

بررسی سیستم‌های حمل و نقل اتوماتیک مواد در مونتاژ انعطاف پذیر (مطالعه‌ی موردی مونتاژ موتورسیکلت)

محمود هوشمند (دانشیار)

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

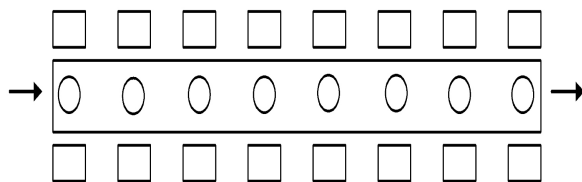
به منظور مونتاژ محصولات متنوع می‌توان از خطوط مونتاژ جداگانه برای هر محصول، یک خط مونتاژ برای چندین محصول یا سیستم مونتاژ انعطاف پذیر بهره جست. عمده‌ی مطالعات و مقایسات انجام گرفته در این مورد به بررسی و مقایسه‌ی تولید محصولات متنوع در خطوط جداگانه یا در یک خط مونتاژ پرداخته‌اند. سیستم حمل و نقل مواد مورد استفاده در این نوع تولید نوار نقاله است. بررسی سیستم‌های مونتاژ انعطاف پذیر^۱ باید با توجه به نیازمندی‌های بازار جدید انجام شود؛ در این سیستم‌ها از سیستم حمل و نقل هدایت شونده‌ی خودکار^۲ (AGV) استفاده می‌شود. در این نوشتار سیستم‌های مونتاژ سنتی و انعطاف پذیر را به طور جداگانه مورد بررسی قرار می‌دهیم. به منظور مقایسه‌ی سیستم‌های مونتاژ از معیارهایی همچون میزان تغییرات سیستم در برابر تغییر تقاضای محصولات، متعادل بودن حجم کاری ایستگاه‌های کاری، کارایی سیستم حمل و نقل و کارایی کلی سیستم مونتاژ استفاده شده است. مثال کاربردی در این مورد مونتاژ دو نوع موتورسیکلت است. نتایج محاسباتی نشان می‌دهد که میزان تغییرات سیستم مونتاژ انعطاف پذیر در برابر تغییر تقاضا کم است و معیارهای کارایی بهتری نسبت به سیستم‌های خط مونتاژ دارد.

واژگان کلیدی: سیستم مونتاژ انعطاف پذیر، خط مونتاژ، نوار نقاله، سیستم حمل و نقل هدایت شونده‌ی خودکار (AGV).

۱. مقدمه

در محصول وجود ندارد. در این مدل برای هر محصول از یک خط مونتاژ جداگانه استفاده می‌شود.^[۱] شکل ۱ ساختار فیزیکی خط مونتاژ منفرد را نشان می‌دهد. مهم ترین مسئله‌ی تصمیم‌گیری در مورد این خطوط، مسئله‌ی متعادل سازی حجم کاری ایستگاه‌های مونتاژ است. ورودی این مسئله فعالیت‌های مونتاژ با زمان‌های قطعی، و نیز روابط میان فعالیت‌ها هستند. هدف این مسئله کمینه کردن تعداد ایستگاه‌های کاری یا زمان کاری ایستگاه گلوگاه است که به ترتیب تحت عنوان SALBP-1 و SALBP-2 از آن‌ها یاد می‌شود.^[۲] به منظور طراحی اولیه و مشخص کردن 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

خطوط مونتاژ از زمان هنری مورد استفاده قرار گرفته‌اند.^[۱] این خطوط از تعدادی ایستگاه‌های مونتاژ که سیستم حمل و نقل آنها نوار نقاله است تشکیل شده‌اند. با افزایش تنوع محصولات، این خطوط مونتاژ منفرد (ساده)^۳ -- که در آن صرفاً یک محصول تولید می‌شود -- به خطوط مونتاژ مختلط^۴ -- که در آن‌ها محصولات متنوعی تولید می‌شوند -- تبدیل شدند. پیشرفت در زمینه‌ی رایانه و استفاده از سیستم‌های حمل و نقل هدایت شونده‌ی خودکار (AGV) زمینه‌ساز ظهور سیستم‌های مونتاژ انعطاف پذیر بود. منظور از سیستم مونتاژ انعطاف پذیر سیستمی است که در ارتباط با تغییرات داخل و خصوصاً تغییرات خارج انعطاف پذیری دارد. به منظور 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 انعطاف پذیر، به کمک یک مثال واقعی و براساس پارهی معیارهای عملکرد، به مقایسه‌ی این ۳ سیستم می‌پردازیم.



