مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۳)
دوره‌ی ۱ - ۳۰، شماره‌ی ۲، ص. ۶۷-۷۱

Original Article

مدل‌سازی و حل یک مسئله‌ی دوباره‌کاری تولید با استفاده از رویکرد صف

محمدامین ایری (دانشجوی کارشناسی ارشد)
سید حمیدرضا پسندیده * (استادیار)
گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه خوارزمی

mohammad.amin.iri@gmail.com
shr_pasandideh@khu.ac.ir

دوباره‌کاری تولید[۱]، فرایندی است که طی آن محصولات مستهلک یا معیوب با شرایط یک محصول جدید بازیابی می‌شود. قوانین محیط زیست، انتظارات مشتریان، و محرک‌های اقتصادی از مهم‌ترین عوامل ایجاد انگیزه در صنایع برای استفاده از فعالیت‌هایی نظیر دوباره‌کاری تولید و بازیافت هستند. در این پژوهش یک مدل دوهدفه PINLP[۲] برای به دست آوردن تعداد بهینه‌ی ماشین‌آلات مورد نیاز هریک از ایستگاه‌های کاری در یک مرکز دوباره‌کاری تولید ارائه شده است. یکی از اهداف ارائه‌شده در این مدل، کمینه‌سازی متوسط زمان انتظار محصولات در صف است؛ هدف دیگر کمینه‌سازی متوسط بیکاری‌های ایستگاه‌های کاری است. مدل ایجاد شده توسط روش‌های LP سنجی و Maximin حل شده و به‌دلیل پیچیدگی بسیار بالای مدل مثال‌هایی با ابعاد کوچک برای آن ارائه شده است. در انتها جواب‌های حاصل از روش‌های مذکور ارائه شده است.

واژگان کلیدی: دوباره‌کاری تولید، نظریه‌ی صف، تصمیم‌گیری چندهدفه، بهینه‌سازی.

۱. مقدمه

دوباره‌کاری تولید، فرایندی است که طی آن محصولات مستهلک یا معیوب با شرایط یک محصول جدید بازیابی می‌شود. این فرایند، استانداردهای کیفی محصولات جدید را برای قطعات کارکرده فراهم می‌کند. دوباره‌کاری تولید نه‌تنها روشی مستقیم و ارجح برای کاهش میزان ضایعات ایجاد شده است بلکه باعث کاهش مصرف مواد جدید و کاهش استفاده از منابع انرژی نیز می‌شود.[۱] دوباره‌کاری تولید یکی از عوامل مهم بازیابی محصولات است. بازیابی محصولات با جمع‌آوری محصولات مستهلک و مرجوعی، و جست‌وجوی فرصت‌هایی برای دوباره‌کاری محصولات، استفاده‌ی مجدد از اعضا یا بازیافت مواد سروکار دارد. هدف مدیریت بازیابی محصولات «دست‌یابی هرچه بیشتر به ارزش اقتصادی همراه با کاهش ضایعات نهایی تا حد امکان» است. در طرف دیگر، بازیافت فرایند بازیابی مواد و محصولات از رده خارج است بدون این که ویژگی‌های محصول اصلی حفظ شود.[۲]

مطالعات زیادی در مورد برنامه‌ریزی تولید و کنترل آن با رویکرد تولید دوباره انجام شده است. در یکی از این مطالعات، یک سیستم کنترل موجودی همراه با در نظرگرفتن محصولات برگشتی بررسی شده[۱] به‌طوری که دوباره‌کاری تولید به‌عنوان یک گزینه‌ی جایگزین در بعضی موارد برای تولید در نظر گرفته شده که هر دو زمان تدارک یکسانی دارند.

