها / ***روشها***	*مجموع هزینه‌ها* *($)*	*جریمه عدول از JIT* *($)*	*هزینه توقف ریل* *($)*	*هزینه تغذیه خارج ازبرنامه* *($)*	*زمان محاسباتی* *(sec)*
Tabu-SA	871/95	656/47	35/48	180	65
سرشماری	857/31	654/31	23	180	17629

جدول3: نتایج حاصل از حل مثال1 بکمک دو روش حل مختلف

1 - enumeration

مثال2- حل یک مثال بزرگ: در این قسمت برنامه تولید یک خط مونتاژ خودرو با 40 ایستگاه کاری و 5 مدل مورد بررسی قرار گرفته است. در افق برنامه‌ریزی تولید تعداد 1000 عدد خودرو از مدلهای مختلف برای 15 مقطع زمانی مختلف (15 سفارش مختلف) می‌بایست تولید شوند. اطلاعات فوق مشابه مشخصات واقعی کارخانجات خودروسازی جهان می‌باشند. تمامی مشخصات و هزینه‌های فرضی مسئله در جدول4 داده شده‌اند.

طول رشته	*تعداد کل تقاضا*	*تعداد سفارشات*	*تعداد مدلها*	*سرعت ریل حامل* $v_c(m/\min)$	*طول ایستگاهها*	*تعداد ایستگاهها*
15	1000	15	5	1	10	40

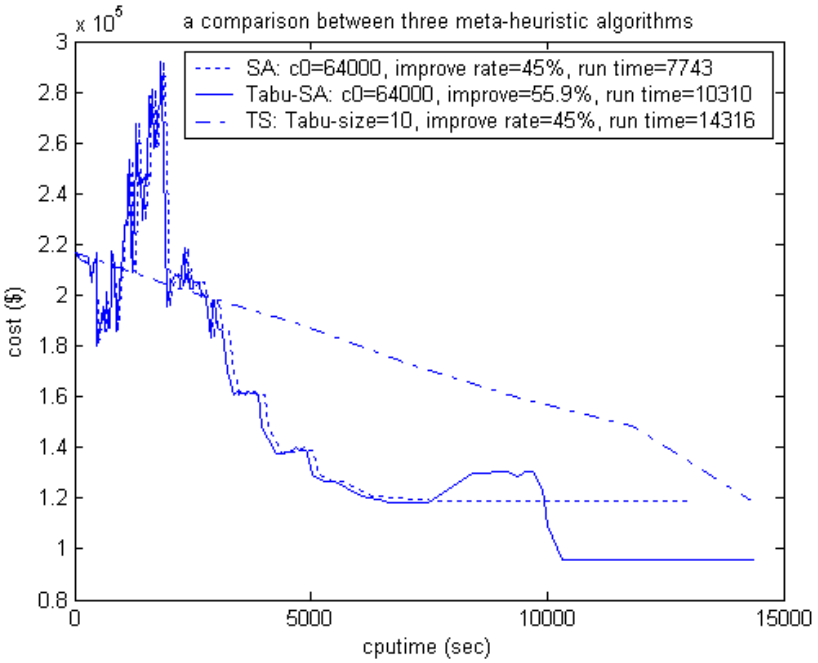
هزینه تغذیه خارج ازبرنامه ($)	*ظرفیت ایستگاهها (عدد)*	*زمانهای تولید* (min)	*زمانهای آماده‌سازی* (min)	*تعداد ایستگاههای مورد نیاز برای هر مدل (عدد)*	*پریود بارگذاری* (min)	*ضریب هزینه توقف ریل* ($/min)
10 تا 20	1 تا 4	5 تا 9	0/5 تا 3	30 تا 40	25	1000

جدول4: مشخصات و هزینه‌های خط مونتاژ در مثال2

این مسئله با سه الگوریتم TS ، SA و Tabu-SA حل و چگونگی عملکرد هر الگوریتم در شکل1 نشان داده شده است. همانطور که از این نمودار پیداست، روش پیشنهادی Tabu-SA از نظر سرعت همگرایی برتری چشمگیری بر روش TS دارد. همچنین، مقایسه نمودارهای پیشروی دو روش SA و Tabu-SA نشان می‌دهد که در شرایط یکسان، سرعت همگرایی روش پیشنهادی به دلایل ذکرشده قبلی کمی بیشتر می‌باشد و ضمناً روش پیشنهادی برخلاف روش SA ، در صورت لزوم، قادر به گریز از بهینه‌های محلی می‌باشد. جزئیات نتایج حاصله در جدول زیر آورده شده است.