شکل ۱. ساختار فیزیکی خط مونتاژ منفرد.

۲. خط مونتاژ منفرد (ساده)

از سیستم خط مونتاژ منفرد برای محصولات با تقاضای زیاد استفاده می‌شود و تنوعی

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.^[۲]

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

$i \in I = \{1, \dots, m\}$ ایستگاه مونتاژ i

$j \in J = \{1, \dots, n\}$ فعالیت مونتاژ j

$k \in K = \{1, \dots, v\}$ محصول k

۲. پارامترهای ورودی

p_{jk} : زمان مونتاژ فعالیت j محصول k ام؛

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

I_j : مجموعه ایستگاه‌هایی که قادر به انجام فعالیت j ام هستند؛

J_k : مجموعه فعالیت‌های لازم برای تولید محصول k ام؛

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

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

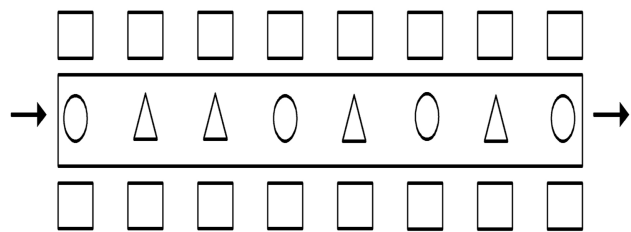
b_i : فضای کاری ایستگاه i ؛

a_{ij} : مقدار فضایی که فعالیت j ام از فضای کاری ایستگاه i ام استفاده می‌کند تا انجام شود؛

d_k : تقاضای محصول k ام.

• 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 کامل شدن سفارش تولیدی؛
 x_{ij} : اگر فعالیت j به ایستگاه i ام تخصیص یابد معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر؛

y_{ijk} : اگر محصول k ام بعد از اتمام فعالیت j ام از ایستگاه i به ایستگاه l حمل شود معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر؛

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

e_{rk} : زودترین ایستگاهی که فعالیت r ام محصول k ام می‌تواند به آن تخصیص یابد؛

l_{rk} : دیرترین ایستگاهی که فعالیت r ام محصول k ام 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.^[۲] به‌منظور طراحی اولیه و مشخص‌کردن تعداد ایستگاه‌ها از مسئله MALBP-1 استفاده می‌کنیم. برنامه‌ریزی عدد صحیح برای این مسئله در ادامه آمده است:

$$\text{Minimize } M \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{i \in I} z_{ijk} = 1; \forall j, k \quad (2)$$

$$\left[\left(\sum_{j < r} p_{jk} \right) / C \right] = e_{rk}; \forall k, r \quad (3)$$

$$M + 1 - \left[\left(\sum_{j < r} p_{jk} \right) / C \right] = l_{rk}; \forall k, r \quad (4)$$

$$\sum_i (i^* z_{ijk} - i^* z_{irk}) \leq 0; k \in K, (j, r) \in R_k \quad (5)$$

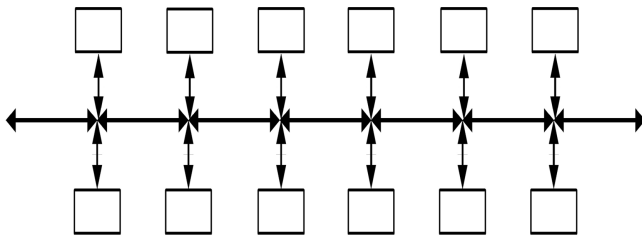
$$i^* z_{ijk} \leq M; \forall i, j \quad (6)$$

$$\sum_j p_{jk} * z_{ijk} \leq C; \forall k, i \quad (7)$$

$$\sum_i \sum_{j \geq r} i^* z_{ijk} \leq l_{rk}; \forall k, r \quad (8)$$

$$\sum_i \sum_{j \leq r} i^* z_{ijk} \geq e_{rk}; \forall k, r \quad (9)$$

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 r ام محصول k ام 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 j ام محصول k ام به ایستگاهی با اندیس بیشتر از زودترین ایستگاه مربوطه‌اش تخصیص یابد. مانند قبل، برقراری نامساوی ۹ باعث می‌شود تا فعالیت j ام محصول k ام به ایستگاهی با اندیس کم‌تر از دیرترین ایستگاه مربوطه‌اش تخصیص یابد.