در مطالعه‌ی یک رویکرد ابتکاری برای تقاضاهای عمومی و فرایندهای برگشتی ارائه شده است. در مطالعه‌یی دیگر، یک سیستم دوباره‌کاری تولید در نظرگرفته شده که موجودی را با سه فرایند تولید ــ تولید محصولات، تولید قطعات و جداسازی محصولات بازیابی شده ــ کنترل می‌کند.[۳]

در یکی دیگر از این مطالعات، سود حاصله‌ی ممکن از دوباره‌کاری با توجه به هزینه‌های مربوط به موجودی بهبود یافته است.[۴] بدین‌منظور محیط تولید مدل شده به‌گونه‌یی است که در آن تولید و دوباره‌کاری هر دو نیازمند یک سری عملیات یکسان و جداگانه در یک شبکه‌ی صف‌اند، و با فرض قابل‌کنترل بودن بازگشتی‌ها و ظرفیت نامحدود تولید، احتمال بهینه‌ی بازگشت اقلام فروخته شده محاسبه می‌شود.[۴]

در مقاله‌یی دیگر، ابزار پشتیبانی تصمیم‌گیری راهبردی برای بهینه‌سازی[۳] شبکه‌ی دوباره‌کاری مورد نیاز، یک سری تصمیمات مالی لازم را توسعه داده‌اند که نه‌تنها با تعداد و مکان مراکز دوباره‌کاری، بلکه با ظرفیت مناسب و سطوح موجودی برای تضمین سطح سرویس‌دهی مشخص نیز سر و کار دارد.[۵]

در مطالعه‌ی مهم دیگری، یک مدل تحلیلی با استفاده از نظریه‌ی صف [۴] برای به‌دست آوردن بهترین سیاست پذیرش محصولات بازگشتی ارائه شده است.[۶] در مدل مذکور ورود محصولات در قالب فرایند پواسون صورت می‌گیرد. از آنجا که ورودی‌های نقص‌هایی دارند و نیاز به عملیات مختلف دارند، محصولات مسیرهای مختلفی بین ایستگاه‌ها طی می‌کنند. محصول بازگشتی یا برای انجام دوباره‌کاری تولید تأیید می‌شود یا برای کاهش تراکم به قیمت اسقاطی به فروش می‌رسد. در این مطالعه یک الگوریتم ژنتیک پیوسته برای حل این مدل به‌صورت مسئله‌ی برنامه‌سازی

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۰/۲۶، اصلاحیه ۱۳۹۲/۳/۸، پذیرش ۱۳۹۲/۳/۲۱.

عددصحیح غیرخطی ترکیبی پیاده‌سازی شده است.[۶]

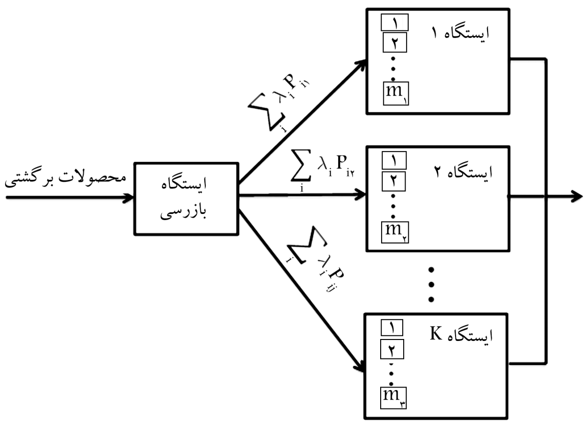
محققین در مطالعه‌یی دیگر، یک مرکز دوباره‌کاری را به‌صورت شبکه‌ی صف GI/G/۱ شبیه‌سازی کرده و تعداد بهینه‌ی ترکیب محصولات را، برای دوباره‌کاری در شرایط بیشینه‌سازی سود و با در نظرگرفتن محدودیت وضعیت در سطح مطلوب، محاسبه کرده‌اند.[۷]

در مطالعه‌ی حاضر، ابتدا به تعریف مسئله خواهیم پرداخت (بخش ۲) و سپس مدل مسئله‌ی تعریف شده ارائه خواهد شد (بخش ۳). در ادامه، روش‌های حل مسئله (بخش ۴) و سپس مثال‌های عددی (بخش ۵) ارائه خواهد شد. در نهایت نتیجه‌گیری مطالعه در بخش ۶ ارائه خواهد شد.

