مجله‌ی علمی و پژوهشی شریف
دی ۱۳۸۷، شماره‌ی چهل و پنجم، ص. ۲۲-۲۲

بررسی سیستم‌های حمل‌ونقل اتوماتیک مواد در مونتاژ انعطاف‌پذیر (مطالعه‌ی موردی مونتاژ موتورسیکلت)

محمود هوشمند (دانشیار)
محسن تقوی (کارشناس ارشد)
دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف

به‌منظور مونتاژ محصولات متنوع می‌توان از خطوط مونتاژ جداگانه برای هر محصول، یک خط مونتاژ برای چندین محصول یا سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر بهره جست. عمده‌ی مطالعات و مقایسات انجام‌گرفته در این مورد به بررسی و مقایسه‌ی تولید محصولات متنوع در خطوط جداگانه یا در یک خط مونتاژ پرداخته‌اند. سیستم حمل‌ونقل مواد مورد استفاده در این نوع تولید نوار نقاله است. بررسی سیستم‌های مونتاژ انعطاف‌پذیر[1] باید با توجه به نیازمندی‌های بازار جدید انجام شود؛ در این سیستم‌ها از سیستم حمل‌ونقل هدایت‌شونده‌ی خودکار[2] (AGV) استفاده می‌شود. در این نوشتار سیستم‌های مونتاژ سنتی و انعطاف‌پذیر را به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهیم. به‌منظور مقایسه‌ی سیستم‌های مونتاژ از معیارهایی همچون میزان تغییرات سیستم در برابر تغییر تقاضای محصولات، متعادل‌بودن حجم کاری ایستگاه‌های کاری، کارایی سیستم حمل‌ونقل و کارایی کلی سیستم مونتاژ استفاده شده است. مثال کاربردی در این مورد مونتاژ دو نوع موتور سیکلت است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که میزان تغییرات سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر در برابر تغییر تقاضا کم است و معیارهای کارایی بهتری نسبت به سیستم‌های خط مونتاژ دارد.

واژگان کلیدی: سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر، خط مونتاژ، نوار نقاله، سیستم حمل و نقل هدایت‌شونده‌ی خودکار(AGV).

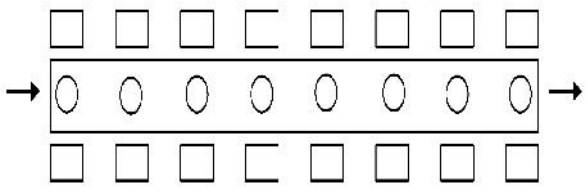
hoshmand@sharif.edu
mohsentaghavi@gmail.com

۱. مقدمه

خطوط مونتاژ از زمان هنری فورد برای تولید انبوه مورد استفاده قرار گرفته‌اند.[1] این خطوط از تعدادی ایستگاه‌های مونتاژ که سیستم حمل‌ونقل آنها نوار نقاله است تشکیل شده‌اند. با افزایش تنوع محصولات، این خطوط مونتاژ منفرد (ساده)[3] ــ که در آن صرفاً یک محصول تولید می‌شد ــ به خطوط مونتاژ مختلط[4] ــ که در آن‌ها محصولات متنوعی تولید می‌شوند ــ تبدیل شدند. پیشرفت در زمینه‌ی رایانه و استفاده از سیستم‌های حمل‌ونقل هدایت‌شونده‌ی خودکار (AGV) زمینه‌ساز ظهور سیستم‌های مونتاژ انعطاف‌پذیر بود. منظور از سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر سیستمی است که در ارتباط با تغییرات داخل و خصوصاً تغییرات خارج انعطاف‌پذیری دارد. به‌منظور تولید محصولات متنوع، نیازمند انتخاب از میان سیستم‌های مونتاژ هستیم. عمده‌ی مطالعات پیشین به بررسی و مقایسه‌ی خطوط مونتاژ منفرد (ساده) و خطوط مونتاژ مختلط پرداخته‌اند. در این تحقیق پس از بررسی سیستم‌های دارای خط مونتاژ منفرد (ساده)، خط مونتاژ مختلط و سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر، به‌کمک یک مثال واقعی و براساس پاره‌یی معیارهای عملکرد، به مقایسه‌ی این ۳ سیستم می‌پردازیم.

۲. خط مونتاژ منفرد (ساده)

از سیستم خط مونتاژ منفرد برای محصولات با تقاضای زیاد استفاده می‌شود و تنوعی در محصول وجود ندارد. در این مدل برای هر محصول از یک خط مونتاژ جداگانه استفاده می‌شود.[2] شکل ۱ ساختار فیزیکی خط مونتاژ منفرد را نشان می‌دهد. مهم‌ترین مسئله‌ی تصمیم‌گیری درمورد این خطوط، مسئله‌ی متعادل‌سازی حجم کاری ایستگاه‌های مونتاژ است. ورودی این مسئله فعالیت‌های مونتاژ با زمان‌های قطعی، و نیز روابط میان فعالیت‌ها هستند. هدف این مسئله کمینه‌کردن تعداد ایستگاه‌های کاری یا زمان کاری ایستگاه گلوگاه است که به‌ترتیب تحت عنوان SALBP-1 و SALBP-2 از آن‌ها یاد می‌شود.[3] به‌منظور طراحی اولیه و مشخص‌کردن تعداد ایستگاه‌ها از مسئله‌ی SALBP-1 استفاده می‌کنیم. ضعف مدل SALBP-1 در این است که ممکن است زمان سیکل کم‌تری از زمان ایستگاه گلوگاه با همان تعداد



شکل ۱. ساختار فیزیکی خط مونتاژ منفرد.

Archive of SID

www.SID.ir

ایستگاه را نتیجه دهد. برای این منظور مدل SALBP-2 را برای تعداد ایستگاه به دست آمده از مدل SALBP-1 حل می‌کنیم و این رویه را تا زمانی که تغییری در جواب‌ها ایجاد نشود، ادامه می‌دهیم.[۴]

۳. خط مونتاژ مختلط

این نوع مدل برای تولید دو یا چند نوع محصول طراحی شده است، با این تفاوت که محصولات به‌طور همزمان مونتاژ می‌شوند. یعنی در حالی که یک محصول در یک ایستگاه رو به کامل شدن است محصول دیگر در ایستگاه دیگر کامل می‌شود. از سیستم‌های مونتاژ مختلط معمولاً در مونتاژ نهایی خودروها و تجهیزات خانگی استفاده می‌شود. در این سیستم مجموعه‌یی از محصولات مونتاژ می‌شوند (شکل ۲). جهت حرکت در این مدل مونتاژ یک‌طرفه است و به‌منظور مرتب‌کردن آن از یک زمان سیکل مشترک برای محصولات استفاده می‌شود. نمادگذاری برای این مدل به‌شرح زیر است:

۱. اندیس‌ها

i: ایستگاه مونتاژ $\quad i \in I = \{1, \cdots, m\}$

j: فعالیت مونتاژ $\quad j \in J = \{1, \cdots, n\}$

k: محصول $\quad k \in K = \{1, \cdots, v\}$

۲. پارامترهای ورودی

p_{jk}: زمان مونتاژ فعالیت j محصول kام؛

q_{il}: زمان حمل‌ونقل لازم برای جابه‌جایی محصول از ایستگاه i به l؛

I_j: مجموعه ایستگاه‌هایی که قادر به انجام فعالیت jام هستند؛

J_k: مجموعه فعالیت‌های لازم برای تولید محصول kام؛

R_k : مجموعه جفت‌فعالیت‌های مونتاژ (j, r)، به‌طوری که فعالیت j قبل از فعالیت r انجام شود؛

λ: ضریب وزنی در تابع هدف، $0 \leq \lambda \leq 1$؛

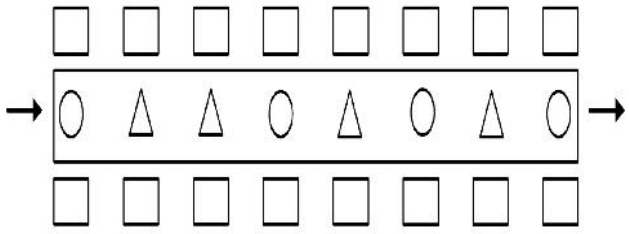
b_i: فضای کاری ایستگاه i؛

a_{ij}: مقدار فضایی که فعالیت jام از فضای کاری ایستگاه iام استفاده می‌کند تا انجام شود؛

d_k: تقاضای محصول kام.

- متغیرهای تصمیم

$P_{\max}$: بیشترین زمان بارگذاری ایستگاه (زمان مونتاژ لازم برای کامل شدن سفارش تولیدی)؛



شکل ۲. ساختار فیزیکی خط مونتاژ مختلط.

Q_{sum}: کل زمان حمل‌ونقل برای کامل‌شدن سفارش تولیدی؛

x_{ij}: اگر فعالیت j به ایستگاه iام تخصیص یابد معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر؛

y_{iljk}: اگر محصول kام بعد از اتمام فعالیت jام از ایستگاه i به ایستگاه l حمل شود معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر؛

z_{ijk}: اگر محصول kام برای انجام فعالیت j به ایستگاه i تخصیص یابد معادل ۱، و در غیر این‌صورت معادل صفر؛

e_{rk}: زودترین ایستگاهی که فعالیت rام محصول kام می‌تواند به آن تخصیص یابد؛

l_{rk}: دیرترین ایستگاهی که فعالیت rام محصول kام می‌تواند به آن تخصیص یابد.

هدف مسئله کمینه‌کردن تعداد ایستگاه‌های کاری و یا زمان کاری ایستگاه گلوگاه است که به‌ترتیب تحت عنوان MALBP-1 و MALBP-2 از آن‌ها یاد می‌شود.[۳] به‌منظور طراحی اولیه و مشخص‌کردن تعداد ایستگاه‌ها از مسئله MALBP-1 استفاده می‌کنیم. برنامه‌ریزی عدد صحیح برای این مسئله در ادامه آمده است:

$$Minimize\ M \qquad (۱)$$

$$subject\ to$$

$$\sum_{i \in I} z_{ijk} = 1; \forall j, k \qquad (۲)$$

$$\left\lceil \left(\sum_{j<r} p_{jk} \right) / C \right\rceil = e_{rk}; \forall k, r \qquad (۳)$$

$$M + 1 - \left\lceil \left(\sum_{j<r} p_{jk} \right) / C \right\rceil = l_{rk}; \forall k, r \qquad (۴)$$

$$\sum_{i} (i^* z_{ijk} - i^* z_{irk}) \leq 0; k \in K, (j, r) \in R_k \qquad (۵)$$

$$i^* z_{ijk} \leq M; \forall i, j \qquad (۶)$$

$$\sum_{j} p_{jk} * z_{ijk} \leq C; \forall k, i \qquad (۷)$$

$$\sum_{i} \sum_{j \geq r} i^* z_{ijk} \leq l_{rk}; \forall k, r \qquad (۸)$$

$$\sum_{i} \sum_{j \leq r} i^* z_{ijk} \geq e_{rk}; \forall k, r \qquad (۹)$$

رابطه‌ی ۱ تابع هدف مسئله و نشان‌گر تعداد ایستگاه‌های مونتاژ است که باید کمینه شود. معادله‌ی ۲ بیان‌گر آن است که هر فعالیت مونتاژ باید به یک ایستگاه مونتاژ تخصیص یابد. با استفاده از رابطه‌های ۳ و ۴ به‌ترتیب زودترین و دیرترین ایستگاهی را که فعالیت rام محصول kام می‌تواند به آن تخصیص یابد محاسبه می‌کنند. برقراری رابطه‌ی ۵ باعث یک‌طرفه‌شدن جریان محصول در خط مونتاژ می‌شود. نامساوی ۶ نشان‌گر بیشترین تعداد ایستگاهی است که ممکن است حداکثر برابر تابع هدف M باشد. رابطه‌ی ۷ نشان می‌دهد که زمان سیکل هر محصول نباید از زمان سیکل مشترک محصولات بیشتر باشد. همچنین برقراری رابطه‌ی ۸ باعث می‌شود تا فعالیت jام محصول kام به ایستگاهی با اندیس بیشتر از زودترین ایستگاه مربوطه‌اش تخصیص یابد. مانند قبل، برقراری نامساوی ۹ باعث می‌شود تا فعالیت jام محصول kام به ایستگاهی با اندیس کم‌تر از دیرترین ایستگاه مربوطه‌اش تخصیص یابد.

Archive of SID

www.SID.ir

همانند خط مونتاژ منفرد (ساده)، ضعف مدل MALBP-1 در این است که ممکن است در زمان سیکل کم‌تر از زمان ایستگاه گلوگاه، همان تعداد ایستگاه را نتیجه دهد. برای این منظور مدل MALBP-2 را برای تعداد ایستگاه به دست آمده از مدل MALBP-1 حل می‌کنیم و این رویه را تا زمانی ادامه می‌دهیم که تغییری در جواب‌ها مشاهده نشود. در ادامه، برنامه‌ریزی ریاضی مدل MALBP-2 ارائه شده است:

$$Minimize\ C \qquad (۱۰)$$

$$subject\ to$$

$$\sum_{i\in I} z_{ijk} = ۱; \forall j,k \qquad (۱۱)$$

$$\sum_{i} (i^* z_{ijk} - i^* z_{irk}) \le ۰; k \in K, (j,r) \in R_k \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{j} p^*_{jk} z_{ijk} \le C; \forall k,i$$

$$z_{ijk} \in \{۰,۱\}; \forall i,j,k \qquad (۱۳)$$

رابطه‌ی ۱۰ نشان‌گر تابع هدف مسئله و زمان سیکل مشترک محصولات است که باید کمینه شود. تساوی ۱۱ بیان‌گر آن است که فعالیت مونتاژ هر محصول باید به یک ایستگاه مونتاژ تخصیص یابد. برقراری رابطه‌ی ۱۲ باعث یک‌طرفه‌شدن جریان محصولات در خط مونتاژ می‌شود. همچنین نامساوی ۱۳ زمان سیکل ایستگاه گلوگاه را نشان می‌دهد که حداکثر می‌تواند برابر مقدار تابع هدف C باشد.