شکل ۳. ساختار فیزیکی سیستم مونتاژ انعطاف پذیر.

رابطه 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. رابطه ۱۸ حجم بارگذاری ایستگاه گلوگاه را در یک زمان مشخص نشان می‌دهد.

مفهوم برنامه‌ریزی FAS به‌طور مفصل در ادبیات سیستم‌های مونتاژ انعطاف پذیر مورد بررسی قرار گرفته است و برای حل این مسئله از برنامه‌ریزی عدد صحیح استفاده شده است.^[۷، ۶] 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:

$$\text{Minimize } \lambda * P_{\max} + (1 - \lambda) * Q_{sum} \quad (19)$$

subject to

$$\sum_{i \in I_j} \sum_{l \in I_r} y_{iljk} = 1; k \in K, (j, r) \in R_k \quad (20)$$

$$\sum_{l \in I} (y_{iljk} - y_{iljk}) = 0; i \in I, k \in K, (j, r) \in R_k \quad (21)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} \sum_{l \in I} p_{jk} y_{iljk} \leq P_{\max}; i \in I \quad (22)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \neq i} \sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} q_{il} y_{iljk} = Q_{sum} \quad (23)$$

$$\sum_{i \in I_j} x_{ij} \geq 1; j \in J \quad (24)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} \leq b_i; i \in I \quad (25)$$

$$y_{iljk} \leq x_{ij}; k \in K, i \in I_j, l \in I_r, (j, r) \in R_k \quad (26)$$

$$y_{iljk} \leq x_{lr}; k \in K, i \in I_j, l \in I_r, (j, r) \in R_k \quad (27)$$

$$\sum_{i \in I} y_{iljk} = z_{ijk}; i \in I, j \in J, k \in K \quad (28)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}; \forall i, j$$

$$y_{iljk} \in \{0, 1\}; \forall i, l, j, k$$

$$z_{ijk} \in \{0, 1\}; \forall i, j, k$$

$$\lambda \in \{0, 1\}; \quad (28)$$

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

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:

$$\text{Minimize } C \quad (10)$$

subject to

$$\sum_{i \in I} z_{ijk} = 1; \forall j, k \quad (11)$$

$$\sum_i (i^* z_{ijk} - i^* z_{irk}) \leq 0; k \in K, (j, r) \in R_k \quad (12)$$

$$\sum_j p_{jk}^* z_{ijk} \leq C; \forall k, i \quad (13)$$

$$z_{ijk} \in \{0, 1\}; \forall i, j, k \quad (13)$$

رابطه 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 رابطه ۱۲ باعث یک‌طرفه شدن 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 انعطاف پذیر

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 انعطاف پذیر را نشان می‌دهد. مسئله‌ی تصمیم‌گیری در سیستم مونتاژ انعطاف پذیر 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 انعطاف پذیر عمومی ارائه شده است به‌منظور مشخص‌کردن تعداد ایستگاه‌های کاری است که می‌تواند در زمان مشخص در دسترس، پاسخگوی ترکیبی از سفارشات باشد.

$$\text{Minimize } M \quad (14)$$

subject to

$$\sum_{i \in I} z_{ijk} = 1; \forall j, k \quad (15)$$

$$i^* z_{ijk} \leq M; \forall i, j \quad (16)$$

$$\sum_j p_{jk}^* z_{ijk} \leq C; \forall k, i \quad (17)$$

$$\sum_k \sum_j d_k p_{jk} z_{ijk} \leq P_{\max}; \forall i \quad (18)$$

$$z_{ijk} \in \{0, 1\}; \forall i, j, k$$

Maximize Q

subject to

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in J_k} d_k p_{jk} z_{ijk} \leq P_{\max}^L; i \in I \quad (29)$$

