

# تعیین توالی خطوط مونتاژ چندمدلی به منظور حداقل کردن طول خط و هموارسازی مصرف قطعات با استفاده از الگوریتم ژنتیک

رضا توکلی مقدم<sup>i</sup>؛ سیدمحمدتقی فاطمی قمی<sup>ii</sup>؛ علی فیضی<sup>iii</sup>؛ مرتضی واسعی<sup>iv</sup>

## چکیده

امروزه زمان بندی و بالانس خطوط مونتاژ چندمدلی با اهداف چندگانه یکی از مباحث مهم در صنایع بزرگ است. در این مقاله مساله تعیین توالی خطوط مونتاژ چندمدلی به منظور حداقل کردن طول خط و هموارسازی مصرف قطعات بررسی می شود. مسأله موردنظر یک مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح است. این دسته مسایل زمان بندی از لحاظ پیچیدگی محاسباتی در زمره مسایل NP-hard قرار می گیرند، بنابراین طراحی خاصی از الگوریتم ژنتیک به عنوان یکی از روش های فرا ابتکاری برای حل مدل موردنظر استفاده می شود. برای ارزیابی کارایی الگوریتم ژنتیک از اطلاعات مربوط به یک نمونه عملی شامل سه سالن تزئینات از صنعت خودروسازی استفاده می شود. برای هر یک از سالن ها پنج دسته مساله با مقادیر مختلف عامل اهمیت وزنی اجزای تابع هدف، تولید شده و جواب های به دست آمده با نرم افزار لینکو ۶ مقایسه می شود. جواب های به دست آمده نزدیک بهینه اند و زمان رسیدن به جواب بسیار کوتاه است که بر مناسب بودن الگوریتم ژنتیک پیشنهادی دلالت دارد.

## کلمات کلیدی

خطوط مونتاژ چندمدلی، مدل برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح، طول خط، مصرف قطعات، الگوریتم ژنتیک

## *Sequencing the Mixed-Model Assembly Line to Minimize Line Length and Leveling Part Usage by Genetic Algorithms*

R. Tavakkoli-Moghaddam; S.M.T. Fatemi-Ghomi; A. Feizi; M. Vasei

### ABSTRACT

Nowadays, scheduling and mixed-model assembly line balancing with multi objectives are significant issues in major industries. In this paper, the problem of sequencing in mixed-model assembly line with the objective function of leveling part usage and minimizing line length is studied. This problem is formulated as an integer non-linear programming model. From the viewpoint of computational complexity, such a scheduling problem belongs to a class of NP-hard problems. Accordingly to solve the above model, a special design of genetic algorithms is used. To evaluate the efficiency of the proposed algorithm, we use the real data taken from three trimming shops in an automotive manufacturing company. For each trimming shop, five different problems (runs) are generated compromising several values of weighted importance factor in the objective function. Then solutions obtained by genetic algorithms are compared with solutions reported by Lingo 6 software. The final solutions are approximately optimal and computational time for achieving the best result is very small showing that the proposed algorithm is a quite suitable tool for solving the problem.

### KEYWORDS

Mixed-model assembly line balancing, Line length, Part usage, Genetic algorithms.

<sup>i</sup> دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، [tavakoli@ut.ac.ir](mailto:tavakoli@ut.ac.ir)

<sup>ii</sup> استاد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

<sup>iii</sup> فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشکده تحصیلات تکمیلی، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد نجف آباد

<sup>iv</sup> فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی اصفهان

برنامه‌ریزی تولید یکی از فعالیت‌های مهم هر واحد تولیدی است. در تولید مدرن امروزه، تعیین توالی و زمان‌بندی در سیستم‌های پیشرفته از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که ضرورت توجه به آن را دو چندان کرده است [۱]. امروزه در برنامه‌ریزی‌ها یک هدف مطرح نبوده بلکه اهداف چندگانه به دلیل انطباق بیشتر با خواسته‌های مدیریت مورد توجه تصمیم‌گیرندگان قرار می‌گیرد [۲]. بنابراین تشخیص اهداف مناسب و جدید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

ایده اصلی خط مونتاژ این است که محصول درحال مونتاژ از ایستگاه‌های ثابت مونتاژ قبلی به وسیله یک ابزار جابجایی مواد (در این مقاله، نقاله) منتقل شود [۳]. خطوط مونتاژ از نظر تنوع تولید یا قابلیت تولید محصول‌های مختلف به سه دسته خطوط مونتاژ تک‌مدلی، چندمدلی و ترکیبی تقسیم می‌شوند. در حالت اول، خط قادر به تولید یک نوع مدل محصول می‌باشد، از این‌رو، مشخصات قطعه‌ها و عملیات ایستگاه‌ها برای کلیه ورودی‌های خط، ثابت هستند. در خط مونتاژ<sup>۱</sup> چندمدلی<sup>۲</sup>، چند نوع مدل از یک نوع محصول (نظیر اتومبیل) تولید می‌شود [۴]، [۵]. در این حالت علیرغم وجود تشابه فرآیند هر مدل در خط مونتاژ، به علت تفاوت مشخصات مدل‌ها، زمان عملیات هرمدل، مشخصات قطعات و میزان مصرف آنها در مدل‌های مختلف و سیستم مونتاژ نسبت به حالت قبل دارای پیچیدگی بیشتری است. درحالت سوم علاوه بر اینکه خط قادر به تولید چند مدل است، قابلیت تولید در حجم کم یا دسته‌های کوچک را برای پاسخگویی سریع به تقاضای متنوع مشتریان بدون نگهداری موجودی زیاد داراست [۶]. از آنجا که حالت سوم وضعیت پیشرفته‌تر حالت دوم است، در این مقاله از آن با همان عنوان خطوط مونتاژ چندمدلی یاد می‌شود. در بسیاری از کارخانجات، خط مونتاژ چندمدلی استفاده می‌شود، چراکه این خطوط قادرند تقاضای متنوع مشتریان را بدون نیاز به موجودی‌های بالا تامین کنند [۷]. بهره‌گیری موثر از خط مونتاژ چندمدلی مستلزم حل مسایل تعیین زمان سیکل خط، تعیین تعداد و توالی ایستگاه‌ها در خط، متعادل‌سازی خط، تعیین برنامه توالی مونتاژ محصولات مختلف در خط است [۸].

تعیین ترتیبی که در آن مدل‌های متفاوت برای مونتاژ وارد خط شوند، عمده‌ترین قسمت مساله متعادل‌سازی خط مونتاژ چندمدلی را تشکیل می‌دهد [۱۰]. برنامه توالی بسته به اهداف هر شرکت متغیر است و ترتیب‌بندی مدل‌ها برای خط مونتاژ چندمدلی بسته به اهداف مختلف کنترل خط، متفاوت است. در این زمینه دو هدف موجود است [۱۱]: یکی هم‌سطح‌کردن بار (زمان کل مونتاژ) برای هر فرآیند در خط و دیگری ثابت نگهداشتن سرعت مصرف هر قطعه در خط می‌باشد. هدف اول مشخص می‌کند که ممکن است محصولات مختلف در هر ایستگاه خط مونتاژ چندمدلی، زمان عملیات یکسانی نداشته باشند و حتی ممکن است محصولی، زمان عملیاتی طولانی‌تر از زمان سیکل تعیین شده داشته باشد و خط مونتاژ چندمدلی باید قادر باشد با این شرایط کار کند، بدون اینکه تاخیر یا کمبودی ایجاد شود. هدف دوم، ثابت نگهداشتن نرخ مصرف قطعات در خط یا نرخ تولید هر قطعه در فرآیندهای قبل از خط، این امکان را فراهم می‌کند تا بتوان از نگهداری موجودی‌های بزرگ قطعات در جریان فرآیند و یا کمبودهای بالا جلوگیری کرد و بدین ترتیب هزینه‌های تولید را کاهش داد [۱۲].