۲. تعریف مسئله

سیستمی مشابه شکل ۱ را در نظر بگیرید. با این فرض که سیستم در حالت پایدار قرار دارد و جریان‌های بازگشتی محصولات به مرکز دوباره‌کاری وارد می‌شود، ابتدا در ایستگاه بازرسی محصولات مورد بازرسی قرار می‌گیرند و سپس عملیاتی که باید روی آنها انجام شود مشخص می‌شود. بعد از مشخص شدن نوع عملیات، بسته به نوع عملیات مورد نیاز، محصول به یکی از K ایستگاه کاری فرستاده می‌شود. در هر ایستگاه تعدادی ماشین وجود دارد که کار یکسانی روی محصولات انجام می‌دهند؛ کار ماشین‌ها در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. در این جا کل محصولات بازگشتی برای دوباره‌کاری به ایستگاه‌های کاری فرستاده می‌شود. برای ورود به ایستگاه‌های کاری در هر ایستگاه، صفی ایجاد خواهد شد که در آن ورود محصولات طبق فرایند پواسون انجام می‌گیرد و نرخ سرویس‌دهی نیز به‌صورت نمایی در نظر گرفته می‌شود که مدل صف ایجاد شده به‌صورت M/M/m خواهد بود. محصولات دوباره‌کاری شده پس از انجام عملیات، آماده‌ی فروش می‌شود. فرضیات مسئله عبارت‌اند از:

- محصولات طبق فرایند پواسون وارد می‌شوند؛
- هر محصول با احتمال مشخص P_{ij} به ایستگاه j ارجاع داده می‌شود؛
- مدت زمان تعمیر در هر ایستگاه نمایی است؛
- محدودیت ظرفیت وجود ندارد؛
- در هر ایستگاه کاری عملیات مشخصی انجام می‌شود و عملیات در هیچ ایستگاهی یکسان نیست.



شکل ۱. مرکز دوباره‌کاری تولید.

در این پژوهش تعداد ماشین‌ها در ایستگاه‌های کاری طوری تعیین می‌شود که متوسط زمان انتظار در صف و متوسط بیکاری‌های ایستگاه‌های کاری کمینه شود؛ این نکته برای محصولات وابسته به زمان و... بسیار مهم است. بنابراین تمامی شرکت‌های تولیدی مانند تولیدکنندگان قطعات رایانه، قطعات خودرو، تجهیزات پزشکی و... از کاربران این مطالعه‌اند.

۳. مدل‌سازی مسئله

۱.۳. پارامترهای مسئله

۱.۱.۳. اندیس‌ها

i: اندیس مربوط به محصولات $(i = 1, 2, ..., n)$؛

j: اندیس مربوط به ایستگاه‌های کاری $(j = 1, 2, ..., k)$.

۲.۱.۳. پارامترها

W_{qj}: مدت زمان انتظار در صف محصول i در ایستگاه j؛

c_j: هزینه‌ی خرید واحد ماشین‌آلات مورد نیاز ایستگاه j؛

B: بودجه‌ی در نظرگرفته شده برای خرید ماشین‌آلات؛

λ_i: نرخ ورود محصول i به مرکز آزمون قطعات؛

P_{ij}: احتمال ورود محصول i به ایستگاه j؛

μ_j: نرخ سرویس‌دهی ایستگاه j؛

ρ_j: ضریب بهره‌وری ایستگاه j.

۳.۱.۳. متغیر تصمیم

m_j: تعداد ماشین‌آلات مورد نیاز در هر ایستگاه کاری.