۴. سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر

این نوع سیستم دارای سیستم حمل‌ونقل هدایت‌شونده‌ی خودکار (AGV) است. مسیرهای حرکت محصول دوطرفه است و فرض می‌شود محدودیتی از لحاظ تعداد AGV وجود ندارد. شکل ۳ ساختار فیزیکی مونتاژ انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد. مسئله‌ی تصمیم‌گیری در سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر سه مرحله‌ی طراحی، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی را شامل می‌شود.[۵]

در اینجا دو مرحله‌ی طراحی و برنامه‌ریزی مورد توجه قرار می‌گیرند. مسئله‌ی طراحی که در زیر برای سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی ارائه شده است به‌منظور مشخص‌کردن تعداد ایستگاه‌های کاری است که می‌تواند در زمان مشخص در دسترس، پاسخ‌گوی ترکیبی از سفارشات باشد.

$$Minimize\ M \qquad (۱۴)$$

$$subject\ to$$

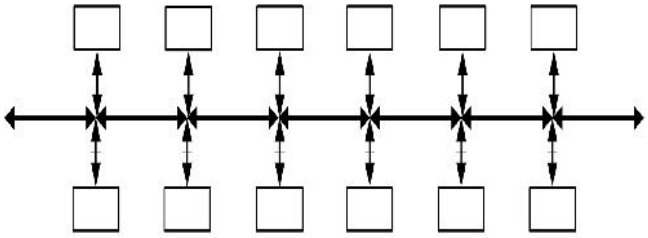
$$\sum_{i\in I} z_{ijk} = ۱; \forall j,k \qquad (۱۵)$$

$$i^* z_{ijk} \le M; \forall i,j \qquad (۱۶)$$

$$\sum_{j} p_{jk}{}^* z_{ijk} \le C; \forall k,i \qquad (۱۷)$$

$$\sum_{k}\sum_{j} d_k p_{jk} z_{ijk} \le P_{\max}; \forall i \qquad (۱۸)$$

$$z_{ijk} \in \left\{۰,۱\right\}; \forall i,j,k$$



شکل ۳. ساختار فیزیکی سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر.

رابطه‌ی ۱۴ بیان‌گر تابع هدف مسئله و تعداد ایستگاه‌های کاری است که باید کمینه شوند. تساوی ۱۵ بیان‌گر آن است که هر فعالیت مونتاژ هر محصول باید به یک ایستگاه مونتاژ تخصیص یابد. نامساوی ۱۶ بیشترین تعداد ایستگاهی را که ممکن است حداکثر برابر M باشند نشان می‌دهد. نامساوی ۱۷ نیز زمان سیکل ایستگاه گلوگاه را نشان می‌دهد که ممکن است حداکثر برابر C باشد. رابطه‌ی ۱۸ حجم بارگذاری ایستگاه گلوگاه را در یک زمان مشخص نشان می‌دهد.

مفهوم برنامه‌ریزی FAS به‌طور مفصل در ادبیات سیستم‌های مونتاژ انعطاف‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته است و برای حل این مسئله از برنامه‌ریزی عدد صحیح استفاده شده است.[۶،۷] به‌طور مثال، با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح دومنظوره رویکردی برای بارگذاری ایستگاه‌های کاری متعادل و کمینه‌کردن کل زمان حمل‌ونقل ارائه شده است.[۹] برنامه‌ریزی ریاضی برای این مسئله چنین است:

$$Minimize\ \lambda^* P_{\max} + (۱-\lambda)^* Q_{sum} \qquad (۱۹)$$

$$subject\ to$$

$$\sum_{i\in I_j}\sum_{l\in I_r} y_{iljk} = ۱; k \in K, (j,r) \in R_k \qquad (۲۰)$$

$$\sum_{l\in I} (y_{lijk} - y_{iljk}) = ۰; i \in I, k \in K, (j,r) \in R_k \qquad (۲۱)$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{j\in J_k}\sum_{l\in I} p_{jk}\ y_{iljk} \le P_{\max}; i \in I \qquad (۲۲)$$

$$\sum_{i\in I}\sum_{l\ne i}\sum_{k\in K}\sum_{j\in J_k} q_{il}\ y_{iljk} = Q_{sum} \qquad (۲۳)$$

$$\sum_{i\in I_j} x_{ij} \ge ۱; j \in J \qquad (۲۴)$$

$$\sum_{j\in J} x_{ij} \le b_i; i \in I \qquad (۲۵)$$

$$y_{lijk} \le x_{ij}; k \in K, i \in I_j, l \in I_r, (j,r) \in R_k \qquad (۲۶)$$

$$y_{lijk} \le x_{lr}; k \in K, i \in I_j, l \in I_r, (j,r) \in R_k \qquad (۲۷)$$

$$\sum_{l\in I} y_{iljk} = z_{ijk}; i \in I, j \in J, k \in K$$

$$x_{ij} \in \{۰,۱\}; \forall i,j$$

$$y_{lijk} \in \{۰,۱\}; \forall i,l,j,k$$

$$z_{ijk} \in \{۰,۱\}; \forall i,j,k$$

$$\lambda \in \{۰,۱\}; \qquad (۲۸)$$

رابطه‌ی ۱۹ بیان‌گر تابع هدف کلی و ترکیبی از دو تابع بیشینه‌ی زمان بارگذاری ایستگاه کاری ($P_{\max}$) و کل زمان حمل‌ونقل (Q_{sum}) است. رابطه‌ی ۲۰ اطمینان حاصل می‌کند که فعالیت‌های هر محصول به یک ایستگاه تخصیص داده شده

Archive of SID

www.SID.ir

است. رابطه‌ی ۲۱ بیان‌گر حفظ جریان برای هر محصول با توجه به رابطه‌ی پیش‌نیاز آن است. رابطه‌های ۲۲ و ۲۳ به‌ترتیب حجم بارگذاری ایستگاه گلوگاه و کل زمان حمل‌ونقل را نشان می‌دهند، و رابطه‌ی ۲۴ بیان‌گر آن است که هر فعالیت حداقل به یک ایستگاه کاری تخصیص می‌یابد. رابطه‌ی ۲۵ نشان‌گر محدودیت فضای ایستگاه است، و رابطه‌های ۲۶ و ۲۷ نیز نشان‌گر آن است که هر محصول ایستگاه‌هایی را ملاقات می‌کند که فعالیت‌های مربوطه‌اش به آن تخصیص یافته‌اند. رابطه‌ی ۲۸ ارتباط بین متغیر مسیردهی y و متغیر تخصیص z را نشان می‌دهد. این رابطه صرفاً برای به دست آوردن مقادیر z است که در مرحله‌ی چیدمان ایستگاه‌های کاری از آن استفاده خواهد شد.