ماندن [۹] در سال ۱۹۸۳ برای اولین بار به ترتیب‌بندی خط مونتاژ چندمدلی در شرکت تویوتا که تحت سیستم تولیدی JIT عمل می‌کند، اشاره می‌کند. الگوریتم ارایه شده توسط او به روش GC<sup>۳</sup> معروف است. در این روش انحراف مصرف واقعی از مصرف یکنواخت حداقل می‌شود. میلتن‌بورگ [۱۳] در سیستم‌های تولیدی JIT الگوریتم‌ها و روش‌های ابتکاری<sup>۵</sup> جدیدی را برای حداقل‌کردن انحراف تولید واقعی از تولید مطلوب ارایه می‌دهد. او تعداد و ترکیب قطعات لازم برای مدل‌های مشابه را یکسان فرض کرده و با صرف‌نظرکردن از نرخ تقاضای قطعات فقط نرخ تقاضای محصولات را در نظر می‌گیرد. میلتن‌بورگ و سینامون [۱۱] سیستم‌های تولیدی را متشکل از چهار سطح مواد اولیه و قطعات خریداری شده، قطعات اصلی، زیرمونتاژها و محصولات معرفی می‌کنند و مساله توالی محصولات بر خط مونتاژ چندمدلی را در یک سیستم تولیدی JIT چندسطحی بررسی می‌کنند. در حقیقت مدل ارایه شده برای مدل یک‌سطحی میلتن‌بورگ [۱۳] است.

اشتاینر و یومانس [۴] در سیستم تولیدی JIT و در حالت چندمدلی یک سطحی، مدل بهینه‌ای برای ترتیب‌بندی محصولات با استفاده از روش گراف ارایه کرده‌اند. آنها فرض می‌کنند که زمان کل فرآیند هر محصول یک واحد است. همچنین ادعا می‌کنند که تابع هدف ارایه شده توسط میلتن بورگ [۱۳]، که مجموع انحرافات کل افق برنامه‌ریزی را حداقل می‌کند، ممکن است انحرافات نسبتاً زیادی در دوره‌های زمانی خاص ایجاد کند، اما مدل پیشنهادی آنها، ترتیب‌بندی تولید را با توجه به هموارسازی در هر دوره زمانی انجام می‌دهد. پلچبرگر و هیتامی [۱۴] یک الگوریتم ترتیب‌بندی برای حالت دوسطحی در سیستم تولید JIT ارایه کرده‌اند. در مدل پیشنهادی آنها ارسال کانبان<sup>۱</sup> به روش دوره ثابت سفارش و میزان موجودی قطعات در افق برنامه‌ریزی صورت می‌گیرد. آنها ادعا می‌کنند که با استفاده از این روش تامین کننده‌ها می‌توانند به طور مستقل نرخ‌های خروجی خود را تعیین و الگوریتم بار کاری خود را مطابق نیازها و اولویت‌هایشان تغییر دهند. در نتیجه خط مونتاژ نهایی انعطاف‌پذیری حاصل می‌کند. مولفان معتقدند که این انعطاف‌پذیری به اجتناب از توقف‌های گران خط مونتاژ نهایی، هنگام قطع تامین قطعات، کمک می‌کند. اینمان و بولفین [۱۵] روند حل و فرموله‌سازی جدیدی برای ترتیب‌بندی سیستم مونتاژ JIT چندمدلی با هدف حداقل کردن انحراف بین تولید تجمعی و تقاضای تجمعی به صورتی ارایه دادند که نرخ مصرف کلیه قطعات در خط، ثابت نگهداشته شود. اینمان و بولفین [۱۶] در سیستم JIT چندسطحی چندمدلی برای حالت چندسطحی، مقیاسی برای مصرف قطعه توسعه داده و الگوریتم ویژه‌ای ارایه کرده‌اند آنها در این تحقیق از الگوریتم EDD<sup>۲</sup>، برای حل استفاده کرده‌اند. این الگوریتم به طور کامل از سطح پایین‌تر چشم‌پوشی می‌کند و در نتیجه خیلی سریع است. کویبک و ستی [۱۷] در سیستم تولیدی JIT برای یافتن جواب‌های بهینه زمان‌بندی یکنواخت خطوط مونتاژ چندمدلی، مدل تخصیصی فرموله کرده‌اند. هدف مدل حداقل کردن کل هزینه ناشی از تخصیص نامناسب است. تامپولس [۵] بیان می‌کند که داشتن یک خط مونتاژ چندمدلی کارا، مستلزم حل دو مساله جدا اما مرتبط متعادل‌سازی خط و ترتیب‌بندی مدل‌ها است.

هدف روند متعادل‌سازی خط، تخصیص کار به اپراتورهای مونتاژ به گونه‌ای است که تعداد اپراتورها حداقل شود و هدف روند ترتیب بندی چندمدلی تعیین ترتیبی از جریان مدل‌ها است به طوری که مطلوبیت اپراتورهای مونتاژ بهینه شود. او در مقاله خود، ایستگاه‌های کاری را به چهار نوع ایستگاه تقسیم می‌کند: ایستگاه بسته، ایستگاه باز، ایستگاه بسته از راست و باز به چپ و ایستگاه بسته از چپ و باز به راست، که به ترتیب با سمبل‌های [ ]، ( )، ( ) و [ ] نشان داده می‌شوند.

بارد و همکاران [۱۸] برای مساله ترتیب‌بندی خطوط مونتاژ پیوسته چندمدلی، با توجه به مشخصه‌های مهم طراحی خط، چند مدل بهینه‌سازی ارایه می‌کنند. آنها با توجه به حداقل کردن طول خط و حداقل کردن مدت زمان خاتمه کل تولید چند مدل بهینه‌سازی پیشنهاد داده‌اند. خیابو و اونو [۶ و ۷] مساله توقف خط برای ترتیب‌بندی چندمدلی‌ها بر خط مونتاژ در سیستم تولیدی JIT را مورد بحث قرار می‌دهند. آنها می‌گویند که در برخی خطوط مونتاژ چندمدلی، کارگران این قدرت و مسؤلیت را دارند که هر گاه کارشان در محدوده ایستگاه کاریشان ناتمام ماند، نقاله را متوقف کنند. بولات و همکاران [۱۹] یکی از مسایل خطوط مونتاژ چندمدلی را پیدا کردن ترتیب بهینه‌ای که هزینه‌های ناشی از ناکارایی ایستگاه‌ها را حداقل کند، معرفی می‌کنند. مولفان مساله را به صورت یک برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله و هزینه‌های آماده‌سازی و مطلوبیت کار را با استفاده از روش شاخه و کران حداقل می‌کنند. کیم و همکاران [۲۰] با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مساله ترتیب‌بندی خطوط مونتاژ چندمدلی را با انواع ایستگاه کاری دوطرفه و زمان آماده‌سازی<sup>۳</sup> وابسته به توالی در نظر گرفته‌اند. مولفان با هدف حداقل کردن کل طول خط الگوریتمی ارایه کرده‌اند که حل‌های نزدیک بهینه نتیجه می‌دهد. این روش به طور جزئی‌تر مساله ترتیب‌بندی خط مونتاژ چندمدلی را با ایستگاه‌های باز و بسته بررسی می‌کند. ایشان ادعا می‌کنند که روش ژنتیک پیشنهاد شده در این مقاله طول خطی خیلی کوتاهتر از الگوریتم میلتن بورگ [۱۳] نتیجه می‌دهد.