۲.۳. توابع هدف

مسئله‌ی پیش رو به‌صورت یک مدل دوهدفه ارائه خواهد شد؛ یکی از توابع هدف این مسئله مربوط به کمینه‌سازی متوسط مدت زمان انتظار محصول در صف است (رابطه‌ی ۱):

$$\min \frac{1}{K}\sum_j W_{qj} \qquad (1)$$

پس از بسط رابطه‌ی ۱ خواهیم داشت:

$$\min \frac{1}{K}\sum_j \left[\frac{(\frac{\lambda_j}{\mu_j})^{m_j}.\mu_j}{(m_j-1)(m_j\mu_j-\lambda_j)^2}\right]\pi_0 \qquad (2)$$

که در آن π_0 عبارت است از:

$$\pi_0 = \left[1+\sum_{s=1}^{m_j-1}(\frac{\lambda_j}{\mu_j})^s\frac{1}{s!}+(\frac{\lambda_j}{\mu_j})^{m_j}\frac{1}{m_j!}\sum_{s=m_j}^{\infty}(\frac{\lambda_j}{m_j\mu_j})^{s-m_j}\right]^{-1} \qquad (3)$$

و در نهایت تابع هدف اول چنین خواهد بود:

$$\min \frac{1}{k}\sum_j \left[\frac{(\frac{\lambda_j}{\mu_j})^{m_j}.\mu_j}{(m_j-1)(m_j\mu_j-\lambda_j)^2}\right].\left[1+\sum_{s=1}^{m_j-1}(\frac{\lambda_j}{\mu_j})^s\frac{1}{s!} +(\frac{\lambda_j}{\mu_j})^{m_j}\frac{1}{m_j!}\sum_{s=m_j}^{\infty}(\frac{\lambda_j}{m_j\mu_j})^{s-m_j}\right]^{-1} \qquad (4)$$

تابع هدف دوم به کمینه‌سازی متوسط زمان بیکاری در ایستگاه‌ها مرتبط است؛ رابطه‌ی مربوط به تابع هدف مورد نظر چنین نشان داده می‌شود:

$$\min \frac{1}{k}\sum_{j}(1-\rho_j) \tag{۵}$$

از بسط رابطه‌ی ۵ به تابع هدف دوم دست می‌یابیم:

$$\min \frac{1}{k}\sum_{j}\left(1-\frac{\lambda_j}{m\mu_j}\right) \tag{۶}$$

۳.۳. محدودیت‌ها

محدودیت‌های مورد نظر عبارت‌اند از:

- ضریب بهره‌وری ایستگاه‌ها که نشان‌گر درصد زمان کار هر ایستگاه است، و برای برقراری تعادل بین ورود و خروج محصول و پایداری سیستم باید مقدارش کم‌تر از ۱ باشد:

$$\rho_j < 1 \tag{۷}$$

- بودجه‌ی خرید ماشین‌آلات:

$$\sum_j m_j c_j \leq B \tag{۸}$$

- ورود محصولات به ایستگاه j:

$$\lambda_j = \sum_i \lambda_i P_{ij} \tag{۹}$$

- احتمال آن که محصولات بیشتر از زمانی مشخصی (t) در صف بمانند کم‌تر از مقدار α است؛ T_q مدت زمان انتظار محصول در صف است و مطابق رابطه‌ی ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$P\{T_q \geq t\} \leq \alpha \tag{۱۰}$$

با بسط رابطه‌ی ۱۰ خواهیم داشت:

$$\left(\frac{\lambda_j}{\mu_j}\right)^{m_j}\frac{e^{-(m_j\mu_j-\lambda_j)t}}{(1-\rho_j)\,m!}\cdot\left[1+\sum_{s=1}^{m_j-1}\left(\frac{\lambda_j}{\mu_j}\right)^s\frac{1}{s!}+\left(\frac{\lambda_j}{\mu_j}\right)^{m_j}\frac{1}{m_j!}\sum_{s=m_j}^{\infty}\left(\frac{\lambda_j}{m_j\mu_j}\right)^{s-m_j}\right]^{-1}\leq\alpha \tag{۱۱}$$