جستجوگرها / ***نتایج حاصله***	*Tabu Search (TS)*	*Simulated Annealing (SA)*	*Tabu-SA*
مجموع هزینه‌ها ($)	119180/3	119182/5	95529/1
کاهش مجموع هزینه‌ها (%)	45	45	55/9
زمان محاسباتی (sec)	14316	7743	10310
جریمه دیرکرد ($)	28336/8	32384/9	17386/7
جریمه زودکرد ($)	10300/9	12633/6	7455/5
هزینه توقف ریل ($)	64672/3	58269/4	54844/6
هزینه تغذیه خارج از برنامه ($)	15870/3	15894/6	15842/3

جدول5: نتایج حاصل از حل مثال2 بکمک جستجوگرهای TS ، SA و Tabu-SA



شکل 1 : نمودار پیشروی جستجوگرها در حل مثال 2

5- بحث و نتیجه‌گیری

امروزه تنوع‌طلبی محصولاتی همچون خودرو و لزوم پاسخ سریع این صنایع به نیاز بازار و مشتریان، برنامه‌ریزی تولید اینگونه محصولات را از اهمیت خاصی برخوردار کرده است. عدم وجود برنامه تولید مدون و بهینه باعث افزایش بی‌رویه هزینه‌ها و اتلافات در کارخانجات تولیدی می‌شود. در این تحقیق مدل نسبتاً جامعی از خطوط مونتاژ چندمدله خودرو با توجه به ویژگیهای خاص آنها ارائه شده است. تولید بهنگام، ظرفیت محدود ایستگاههای کاری و هزینه‌های ناشی از توقف خط از جمله عوامل مهمی هستند که برای اولین بار در این تحقیق بطور همزمان لحاظ شده‌اند. محاسبات نشان می دهد روش تلفیقی Tabu-SA قابلیت بالایی را در حل سریع اینگونه مسائل داراست. بنابراین با توجه به انطباق‌پذیری و ساختار انعطاف‌پذیر این الگوریتم می‌توان انتظار داشت که این روش سایر مدلهای بهینه‌سازی دیگر را در زمانهای معقولی حل نماید.

مراجع

[1] Patrick R. McMullen, An efficient frontier approach to addressing JIT sequencing problems with setups via search heuristics, Computers & Industrial Engineering 41 (2001) 335-353.

[2] Chul Ju Hyun, Yeongho Kim, and Yeo Keun Kim, A genetic algorithm for multiple objective sequencing problems in mixed model assembly lines, Computers Operations Research 25 (1998) 675-690.

[3] Patrick R. McMullen, An ant colony optimization approach to addressing a JIT sequencing problem with multiple objectives, Artificial Intelligence in Engineering 15 (2001) 309-317.

[4] Zhao Xiaobo, Katsuhisa Ohno, Properties of a sequencing problem for a mixed model assembly line with conveyor stoppages, European Journal of Operations Research 124 (2000) 560-570.

[5] R.L. Brudett, E. Kozan, Evolutionary algorithms for flow shop sequencing with non-unique jobs, International Transactions in Operational Research 7 (2000) 401-418.

[6] F. Kolahan, M. Liang, An adaptive TS approach to JIT sequencing with variable processing times and sequence-dependent setups, European Journal of Operational Research 109 (1998) 142-159.

[7] P.J.M. van Laarhoven and E.H.L. Aarts, Simulated Annealing: Theory and Applications, by Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London (1988).