یانو و راخامادوگو [۲۱] معتقدند ترتیب‌بندی کارها باید به گونه‌ای باشد که مقدار کل کار تکمیل شده، حداکثر

و یا مقدار کل کار تکمیل نشده (بارکاری) حداقل شود. آنها ابتدا مساله را به صورت تک ایستگاهی با دو عملیات متفاوت در نظر گرفته و آن را بهینه‌سازی می‌کنند. سپس بر اساس آن روشی ابتکاری برای حالت چند ایستگاهی ارایه می‌دهند. ماندن [۹] علاوه بر بیان روش‌های GC که تنها به هدف اول یعنی یکنواختی مصرف قطعات می‌پردازد، به روش شرکت توپوتا برای در نظر گرفتن هدف دوم یعنی هم‌سطح‌سازی بار در ترتیب‌بندی محصولات نیز اشاره می‌کند. زوکی و شوساکو [۸] هدف ثابت نگهداشتن مصرف قطعات در سیستم تولیدی JIT را دارای اهمیت بیشتری می‌دانند و قدر مطلق تفاوت بین متوسط مقادیر لازم و مقادیر برداشتی کلیه قطعات را در هر موقعیت برداشت حداقل می‌کنند. آنها از مساله برداشت قطعات از فرآیندهای تولیدکننده آنها، قبل از خط مونتاژ کمک گرفته‌اند. بدین ترتیب که برداشت کلیه قطعات از فرآیندهای قبلی و انتقال آنها به خط مونتاژ چندمدلی در هر موقعیتی غیرممکن است. زمانی که هدف، داشتن مقدار برداشت حتی‌المقدور ثابت از کلیه قطعات، با فاصله‌های ثابت باشد در حقیقت تغییرات در مقادیر تولید و زمان‌های حمل در فرآیندهای قبل از خط حداقل خواهد شد و موجودی‌های در جریان فرآیند مربوط به آنها نیز حداقل خواهد شد. سامی‌کراست و همکاران [۲۲] با استفاده از روش TS توقف خط را حداقل کرده و بر اساس چهار معیار ناکارایی خط مونتاژ شامل کار ناتمام، بیکاری کارگر، زمان ایستگاه کاری و معیار تغییرپذیری در استفاده یکنواخت قطعات الگوریتم پیشنهادی را مورد ارزیابی قرار می‌دهند. ایگبدو و ماندن [۱۲] روشی پارامتریک برای زمان‌بندی توالی چندمعیاره برای خطوط مونتاژ چندمدلی JIT مطرح می‌کنند. میلتن‌بورگ و گلدشتاین [۲۳] با توجه به متعادل‌سازی مصرف قطعات و یکنواخت‌سازی بارهای تولید برای سیستم‌های تولیدی JIT سعی کرده‌اند تا مساله ترتیب‌بندی محصولات در خط مونتاژ چندمدلی را با توجه به هر دو هدف در یک سیستم چندسطحی بررسی کنند. بارد و همکاران [۲۴] یکنواخت‌کردن مصرف قطعات و حداقل‌کردن طول خط را بررسی کرده‌اند. مدل حاصل شکلی از برنامه غیرخطی عدد صحیح مختلط به خود می‌گیرد و با ترکیبی از روش‌های ابتکاری و روش شاخه و کران حل می‌شود.

در مقاله مذکور فرض بر این است که اپراتورها می‌توانند در ایستگاه‌های یکدیگر وارد شوند و یا به طور همزمان بر روی یک واحد کار کنند. ایستگاه‌ها بسته به طبیعت فعالیت‌ها و طرح استقرار تسهیلات ممکن است باز یا بسته باشند.

در این مقاله، دو نوع معیار در ترتیب‌بندی خط مونتاژ مطرح است: یکنواخت‌کردن مصرف قطعات<sup>۱</sup> و حداقل‌کردن طول خط<sup>۱</sup>. در حالت اول توجه به تولیدکنندگان قطعات معطوف می‌شود و سعی بر این است که به منظور هموارسازی تولید، یکنواختی در مصرف قطعات حاصل شود. در حالت دوم با فرض طول ثابت ایستگاه‌ها به منظور حداقل‌کردن ریسک توقف مقاله وقتی متغیر سیستم نشان داده شده سعی در حداقل‌کردن طول خط می‌شود. توقفات خط یکی از مهمترین مسایل نامطلوب در سیستم مونتاژ است. در ادامه مقاله، مساله تعریف شده و مدل ریاضی معرفی می‌گردد. سپس نحوه نمایش جواب، عملگرهای مورد استفاده در الگوریتم، نحوه تولید جمعیت اولیه و نحوه انتخاب جمعیت والد بیان می‌شود. بعد از آن نوبت به تشریح قدم‌های الگوریتم می‌رسد. در نهایت با استفاده از پارامترهای مختلف ورودی، نتایج محاسباتی استخراج شده و مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

## ۲- ارایه مدل ریاضی

همان‌طور که اشاره شد، اهداف متفاوتی در ترتیب‌بندی خطوط مونتاژ چندمدلی مطرح هستند. می‌توان با تابع هدفی چندمعیاره توابع هدف مورد نظر را به صورت یک تابع هدف منفرد یکپارچه کرد.

$$F = w_1 F_1 + w_2 F_2 + \dots + w_i F_i + \dots \quad (1)$$

که در آن  $w_i$  وزن تخصیص یافته به هدف  $i$  و  $F_i$  هدف  $i$  ام می‌باشد. تعیین وزن‌های عبارت فوق در استفاده از این روش از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق از دو معیار یکنواخت‌کردن مصرف قطعات و حداقل‌کردن طول خط استفاده شده است. بنابراین  $i$  برابر ۲ است و مساله به شکل زیر تبدیل می‌شود.

$$F = w_1 F_1 + w_2 F_2 \quad (2)$$

## ۲-۱- برنامه زمانی اپراتور

از نقطه نظر طراحی، یک رابطه بین طول خط و زمان یکبارگی اپراتور وجود دارد. همیشه این امکان وجود دارد که راه اندازی خط و برنامه زمانی اپراتورها به صورت کارهای پشت سرهم و پیوسته صورت گیرد. این امر با دیرتر شروع شدن برنامه زمانی اپراتور انجام می شود و به صورت غیرمستقیم این اطمینان را می دهد که برای جلوگیری از کمبود موجودی بر روی نقاله به مقدار کافی موجودی بر روی نقاله در دسترس است. نتیجه آن شبیه به این است که در تعداد دستگاه ها و امکانات، افزایشی صورت گرفته باشد. در طراحی خط برای شروع کار دیرتر، یک نقطه بازگشت ثابت صفر برای هر ایستگاه کاری تعریف شده است و هر دو نمایش مکانی مثبت و منفی مجاز است. همیشه اپراتور از سمت نقطه بازگشت صفر شروع و به سمت محصول حرکت می کند. وقتی به نقطه اولیه برمی گردد، در نقطه اولیه می ایستد و منتظر می ماند تا واحد بعدی برسد. این امر ممکن است باعث اتلاف زمان شود.