$$\sum_{i \in I_j} \sum_j \sum_k m_{ijk} = Q \quad (30)$$

$$\sum_{i \in I_j} z_{ijk} = 1; k \in K, j \in J_k \quad (31)$$

$$-z_{ijk} - z_{irk} + 2^* m_{ijk} \leq 0 \quad (32)$$

$$\sum_j z_{ijk} \leq b_i; i \in I \quad (33)$$

$$m_{ijk} \in \{0, 1\}; k \in K, j \in J_k, i \in I_j \quad (34)$$

$$z_{ijk} \in \{0, 1\}; k \in K, j \in J_k, i \in I_j$$

رابطه 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. رابطه 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. در نهایت رابطه ۳۴ نشان‌گر محدودیت حجم ایستگاه است. مدل ارائه شده به‌ازای مقادیر مشخصی از P_{\max}^L قابل حل است.

است. رابطه 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 رابطه ۲۴ بیان‌گر آن است که هر فعالیت حداقل به یک ایستگاه کاری تخصیص می‌یابد. رابطه 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. رابطه ۲۸ ارتباط بین متغیر مسیره‌ی l 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 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 مسیره‌ی 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 پاره‌ی از فعالیت‌ها را داشته باشند، ثابت در نظر گرفتن 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 موتاژ انعطاف‌پذیر است. برای برطرف کردن این نقایص، یک مدل سلسله‌مراتبی پیشنهاد می‌کنیم.

۵. رویه‌ی سلسله‌مراتبی ارائه شده

به‌منظور در نظر گرفتن 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 نظر گرفتن 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 نظر گرفتن حجم حمل‌ونقل کل به‌طور

ضمنی

کنار هم قرار گرفتن 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 حمل‌ونقل را به‌طور ضمنی در حل مدل بارگذاری در نظر گرفت. نمادگذاری و برنامه‌ریزی ریاضی مربوط به این مدل چنین است:

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

اگر برای محصول k فعالیت‌های پیش‌نیاز r و i در ایستگاه i انجام شوند معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر.

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 نظر گرفته 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_{ii} 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؛

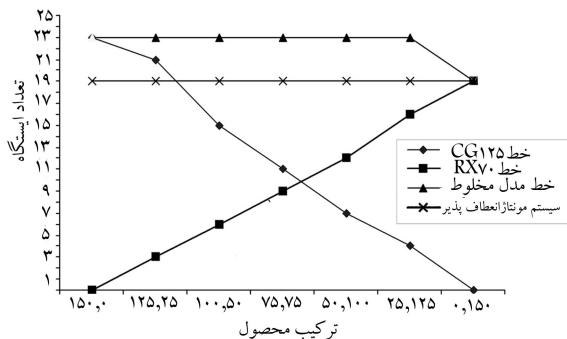
x_{im} : اگر ماشین i m به محل m تخصیص یابد معادل ۱، و در غیر این صورت معادل صفر است؛

z_{irk}^L : متغیر تخصیص به دست آمده از مرحله‌ی برنامه‌ریزی؛

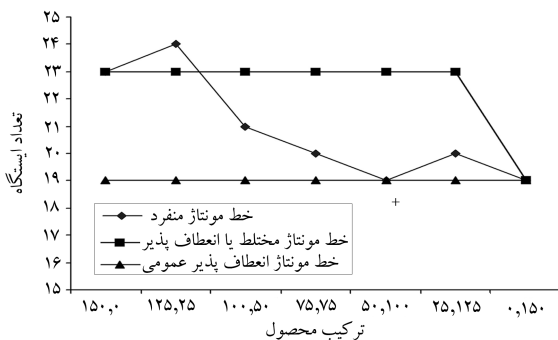
زمان لازم برای نظام مونتاژ معادل ۴۸۰ دقیقه، بدون احتساب زمان‌های جابه‌جایی بین ایستگاه‌های کاری، در نظر گرفته شده است. ترکیب‌های مختلف تقاضای روزانه برای موتورسیکلت‌های CG125, RX70 عبارتند از: (۱۵۰ و ۰)، (۱۲۵ و ۲۵)، (۵۰ و ۱۵۰)، (۷۵ و ۷۵)، (۱۰۰ و ۵۰)، (۲۵ و ۱۲۵)، (۱۵۰ و ۰). به منظور حل مدل‌های ریاضی مربوطه 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