۴.۳. مدل مسئله

$$\min\frac{1}{k}\sum_j\left[\frac{\left(\frac{\lambda_j}{\mu_j}\right)^{m_j}.\mu_j}{(m_j-1)(m_j\mu_j-\lambda_j)^2}\right]\cdot\left[1+\sum_{s=1}^{m_j-1}\left(\frac{\lambda_j}{\mu_j}\right)^s\frac{1}{s!}+\left(\frac{\lambda_j}{\mu_j}\right)^{m_j}\frac{1}{m_j!}\sum_{s=m_j}^{\infty}\left(\frac{\lambda_j}{m_j\mu_j}\right)^{s-m_j}\right]^{-1} \tag{۱۲}$$

$$\text{s.t.}: \min\frac{1}{k}\sum_j\left(1-\frac{\lambda_j}{m\mu_j}\right) \tag{۱۳}$$

$$\frac{\lambda_j}{m\mu_j} < 1 \quad \forall j \tag{۱۴}$$

$$\sum_j m_j c_j \leq B \quad \forall j \tag{۱۵}$$

$$\lambda_j = \sum_i \lambda_i P_{ij} \quad \forall i, j \tag{۱۶}$$

$$\left(\frac{\lambda_j}{\mu_j}\right)^{m_j}\frac{e^{-(m_j\mu_j-\lambda_j)t}}{(1-\rho_j)\,m!}\cdot\left[1+\sum_{s=1}^{m_j-1}\left(\frac{\lambda_j}{\mu_j}\right)^s\frac{1}{s!}+\left(\frac{\lambda_j}{\mu_j}\right)^{m_j}\frac{1}{m_j!}\sum_{s=m_j}^{\infty}\left(\frac{\lambda_j}{m_j\mu_j}\right)^{s-m_j}\right]^{-1}\leq\alpha$$

$$\forall j \;\; for \;\; j=1,\dots,k \tag{۱۷}$$

$m_j > 0$ و عدد صحیح (۱۸)

۴. حل مسئله

مدل‌های تصمیم‌گیری به دو دسته‌ی عمده تقسیم می‌شود: مدل‌های چندهدفه (MODM) و مدل‌های چندشاخصه (MADM). مدل‌های چندهدفه به‌منظور طراحی بهینه با توجه به چند هدف کاربرد دارند، در حالی که از مدل‌های چندشاخصه به‌منظور انتخاب گزینه‌ی برتر استفاده می‌شود.[۸] در این مطالعه ما با یک مدل دوهدفه سروکار داریم. برای حل مسائل چندهدفه روش‌های مختلفی وجود دارد. در این مطالعه برای حل مدل ارائه‌شده ابتدا از روش LP سنجی و سپس از روش Maximin استفاده می‌کنیم. چون می‌خواهیم مدل خود را به فرم استاندارد تبدیل کنیم توابع هدف را در یک منفی ضرب می‌کنیم تا به حالت Max درآیند. در اینجا تابع هدف اول (رابطه‌ی ۱۲) به‌عنوان f_1 و از تابع هدف دوم (رابطه‌ی ۱۳) به‌عنوان f_2 در نظر گرفته می‌شود. سپس هرکدام از توابع هدف به‌صورت جداگانه با محدودیت‌های مسئله حل می‌شود؛ جواب بهینه‌ی f_1 را f_1^* و جواب بهینه‌ی f_2 را f_2^* می‌نامیم.