## ۲-۲- فرضیات، علایم و مدل ریاضی

در تعریف مساله فرض بر این است که اپراتور اجازه ندارد در کارهای مربوط به ایستگاه های دیگر دخالت کند یا به یک واحد مشابه سرویس دهی نماید. ایستگاه های کاری بسته فرض می شود و تعداد  $M$  مدل محصول برای مونتاژ در طول خط که شامل  $I$  ایستگاه کاری است. در نظر گرفته شده است. بر روی هر مدل  $m$  از هر یک از محصولات، کارهای مختلفی صورت می گیرد تا محصول به صورت تکمیل شده از خط خارج شود. مجموع زمان لازم برای مونتاژ یک واحد از مدل  $i$  در ایستگاه  $z$  با  $t_{ij}$  نشان داده می شود. محصولات به صورت ثابت بر روی نقاله که با سرعت  $V_c$  حرکت می کند بسته شده اند.  $\gamma$  مدت زمان سپری شده از اتمام یک محصول تا رسیدن به محصول بعدی برای شروع کار بر روی آن است. فاصله ای که اپراتور پس از اتمام محصول تا رسیدن به محصول بعدی یا تا فاصله نقطه شروع صفر (هر کدام که کمتر باشد) طی می کند برابر است با  $W = V_c \cdot \gamma$ . نرخ

تقاضا برای هر مدل  $m$  که در افق برنامه ریزی مشخص است با  $d_m$  نشان داده می شود. تعداد محصولاتی که در هر دوره ترتیب بندی می شوند از رابطه زیر به دست می آید.

$$I = \sum_{m=1}^M d_m \quad (3)$$

ماتریس  $X$  ترتیب بندی مدل ها را نشان می دهد. هر عنصر  $x_{im}$  مقدار یک می گیرد اگر  $i$  امین واحد از مدل  $m$  در ترتیب بندی قرار گیرد و در غیر این صورت مقدار صفر می گیرد. تعداد  $I$  عنصر غیرصفر در ماتریس  $X$  وجود دارد. اندیس  $i$  ( $i=1, \dots, I$ ) نشان دهنده  $i$  امین محصولی است که باید مونتاژ شود.  $i$  را به صورت موقعیت در ترتیب بندی نیز تعریف می کنیم مثلاً مرحله  $i$  اپراتور در ایستگاه  $z$  کار بر روی واحد  $i$  را که در ترتیب بندی در یک موقعیت  $Z_{ij}$  که در ارتباط با نقطه شروع صفر است شروع می کند. موقعیت او پس از اتمام کارش بر روی محصول برابر است با  $Y_{ij}$ . طول ایستگاه  $z$  ام با  $Y^z$  نشان داده می شود و مقدار آن بیشترین مقدار  $Y_{ij}$  در تمامی  $i$  ها است. تابع هدف، حداقل کردن ترکیبی خطی از کل طول خط و تفاوت تولید از نسبت تقاضا است. پس نسبت تقاضا برای مدل  $m$  از کل تقاضا برابر با  $r_m = \frac{d_m}{I}$  در نظر گرفته می شود.

مقدار  $X_{im} \in \{0, 1\}$ ;  $m=1, \dots, M$ ,  $i=1, \dots, I$ ، زمانی تولید است. اگر  $X_{im}=1$  آنگاه محصول  $m$  در مرحله  $i$  تولید خواهد شد و برای همه  $i$  ها  $\sum_{m=1}^M X_{im} = 1$  چون در هر مرحله فقط یک محصول مونتاژ می شود. مقدار  $S_{im} = \sum_{l=1}^i X_{lm}$  برابر است با مجموع کل تولید محصول نوع  $m$  از مرحله ۱ تا مرحله  $i$  به طور مشخص مقدار  $S_{im}$  یک مقدار عدد صحیح غیرمنفی است و  $\sum_{m=1}^M S_{im} = 1$  برای همه  $i$  ها.

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \left| \sum_{l=1}^i \frac{X_{lm}}{i} - \frac{d_m}{I} \right| \quad (4)$$

در مدل پیشنهادی تابع هدف شماره ۴ در نظر گرفته می‌شود.

$i$  = موقعیت یک محصول در ترتیب بندی ( $i=1,2,\dots,I$ )  
 $j$  = ایستگاه کاری ( $j=1,2,\dots,J$ )

$m$  = نوع مدل ( $m=1,2,\dots,M$ )

$V_c$  = سرعت نقاله.

$V_o$  = سرعت اپراتور.

$d_m$  = تقاضای مدل نوع  $m$  براساس MPS.

$t_{jm}$  = زمان لازم برای مونتاژ مدل نوع  $m$  در ایستگاه  $j$

$I$  = تعداد محصولات در ترتیب بندی ( $I = \sum_{m=1}^M d_m$ )

$J$  = تعداد ایستگاه‌های کاری.

$M$  = تعداد انواع مدل.

$\beta$  = فاکتور وزن‌دهی اجزاء تابع هدف.

$T$  = مقدار کل کار ( $T = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M t_{jm} d_m$ )

$\gamma$  = تغذیه داخلی خط  $\gamma = T/(I*J)$

$W$  = فاصله‌ای که اپراتور با فرض عدم توقف طی می‌کند.

$W = V_o \gamma \frac{V_o}{V_o + V_c}$  وقتی  $V_o$  (سرعت اپراتور) نسبت به نقاله

خیلی زیاد باشد  $W = V_c \times \gamma$

متغیرهای تصمیم مورد استفاده  $X_{jm}$  متغیر تصمیم

صفر و یک است که برابر با یک خواهد بود اگر مدل  $m$

در موقعیت  $i$  باشد در غیر این صورت، برابر صفر است.

$Z_{ij}$  موقعیت اپراتور هنگام شروع به کار در ایستگاه  $j$  قبل

از اینکه مونتاژ محصول  $i$  ام را در ترتیب بندی آغاز کند

را نشان می‌دهد.  $Y_j^+$  حداکثر جابجایی اپراتور در ایستگاه

زبوده و  $Y_{ij}$  موقعیت اپراتور هنگام اتمام کار در ایستگاه  $j$

بعد از اینکه مونتاژ محصول  $i$  ام را در ترتیب بندی تمام

شد را مشخص می‌کند. با توجه به متغیرهای تعیین شده

مدل ریاضی به صورت زیر ارائه می‌شود.

$$Y_{0j} = 0 \quad \forall j \quad (9)$$

$$x_{jm} \in \{0,1\}, \quad Z_{ij}, Y_{ij} \geq 0, \quad (10)$$

معیار اول در معادله (۵) مربوط به مجموع طول خط است. معیار دوم نشان‌دهنده انحرافات از نسبت تقاضا است. فاکتور وزن‌دهی  $\beta$  (بین صفر و یک) میزان اهمیت هر معیار را تنظیم و تعدیل می‌کند و یا به سمت مرز کارایی هدایت می‌کند. وقتی  $\beta=1$  باشد روش بار [۱۸] مورد پذیرش قرار می‌گیرد و وقتی  $\beta=0$  باشد روش میلتن‌بورگ [۱۳] مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر حداقل کردن زمان عملکرد مطلوب‌تر از طول خط باشد، باید ارزش کمتری به معیار اول داده شود. محدودیت‌های سوم و چهارم (۷) و (۸) پیگیری موقعیت شروع و پایان هر اپراتور در هر ایستگاه کاری زبر روی محصول  $i$  در ترتیب بندی می‌باشد. طول ایستگاه  $Z$  توسط محدودیت پنجم (۹) تعریف می‌شود و شرایط اولیه در محدودیت ششم (۱۰) داده شده است. فرض بر این است که نقاله از چپ به راست حرکت می‌کند و هر اپراتور کار بر روی اولین محصول را از لبه سمت چپ ایستگاه شروع می‌کند. با توجه به ماهیت مساله و محدودیت‌های تعریف شده، مدل ریاضی ارائه شده غیرخطی است. با به‌کارگیری روش فوق ابتکاری الگوریتم ژنتیک، برای جستجوی بهترین جواب از فضای حل، به طراحی عملگرها و مکانیزم انتخاب و ارائه نمایش کروموزم و تعیین تابع برازندگی به صورت خاص، برای مساله مورد مطالعه پرداخته می‌شود.