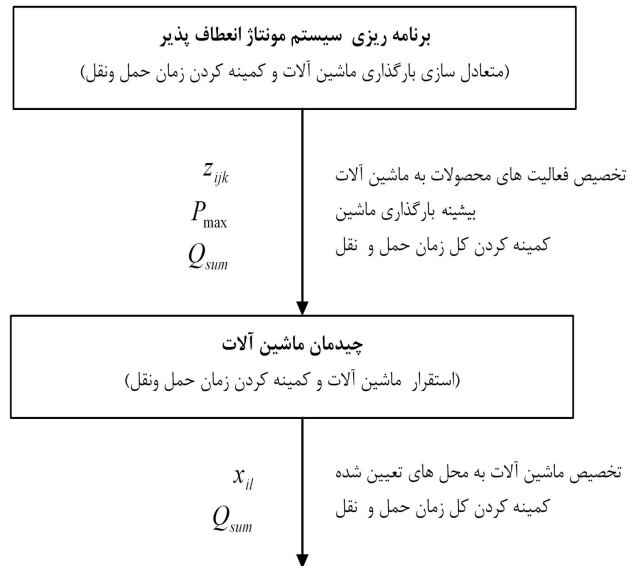
به منظور مقایسه‌ی کارایی رویکرد سلسله‌مراتبی ارائه شده با رویکرد یکپارچه، مثال عددی مطرح شده برای تعداد ایستگاه ۶، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ حل شده است. ترکیب تقاضای روزانه‌ی استفاده شده به ترتیب برای موتورسیکلت‌های CG125, RX70 عبارت است از: (۱۰ و ۵۰). در حالت‌های مرزی $\lambda = 0$ و $\lambda = 1$ به ترتیب به دنبال کمینه‌کردن توابع هدف زمان کل حمل و نقل و زمان بارگذاری هستیم. در حالت‌های دیگر به ازای مقدار مشخصی از زمان بارگذاری (P_{max}^L) زمان کل حمل و نقل را کمینه می‌کنیم. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با افزایش اندازه‌ی مسئله رویکرد سلسله‌مراتبی جواب‌های بهتری به دست 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 به ازای ترکیب‌های مختلف محصول.



شکل ۶. تعداد کل ایستگاه به ازای ترکیب‌های مختلف محصول برای هر سیستم.



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

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

$$\text{Minimize } Q_{sum}^* \quad (35)$$

subject to

$$\sum_i \sum_{l \neq i} \sum_j \sum_r \sum_k \sum_m \sum_{n \neq m} d_k q_{mn} z_{ijk}^L z_{lrk}^L x_{im} x_{ln} = Q_{sum}^* \quad (36)$$

$$\sum_i x_{il} = 1 \quad (37)$$

$$\sum_l x_{il} = 1 \quad (38)$$

$$x_{im} \in \{0, 1\}$$

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. در این 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 استفاده شده به عنوان ورودی براساس ترتیب کد فعالیت‌ها است. زمان جابه‌جایی بین دو ایستگاه مجاور مساوی هم، و برای نوار نقاله ۱۰ ثانیه و برای سیستم حمل و نقل هدایت‌شونده‌ی خودکار (AGV) ۲ ثانیه است.

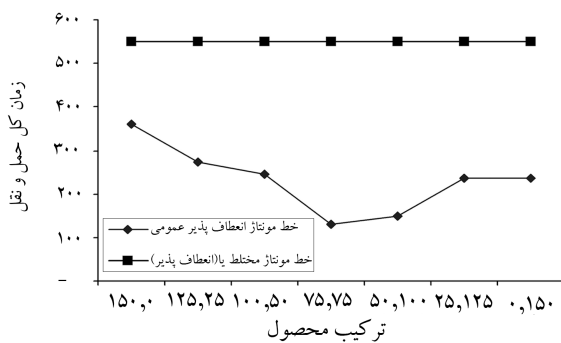
جدول ۱. مقایسه‌ی رویکرد یکپارچه و سلسله‌مراتبی به‌ازای ۲۰ ایستگاه.