۱.۴. روش LP سنجی

در این روش، هدف کمینه‌سازی انحراف توابع هدف موجود از یک مدل چندهدفه نسبت به یک راه حل ایده‌آل است. x^* را راه حل ایده‌آل گویند اگر، تمامی اهداف موجود از یک مسئله‌ی مفروض را به‌طور همزمان بهینه سازد:

$$F(x^*) = \{f_1(x^*), f_2(x^*), \dots, f_k(x^*)\} \tag{۱۹}$$

$1 \leq p \leq \infty$ بیان‌گر پارامتر مشخص‌کننده‌ی خانواده‌ی $\mathrm{L-P}$ است. ارزش P مشخص کننده‌ی درجه‌ی تأکید بر انحرافات موجود است به‌گونه‌یی که هرچه این ارزش بزرگ‌تر باشد تأکید بیشتری بر بزرگ‌ترین انحرافات خواهد داشت. معمولاً ارزش‌های $P=1$ و $P=2$ و $P=\infty$ در محاسبات کاربرد دارند. در این روش، هر یک از توابع هدف بیشینه‌سازی به‌صورت جداگانه با محدودیت‌های مسئله حل می‌شود و $F(x^*)=\{f_1(x^*), f_2(x^*), \dots, f_k(x^*)\}$ از حل k مسئله‌ی یک‌هدفه به دست می‌آید؛ x^{*j} نیز هدف jام را بهینه می‌سازد. اگر $x^{*1}=x^{*2}=\dots=x^{*k}$، آنگاه راه حل ایده‌آل برای یک برنامه‌ریزی چندهدفه حاصل شده است.

سنجش انحراف یک راه حل موجود نسبت به راه حل ایده‌آل، به‌صورت یک

تابع سازگار خواهد بود:

$$\mathrm{L-P}=\left\{\sum_{j=1}^{k}\gamma_j\left[f_j\left(x^{*j}\right)-f_j\left(x\right)\right]^p\right\}^{\frac{1}{p}} \qquad (20)$$

از آنجا که ارزش $\mathrm{L-P}$ سنجی ممکن است تحت تأثیر مقیاس اندازه‌گیری اهداف موجود واقع شود (در صورت متفاوت بودن این مقیاس‌ها)، برای رفع این مشکل می‌توان از رابطه‌ی ۲۱ استفاده کرد:

$$\mathrm{L-P}=\left\{\sum_{j=1}^{k}\gamma_j\left[\frac{f_j\left(x^{*j}\right)-f_j\left(x\right)}{f_j\left(x^{*j}\right)}\right]^p\right\}^{\frac{1}{p}} \qquad (21)$$

براساس این روش تابع هدف مسئله عبارت خواهد بود از:

$$\mathrm{Min}\left(\left(\frac{f_1^*-\left(-\left(\frac{1}{K}\sum_j W_{qj}\right)\right)}{f_1^*}\right)^P+\left(\frac{f_2^*-(-(\frac{1}{K}\sum_j(1-\rho_j)))}{f_2^*}\right)^P\right)^{\frac{1}{P}} \qquad (22)$$

۲.۴. روش Maximin

در این روش نیز همانند روش LP سنجی، ابتدا هرکدام از توابع هدف بیشینه‌سازی به‌صورت جداگانه با محدودیت‌های مسئله حل می‌شود و $\{f_1(x^*), f_2(x^*), ..., f_k(x^*)\}$ از حل k مسئله‌ی یک‌هدفه به دست می‌آید و در نهایت خواهیم داشت:

$$\mathrm{Max}(\min(\frac{f_1\left(x\right)}{f_1\left(x^{*1}\right)},\frac{f_2\left(x\right)}{f_2\left(x^{*2}\right)},...,\frac{f_k\left(x\right)}{f_k\left(x^{*k}\right)}) \qquad (23)$$

جدول ۱. مقادیر مربوط به داده‌های مثال ۱.

ایستگاه	C	μ_j	B
۱	۱۴۰	۶۰	۱۰۰۰
۲	۱۵۰	۵۷	

جدول ۲. مقادیر P_{ij} و λ_i.