### ۳- طراحی الگوریتم ژنتیک

#### ۳-۱- نحوه نمایش جواب

در این قسمت نحوه حل مساله توسط روش فوق ابتکاری ژنتیک تشریح می‌شود. در ابتدا به نحوه نمایش جواب‌ها، عملگرهای به کار گرفته شده و نحوه تولید جمعیت اولیه پرداخته می‌شود و در نهایت با شرح الگوریتم، فلوچارت آن نمایش داده می‌شود. در تمام الگوریتم‌های فراابتکاری به دلیل نیاز به حل اولیه<sup>۱</sup> در شروع کار، لازم است تا حل شدنی را بر طبق ساختار

$$\min \Psi = \beta \left[ \sum_{j=1}^J Y_j^+ \right] + (1-\beta) \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M \left| \sum_{j=1}^J \frac{X_{jm}}{i} - \frac{d_m}{I} \right| \right] \quad (5)$$

$$Z_{ij} = \max(0, Y_{i-1,j} - W) \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$Y_{ij} = V_c \left[ \sum_{m=1}^M X_{jm} t_{jm} \right] + Z_{ij} \quad \forall i, j \quad (7)$$

$$Y_j^+ = \max(Y_{ij}, i \in [1, I]) \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^{CP} X_{im}^1 = \sum_{i=1}^{CP} X_{im}^2 \quad (15)$$

شرط فوق تضمین می‌کند که روابط (I) و (II) نیز در کروموزوم‌های جدید برقرار باشند.

(ب) عملگر جهش: برای اعمال این عملگر ابتدا یک کروموزوم به تصادف از جمعیت فعلی انتخاب شده سپس دو سطر از این کروموزوم نیز به تصادف انتخاب و درایه‌های این دو سطر با یکدیگر تعویض می‌شوند.

(ج) عملگر معکوس: برای اعمال این عملگر ابتدا یک کروموزوم به تصادف از جمعیت فعلی انتخاب شده سپس کلیه درایه‌های آن در جهت ستونی معکوس می‌شوند.

### ۳-۳- نحوه تولید جمعیت اولیه

برای تولید اولین نسل الگوریتم (جمعیت اولیه)، تعداد  $K$  (تعداد جمعیت هر نسل به عنوان ورودی الگوریتم) کروموزوم به صورت تصادفی بایستی تولید شود به گونه‌ای که روابط (I) و (II) ارضا شود.

### ۳-۴- نحوه انتخاب جمعیت والد

برای تولید نسل جدید باید تعدادی والد با بهترین برازندگی از نسل فعلی انتخاب شوند. برای انتخاب بهترین کروموزوم‌ها ابتدا مقادیر برازندگی (مقدار هدف) کروموزوم‌های نسل فعلی به صورت زیر نرمالیزه می‌شود.

$$Z_i = \frac{F_i - \mu}{\delta} \quad (16)$$

به طوری که  $F_i$  برابر برازندگی کروموزوم  $i$  ام بوده،  $\mu$  میانگرمیانگین نسل جاری،  $\delta$  بیانگر انحراف از میانگین نسل جاری و  $Z_i$  بیانگر برازندگی نرمالیزه شده کروموزوم  $i$  ام است. حال با توجه به کمینه‌سازی مدل ریاضی، آن دسته از کروموزوم‌هایی که در رابطه  $0 \leq Z_i$  صدق می‌کنند به عنوان جمعیت والد نسل بعدی انتخاب می‌شوند.

### ۳-۵- قدم‌های الگوریتم

قبل از ارایه قدم‌های مربوط به الگوریتم، فرض‌های مساله تعیین می‌شود.

مشخصی ذخیره کنیم که به آن ساختار، نحوه نمایش جواب می‌گویند. در اصطلاح ژنتیک به این ساختار کروموزوم گفته می‌شود. با توجه به ماهیت مساله مورد بررسی، از آنجاکه مقادیر متغیر باینری  $X_{i,M}$  بیانگر یک حل خواهد بود. ساختار جواب را به صورت ماتریسی نیز می‌توان نشان داد. به عبارت دیگر هر کروموزوم ساختاری به شکل زیر خواهد داشت.

$$\begin{bmatrix} X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,M} \\ X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & X_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{I,1} & X_{I,2} & \dots & X_{I,M} \end{bmatrix}$$

ماتریس فوق یک ماتریس باینری است که درایه‌های آن بایستی محدودیت‌های اول و دوم مدل ریاضی را ارضا کند. به عبارت دیگر باید:

$$\sum_{i=1}^I X_{im} = d_m \quad \forall m \quad (I) \quad (17)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{im} = 1 \quad \forall i \quad (II) \quad (18)$$

### ۳-۲- عملگرها

در الگوریتم ژنتیک برای دستیابی به حل جدید (حل همسایه) از دو عملگر متداول تقاطع و جهش استفاده می‌شود که با توجه به ساختار کروموزوم طراحی می‌شوند. در این الگوریتم از عملگر دیگری به نام عملگر معکوس نیز استفاده شده است تا کیفیت حل‌های به دست آمده افزایش یابد. با توجه به ساختار ماتریسی در نظر گرفته شده برای کروموزوم‌ها در این مساله، این عملگرها به صورت زیر طراحی می‌شوند.

(الف) عملگر تقاطع: برای اعمال این عملگر ابتدا دو کروموزوم به صورت تصادفی از نسل جاری انتخاب شده سپس با انتخاب یک نقطه تقاطع در جهت سطری، دو کروموزوم را آمیزش داده تا فرزندان جدید حاصل شوند. البته نقطه تقاطع بایستی به گونه‌ای انتخاب شود که کروموزوم‌های جدید نیز حل شدنی باشند یعنی روابط (I) و (II) در آنها صدق کند. به همین دلیل نقطه تقاطع بایستی به گونه‌ای انتخاب شود که رابطه زیر برای بین دو کروموزوم والد برقرار باشد.

۱- در کلیه مراحل عملیات فوق منظور از انتخاب تصادفی، انتخاب براساس توزیع یکنواخت گسسته است، حال آنکه می‌تواند توسط هر توزیع دیگری مانند توزیع نرمال و غیره نیز صورت گیرد.

۲- انتخاب نوع عملگر در هر تکرار الگوریتم بر اساس وزن داده شده است.

۳- تعداد جمعیت هر نسل سی برابر مقدار  $K$  و پارامتر  $G$  شماره نسل حداکثر است. این شمارنده می‌تواند برابر  $G_{max}$  (معیار توقف) باشد.  $Rpt_{Max}$  حداکثر تعداد تکرارهای مجاز جهت تولید نسل جدید است. اگر مقدار این پارامتر نقض شود، برای تکمیل نسل فعلی از عملگر تولید مجدد استفاده خواهد شد.  $Cp$  شمارنده تعداد جمعیت نسل فعلی است. مقدار این شمارنده باید برابر با  $K$  شود.  $\varepsilon$  حداقل مقدار مجاز برای انحراف از میانگین نسل‌ها (معیار توقف) و  $Var_{Gen}$  واریانس نسل جاری است.

قدم ۱۵- با توجه به نوع عملگر انتخابی، یک یا دو کروموزوم را از جمعیت والد به تصادف انتخاب کرده و سپس عملگر را به روی آنها اعمال کنید.

قدم ۱۶- اگر برازندگی فرزندان جدید نسبت به والدین آنها بهبود نیافته باشد به قدم ۱۷ بروید و اگر بهبود یافته باشد به قدم ۱۸ بروید.

قدم ۱۷- فرزندان را حذف کنید و به قدم ۱۱ بروید.