رویکرد یکپارچه				رویکرد سلسله‌مراتبی			
P ^L max	Q*sum	Qsum	Pmax	P ^L max	Q	Q*sum	Pmax
$\lambda = 0$	۵۶,۶۷	۹۵	۸۰,۸۳۳	$\lambda = 0$	۵۴	۴۳,۳۳	۷۵۵,۰۰
$\lambda = 1$	۴۱۱,۶۷	۶۱۶,۶۷	۴۱۱,۶۷	$\lambda = 1$	۵	۶۱۶,۶۷	۴۱۱,۶۷
$< 45^\circ$	-	-	-	$< 45^\circ$	۳۸	۲۳۸,۳۳	۴۵۰,۰۰
$< 48^\circ$	۲۲۸,۳۳	۲۸۱,۶۷	۴۷۵,۸۳	$< 48^\circ$	۴۱	۱۷۸,۳۳	۴۷۵,۸۳
$< 60^\circ$	۲۴۵	۴۳۸,۳۳	۵۹۶,۶۷	$< 60^\circ$	۴۷	۱۴۰	۵۸۱,۰۰
ثابت‌ها: ۵۹۱۷۴			متغیرها: ۲۹۹۸۳	ثابت‌ها: ۲۹۳۸			متغیرها: ۳۱۲۰

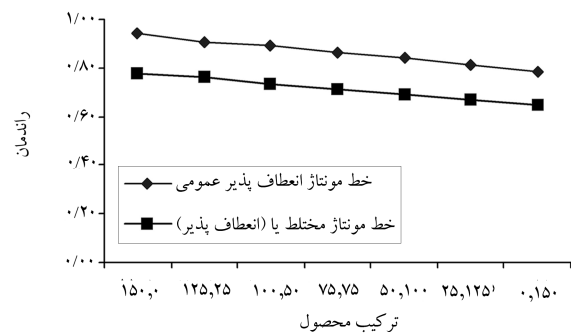
ترکیب محصول کاهش می‌یابد. همچنین کارایی سیستم مونتاژ مختلط (انعطاف‌پذیر) درزمینه‌ی متعادل‌سازی، به‌ازای تمام ترکیبات محصول، بیشتر است. با توجه به شکل ۸، زمان متعادل‌سازی برای سیستم مونتاژ مختلط ثابت می‌ماند، زیرا با سیکل زمانی ثابتی تولید می‌کند؛ حال آن‌که سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی به دلیل دارا بودن 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، به دلیل 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،

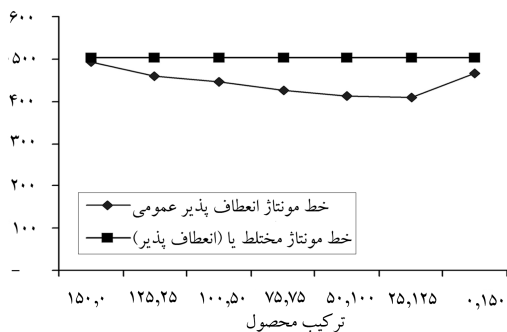
با توجه به شکل ۵ استفاده از خط مونتاژ منفرد (خطوط مونتاژ سستی جدا از هم) نیازمند انجام تغییرات عمده به هنگام تغییر ترکیب محصولات است، و بنابراین فاقد انعطاف‌پذیری لازم است. دو گزینه‌ی دیگر باقی مانده استفاده از خط مونتاژ مختلط و سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی هستند. با توجه به شکل ۶، سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی دارای بیشترین انعطاف‌پذیری و کم‌ترین تغییرات بر اثر تغییر ترکیب محصولات است. همچنین این سیستم نیازمند کم‌ترین تعداد ایستگاه به‌ازای ترکیبات مختلف محصول است. به منظور 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 0° و 15° به 15° و 0° کارایی هر دو سیستم کاهش می‌یابد، زیرا کل زمان لازم برای مونتاژ



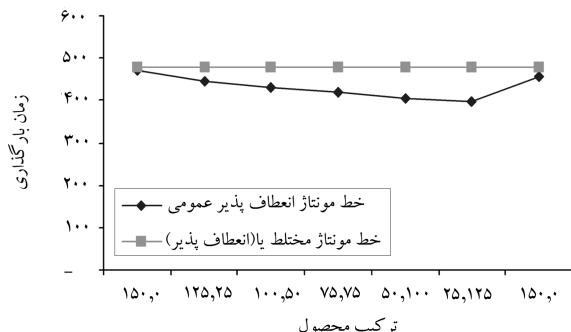
شکل ۹. میزان حمل‌ونقل سیستم مونتاژ مختلط و سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی.