	محصول				
	۱	۲	۳	۴	۵
ایستگاه ۱	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۵	۰٫۱
ایستگاه ۲	۰٫۴	۰٫۲	۰٫۳	۰٫۱	۰
λ_i	۴۲	۴۶	۲۵	۳۴	۲۷

که با جایگذاری f_1 و f_2 در آن خواهیم داشت:

$$\mathrm{Max}(\min(\frac{\frac{1}{K}\sum_j W_{qj}}{f_1^*},\frac{\frac{1}{K}\sum_j\left(1-\rho_j\right)}{f_2^*})) \qquad (24)$$

۵. مثال‌های عددی

برای مدل ارائه شده‌ی فوق دو مثال عددی ارائه شده است که هم برای روش LP سنجی، و هم برای روش Maximin حل شده است؛ در هر دو مثال $t=3$ در نظر گرفته شده است.

۱.۵. مثال ۱

در این مثال دو ایستگاه و پنج محصول را در نظر گرفته‌ایم؛ تعداد محصولات وارده (از هر نوع) به مرکز دوباره‌کاری، با استفاده از تابع توزیع یکنواخت عبارت است از:

$$\lambda_i\sim u(25,50)$$

همچنین هزینه‌ی خرید هر یک از ماشین‌آلات، بودجه‌ی در دسترس، و نرخ سرویس‌دهی مربوط به هریک از ایستگاه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین سایر مقادیر مربوط به مثال ۱ در جدول ۲ آمده است.

نتایج به دست آمده برای روش LP سنجی با $P=1$ و $P=2$ برای ایستگاه اول تعداد دو ماشین و برای ایستگاه دوم تعداد پنج ماشین است که مقدار تابع هدف با $P=2$ کم‌تر از مقدار تابع هدف در $P=1$ به دست آمده است. همچنین مقدار بهینه‌ی ماشین‌آلات با استفاده از روش Maximin برای ایستگاه اول تعداد دو، و برای ایستگاه دوم تعداد سه ماشین، با مقدار تابع هدف کم‌تری نسبت به روش LP سنجی به دست آمده است. نتایج به دست آمده در جدول ۳ نیز ارائه شده است.

جدول ۴. مقادیر مربوط به داده‌های مثال ۲.

ایستگاه	C	μ_j	B
۱	۱۱۴	۶۰	۱۰۰۰
۲	۱۴۲	۵۷	

جدول ۵. مقادیر P_{ij} و λ_i.

	محصول ۱	محصول ۲	محصول ۳	محصول ۴
ایستگاه ۱	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۵
ایستگاه ۲	۰٫۲	۰٫۱	۰٫۳	۰٫۴
λ_j	۴۲	۴۷	۳۲	۴۰

جدول ۳. جواب‌های به دست آمده با استفاده از روش‌های LP سنجی و Maximin برای مثال اول.

	n	k	α	f_1^*	f_2^*	مقدار تابع هدف	m_1^*	m_2^*
روش LP سنجی با $\mathrm{P}=1$						۶٫۴۴۹	۲	۵
روش LP سنجی با $\mathrm{P}=2$	۵	۲	۰٫۴	۰٫۰۰۰۳۴۹۴	۰٫۵۵۲۹۸۲۵	۳٫۸۶۶	۲	۵
روش Maximin						۰٫۲۰۰۱	۲	۳

جدول ۶. جواب‌های به دست آمده با استفاده از روش‌های LP سنجی و Maximin برای مثال دوم.

	n	k	α	f_1^*	f_2^*	مقدار تابع هدف	m_1^*	m_2^*
روش LP سنجی با $P = 1$						۷٫۸۰۳	۳	۴
روش LP سنجی با $P = 2$	۴	۲	۰٫۴	۰٫۰۰۰۱۰۰۸	۰٫۲۸۵۰۸۷۷	۴٫۵۳۲	۳	۴
روش Maximin						۰٫۱۰۶۹	۳	۴

۲.۵. مثال ۲

در این مثال، همانند مثال ۱، تعداد ایستگاه‌ها دوتا ولی تعداد محصولات ۴ تا در نظر گرفته شده است. مقادیر مربوط به داده‌ی مثال در جدول ۴ و همچنین جدول ۵ ارائه شده است.

مطابق نتایج حاصله، تعداد بهینه‌ی ماشین‌آلات با استفاده از روش‌های مذکور با هم برابر، و برای ایستگاه اول تعداد سه ماشین و برای ایستگاه دوم تعداد چهار ماشین است. همچنین مقدار تابع هدف به دست آمده در روش Maximin از روش LP سنجی کم‌تر است (جدول ۶).

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک مدل دوهدفه‌ی PINLP برای به دست آوردن تعداد بهینه‌ی ماشین‌آلات مورد نیاز هریک از ایستگاه‌های کاری در یک مرکز دوباره‌کاری تولید ارائه شده است. یکی از اهداف مد نظر کمینه‌سازی متوسط زمان انتظار محصولات در صف است و هدف دیگر کمینه‌سازی متوسط بیکاری‌های ایستگاه‌های کاری است. رویکرد حل این مدل با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندهدفه[5] و به‌طور خاص روش‌های LP سنجی و روش Maximin است. برای مدل فوق به‌علت پیچیدگی بالای مدل و غیرخطی بودن آن دو مثال عددی با اندازه‌ی کوچک ارائه شده است. حل مدل فوق توسط نرم‌افزار LINGO ویرایش ۱۱ انجام شده است.

برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود:

- تصمیم‌گیری درمورد رفتن محصول بازگشتی به مرکز دوباره‌کاری یا فروش آن به قیمت اسقاطی؛
- تبدیل مدل صف M/M/m در نظرگرفته شده به مدل صف G/G/m و حل مدل جدید؛
- ملحوظ داشتن قیمت خرید ماشین‌آلات یا ورود محصولات برگشتی احتمالی؛
- در نظرگرفتن ارزش زمانی پول برای مدل مورد نظر، به‌عنوان مثال برای محصولات حساس به زمان؛
- سناریونویسی برای بودجه‌ی در نظرگرفته شده بسته به موقعیت زمانی؛ مثلاً در یک فصل، فروش یک محصول بیشتر شده و به تبع آن محصولات برگشتی نیز بیشتر خواهد شد (برای هر فصل می‌توانیم بودجه‌یی در نظر بگیریم).

پانوشت‌ها

1. pure integer nonlinear program (PINLP)
2. remanufacturing
3. optimization
4. queuing theory
5. multiple objective decision making

منابع (References)

1. Van der Laan, E.A. and Teunter, R.H. "Simple heuristics for push and pull remanufacturing policies", *European Journal of Operational Research*, **175**, pp. 1084-1102 (2006).
2. Aksoy, H.K. and Gupta, S.M. "Near optimal buffer allocation in remanufacturing systems with N-policy", *Computers & Industrial Engineering*, **59**, pp. 496-508 (2010).
3. Takahashi, K., Morikawa, K., Myreshka , Takeda, D. and Mizuno, A. "Inventory control for a MARKOVIAN remanufacturing system with stochastic decomposition process", *Int. J. Production Economics*, **108**, pp. 416-425 (2007).
4. Bayindir, Z.P., Erkip, N., Güllü, R. "A model to evaluate inventory costs in a remanufacturing environment", *Int J Prod Econ*, **81-82**, pp. 597-607 (2003)
5. Lieckens, K.T., Colen, P.J. and Lambrecht, M.R., *Optimization of a Stochastic Remanufacturing Network with an Exchange Option*, In Press, Corrected Proof (2014).
6. Karamouzian, A., Teimoury, E. and Modarres, M. "A model for admission control of returned products in a remanufacturing facility using queuing theory", *Int J Adv Manuf Technol*, **54**, pp. 403-412 (2011).
7. Souza, G.C. and Ketzeberg, M.E. "Guide VDR capacitated remanufacturing with service level constraints", *Prod Oper Manag*, **11**, pp. 232-248 (2002).
8. Asgarpour, M.J., *Multiple Criteria Decision Making*, University of Tehran press, 10th edition (1998).