با افزایش مقادیر اندیس‌های مدل، به‌ویژه تعداد ایستگاه‌های کاری، اندازه‌ی مدل بسیار بزرگ می‌شود. برای تعداد ایستگاه‌های بیشتر از ۱۰، حل مسئله در زمان کوتاه امکان‌پذیر نیست و مسئله در رده‌ی مسائل NP-Hard[۵] قرار می‌گیرد.[۸] محققان برای کم‌کردن حجم مسئله با استفاده از روش سلسله‌مراتبی ابتدا مسئله‌ی بارگذاری را حل، و سپس از خروجی آن برای مسئله‌ی مسیردهی بهره می‌گیرند.[۹] با این وجود از حجم مسئله کاسته نمی‌شود و جواب‌های به دست آمده چندان قابل قبول نیستند زیرا در مرحله‌ی اول صرفاً تابع هدف بارگذاری مورد توجه قرار می‌گیرد و خروجی آن چندین گزینه برای کمینه‌کردن کل زمان حمل‌ونقل به وجود می‌آورد. از سوی دیگر، هرگاه هرکدام از ایستگاه‌ها (ماشین‌آلات) قابلیت انجام پاره‌یی از فعالیت‌ها را داشته باشند، ثابت در نظرگرفتن محل ایستگاه‌ها توالی خاصی از ماشین‌ها را ایجاد می‌کند و به‌نوعی از انعطاف‌پذیری مدل کاسته می‌شود. این ضعف ناشی از عدم ارتباط سطوح طراحی و برنامه‌ریزی سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر است. برای برطرف‌کردن این نقایص، یک مدل سلسله‌مراتبی پیشنهاد می‌کنیم.

۵. رویه‌ی سلسله‌مراتبی ارائه شده

به‌منظور در نظرگرفتن زمان کل حمل‌ونقل در هنگام بارگذاری ایستگاه‌های کاری، و همچنین ایجاد ارتباط بین سطوح طراحی و برنامه‌ریزی یک رویکرد سلسله‌مراتبی ارائه می‌کنیم. در مرحله‌ی اول این رویکرد، مدل بارگذاری با در نظرگرفتن حجم حمل‌ونقل کل به‌طور ضمنی حل می‌شود، و در مرحله‌ی بعد از طریق توالی‌دهی به ایستگاه‌های کاری (چیدمان ایستگاه‌های کاری) زمان کل حمل‌ونقل کمینه می‌شود.

۱.۵. حل مدل بارگذاری با در نظرگرفتن حجم حمل‌ونقل کل به‌طور ضمنی

کنار هم قرارگرفتن جفت فعالیت‌های پیش‌نیاز در ایستگاه‌های کاری یکسان حجم حمل‌ونقل را برای هر محصول به‌طور مجزا کاهش خواهد داد. با بیشینه‌کردن تعداد جفت‌های پیش‌نیازی که در ایستگاه مشابه حادث می‌شوند، می‌توان از میزان پخش فعالیت‌ها جلوگیری کرد. با توجه به این مفهوم می‌توان تابع هدف حمل نقل را به‌طور ضمنی در حل مدل بارگذاری در نظرگرفت. نمادگذاری و برنامه‌ریزی ریاضی مربوط به این مدل چنین است:

Q تعداد کل جفت فعالیت‌های پیش‌نیاز که برای انجام آن‌ها نیازی به جابه‌جایی نیست.

m_{ijk} اگر برای محصول kام فعالیت‌های پیش‌نیاز j و r در ایستگاه iام انجام شوند معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر.

$$Maximize\ Q \quad (۲۹)$$

$$subject\ to$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{j\in J_k} d_k\, p_{jk}\, z_{ijk} \le P^L_{\max}; i \in I \quad (۳۰)$$

$$\sum_{i\in I_j}\sum_{j}\sum_{k} m_{ijk} = Q \quad (۳۱)$$

$$\sum_{i\in I_j} z_{ijk} = ۱; k \in K, j \in J_k \quad (۳۲)$$

$$-z_{ijk} - z_{irk} + ۲^* m_{ijk} <= ۰ \quad (۳۳)$$

$$\sum_{j\in J} z_{ijk} \le b_i; i \in I$$

$$m_{ijk} \in \{۰, ۱\}; k \in K, j \in J_k, i \in I_j$$

$$z_{ijk} \in \{۰, ۱\}; k \in K, j \in J_k, i \in I_j \quad (۳۴)$$

رابطه‌ی ۲۹ بیان‌گر تابع هدف مسئله و نیز تعداد کل جفت‌های پیش‌نیازی است که در ایستگاه‌های مشابه قرار می‌گیرند. با استفاده از نامساوی ۳۰ حجم بارگذاری ایستگاه گلوگاه نشان داده می‌شود. با استفاده از تساوی ۳۱ تعداد کل جفت‌های پیش‌نیاز که در ایستگاه مشابه اتفاق می‌افتند، محاسبه می‌شود. رابطه‌ی ۳۲ بیان‌گر آن است که فعالیت هر محصولی باید به یک ایستگاه تخصیص یابد، و نامساوی ۳۳ نیز نشان می‌دهد که اگر دو فعالیت j و r و محصولی به ایستگاه مشابه i تخصیص یابند آنگاه مقدار متغیر m_{ijk} معادل ۱ خواهد بود. و در نهایت رابطه‌ی ۳۴ نشان‌گر محدودیت حجم ایستگاه است. مدل ارائه شده به‌ازای مقادیر مشخصی از $P^L_{\max}$ قابل حل است.

۲.۵. چیدمان ایستگاه‌های کاری شامل فعالیت‌های تخصیص یافته از مرحله اول

با اضافه‌کردن مدلی تحت عنوان «توالی‌دهی به ایستگاه‌های کاری» می‌توان خروجی مرحله‌ی اول را بهبود بخشید. این مدل مسئله‌ی طراحی را با مسئله‌ی برنامه‌ریزی مرتبط می‌سازد. فرضیات در نظرگرفته شده برای مسئله‌ی چیدمان ایستگاه‌هایی که فعالیت‌های آن‌ها در مرحله‌ی اول تخصیص داده شده‌اند، عبارت‌اند از:

۱. تعداد n فضای مشخص برای استقرار n ایستگاه کاری وجود دارد؛

۲. فاصله‌ی بین محل‌های استقرار، مقادیر ثابت q_{il} است؛

با توجه به فرضیات این مسئله، مدل ریاضی آن در طبقه‌بندی مدل تخصیص درجه دوم[۶] (کوادراتیک) قرار می‌گیرد.[۱۰] برنامه‌ریزی ریاضی این مسئله به‌صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح غیر خطی است. نمادگذاری برای این مدل چنین است:

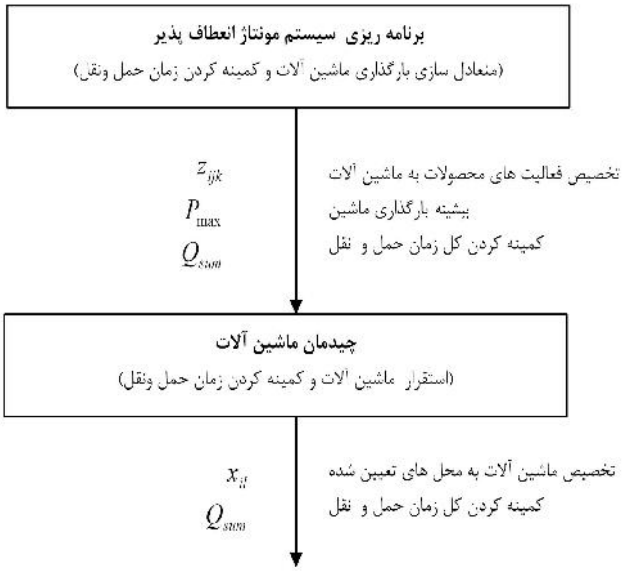
Q^*_{sum}: کل زمان حمل‌ونقل برای تکمیل سفارش تولیدی؛

x_{im}: اگر ماشین iام به محل mام تخصیص یابد معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر است؛

z^L_{irk}: متغیر تخصیص به دست آمده از مرحله‌ی برنامه‌ریزی؛

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴. شمای کلی رویکرد سلسله‌مراتبی پیشنهادی برای متعادل‌سازی بارگذاری ایستگاه‌های کاری و کمینه‌کردن زمان حمل‌ونقل.

q_{mn}: زمان حمل‌ونقل لازم برای جابه‌جایی محصول از ایستگاه m به n.

$$Minimize\ Q^*_{sum} \qquad (۳۵)$$

$$subject\ to$$

$$\sum_i \sum_{l\neq i} \sum_j \sum_r \sum_k \sum_m \sum_{n\neq m} d_k\, q_{mn}\, z^L_{ijk}\, z^L_{lrk} x_{im} x_{\ln} = Q^*_{sum} \qquad (۳۶)$$

$$\sum_i x_{il} = ۱ \qquad (۳۷)$$

$$\sum_l x_{il} = ۱ \qquad (۳۸)$$

$$x_{im} \in \{۰, ۱\}$$

رابطه‌ی ۳۵ بیان‌گر تابع هدف کمینه‌کردن کل زمان جابه‌جایی بین ایستگاه‌های کاری است و با استفاده از تساوی ۳۶ کل زمان جابه‌جایی بین ایستگاه‌های کاری محاسبه می‌شود. تساوی ۳۷ بیان‌گر آن است که هر ماشین فقط به یک محل تخصیص می‌یابد و تساوی ۳۸ نیز اطمینان حاصل می‌کند که هر محل استقرار فقط به یک ماشین تخصیص می‌یابد. شمای کلی رویکرد سلسله‌مراتبی پیشنهاد شده در شکل ۴ ارائه شده است.

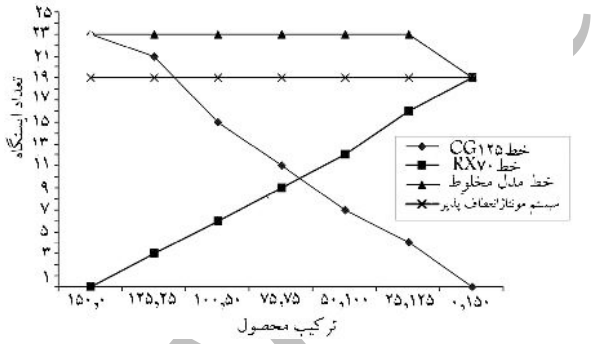
۶. نمونه مثال واقعی

در این بخش برای مقایسه‌ی سیستم‌های مونتاژ سنتی و انعطاف‌پذیر مثالی واقعی ارائه شده است. دراین مثال مونتاژ دو نوع موتورسیکلت (CG125, RX70) بررسی شده است. داده‌های مربوط به فعالیت‌ها، روابط پیش‌نیاز، و زمان‌های فعالیت در پیوست آمده‌اند. چیدمان ایستگاه‌های کاری در امتداد یک خط است و فاصله‌ی بین ایستگاه‌های مجاور مساوی است. توالی مونتاژ استفاده‌شده به‌عنوان ورودی براساس ترتیب کد فعالیت‌ها است. زمان جابه‌جایی بین دو ایستگاه مجاور مساوی هم، و برای نوار نقاله ۱۰ ثانیه و برای سیستم حمل‌ونقل هدایت‌شونده‌ی خودکار (AGV) ۲ ثانیه است.

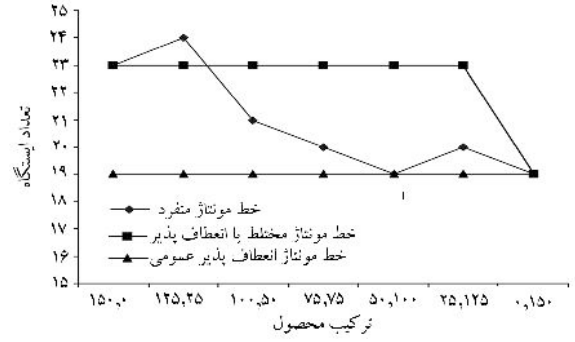
زمان لازم برای نظام مونتاژ معادل ۴۸۰ دقیقه، بدون احتساب زمان‌های جابه‌جایی بین ایستگاه‌های کاری، در نظر گرفته شده است. ترکیب‌های مختلف تقاضای روزانه برای موتورسیکلت‌های CG125 ,RX70 عبارت‌اند از: (۰و۱۵۰)، (۲۵و۱۲۵)، (۵۰و۱۰۰)، (۷۵و۷۵)، (۱۰۰و۵۰)، (۱۲۵و۲۵)، (۱۵۰و۰). به‌منظور حل مدل‌های ریاضی مربوطه از نرم‌افزار GAMS 21.2 استفاده شده است. محدودیت زمان حل ۲ ساعت در نظر گرفته شده است. در سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر، چیدمان ایستگاه‌های کاری در امتداد یک خط، و فاصله‌ی بین ایستگاه‌های مجاور مساوی است. مسیر راهنمای استفاده شده مسیر باز شاخه‌شده است که براساس حل مدل ایستگاه‌های بارگذاری و تخلیه‌ی آن مشخص می‌شوند.

۱.۶. مقایسه‌ی رویکرد سلسله‌مراتبی ارائه شده و رویکرد یکپارچه

به‌منظور مقایسه‌ی کارایی رویکرد سلسله‌مراتبی ارائه‌شده با رویکرد یکپارچه، مثال عددی مطرح شده برای تعداد ایستگاه ۶، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ حل شده است. ترکیب تقاضای روزانه‌ی استفاده‌شده به‌ترتیب برای موتورسیکلت‌های CG125, RX70 عبارت است از: (۵۰و۱۰۰). در حالت‌های مرزی $\lambda = ۰$ و $\lambda = ۱$ به‌ترتیب به دنبال کمینه‌کردن توابع هدف زمان کل حمل‌ونقل و زمان بارگذاری هستیم. در حالت‌های دیگر به‌ازای مقدار مشخصی از زمان بارگذاری ($P^L_{\max}$) زمان کل حمل‌ونقل را کمینه می‌کنیم. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که با افزایش اندازه‌ی مسئله رویکرد سلسله‌مراتبی جواب‌های بهتری به‌دست می‌آید. برای مثال، نتایج مسئله با در نظر گرفتن ۲۰ ایستگاه برای آن در جدول ۱ آمده است. مسئله‌ی طراحی (تعیین تعداد ایستگاه‌های کاری) برای سه گونه‌ی خطوط مونتاژ منفرد (خطوط سنتی جدا از هم)، خط مونتاژ مختلط (انعطاف‌پذیر)، و سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی حل، و نتایج آن در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است.



شکل ۵. تعداد ایستگاه به‌ازای ترکیبات مختلف محصول.



شکل ۶. تعداد کل ایستگاه به‌ازای ترکیبات مختلف محصول برای هر سیستم.

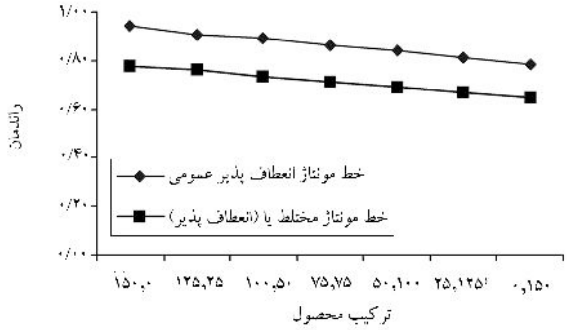
www.SID.ir

جدول ۱. مقایسه‌ی رویکرد یکپارچه و سلسله‌مراتبی به‌ازای ۲۰ ایستگاه.

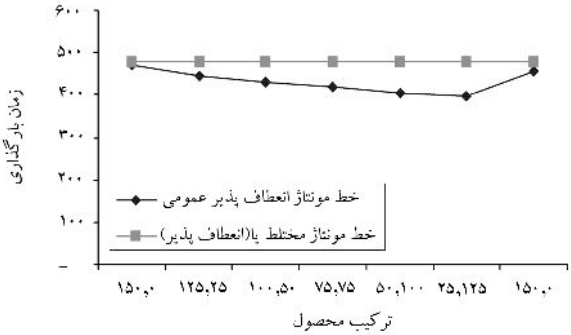
رویکرد سلسله‌مراتبی				رویکرد یکپارچه			
Pmax	Q*sum	Q	P^Lmax	Pmax	Qsum	Q*sum	P^Lmax
۷۵۵/۰۰	۴۳/۳۳	۵۴	$\lambda = ۰$	۸۰۸/۳۳	۹۵	۵۶/۶۷	$\lambda = ۰$
۴۱۱/۶۷	۶۱۶/۶۷	۵	$\lambda = ۱$	۴۱۱/۶۷	۶۱۶/۶۷	۴۱۱/۶۷	$\lambda = ۱$
۴۵۰/۰۰	۲۳۸/۳۳	۳۸	< ۴۵۰	-	-	-	< ۴۵۰
۴۷۵/۸۳	۱۷۸/۳۳	۴۱	< ۴۸۰	۴۷۵/۸۳	۲۸۱/۶۷	۲۲۸/۳۳	< ۴۸۰
۵۸۱/۰۰	۱۴۰	۴۷	< ۶۰۰	۵۹۶/۶۷	۴۳۸/۳۳	۲۴۵	< ۶۰۰
متغیرها: ۳۱۲۰		ثابت‌ها: ۲۹۳۸		متغیرها: ۲۹۹۸۳		ثابت‌ها: ۵۹۱۷۴	

با توجه به شکل ۵ استفاده از خط مونتاژ منفرد (خطوط مونتاژ سنتی جدا از هم) نیازمند انجام تغییرات عمده به هنگام تغییر ترکیب محصولات است، و بنابراین فاقد انعطاف‌پذیری لازم است. دو گزینه‌ی دیگر باقی مانده استفاده از خط مونتاژ مختلط و سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی هستند. با توجه به شکل ۶، سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی دارای بیشترین انعطاف‌پذیری و کم‌ترین تغییرات براثر تغییر ترکیب محصولات است. همچنین این سیستم نیازمند کم‌ترین تعداد ایستگاه به‌ازای ترکیبات مختلف محصول است. به‌منظور مقایسه‌ی بیشتر سیستم خط مونتاژ مختلط با سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی سایر معیارهای ارزیابی همچون کارایی متعادل‌سازی، میزان بارگذاری ایستگاه‌های کاری، میزان کل حمل‌ونقل به‌ازای سفارش تولیدی روزانه، و مجموع کل زمان بارگذاری و زمان حمل‌ونقل به‌ازای هر ایستگاه بررسی شده‌اند (شکل ۷). با توجه به شکل ۷، با تغییر ترکیب محصولات از ۰ و ۱۵۰ به ۱۵۰ و ۰ کارایی هر دو سیستم کاهش می‌یابد، زیرا کل زمان لازم برای مونتاژ ترکیب محصول کاهش می‌یابد. همچنین کارایی سیستم مونتاژ مختلط (انعطاف‌پذیر) درزمینه‌ی متعادل‌سازی، به‌ازای تمام ترکیبات محصول، بیشتر است. با توجه به شکل ۸، زمان متعادل‌سازی برای سیستم مونتاژ مختلط ثابت می‌ماند، زیرا با سیکل زمانی ثابتی تولید می‌کند؛ حال آن که سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی به‌دلیل دارابودن سیستم حمل‌ونقل دوطرفه از ترکیب‌های بهتر فعالیتی استفاده می‌کند و زمان بارگذاری کم‌تری ایجاد می‌کند. همچنین در ترکیبات نهایی شاهد افزایش ناگهانی زمان کل بارگذاری هستیم. دلیل این افزایش ناگهانی این است که در حالت‌های پایانی ترکیب محصول، به‌دلیل وجود تنها یک محصول، تنوع فعالیتی کم، و شانس ترکیب‌های بهتر برای کم‌کردن زمان متعادل‌سازی کم‌تر است.

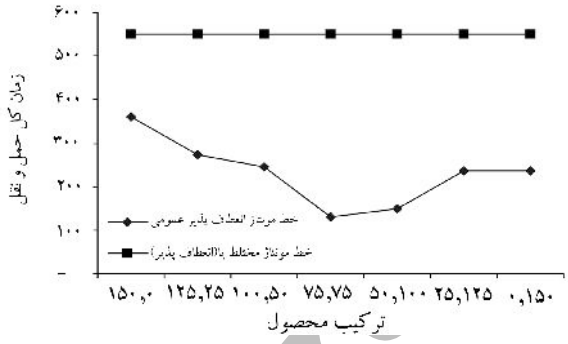
در شکل ۹ مشابه شکل ۸، زمان حمل‌ونقل برای سیستم مونتاژ مختلط ثابت می‌ماند. همچنین در ترکیبات نهایی شاهد افزایش ناگهانی زمان کل حمل‌ونقل هستیم. دلیل این افزایش ناگهانی این است که در حالت‌های پایانی ترکیب محصول،



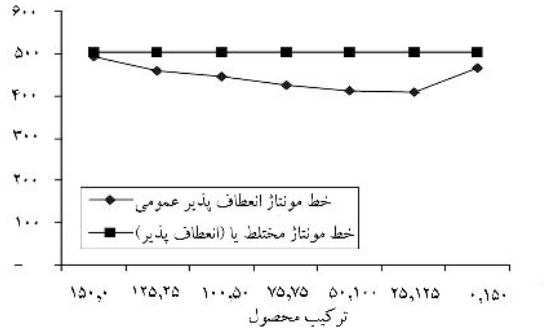
شکل ۷. مقایسه‌ی کارایی سیستم خط مونتاژ مختلط و سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی.



شکل ۸. میزان بارگذاری سیستم خط مونتاژ انعطاف‌پذیر و سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی.



شکل ۹. میزان حمل‌ونقل سیستم مونتاژ مختلط و سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی.



شکل ۱۰. مقایسه کلی سیستم خط مونتاژ مختلط و سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی.

www.SID.ir

به‌دلیل وجود تنها یک محصول، تنوع فعالیتی کم، و شانس ترکیب‌های بهتر برای کم‌کردن زمان حمل‌ونقل کم‌تر است.

در شکل ۱۰ کل زمان مورد نیاز برای سیستم مونتاژ و حمل‌ونقل به‌ازای هر ایستگاه برای ترکیبات مختلف محصول آمده است. مشابه شکل‌های ۸ و ۹ سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی امکان استفاده‌ی بهینه از منابع موجود را فراهم می‌آورد.

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی استفاده از سیستم مونتاژ مختلط (انعطاف‌پذیر) در برابر سیستم مونتاژ منفرد (مونتاژ سنتی) پرداخته‌ایم. سه نوع سیستم خطوط مونتاژ منفرد (سنتی)، خط مونتاژ مختلط (انعطاف‌پذیر) و سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی برای تولید ترکیبی از محصولات مورد بررسی قرارگرفته‌اند. در سیستم‌های مونتاژ مختلط (انعطاف‌پذیر)، معیار متعادل‌سازی بارگذاری ایستگاه‌های کاری علاوه‌بر معیار حمل‌ونقل مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به این که برنامه‌ریزی ریاضی ارائه‌شده در ادبیات سیستم‌های مونتاژ انعطاف‌پذیر، قادر به حل مسئله‌ی واقعی با حجم بزرگ نیست، رویکردی سلسله‌مراتبی ارائه شده است که در زمان کوتاه جواب‌های قابل قبولی را ارائه می‌کند. مدل به‌ازای ترکیب‌های مختلف محصولات حل شده است و به‌منظور مقایسه‌ی سیستم‌های تولید مختلف از معیارهایی همچون تغییرپذیری تعداد ایستگاه‌های کاری در برابر تغییرات ترکیب محصولات، کارایی سیستم مونتاژ، بیشترین میزان بارگذاری، میزان حمل‌ونقل و کارایی کل سیستم مونتاژ و حمل‌ونقل استفاده شده است.

نتایج نشان می‌دهند که سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی در برابر تغییرات تقاضا منعطف است و تغییرات عمده‌یی در آن حادث نمی‌شود، حال آن‌که در خطوط مونتاژ منفرد و نیز در خط مونتاژ انعطاف‌پذیر بر اثر تغییرات تقاضا تغییرات عمده‌حاصل می‌شود و درنتیجه سازمان‌دهی مجدد ضرورت می‌یابد. از سوی دیگر، مقایسه‌ی مقادیر زمان بارگذاری و حمل‌ونقل به‌ازای ترکیب تقاضای مشخص نشان می‌دهد که سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی بهتر عمل می‌کند. نکته‌ی دیگر این که در سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی با دو تابع هدف بارگذاری ایستگاه کاری و زمان حمل‌ونقل مواجه هستیم، و بنابراین با توجه به هزینه‌ی نسبی این دو معیار می‌توانیم تخصیص فعالیت‌ها به ایستگاه‌های کاری و مسیردهی به محصولات را به گونه‌یی انجام دهیم که از ظرفیت کلی سیستم بهتر استفاده شود و تابع هدف کلی بهینه شود. حال آن که در سیستم خط مونتاژ تمامی محصولات مسیر یکسانی را طی می‌کنند و تنها تابع هدف بارگذاری ایستگاه‌های کاری مورد توجه قرار می‌گیرد و در پاره‌یی موارد دست‌یابی به جوابی که هم سیستم مونتاژ و هم سیستم حمل‌ونقل را به‌طور همزمان بهینه کند ممکن نیست.

۸. کارهای آتی

در این نوشتار پیشنهاد استفاده از رویه هیورستیک (رویه سلسله مراتبی) مورد ارزیابی قرارگرفت. ارائه مدل‌هایی بر اساس رویه‌های متاهیورستیک همچون الگوریتم ژنتیک و به‌خصوص الگوریتم مورچگان می‌تواند زمینه تحقیقات آینده برای این نوع مسائل باشد[۱۱]. از سوی دیگر معیارهای ارزیابی و مقایسه‌های انجام شده صرفا در فاز طراحی و برنامه‌ریزی بوده و در مرحله‌ی اجراء نیازمند بررسی در مرحله اجراء هستند. در عمل و در مرحله اجرا و زمان بندی ضروری است امکان‌پذیر بودن سیستم حمل و نقل AGV از دید تعداد AGV لازم، عدم ایجاد تداخل و میزان افزایش زمان‌های مونتاژ و حمل و نقل به دلیل ایجاد صف و تلافی مورد بررسی قرارگیرد. استفاده از رویه‌های شبیه سازی در مرحله زمان بندی می تواند ما را در شناخت و حل مساله یاری رساند[۱۲].