قدم ۱۸- فرزندان جدید را ذخیره کنید و قرار دهید  $Cp+2$  یا  $Cp=Cp+1$ .

قدم ۱۹- اگر مقدار  $Cp \geq k$  باشد به قدم ۴ بروید اگر نباشد به قدم ۱۱ بروید.

شکل (۱) فلوچارت الگوریتم ژنتیک را بر اساس قدم‌های ذکر شده ارائه می‌دهد.

#### ۴- نتایج محاسباتی

در این قسمت نحوه طراحی مسایل، نتایج حل مساله به همراه نتیجه‌گیری خواهد آمد. برای اندازه‌گیری کارایی الگوریتم ژنتیک ارائه شده معیاری در نظر گرفته می‌شود. برای نشان دادن کارایی الگوریتم ژنتیک، از یک نمونه کاربردی از خطوط مونتاژ تزئینات یک شرکت خودروسازی استفاده شده تا توانایی و نقاط ضعف این الگوریتم را نشان دهد. از آنجا که این الگوریتم برای نمونه عملی ارائه شده، زمان‌های پردازش به کارگرفته شده در مساله عیناً از ارقام واقعی گرفته می‌شود.

یکی از پارامترهای مهم در تابع هدف مقدار  $\beta$  بوده که برای در نظر گرفتن حالت‌های مختلف، مقدار این پارامتر با اندازه‌های ۰، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱ در مساله به کار برده می‌شود. برای سنجش کارایی الگوریتم با استفاده از مقادیر مختلف  $\beta$ ، پنج دسته مساله با  $\beta=0$ ،  $\beta=0/3$ ،  $\beta=0/5$ ،  $\beta=0/7$  و  $\beta=1$  ایجاد می‌شود. مسایل در هر دسته ۵ بار حل شده و میانگین جواب‌های این پنج تکرار به عنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته می‌شود. این نتیجه‌گیری برای ۲ سالن تزئینات با مدل‌های مختلف به دست می‌آید. سالن اول مربوط به مدل‌های  $A_1$ ،  $A_2$  و مدل  $A_3$  با دو تیپ یک و سه، سالن دوم برای مدل‌های  $B_1$ ،  $B_2$ ،  $B_3$  و  $B_4$  و سالن سوم نیز برای تزئین دو مدل  $A_1$  و  $C_2$  مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مسایل با کامپیوتر شخصی پنتیوم ۴ حل شده است.

قدم ۱- شروع

قدم ۲- مقدار  $G$  را برابر صفر قرار دهید.

قدم ۳- جمعیت اولیه را تولید نمایید.

قدم ۴- نسل جدید را نرمالیزه کنید.

قدم ۵- اگر مقدار  $\varepsilon \leq Var_{Gen}$  باشد به قدم ۶ بروید، اگر نه به قدم ۷ بروید.

قدم ۶- کروموزوم‌های دارای بهترین برازندگی را در خروجی چاپ و توقف کنید.

قدم ۷- مقدار  $G$  را برابر  $G+1$  قرار دهید:  $G=G+1$  و به قدم ۸ بروید.

قدم ۸- اگر مقدار  $G \geq G_{max}$  باشد به قدم ۶ بروید، اگر نه به قدم ۹ بروید.

قدم ۹- جمعیت والد را انتخاب کنید.

قدم ۱۰- مقدار  $Cp$  و  $Rpt$  را برابر صفر قرار دهید.

قدم ۱۱- یکی از عملگرهای تقاطع، جهش یا معکوس را به تصادف انتخاب کنید.

قدم ۱۲- مقدار  $Rpt=Rpt+1$ .

قدم ۱۳- اگر مقدار  $Rpt \geq Rpt_{Max}$  باشد به قدم ۱۴ وگرنه به قدم ۱۵ بروید.

قدم ۱۴- برای تکمیل نسل کنونی از عملگر تولید مجدد استفاده کنید و به قدم ۴ بروید.



مقایسه نتایج به دست آمده در رابطه با سالن اول این نتیجه قابل استنتاج است که در این سالن نتایج به دست آمده نسبت به سالن اول دارای خطای بیشتری است.

جدول (۱): نتایج حل مساله در سالن تزیینات اول

D	Z <sub>LINGO</sub>	T <sub>LINGO</sub>	Z <sub>GA</sub>	T <sub>GA</sub>	$\beta$
+۲/۲۸۳	۱۸۱۴۶/۹	۱۸۰۰	۱۸۱۴۹/۱۸۳	۰	۰
+۴/۱۹۶	۱۰۸۹۰/۷	۱۵۰۰	۱۰۸۹۴/۱۹۶	۰	۰/۳
+۱/۲۲۹	۲۵۴۰۳/۴	۱۵۶۰	۲۵۴۰۴/۲۲۹	۰	۰/۵
+۰/۳۰۳	۱۰/۶۴۸	۲۱۰۰	۱۰/۹۵۱	۴	۰/۷
-۰/۰۴۰	۳۶۲۸۷/۹	۱۴۲	۳۶۲۸۷/۸۶	۰	۱

جدول (۲): نتایج حل مساله در سالن تزیینات دوم

D	Z <sub>LINGO</sub>	T <sub>LINGO</sub>	Z <sub>GA</sub>	T <sub>GA</sub>	$\beta$
-۰/۹۵۳	۱۳/۲۶۷	۱۹۲۰	۱۳/۲۲	۱	۰
+۸/۰۵۰	۴۵۴۲/۸۸	۶۰۰	۴۵۵۰/۹۳	۰	۰/۳
+۴	۷۵۶۸/۹	۶۰۰	۷۵۷۲/۹	۱	۰/۵
+۶/۰۸۰	۱۰۵۹۲/۵	۵۴۰	۱۰۵۹۸/۵۸	۲	۰/۷
+۸/۱۶۰	۱۵۱۲۹/۳	۴۸۰	۱۵۱۳۷/۴۶	۰	۱

سالن تزیینات سوم با ۲ مدل و ۳۷ ایستگاه کاری فعالیت می کند. تقاضا این مدل در یک دوره یک ساعته به ترتیب ۱۲ و ۱۰ دستگاه است. خلاصه نتایج مربوط به این سالن در جدول (۳) آورده شده است. همان طور که در جدول (۳) مشاهده می شود الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده در زمان قابل قبول و بسیار کمتری نسبت به نرم افزار لینگو ۶ به جواب می رسد. از طرفی همان طور که در ستون D مشاهده می شود میزان خطا در به دست آوردن جواب بسیار ناچیز است. در این سالن

خلاصه نتایج حل مسایل سالن تزیینات اول با در جدول شماره (۱) آورده شده است. ستون T<sub>GA</sub> مدت زمان اجرای الگوریتم را به ثانیه نشان می دهد. بهترین مقدار به دست آمده تابع هدف از اجرای الگوریتم ژنتیک برای یکنواخت کردن مصرف قطعات و کمینه کردن طول خط در ستون Z<sub>GA</sub> وجود دارد. برای تست کردن صحت جواب به دست آمده الگوریتم از نرم افزار لینگو ۶ استفاده شده است. در ستون T<sub>LINGO</sub>، زمان اجرای نرم افزار به ثانیه آورده شده است. در ستون Z<sub>LINGO</sub>، مقدار تابع هدف به دست آمده از نرم افزار لینگو ۶ ارایه شده است. در ستون D نیز مقدار اختلاف بهترین تابع هدف به دست آمده از الگوریتم ژنتیک و نرم افزار لینگو ۶ درج می شود. خلاصه نتایج مربوط به این سه سالن در جداول شماره ۱ تا ۳ درج و تحلیل مربوطه آورده شده است.