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



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



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

می‌شود و در نتیجه 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 گونه‌ی 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 پاره‌ی 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 سلسله‌مراتبی) مورد ارزیابی قرار گرفت. 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 صرفاً در فاز طراحی و برنامه‌ریزی بوده و در مرحله‌ی اجرای نیازمند بررسی در مرحله اجرا 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 تلاقی مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از رویه‌های شبیه‌سازی در مرحله زمان بندی می‌تواند ما را در شناخت و حل مساله یاری رساند^[۱۲].

پانویس

- flexible assembly system
- automated guided vehicle
- single-model assembly line
- mixed-model assembly line
- nondeterministic polynomial-time hard
- quadratic assignment problem

منابع

- Groover, M. *Automation, production systems and computer-integrated manufacturing*, Prentice Hall, Upper Saddle River, (2001).
- Sawyer, J.H.F. *Line balancing*, Machinery Publishing, Brighton, (1970).
- Salveson, M.E. "The assembly line balancing problem", *Journal of industrial engineering*, **6**, pp. 18-25 (1995).
- Scholl, A. *Balancing and sequencing of assembly lines*, Physica-Verlag, New York, (1999).
- Sawik, T. *Production planning & scheduling in flexible assembly systems*, Springer, Berlin, (1999).

به دلیل 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 قرار گرفته‌اند. در سیستم‌های مونتاژ مختلط (انعطاف‌پذیر)، معیار متعادل‌سازی بارگذاری ایستگاه‌های کاری علاوه بر 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.

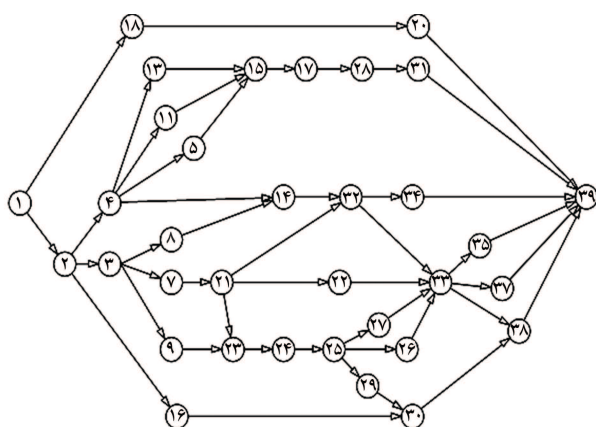
نتایج نشان می‌دهند که سیستم مونتاژ انعطاف‌پذیر عمومی در برابر تغییرات تقاضا منعطف است و تغییرات عمده‌ی در آن حادث نمی‌شود، حال آن‌که در خطوط مونتاژ منفرد و نیز در خط مونتاژ انعطاف‌پذیر بر اثر تغییرات تقاضا تغییرات عمده حاصل

- Sawik, T. "An LP-Based approach for loading and routing in a flexible assembly line", *Int. J. Production Economics*, **64**, pp. 49-58 (2000).
- Sawik, T. "A lexicographic approach to bi-objective loading of a flexible assembly system", *European Journal of Operational Research*, **107**, pp. 656-668 (1998).
- 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).
- Sawik, T. "Monolithic vs. hierarchical balancing and scheduling of a flexible assembly line", *European Journal of Operational Research*, **143**, pp. 115-124 (2002).
- Elshafei, A.N. "Hospital layout as a quadratic assignment problem", *Opl Res. Q.*, **28**, pp. 167-179 (1977).
- 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, pp. 427-435, (December 2006).
- 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).