پانوشت

1. flexible assembly system
2. automated guided vehicle
3. single-model assembly line
4. mixed-model assembly line
5. nondeterministic polynomial-time hard
6. quadratic assignment problem

منابع

1. Groover, M. Automation, *production systems and computer-integrated manufacturing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, (2001).
2. Sawyer, J.H.F. *Line balancing*, Machinery Publishing, Brighton, (1970).
3. Salveson, M.E. "The assembly line balancing problem", *Journal of industrial engineering*, **6**, pp. 18-25 (1995) .
4. Scholl, A. *Balancing and sequencing of assembly lines*, Physica-Verlag, New York, (1999).
5. Sawik, T. *Production planning & scheduling in flexible assembly systems*, Springer, Berlin, (1999).
6. Sawik, T. "An LP-Based approach for loading and routing in a flexible assembly line", *Int. J. Production Economics*, **64**, pp. 49-58 (2000).
7. Sawik, T. "A lexicographic approach to bi-objective loading of a flexible assembly system", *European Journal of Operational Research*, **107**, pp. 656-668 (1998).
8. Kumar, A.; Jacobson, Sheldon H. and Sewell, Edward C. "Computational analysis of a flexible assembly system design problem", *European Journal of Operational Research*, **123**, pp. 453-472 (2000).
9. Sawik, T. "Monolithic vs. hierarchical balancing and scheduling of a flexible assembly line", *European Journal of Operational Research*, **143**, pp. 115-124 (2002).
10. Elshafei, A.N. "Hospital layout as a quadratic assignment problem', *Opl Res. Q*, **28**, pp. 167-179 (1977).
11. Demirel, N.C. and Toksarı, M.D. "Optimization of the quadratic assignment problem using an ant colony algorithm", *Applied Mathematics and Computation*, **183**, Issue 1,1,pp. 427-435, (December 2006).
12. Loukil, T.; Teghem, J. and Fortemps, P. "A multi-objective production scheduling case study solved by simulated annealing", *European Journal of Operational Research*, **179**, (3), pp. 709-722 (2007).

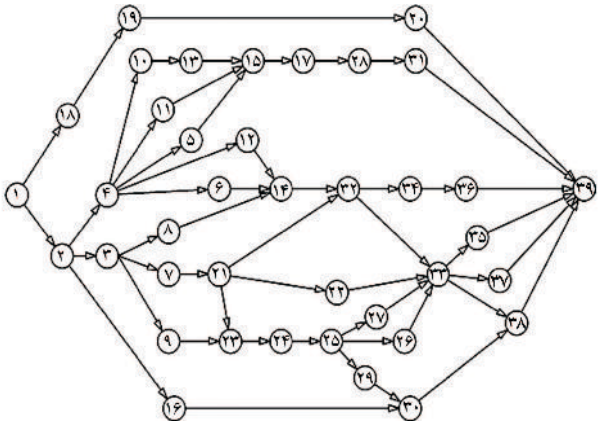
Archive of SID
www.SID.ir

پیوست

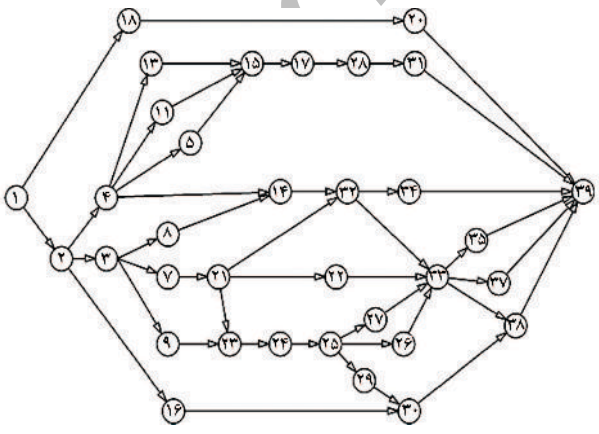
فعالیت‌های موتورسیکلت CG125 و RX70:

فعالیت	عنوان فعالیت (j)	P_{j1}	p_{j2}
۱	آوردن شاسی و جازدن موتور در شاسی	۱۸۶	۱۲۳
۲	نوشتن کارت کنترل کیفی	۶۶	۵۶
۳	گریس‌کاری و بستن کمک فرمان	۷۷	۷۵
۴	آماده‌کردن و جازدن دوشاخ	۹۶	۶۰
۵	بستن کمک راست	۸۰	۶۶
۶	بستن چراغ راهنمای راست	۳۳	-
۷	بستن قفل کلاه ایمنی یا فرمان	۳۰	۴۸
۸	سوارکردن سیم درختی: جا زدن سوکت‌های وسط بدنه	۱۱۳	۱۴۵
۹	بستن تایر جلو	۹۰	۶۱
۱۰	بستن هواکش	۱۰۰	-
۱۱	بستن کمک چپ	۹۰	۶۶
۱۲	بستن چراغ راهنمای چپ	۳۳	-
۱۳	بستن بچه گلگیر و گلگیر	۱۵۰	۱۸۲
۱۴	بستن سیم درختی: جازدن سوکت‌های عقب	۱۵۰	۱۵۳
۱۵	جازدن چرخ عقب	۱۲۰	۱۱۸
۱۶	بستن هندل	۲۷	۳۰
۱۷	بستن زنجیر، بستن پیچ چرخ عقب	۱۳۰	۱۵۸
۱۸	بستن سیم استپ ترمز، بستن پدال ترمز و جازدن و بستن میل تعادل(محور)	۱۳۵	۷۰
۱۹	بستن فنر پدال ترمز و استپ ترمز	۱۰۱	-
۲۰	بستن اگزوز	۱۵۶	۸۶

فعالیت	عنوان فعالیت (j)	P_{j1}	p_{j2}
۲۱	جازدن گوشواره	۳۹	۲۲
۲۲	بستن سیم دور موتور	۹۰	۶۵
۲۳	بستن سیم کیلومتر به چرخ جلو	۹۷	۷۰
۲۴	بستن کرپی	۷۶	۸۳
۲۵	بستن فرمان	۸۲	۷۵
۲۶	بستن سیم کلاچ	۹۷	۵۵
۲۷	بستن سیم ترمز	۸۹	۱۱۷
۲۸	بستن قاب زنجیر	۱۳۵	۳۳
۲۹	بستن بست سیم گاز، و سیم گاز	۱۱۷	۱۱۵
۳۰	بستن درب مگنت (بستن پوسته‌ی موتور)	۵۳	۸۸
۳۱	بستن پدال دنده	۲۱	۳۰
۳۲	عبور دادن و جداکردن دسته سیم از داخل کاسه‌ی چراغ: جازدن سیم‌های جلو (۱)	۸۹	۱۶۶
۳۳	جازدن باک و بستن درب باک	۱۰۳	۴۰
۳۴	جازدن سوکت‌های سیم‌های داخل چراغ و بوق: جازدن سیم‌های جلو (۲)	۱۳۰	۱۱۵
۳۵	جازدن زین	۷۹	۹۶
۳۶	بستن بلوری جلو	۸۵	-
۳۷	جازدن قاب بغل راست	۱۸	۷۷
۳۸	جازدن قاب بغل چپ	۱۸	۷۷
۳۹	پایین‌آوردن موتور از خط	۴۷	۴۵



نمودار پیش‌نیازی موتور سیکلت CG125:



نمودار پیش‌نیازی موتور سیکلت RX70:

Archive of SID

www.SID.ir