همان طور که گفته شد سالن اول با ۴ مدل مشغول به کار است. این سالن دارای ۶۴ ایستگاه کاری بوده که کار تزیینات در آن انجام می شود. تقاضاهای در نظر گرفته شده برای این ۴ مدل به عنوان نمونه از موردی عملی استفاده شده که از قسمت فروش برای یکبار سفارش گرفته شده است. این تقاضا برای ۴ مدل به ترتیب ۱۵، ۱۰، ۱۰ و ۵ دستگاه است. همان طور که در جدول (۱) مشاهده می شود الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده در زمان قابل قبول و بسیار کمتری نسبت به نرم افزار لینگو ۶ به جواب می رسد. از طرفی همان طور که در ستون D مشاهده می شود میزان خطای جواب به دست آمده بسیار ناچیز است.

همانند سالن تزیینات اول، سالن تزیینات دوم نیز با ۴ مدل و با ۴۰ ایستگاه کاری مشغول به کار است. تقاضاهای در نظر گرفته شده برای این ۴ مدل به عنوان نمونه از موردی عملی از قسمت فروش برای یک دوره سفارش استخراج شده است. این تقاضا برای ۴ مدل به ترتیب ۲۰، ۱۶، ۷ و ۲ دستگاه می باشد.

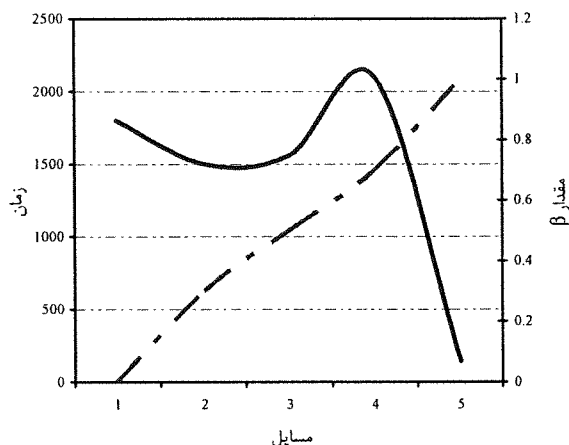
همان طور که در جدول (۲) مشاهده می شود الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده در زمان قابل قبول و بسیار کمتری نسبت به نرم افزار لینگو ۶ به جواب می رسد. از طرفی همان طور که در ستون D مشاهده می شود میزان خطا در به دست آوردن جواب بسیار ناچیز است. بنابراین الگوریتم پیشنهادی مناسب ارزیابی می شود. البته با

نیز همانند دو سالن تزیینات دیگر الگوریتم ژنتیک پیشنهادی دارای کارایی بالاست.

خاصی میان افزایش پارامتر  $\beta$  و زمان محاسبات نرم افزار لینگو وجود ندارد.

جدول (۳): نتایج حل مساله در سالن تزیینات سوم

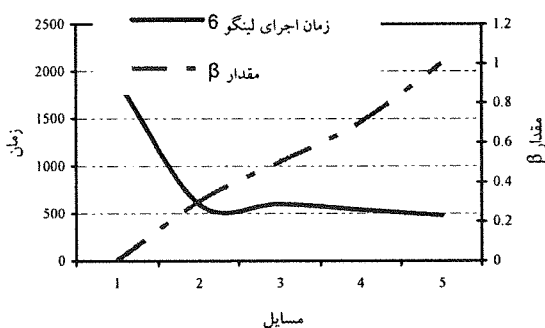
D	Z <sub>LINGO</sub>	T <sub>LINGO</sub>	Z <sub>GA</sub>	T <sub>GA</sub>	$\beta$
+۰/۱۰۶	۲/۱۳۰	۲۰	۲/۲۸۶	۲۲	۰
-۶۹/۹۰	۲۸۹۲/۴۷	۲۰	۲۸۲۲/۵۷	۲۷	۰/۳
+۰/۰۴	۶۴۸۵/۹۶	۲۶	۶۴۸۶	۶	۰/۵
--/۴۲۰	۹۰۷۹/۴۲	۲۵	۹۰۷۹	۴۲	۰/۷
.	۱۲۹۶۹/۶	۳۶۰	۱۲۹۶۹/۶	.	۱



شکل (۲): نمودار تحلیل حساسیت پارامتر  $\beta$  و زمان

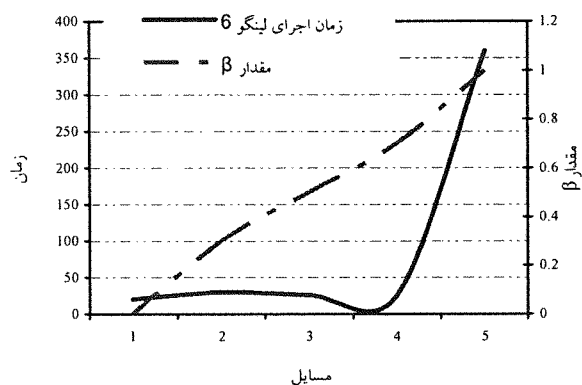
اجرای نرم افزار لینگو در سالن اول

همان طور که اشاره شد، پنج دسته مساله برای هر سالن در نظر گرفته می شود. در هر کدام از این پنج دسته مساله تعداد  $\beta$  با دسته های دیگر متفاوت است. تفاوت در مقدار این پارامتر در تعیین درجه اهمیت و قسمت تابع هدف یعنی یکنواخت کردن مصرف قطعات و حداقل کردن طول خط نهفته است. مجموع ضرایب این پارامتر در این دو قسمت از تابع هدف برابر با یک می شود. پس با افزایش  $\beta$  اهمیت قسمت اول تابع هدف یعنی حداقل کردن طول خط افزایش یافته و اهمیت قسمت دوم یعنی یکنواخت کردن مصرف قطعات کاهش می یابد. با توجه به موضوع ذکر شده هم اکنون می توان ارتباط میان تغییر در  $\beta$  و زمان مصرفی برای حل مسایل را با استفاده از شکل های (۲)، (۳) و (۴) در هر یک از سه سالن تحلیل نمود.



شکل (۳): نمودار تحلیل حساسیت پارامتر  $\beta$  و زمان

اجرای نرم افزار لینگو در سالن دوم



شکل (۴): نمودار تحلیل حساسیت پارامتر  $\beta$  و زمان

اجرای نرم افزار لینگو در سالن سوم

همان طور که در شکل های (۲)، (۳) و (۴) دیده می شود با افزایش پارامتر  $\beta$  ترتیب خاصی به صورت صعودی یا نزولی جهت افزایش زمان محاسبه جواب با استفاده از نرم افزار وجود ندارد. در این حالت بیشترین زمان مصرفی در سالن های اول، دوم و سوم به ترتیب برای پارامتر  $\beta$  با مقدار ۰/۷، ۱ و ۱ بوده است. در نتیجه الگوریتم ژنتیک برای این گونه مسایل کارایی بیشتری را نشان می دهد. با این تحلیل می توان نتیجه گرفت که رابطه

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک مساله تعیین توالی خطوط مونتاژ چندمدلی به منظور حداقل کردن طول خط و هموارسازی مصرف قطعات بررسی شد. برای ارزیابی کارایی الگوریتم ژنتیک از اطلاعات ورودی مربوط به یک نمونه عملی شامل سه سالن تزیینات از صنعت خودروسازی استفاده شد. برای هر یک از سالن‌ها پنج دسته مساله با مقادیر مختلف اهمیت وزنی اجزای مختلف تابع هدف تولید شده و جواب‌های به دست آمده با نرم‌افزار لینگو مقایسه شد. جواب‌های به دست آمده نزدیک بهینه بوده و زمان رسیدن به جواب بسیار کوتاه بود که دلیل بر مناسب بودن الگوریتم ژنتیک پیشنهادی است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک در شرایط متفاوت عملکرد خوب و قابل قبولی دارد و زمان‌های رسیدن به حل بهینه یا نزدیک به بهینه بسیار کم است. زمینه‌های تحقیق می‌تواند در قالب بررسی ورود بیکاری عمدی در توالی، نقض فرض در دسترس بودن قطعات در زمان صفر، عدم قطعیت در تعداد سفارش‌های دوره‌ای محصول مورد بررسی قرار گیرد.

## ۶- ضمایم: فهرست علائم

$M$  = تعداد انواع مدل.  
 $J$  = تعداد ایستگاه‌های کاری.  
 $t_{jm}$  = زمان لازم برای مونتاژ مدل نوع  $m$  در ایستگاه  $j$ .  
 $V_C$  = سرعت نقاله.  
 $W$  = فاصله طی شده اپراتور پس از اتمام محصول تا نقطه شروع صفر.  
 $d_m$  = تقاضای مدل نوع  $m$ .  
 $V_o$  = سرعت اپراتور.  
 $Var_{Gen}$  = واریانس نسل جاری.  
 $Z_{ij}$  = موقعیت اپراتور در هنگام شروع کار برای واحد  $i$  در ایستگاه  $j$ .  
 $T$  = مقدار کل کار.  
 $Y_{ij}$  = موقعیت اپراتور هنگام اتمام کار در ایستگاه  $j$  پس از اتمام کار.  
 $Y_r$  = طول ایستگاه  $r$ ام.  
 $Rpt$  = تعداد تکرارهای مجاز جهت تولید نسل.  
 $G$  = شمارنده نسل.

$Rpt_{max}$  = حداکثر تعداد تکرارهای مجاز جهت تولید نسل.

$G_{max}$  = معیار توقف.

$F_i$  = برانزنگی کروموزوم  $i$ .

$Z_i$  = برانزنگی نرمالیزه شده کروموزوم  $i$ .

$C_P$  = شمارنده تعداد جمعیت نسل فعلی.

$m$  = نوع مدل.

$\beta$  = فاکتور وزن‌دهی در تابع هدف.

$\delta$  = انحراف از میانگین نسل جاری.

$\mu$  = میانگین نسل جاری.

$\gamma$  = تغذیه داخلی خط.

$\epsilon$  = حداقل مجاز برای انحراف از میانگین نسل‌ها.

## ۷- مراجع

- [۱] Baker, K.R.; *Introduction to sequencing and scheduling*, John Wiley, New York, 1974.
- [۲] Falkenauer, E.; *Genetic algorithms and grouping problems*, John Wiley & Sons, 1998.
- [۳] Hyun, C.J.; Kim, Y.; Kim, Y.K.; "A genetic algorithm for multiple objectives sequencing problem in mixed-model assembly lines", *Computers and Operational Research*, Vol. 25, pp. 675-690, 1998.
- [۴] Steiner, G.; Yeomans, J.S.; "Optimal level schedules in mixed-model, multi-level JIT assembly systems with pegging", *European Journal of Operational Research*, Vol. 95, pp. 38-52, 1996.
- [۵] Thomopoulos, N.T.; "Line balancing-sequencing for mixed-model assembly", *Management Science*, Vol. 14, No. 2, pp. 59-75, 1967.
- [۶] Xiabo, Z.; Ohno, K.; "A sequencing problem for a mixed model assembly line in a JIT production system", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 27, No.s 1-4, pp. 71-74, 1994.
- [۷] Xiabo, Z.; Ohno, K.; "Algorithms for Sequencing mixed models on an assembly line in a JIT Production system", *computers & Industrial Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 47-56, 1997.
- [۸] Zhuqi, X.; Shusahu, Xu.; "A study on sequencing method for the mixed model assembly line in just in time production system", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 27, No.s 1-4, pp. 225-228, 1994.
- [۹] Monden, Y.; *Toyota production system*, 2<sup>nd</sup> edition, Institute of Industrial Engineers, 1993.
- [۱۰] Salvendy, G.; *Handbook of Industrial Engineering*, John Wiley & Sons, 1982.

- Bolat, A.; Savsar, M.; "Al-Fawzan, Algorithms for real-time scheduling of jobs on mixed model assembly lines", Computers and Operations Research, Vol. 21, No. 5, pp. 487-498, 1994. [۱۷]
- Kim, Y.K.; Hyun, C.J.; Kim, Y.; "Sequencing in mixed-model assembly lines: A genetic algorithm approach", Computers and Operations Research, Vol. 23, No. 12, pp. 1131-1145, 1996. [۲۱]
- Yano, C.A.; Rachamadugu, R.; "Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options", Management Science, Vol. 37, No. 5, pp. 572-586, 1991. [۲۲]
- Sumichrast, R.T.; Russell, R.A.S.; Taylor, B.W.; "A comparative analysis of sequencing procedure for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems", International Journal of Production Research, Vol. 30, No. 1, pp. 199-214, 1992. [۲۳]
- Miltenburg, G.J.; Goldstein, T.; "Developing production schedules with balance part usage and smooth production load for just-in-time production systems", Naval Research Logistics, Vol. 38, pp. 893-910, 1991. [۲۴]
- Bard, J.F.; Dar-el, E.; Shtub, A.; "An analytic framework for sequencing mixed-model assembly lines to level pates usage and minimize line length", International Journal of Production Research, Vol. 32, No. 15, pp. 2431-2454, 1994. [۲۵]
- Miltenburg, J.; Sinnamon, G.; "Scheduling mixed-model multi level just in time production systems", International Journal of Production Research, Vol. 27, No. 9, pp. 1487-1509, 1989. [۱۸]
- Aigbedo, H.; Monden, Y.; "A parametric procedure for multi-criterion sequence scheduling for Just-In-Time mixed-model assembly lines", International Journal of Production Research, Vol. 35, No. 9, pp. 2543-2564, 1997. [۱۹]
- Miltenburg, J.; "Level schedules for mixed model assembly lines in just-in-time production systems", Management Science, Vol. 35, No. 2, pp. 192-207, 1989. [۱۸]
- Pleschberger, T.E.; Hitomi, K.; "Flexible final-assembly sequencing method for a JIT manufacturing environment", International Journal of Production Research, Vol. 31, No. 5, pp. 1189-1199, 1993. [۱۲]
- Inman, R.R.; Bulfin, R.L.; "Sequencing JIT mixed-model assembly lines", Management Science, Vol. 37, No. 7, pp. 901-904, 1991. [۱۳]
- Inman, R.R.; Bulfin, R.L.; "Quick and dirty sequencing for mixed-model multi-level JIT systems", International Journal of Production Research, Vol. 30, No. 9, pp. 2011-2018, 1992. [۱۴]
- Kubiak, W.; Sethi, S.; "A note on level schedules for mixed model Lines in just-in-time production systems", Management Science, Vol. 37, No. 1, pp. 121-122, 1991. [۱۵]
- Bard, J.F.; Dar-el, E.; Shtub, A.; "An analytic framework for sequence scheduling mixed-model assembly lines", International Journal of Production Research, Vol. 30, No. 1, pp. 35-48, 1992. [۱۶]

#### زیر نویس ها

- ١ Assembly Line
- ٢ Mixed-Model
- ٣ Just In Time
- ٤ Goal Chasing
- ٥ Heuristic Method
- ٦ Kanban
- ٧ Earliest Due Date
- ٨ Set-up Time
- ٩ Part Usage
- ١٠ Line Length
- ١١ Initial Solution