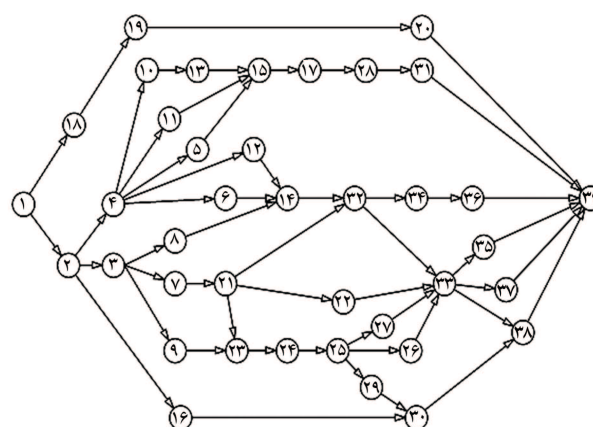
پیوست

فعالیت‌های موتورسیکلت CG125 و RX70:

P_{j2}	P_{j1}	عنوان فعالیت (j)	فعالیت	P_{j2}	P_{j1}	عنوان فعالیت (j)	فعالیت
۲۲	۳۹	جازدن گوشواره	۲۱	۱۲۳	۱۸۶	آوردن شاسی و جازدن موتور در شاسی	۱
۶۵	۹۰	بستن سیم دور موتور	۲۲	۵۶	۶۶	نوشتن کارت کنترل کیفی	۲
۷۰	۹۷	بستن سیم کیلومتر به چرخ جلو	۲۳	۷۵	۷۷	گریس‌کاری و بستن کمک فرمان	۳
۸۳	۷۶	بستن کرپی	۲۴	۶۰	۹۶	آماده‌کردن و جازدن دوشاخ	۴
۷۵	۸۲	بستن فرمان	۲۵	۶۶	۸۰	بستن کمک راست	۵
۵۵	۹۷	بستن سیم کلاچ	۲۶	-	۳۳	بستن چراغ راهنمای راست	۶
۱۱۷	۸۹	بستن سیم ترمز	۲۷	۴۸	۳۰	بستن قفل کلاه ایمنی یا فرمان	۷
۳۳	۱۳۵	بستن قاب زنجیر	۲۸	۱۴۵	۱۱۳	سوارکردن سیم درختی: جا زدن سوکت‌های وسط بدنه	۸
۱۱۵	۱۱۷	بستن بست سیم گاز، و سیم گاز	۲۹	۶۱	۹۰	بستن تایر جلو	۹
۸۸	۵۳	بستن درب مغنت (بستن پوسته‌ی موتور)	۳۰	-	۱۰۰	بستن هواکش	۱۰
۳۰	۲۱	بستن پدال دنده	۳۱	۶۶	۹۰	بستن کمک چپ	۱۱
۱۶۶	۸۹	عبور دادن و جداکردن دسته سیم از داخل کاسه‌ی چراغ: جازدن سیم‌های جلو (۱)	۳۲	-	۳۳	بستن چراغ راهنمای چپ	۱۲
۴۰	۱۰۳	جازدن باک و بستن درب باک	۳۳	۱۸۲	۱۵۰	بستن بچه گلگیر و گلگیر	۱۳
۱۱۵	۱۳۰	جازدن سوکت‌های سیم‌های داخل چراغ و بوق: جازدن سیم‌های جلو (۲)	۳۴	۱۵۳	۱۵۰	بستن سیم درختی: جازدن سوکت‌های عقب	۱۴
۹۶	۷۹	جازدن زین	۳۵	۱۱۸	۱۲۰	جازدن چرخ عقب	۱۵
-	۸۵	بستن بلوری جلو	۳۶	۳۰	۲۷	بستن هندل	۱۶
۷۷	۱۸	جازدن قاب بغل راست	۳۷	۱۵۸	۱۳۰	بستن زنجیر، بستن پیچ چرخ عقب	۱۷
۷۷	۱۸	جازدن قاب بغل چپ	۳۸	۷۰	۱۳۵	بستن سیم استپ ترمز، بستن پدال ترمز و جازدن و بستن میل تعادل (محور)	۱۸
۴۵	۴۷	پایین آوردن موتور از خط	۳۹	-	۱۰۱	بستن فنر پدال ترمز و استپ ترمز	۱۹
				۸۶	۱۵۶	بستن آگزوز	۲۰



نمودار پیش‌نیازی موتور سیکلت RX70:



نمودار پیش‌نیازی موتور سیکلت CG125: