

طراحی مدل بازیابی پایدار محصولات فرسوده

نازنین محبی، عباس راد^{۱*}، علی‌رضا موتمنی^۲

- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
۲- استادیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۳- دانشیار، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۱۲

چکیده

هدف این مقاله ارائه مدل بازیابی پایدار محصولات فرسوده با در نظر گرفتن هم‌زمان اثرات اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی است. تعیین تعداد، محل کارخانه‌ها و جریان مواد بین این کارخانه‌ها در شبکه بازیابی مد نظر است. در فرایند بازیابی و مدیریت ضایعات، بیشینه‌سازی سود و منافع اجتماعی و کمینه‌سازی آلودگی در عملیات محصول فرسوده مورد توجه است؛ جهت تجزیه و تحلیل اطلاعات ابتدا از طریق تکنیک فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی وزن شاخص‌های مناسب برای تعریف توابع اجتماعی تعیین شده است. سپس با استفاده از مفاهیم و اصول مدل‌سازی ریاضی به تعیین مجموعه‌ها، پارامترها، متغیرها، توابع هدف و محدودیت‌های مدل ریاضی مکان‌یابی سایت‌های بازیابی ضایعات خودرو پرداخته شده است. به دنبال آن مدل ریاضی ارائه شده به وسیله الگوریتم ژنتیک چندهدفه حل شده است. در این تحقیق دو الگوریتم NSGA-II ترکیبی پیشنهادی و NSGA-II ساده برای حل مدل استفاده و مقایسه شده و تعدادی مسئله آزمایشی به صورت تصادفی تولید و توسط دو الگوریتم حل شده است. همچنین یک نمونه موردی با استفاده از داده‌های واقعی شرکت سایپا توسط مدل حل شده است.

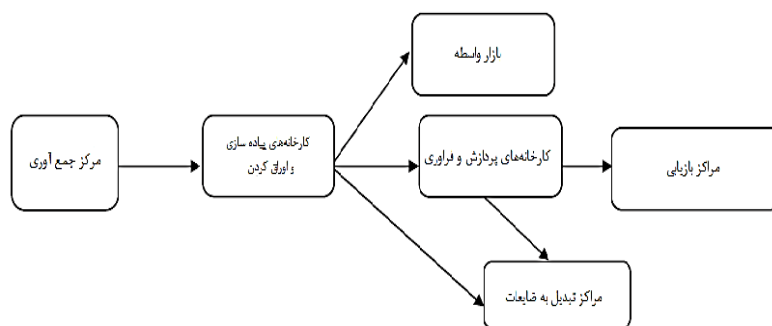
کلیدواژگان: لجستیک معکوس، توسعه پایدار، محصولات فرسوده، الگوریتم ژنتیک چندهدفه

۱- مقدمه و پیشینه تحقیق

توسعه پایدار را می‌توان «مدیریت روابط سیستم‌های انسانی و اکوسیستم‌ها به منظور استفاده پایدار از منابع در جهت تأمین رفاه حال و آینده انسان‌ها و اکوسیستم‌ها» تعریف کرد [۱]. در سال‌های اخیر علاقه و توجه به توسعه پایدار در سطح بین‌الملل به طور فزاینده‌ای رشد کرده به گونه‌ای که سازمان ملل با انتشار اخبار مربوط به توسعه پایدار به این مهم پرداخته است [۲]. افزایش نگرانی‌های اجتماعی و زیست محیطی در سراسر جهان، تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان را برای اجرای استراتژی‌های حفاظت محیط‌زیست مانند بازیابی محصول، مدیریت ضایعات و استفاده از مواد بازیابی شده تحریک کرده و سبب ایجاد انگیزه در آن‌ها می‌گردد. ۴۲٪ مردم معتقدند شرکت‌ها باید کامل و یا حتی جزئی برای حل مسایل اجتماعی خود مسئول باشند [۳]. همچنین این شرکت‌ها در بسیاری از کشورها به وسیله قانون ملزم به مسئولیت‌پذیری برای محصولاتشان در طول کل چرخه زندگی هستند. این گونه قوانین برای صنعت خودرو، یکی از بزرگ‌ترین صنایع در جهان، مناسب است. صنعت خودرو یک مجموعه عملیات زنجیره تأمین شامل تعداد زیادی بخش‌های بین‌المللی برای تولید و تحویل خودروها را شامل می‌شود [۴]. ساس کومر و همکاران سال ۲۰۱۰ یک مدل برنامه‌نویسی غیرخطی عدد صحیح مختلط برای بهینه‌سازی سود یک شبکه لجستیک معکوس چندپله‌ای ارائه دادند و یک مورد واقعی از بازتولید تیر کامیون برای بازار دست دوم معرفی کردند [۵]. تزکایا و همکاران سال ۲۰۱۱ یک مدل چندمنظوره و یک روش دو مرحله‌ای برای مسأله طراحی شبکه لجستیک معکوس پیشنهاد دادند [۶]. لی و دانگ سال ۲۰۰۸ طراحی شبکه لجستیک بازیافت EOL برای سیستم‌های رایانه را مورد بررسی قرار دادند و یک مدل برنامه‌ریزی قطعی برای جریان‌های لجستیک معکوس و مستقیم و یک روش حل ابتکاری دو مرحله‌ای را توسعه دادند [۷]. دمیرل و گاکسن سال ۲۰۰۸ یک مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح برای طراحی یک سیستم طراحی مجدد با جریان‌های معکوس و مستقیم را توسعه دادند [۸].

یور و همکاران سال ۲۰۱۱ یک شبکه بهبود برای محصولات الکتریکی و الکترونیکی در پرتقال را بررسی و یک مدل ریاضی بر پایه نظریه گراف ارائه دادند [۹]. آلمر و همکاران سال ۲۰۱۲ یک مدل برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح مختلط برای بهینه‌سازی سود شبکه

لجستیکی معکوس طراحی کردند [۱۰]. دت و همکاران سال ۲۰۱۲ یک مدل برنامه‌نویسی ریاضی ایجاد کرد که تمام هزینه پردازش در یک شبکه لجستیکی معکوس برای محصولات الکتریکی و الکترونیکی را به حداقل می‌رساند. این مدل محل‌های بهینه برای تجهیزات و جریان مواد را در شبکه تعیین می‌کرد [۱۱]. کتان و همکاران سال ۲۰۱۲ یک مدل برنامه‌نویسی خطی عدد صحیح مختلط برای طراحی شبکه لجستیکی معکوس بر پایه «رد پای کربن» ارائه دادند [۱۲]. داس و چودهاری سال ۲۰۱۲ یک مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط برای به بیشینه سازی سود در پیمان‌های طراحی محصول با در نظر گرفتن گردآوری کالاهای برگشتی، بهبود اجزا و مقدار ترکیب محصول در مراحل مختلف کیفیت ارائه کرد [۱۳]. چن و همکاران سال ۲۰۱۰ استقرار سیستم بازیابی خودرو EOL در تایوان را مرور و این سیستم و عملکرد آن را تحلیل کردند [۱۴].



شکل ۱ ساختار شبکه پیشنهادی

۲-روش تحقیق

تحقیق حاضر را می‌توان براساس هدف از نوع تحقیقات کاربردی به شمار آورد. تحقیقات کاربردی با استفاده از زمینه و بسترشناختی و معلوماتی که از طریق تحقیقات بنیادی فراهم شده برای رفع نیازمندی‌های بشر و بهبود و بهینه‌سازی ابزارها و اشیا و الگوها مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین این پژوهش را می‌توان جز تحقیقات کمی-مدل‌سازی به شمار آورد. این پژوهش براساس نتیجه یا هدف از نوع تحقیقات کاربردی و نیز از نظر روش

اجرا جز تحقیقات کمی - مدل سازی برنامه ریزی ریاضی است.

۳-مدل سازی مسئله

مجموعه ها و اندیس های به کار رفته در مدل ریاضی برنامه ریزی پارامتریک این تحقیق به شرح زیر است.

$\forall i \in I$ و اندیس نشان دهنده مراکز جمع آوری / اولیه I

$\forall j \in J$ و اندیس نشان دهنده محل های بالقوه کارخانه پیاده سازی اوراق کردن J

$\forall k \in K$ و اندیس نشان دهنده محل های کارخانه پردازش و فرآوری بالقوه K

$\forall l \in L$ و اندیس نشان دهنده مراکز بازیابی L

$\forall m \in M$ و اندیس نشان دهنده مراکز تبدیل به ضایعات M

$\forall n \in N$ و اندیس نشان دهنده محل های بازار واسطه N

$\forall t \in T$ و اندیس نشان دهنده دوره های زمانی T

$\forall p \in P$ و اندیس نشان دهنده قطعات یدکی خودرو P

□ پیارامترها

پارامترهای به کار رفته در مدل ریاضی برنامه ریزی پارامتریک این تحقیق به شرح زیر است.

هزینه ثابت راه اندازی کارخانه پیاده سازی و اوراق کردن jc_j

هزینه ثابت راه اندازی کارخانه پردازش و فرآوری ck_k

ظرفیت کارخانه پیاده سازی و اوراق کردن cap_{jj}

ظرفیت کارخانه پردازش و فرآوری cap_{kk}

ظرفیت مرکز بازیابی cap_{ll}

ظرفیت مرکز تبدیل به ضایعات cap_{mm}

هزینه حمل و نقل هر واحد از مرکز جمع آوری / اولیه i به کارخانه پیاده سازی و اوراق

کردن ct_{ijj}

هزینه حمل و نقل هر واحد از کارخانه پیاده سازی و اوراق کردن j به کارخانه پردازش و

فرآوری ct_{jkk}

هزینه حمل و نقل هر واحد از کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j به محل بازار واسطه

$$ct_{jn}n$$

هزینه حمل و نقل هر واحد از کارخانه پردازش و فرآوری k به مرکز بازیابی $ct_{kl}l$

هزینه حمل و نقل هر واحد از کارخانه پردازش و فرآوری k به مرکز تبدیل به ضایعات

$$ct_{km}m$$

هزینه حمل و نقل هر واحد از کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن به مرکز تبدیل به

$$ct_{jm}m$$

ضایعات $ct_{jm}m$ هزینه عملیات هر واحد برای کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j در بازه زمانی $oc_{jt}t$

هزینه عملیات هر واحد برای کارخانه پردازش و فرآوری k در بازه زمانی $oc_{kt}t$

سود هر واحد از قطعه یدکی P-ام قابل استفاده دوباره خودرو r_p

تعداد خودروهای پذیرش شده به وسیله مرکز جمع‌آوری / اولیه i در بازه زمانی $e_{it}t$

تعداد قطعات یدکی در هر خودرو q_p

میزان قطعات قابل استفاده دوباره در هر خودرو v_p

اثرات محیط‌زیستی عملیات انجام شده واحد خودرو فرسوده در کارخانه پیاده‌سازی و

$$El_jj$$

اثرات محیط‌زیستی عملیات انجام شده واحد خودرو فرسوده در کارخانه پردازش و

$$El_kk$$

فرآوری El_kk فاصله بین مرکز جمع‌آوری / اولیه i و کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن $d_{ij}j$

فاصله بین کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j و کارخانه پردازش و فرآوری $d_{jk}k$

فاصله بین کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j و محل بازار واسطه $d_{jn}n$

فاصله بین کارخانه پردازش و فرآوری k و مرکز بازیابی $d_{kl}l$

فاصله بین کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j و مرکز تبدیل به ضایعات $d_{jm}m$

فاصله بین کارخانه پردازش و فرآوری k و مرکز تبدیل به ضایعات $d_{km}m$

امتیاز استخدام کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن EM_jj

امتیاز توسعه محلی کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن LD_jj

امتیاز آسیب به کارگر کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن DM_jj

ریسک محصول کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن PR_jj

امتیاز استخدام کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن $EM_k k$
 امتیاز توسعه محلی کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن $ld_k k$
 امتیاز آسیب به کارگر کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن $DM_k k$
 ریسک محصول کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن $PR_k k$
 F را به عنوان مجموعه زیرمجموعه‌های J برای همه بخش‌ها قرار می‌دهیم.
 $O \in F, SD(O)$ بیشینه تعداد کارخانه‌های پیاده‌سازی و اوراق کردن برای زیرمجموعه O را مشخص می‌کند.
 □ متغیرهای تصمیم
 متغیرهای تصمیم به کار رفته در مدل ریاضی برنامه‌ریزی پارامتریک این تحقیق به شرح زیر است.

در غیر این صورت $a_j = 0$ اگر کارخانه پیاده‌سازی و اوراق در محل j راه اندازی گردد 1

در غیر این صورت $b_k = 0$ اگر کارخانه پردازش و فرآوری در محل k راه اندازی گردد 1

$\alpha_{ij} =$
 در غیر این صورت 0 اگر یک جریان بین جمع‌آوری i به کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j وجود داشته باشد 1

تعداد خودروهای حمل شده از مرکز جمع‌آوری / اولیه i به کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j در بازه زمانی t x_{ijt}

تعداد خودروهای حمل شده از کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j به کارخانه پردازش و فرآوری k در بازه زمانی t Y_{jkt}

تعداد قطعات یدکی خودرو p حمل شده از کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j به محل بازار واسطه n در بازه زمانی t Z_{jnpt}

مقدار مواد حمل شده از کارخانه پردازش و فرآوری k به مرکز بازیابی l در بازه زمانی t w_{klt}

مقدار مواد حمل شده از کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j به مرکز تبدیل به ضایعات m در بازه زمانی t u_{jmt}

مقدار مواد حمل شده از کارخانه پردازش و فرآوری k به مرکز تبدیل به ضایعات m در بازه زمانی $u_{kmt}t$

□ اسکالرها

اسکالرهایی به کار رفته در مدل ریاضی برنامه‌ریزی پارامتریک این تحقیق به شرح زیر است.

اثرات محیط زیستی حمل واحد خودرو فرسوده در کیلومتر EIT

وزن نرمال شده استخدام W_{em}

وزن نرمال شده توسعه محلی W_{ld}

وزن نرمال شده وضعیت کاری پرخطر W_{dm}

وزن نرمال شده ریسک محصول W_{pr}

هزینه تبدیل به ضایعات به ازای هر واحد cd

هزینه ایجاد انگیزه برای بازگرداندن هر واحد خودرو به مراکز جمع‌آوری cv

سود هر واحد از محصولات بازیابی شده rr

میزان مواد حمل شده از کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن به مرکز تبدیل ضایعات k_1

میزان مواد حمل شده از کارخانه پردازش و فرآوری به مرکز تبدیل به ضایعات k_2

وزن متوسط خودرو aw_1

وزن متوسط خودرو پیاده‌سازی شده aw_2

با توجه به نمادسازی انجام شده، مدل بهینه‌سازی شبکه لجستیک معکوس به صورت زیر فرمول‌سازی می‌شود.

در کل مدل ریاضی برنامه‌ریزی پارامتریک این تحقیق به شرح ذیل ارائه شده است.

$$\begin{aligned}
 Max \ z_1 = & \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T z_{jnpt} r_p + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T w_{klt} r r \\
 & - \sum_{j=1}^J a_j c_j - \sum_{k=1}^K b_k c_k - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T x_{ijt} c v \\
 & - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T x_{ijt} o c_{jt} \\
 & - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T y_{jkt} o c_{kt} - \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T x_{ijt} c t_{ij} \\
 & - \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T y_{jkt} c t_{jk} \\
 & - \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T z_{jnpt} c t_{jn} \\
 & - \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T w_{klt} c t_{kl} \\
 & - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T u_{jmt} c t_{jm} \\
 & - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T u_{kmt} c t_{km} \\
 & - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T u_{jmt} c d \\
 & - \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T u_{kmt} c d
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Min} z_2 = & \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T Y_{jkt} E I_k + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{ijt} E I_j \\
 & + EIT \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T X_{ijt} d_{ij} \right. \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T k t d_{jk} + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T Z_{jnpt} d_{jn} \\
 & + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T W_{klt} d_{kl} \\
 & + \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T U_{jmt} d_{jm} \\
 & \left. + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T U_{kmt} d_{km} \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Max } z_3 = & \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (W_{em} E M_{jt} + W_{ld} l d_j + W_{dm} D M_j + W_{pr} P R_j) a_j \\
 & + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T (W_{em} E M_{kt} + W_{ld} l d_k + W_{dm} D M_k \\
 & + W_{pr} P R_k) b_k \quad (3)
 \end{aligned}$$

s.t:

$$\begin{aligned}
 x_{ijt} &= e_{it} \alpha_{ij} \quad \forall i, j, t \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} &\geq 0 \quad \forall i \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\sum_{t=1}^I x_{ijt} \leq cap_j a_j \quad \forall j, t \quad (6)$$

$$\sum_{j \in O} a_j \leq SD(O) \quad \forall O \in F \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{jkt} \leq cap_k b_k \quad \forall k, t \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K w_{klt} \leq cap_l \quad \forall l, t \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J u_{jmt} + \sum_{k=1}^K u_{kmt} \leq cap_m \quad \forall m, t \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijt} = \sum_{k=1}^K y_{jkt} \quad \forall j, t \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijt} a w_1 k_1 = \sum_{m=1}^M u_{jmt} \quad \forall j, t \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijt} q_p v_p = \sum_{n=1}^N z_{jnpt} \quad \forall j, p, t \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{jkt} a w_2 (1 - k_2) = \sum_{l=1}^L w_{klt} \quad \forall k, t \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{jkt} a w_2 k_2 = \sum_{m=1}^M u_{kmt} \quad \forall k, t \quad (15)$$

$$x_{ijt}, y_{jkt}, z_{jnpt}, w_{klt}, u_{jmt}, u_{kmt} \geq 0 \quad \forall i, j, k, m, l \quad (16)$$

$$a_j, b_k, \alpha_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall j, k \quad (17)$$

□ توابع هدف و محدودیت‌های مدل ریاضی برنامه‌ریزی پارامتریک

معادلات (۳-۱) توابع هدف مسأله را نشان می‌دهند که هدف آن‌ها به ترتیب بیشینه‌سازی سود نهایی شبکه، کمینه‌سازی اثرات محیط زیستی شبکه و بیشینه‌سازی سود اجتماعی

شبکه است.

تابع هدف (۱) سود نهایی شبکه، تابع هدف (۲) اثرات محیط زیست شبکه، تابع هدف (۳) اثرات اجتماعی شبکه را نشان می‌دهد. محدودیت ۴ ملزم می‌کند که همه خودروهای پذیرش شده به وسیله مراکز جمع‌آوری/ اولیه در هر بازه زمانی باید در آن بازه زمانی پردازش شوند. محدودیت ۵ جریان از مراکز جمع‌آوری/ اولیه به کارخانه‌های پیاده‌سازی و اوراق کردن را تضمین می‌کند.

محدودیت ۶ عدم تجاوز تعداد نهایی خودروهای حمل شده به کارخانه‌های پیاده‌سازی و اوراق کردن از ظرفیت کارخانه‌ها در هر بازه زمانی را تضمین می‌کند. محدودیت ۷ تعداد کارخانه‌های پیاده‌سازی و اوراق کردن که در هر بخش راه‌اندازی می‌شود را محدود می‌کند. محدودیت ۸ عدم تجاوز تعداد نهایی خودروهای حمل شده به کارخانه‌های پردازش و فرآوری در هر بازه زمانی از ظرفیت‌های کارخانه‌ها را تضمین می‌کند. محدودیت ۹ و ۱۰ عدم تجاوز مقدار نهایی مواد حمل شده به مراکز بازیابی و تبدیل به ضایعات در هر بازه زمانی از ظرفیت‌های مراکز را تضمین می‌کند. محدودیت ۱۱ و ۱۲ سازگاری میزان خودرو پیاده‌سازی شده و مواد حمل شده به کارخانه‌های پردازش و فرآوری و مراکز تبدیل به ضایعات به ترتیب برای هر بازه زمانی، محدودیت ۱۳ سازگاری تعداد قطعات یدکی خودروی حمل شده به بازار واسطه برای هر بازه زمانی، محدودیت ۱۴، حمل میزان‌های مواد از کارخانه‌های پردازش و فرآوری به مراکز بازیابی برای هر بازه زمانی، محدودیت ۱۵، سازگاری میزان‌های مواد حمل شده از کارخانه‌های پردازش و فرآوری به مرکز تبدیل به ضایعات برای هر بازه زمانی t ، محدودیت ۱۶ بالاتر از صفر بودن ارزش متغیرهای تصمیم‌گیری X_{ijt} و Y_{jut} و Z_{jnpt} و u_{kmt} و u_{jmt} و W_{klt} را تضمین می‌کند و محدودیت ۱۷ صفر و یک بودن ارزش متغیرهای تصمیم‌گیری a_j و b_k و a_{ijts} را معین می‌کند، این مسئله‌های آزمودن بیشتر و اساساً در مرحله‌های شبکه و اندازه مسئله تفاوت دارند، همچنین اطلاعات مسئله‌های آزمودن عموماً به حساب آورده نمی‌شوند، این یک استثناست [۱۵]، شبکه در نظر گرفته شده در این مطالعه برای قسمت اجرای مدل، مجموعه اندازه‌های مختلف مسئله به صورت تصادفی با استفاده از مدل پیشنهادی ایجاد و حل شده‌اند.

۴-روش حل

در این بخش ابتدا با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی معیارهای تابع اجتماعی برای هریک از مکان‌های بالقوه در این تحقیق از منظر کارخانه‌های پیاده‌سازی و اوراق کردن و پردازش و فرآوری شناسایی می‌شود، سپس به حل مدل ریاضی چندهدفه جهت طراحی شبکه لجستیک معکوس در صنعت خودرو پرداخته می‌شود. در این تحقیق جهت حل مدل از الگوریتم NSGA-II استفاده می‌شود که نوعی از الگوریتم ژنتیک است. ساختار پیشنهادی این الگوریتم جهت حل مدل مورد بررسی به صورت ترکیب با عملگرهای جستجوی همسایگی است که نتایج آن با الگوریتم NSGA-II ساده مقایسه می‌گردد.

تعداد نقاط بالقوه (گزینه‌ها) برای تأسیس تسهیلات برابر با ۷ بوده و شامل شهرهای تهران، کاشان، قزوین، مشهد، تبریز، سمنان و ارومیه است. مبنای انتخاب این گزینه‌ها با توجه به نظر کارشناسان وجود کارخانه‌های گروه خودروسازی سایپا در این مناطق و استفاده احتمالی از تجهیزات آن‌هاست.

در جدول ۱ پارامترهای مربوط به اثرات اجتماعی محاسبه شده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی آمده است.

جدول ۱ مقادیر اثرات اجتماعی

نام شهرها	کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن				کارخانه پردازش و فرآوری			
	توسعه محلی	استخدام	آسیب به کارگر	ریسک محصول	توسعه محلی	استخدام	آسیب به کارگر	ریسک محصول
تهران	۰/۰۳۸	۰/۱۴۵	۰/۱۸	۰/۰۸۶	۰/۱۲۶	۰/۱۴۷	۰/۱۴	۰/۰۷۶
کاشان	۰/۲۱۸	۰/۱۲۴	۰/۱۷۵	۰/۱۷۳	۰/۱۶۵	۰/۱۲۷	۰/۱۴۴	۰/۱۵
قزوین	۰/۱۷۶	۰/۱۵۵	۰/۱۶	۰/۱۷۳	۰/۱۴۲	۰/۱۴۶	۰/۱۷۳	۰/۱۳۴
مشهد	۰/۱۳	۰/۱۲۲	۰/۱۵۸	۰/۱۱۴	۰/۱۲۹	۰/۱۴۷	۰/۱۶۱	۰/۱۴۸
تبریز	۰/۱۲۵	۰/۱۴۲	۰/۱۲۵	۰/۱۱۶	۰/۱۳۳	۰/۱۴۴	۰/۱۴۲	۰/۱۷۴
سمنان	۰/۱۵۳	۰/۱۵۱	۰/۱۰۲	۰/۱۶۱	۰/۱۵۲	۰/۱۴۱	۰/۱۱۱	۰/۱۶۸
ارومیه	۰/۱۵۹	۰/۱۶	۰/۱۰۱	۰/۱۷۶	۰/۱۵۳	۰/۱۴۸	۰/۱۲۹	۰/۱۵

□ مراحل حل مدل از طریق روش الگوریتم ژنتیک

در این تحقیق از آرشیو پارتو جهت نگهداری پاسخ‌های غیرمغلوب^{۷۵} استفاده شده است که در طول اجرای الگوریتم تولید می‌شوند. جهت حل مدل از الگوریتم NSGA-II بر پایه آرشیو پارتو استفاده شده که به صورت ترکیبی طراحی و ساختار اصلی الگوریتم در ساختار ترکیبی این الگوریتم با یک رویه بهبود براساس ساختار جستجوی همسایگی متغیر^{۷۶} ترکیب شده است.

(۱) نحوه نمایش پاسخ

در تمام الگوریتم‌های فرا ابتکاری به دلیل نیاز به حل شدنی در شروع کار، لازم است حل شدنی را بر طبق ساختار مشخصی ذخیره کنیم که به این ساختار نحوه نمایش پاسخ می‌گویند. در این تحقیق برای نمایش هر پاسخ از ماتریس استفاده می‌شود. هر پاسخ شامل چندین ماتریس است که این ماتریس‌ها مطابق با خروجی‌های مدل طراحی می‌شوند. برای نمونه برای متغیر α_j یک ماتریس سطری (یک بعدی) که تعداد درایه‌های آن برابر با J است تعریف می‌شود. ماتریس زیر مثالی از این بخش پاسخ را نشان می‌دهد (شکل ۲). فرض کنید تعداد مکان‌های بالقوه کارخانه پیاده‌سازی اوراق کردن برابر با ۶ باشد و بیشترین مجاز این کارخانه برابر ۴ باشد.

۱	۰	۱	۱	۰	۱
---	---	---	---	---	---

شکل ۲ مثال نحوه نمایش متغیر α_j

در ماتریس بالا در مکان ۱، ۳، ۴ و ۶، کارخانه پیاده‌سازی اوراق کردن برپا شده است. جهت نمایش متغیر b_k نیز از یک ماتریس سطری استفاده شده که تعداد درایه‌های آن برابر با K است.

جهت نمایش متغیر α_{ij} از یک ماتریس دو بعدی استفاده شده که تعداد درایه‌های آن برابر حاصلضرب تعداد مراکز جمع‌آوری در تعداد کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن و مقادیر یک در خانه‌های آن نشان‌دهنده این است که مرکز جمع‌آوری i می‌تواند به کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j کالا ارسال کند.

جهت نمایش متغیر x_{ijt} از یک ماتریس سه‌بعدی استفاده شده که ابعاد آن به صورت $I*J*T$ است. جهت نمایش متغیر y_{jkt} از یک ماتریس سه‌بعدی استفاده شده که ابعاد آن به صورت $J*K*T$ است. جهت نمایش متغیر w_{klt} از یک ماتریس سه‌بعدی استفاده شده که ابعاد آن به صورت $K*L*T$ است. جهت نمایش متغیر u_{kmt} از یک ماتریس سه‌بعدی استفاده شده که ابعاد آن به صورت $K*M*T$ است. جهت نمایش متغیر u_{jmt} از یک ماتریس سه‌بعدی استفاده شده که ابعاد آن به صورت $J*M*T$ است. جهت نمایش متغیر z_{jnt} از یک ماتریس چهاربعدی استفاده شده که ابعاد آن به صورت $J*N*P*T$ است.

□ نحوه تولید پاسخ‌های اولیه

در این تحقیق از یک روش جستجوی همسایگی موازی برای تولید پاسخ‌های آغازین استفاده می‌شود. از سه عملگر به صورت موازی استفاده شده است. در هر کدام از توابع جستجوی همسایگی، یک پاسخ به عنوان پاسخ اولیه به تابع مربوطه ارسال شده است و در گام اول عملگر مربوطه روی پاسخ اعمال می‌شود و همسایگی پاسخ به دست می‌آید. پس از تولید تمام پاسخ‌های همسایگی با توجه به قاعده دب [۱۶] پاسخ با کیفیت^{۷۷} بالاتر و پراکندگی^{۷۸} بالاتر انتخاب شده و در صورت تکراری نبودن به جمعیت پاسخ‌های اولیه اضافه می‌شود.

۵- عملگرهای الگوریتم NSGA-II

الگوریتم NSGA-II نسخه توسعه‌یافته الگوریتم ژنتیک جهت حل مدل‌های چندهدفه است؛ بنابراین این الگوریتم دارای عملگرهای جهش، تقاطع و تجدید نسل است.

□ عملگر جهش: در این تحقیق جهت پیاده‌سازی عملگر جهش، از ۳ ساختار جستجوی همسایگی شرح داده شده در بخش تولید پاسخ‌های اولیه استفاده شده است. به این ترتیب که یک عدد تصادفی بین ۱ تا ۳ تولید شده و سپس با توجه به عدد تولید شده یکی از ساختارهای اول، دوم یا سوم روی پاسخ اعمال شده است.

□ عملگر تقاطع: در این تحقیق جهت پیاده‌سازی عملگر تقاطع از یک تقاطع تک نقطه‌ای استفاده شده که روی دو ماتریس a_j و b_k اعمال شده است.

□ مسئله نمونه

در این مقاله مدل برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده برای یک مطالعه موردی که شامل لجستیک معکوس خودروهای فرسوده سایپا در شهرهای تهران، کاشان، قزوین، تبریز، ارومیه، مشهد و سمنان حل شده است. پس از حل مسأله مربوط به مطالعه موردی مقادیر توابع هدف به شرح جدول ۲ هستند.

جدول ۲ مقادیر توابع هدف حاصل از حل مسأله مطالعه موردی

نوع الگوریتم	اثرات اقتصادی (مقدار تابع هدف اول)	اثرات محیطی (مقدار تابع هدف دوم)	اثرات اجتماعی (مقدار تابع هدف سوم)	درصد وزنی انحراف (WPD)
الگوریتم ترکیبی NSGA-II	۵۷۴۳۲۹۰۴	۵۵۲۱۹۳	۴۶۹	۸/۱٪
الگوریتم ساده NSGA-II	۴۹۳۳۲۷۵۱	۵۷۸۴۲۵	۴۶۹	۹/۶٪

براساس جدول ۲ مقدار تابع هدف اول در الگوریتم NSGA-II ترکیبی پیشنهادی بهتر از همین مقدار در الگوریتم NSGA-II ساده است. همچنین مقدار تابع هدف دوم در الگوریتم NSGA-II ترکیبی پیشنهادی از مقدار نظیرش در الگوریتم NSGA-II ساده بهتر است. مطابق این جدول مقدار تابع هدف سوم برای هر دو الگوریتم NSGA-II ترکیبی پیشنهادی و ساده یکسان است. ستون آخر در جدول میزان فاصله وزنی بین راه‌حل بهینه پارتو و نقطه ایده‌آل را نشان می‌دهد که از طریق فرمول زیر محاسبه شده است. با توجه به این فرمول باید عنوان نمود که راه‌حل بهینه پارتو انتخاب شده دارای کمترین درصد وزنی انحراف بین دیگر راه‌حل‌های بهینه پارتو است.

$$WPD_i = \sum_{j=1}^3 \left(W_j \times \frac{|f_j^{(i)} - f_j^*|}{f_j^*} \right) \quad (18)$$

موارد زیر را در فرمول (18) داریم.

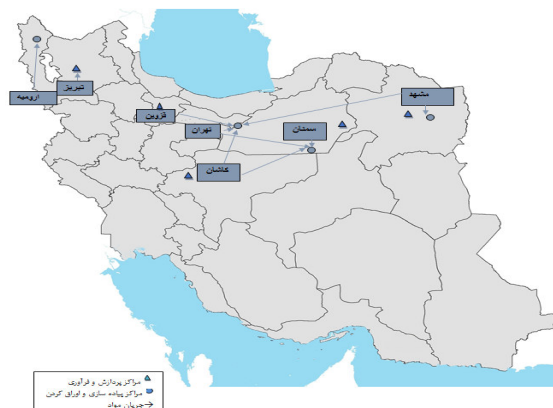
WPD_i : درصد وزنی انحراف حل بهینه پارتو i -ام

W_j : وزن تابع هدف j -ام که در مطالعه موردی طبق نظر خبرگان برای توابع هدف اقتصادی، اجتماعی و محیط زیستی به ترتیب برابر $0/8$ ، $0/1$ ، $0/1$ در نظر گرفته شده است.

$f_j^{(i)}$: ارزش تابع هدف حل i -ام

f_j^* : ارزش تابع هدف نقطه ایده‌ال

براساس شکل ۳ در شهرهای تهران، سمنان، مشهد و تبریز کارخانه اوراق کردن تأسیس و در شهرهای کاشان، سمنان، مشهد و تبریز نیز کارخانه پردازش و فرآوری تأسیس شده است. جریان مواد در نمودار ۱ مشاهده می‌گردد.



نمودار ۱ نقشه جریان مواد

۶- نتایج حل مسائل آزمایشی تصادفی

در این تحقیق جهت مقایسه دقیق‌تر عملکرد دو الگوریتم NSGA-II ترکیبی و NSGA-II ساده، تعدادی مسئله آزمایشی به صورت تصادفی تولید و توسط دو الگوریتم حل شده است. نتایج مقایسه‌ای برای حل این مسائل با توجه به شاخص‌های مطرح شده در جدول‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

جدول ۳ نتایج حل مسائل با اندازه کوچک

Prob.	الگوریتم NSGA-II ترکیبی			الگوریتم NSGA-II ساده		
	Quality metric	Spacing metric	Diversity metric	Quality metric	Spacing metric	Diversity metric
۱	۶۹/۱۳	۰/۸۸	۱۴۶۱/۳	۳۰/۸۷	۰/۷۳	۸۵۹/۳۱
۲	۸۵	۰/۹۴	۱۵۷۰/۱	۱۵	۰/۶۶۰۱	۹۷۸/۹
۳	۱۰۰	۱/۱۱	۱۸۶۰/۵	۰	۰/۶۴	۱۰۰۱/۳
۴	۱۰۰	۰/۸۹	۲۱۰۱/۳	۰	۰/۷۷	۱۱۱۲/۴
۵	۱۰۰	۱/۱۱	۲۰۹۲/۳	۰	۰/۶۸	۱۲۱۰/۹
۶	۷۹/۵۲۰۴	۱/۰۳	۲۲۳۱/۴	۲۰/۴۷۹۶	۰/۹۴	۱۳۴۲/۵
۷	۸۹	۰/۸۸۹	۲۶۰۹/۴	۱۱	۰/۷۵	۱۹۹۲/۴
۸	۱۰۰	۱/۲۲	۲۸۹۴/۶	۰	۰/۹۰۴۸	۱۷۳۲/۹
۹	۱۰۰	۰/۹۹	۲۷۲۷/۳	۰	۰/۴۴	۲۱۷۶/۲
۱۰	۱۰۰	۱/۰۹	۳۵۶۸/۴	۰	۰/۵۹	۱۷۲۰/۶

جدول ۴ نتایج حل مسائل با اندازه بزرگ و متوسط

Prob.	الگوریتم NSGA-II ترکیبی			الگوریتم NSGA-II ساده		
	Quality metric	Spacing metric	Diversity metric	Quality metric	Spacing metric	Diversity metric
۱	۷۰	۱/۰۱	۱۵۹۹/۵	۳۰	۰/۴۹	۱۳۰۲/۶
۲	۷۷/۶۵	۰/۶۹	۱۶۹۴/۸	۲۲/۳۵	۰/۴۵	۱۳۹۹/۴
۳	۱۰۰	۱/۲۳	۲۸۳۴/۷	۰	۰/۹۳	۱۵۴۹/۲
۴	۹۴/۷۶	۰/۹۸	۱۱۰۰۹/۳	۵/۲۴	۰/۷۴	۱۶۶۶/۵
۵	۸۴/۴۹	۰/۹۹	۱۱۵۱۷/۲	۱۵/۵۱	۰/۴۴	۲۷۰۹/۳
۶	۱۰۰	۱/۶۵	۱۱۸۹۹/۷	۰	۰/۹۱	۲۸۵۸/۶
۷	۱۰۰	۰/۷۶	۲۲۲۰۹/۵	۰	۰/۵۸	۱۱۰۲۹/۹
۸	۸۳/۰۳	۰/۹۴	۲۶۳۴۲/۲	۱۶/۹۷	۰/۷۷	۱۱۰۴۲/۹
۹	۱۰۰	۱/۳۴	۳۰۰۷۶/۶	۰	۰/۶۴	۱۱۰۹۵/۳
۱۰	۹۰/۵	۰/۹۹	۳۱۱۷/۵	۹/۵	۰/۵۱	۱۱۲۳۱/۹

نتایج مقایسه‌ای در جدول‌های ۳ و ۴ نشان می‌دهد که الگوریتم NSGA-II ترکیبی، در تمام موارد توانایی بالاتری برای تولید پاسخ‌های باکیفیت‌تر نسبت به الگوریتم NSGA-II ساده دارد. الگوریتم پیشنهادی قادر به تولید پاسخ‌های با پراکندگی بالاتری نسبت به الگوریتم ساده دارد.

جدول ۵ مقایسه زمان اجرای دو الگوریتم را در حل مسائل نمونه نشان می‌دهد. جهت مقایسه زمان اجرا ۵ مسأله از هر گروه از مسائل نمونه انتخاب شده و زمان اجرای آن‌ها ثبت و بررسی شده است.

جدول ۵: مقایسه دو الگوریتم NSGA-II ساده و ترکیبی

مسأله ^{۸۰}	زمان اجرا ^{۷۹}	
	الگوریتم NSGA-II ترکیبی	الگوریتم NSGA-II ساده
۱	۰/۳۴	۰/۱۲
۲	۰/۳۷	۰/۱۵
۳	۰/۴۲	۰/۲۱
۴	۰/۶۲	۰/۳۰
۵	۰/۷۵	۰/۴۷
۶	۱/۷۴	۰/۸۹
۷	۲/۸۶	۰/۷۷
۸	۴/۱۱	۱/۰۲۳
۹	۶/۷۶	۲/۳۲
۱۰	۷/۵	۴/۶۰

۷- تحلیل حساسیت

در این بخش تأثیر برخی از پارامترهای مدل ریاضی روی توابع هدف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل در جدول‌های ۶ و ۷ درج شده است.

جدول ۶ تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای ظرفیت کارخانه‌های پیاده‌سازی و پردازش و

مراکز بازیافت و تبدیل (الگوریتم **NSGA-II** ترکیبی)

بازه ظرفیت	پارامترها	اثرات اقتصادی (مقدار تابع هدف اول)	اثرات محیطی (مقدار تابع هدف دوم) (سوم)	اثرات اجتماعی (مقدار تابع هدف سوم)
۱۸۰۰-۲۵۰۰	ظرفیت کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن z (cap_z)	۵۸۶۷۵۸۱۷	۵۵۴۸۹۷	۴۶۹
۳۰۰۰-۳۶۰۰	ظرفیت کارخانه پردازش و فرآوری k (cap_k)	۵۹۴۴۲۹۳۱	۵۵۹۱۸۳	۴۶۹
۱۰۰۰-۱۹۰۰	ظرفیت مرکز بازیافت l (cap_l)	۵۹۹۴۰۱۶۶	۵۶۰۰۱۹	۴۶۹
۱۰۰۰-۱۶۰۰	ظرفیت مرکز تبدیل به ضایعات m (cap_m)	۵۸۹۴۳۳۸۲	۵۵۸۹۰۵	۴۶۹

جدول ۷ تحلیل حساسیت مدل نسبت به پارامترهای هزینه حمل و نقل هر واحد بین کارخانه‌های پیاده‌سازی و پردازش و مراکز بازیافت و تبدیل (الگوریتم **NSGA-II** ترکیبی)

بازه ظرفیت	پارامترها	اثرات اقتصادی (مقدار تابع هدف اول)	اثرات محیطی (مقدار تابع هدف دوم)	اثرات اجتماعی (مقدار تابع هدف سوم)
۱۰۰۰۰-۱۵۵۰۰	هزینه حمل و نقل هر واحد از مرکز جمع‌آوری/ اولیه i به کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j (ct_{ij})	۵۶۸۱۹۴۲۳	۵۵۲۱۹۳	۴۶۹
۱۰۰۰۰-۱۵۵۰۰	هزینه حمل و نقل هر واحد از کارخانه پیاده‌سازی و اوراق کردن j به کارخانه پردازش و فرآوری k (ct_{jk})	۵۷۰۰۵۴۹۷	۵۵۲۱۹۳	۴۶۹

ادامه جدول ۷

بازه ظرفیت	پارامترها	اثرات اقتصادی (مقدار تابع هدف اول)	اثرات محیطی (مقدار تابع هدف دوم)	اثرات اجتماعی (مقدار تابع هدف سوم)
۱۰۰۰۰-۱۵۰۰۰	هزینه حمل و نقل هر واحد از کارخانه پردازش و فرآوری k به مرکز بازیافت (ct_{kl})	۵۶۷۷۰۶۵۸	۵۵۲۱۹۳	۴۶۹
۱۰۰۰۰-۱۵۰۰۰	هزینه حمل و نقل هر واحد از کارخانه پردازش و فرآوری k به مرکز تبدیل به ضایعات m (ct_{km})	۵۶۸۵۰۶۳۳	۵۵۲۱۹۳	۴۶۹

براساس جدول ۷ بازه تغییرات برای هر یک از پارامترهای هزینه حمل و نقل بین کارخانه‌های پیاده‌سازی و پردازش و مراکز بازیافت و تبدیل مشخص شده است. مقادیر توابع هدف ریاضی در این بازه تا جایی تغییر می‌کند که متغیرهای تصمیم مدل تغییر نکند. به عبارتی شبکه به دست آمده در مطالعه موردی تغییر نمی‌کند.

۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مدل پیشنهادی این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه برای عملیات بازیابی خودروهای EOL است. این مدل برای طراحی شبکه بازیابی پایدار که در آن اثرات اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی متوازن هستند، توسعه داده شده است. نتایج، عملکرد مدل و قابل اجرا بودن آن را برای استفاده در برنامه‌ریزی در عملیات بازیابی صنعت خودرو را نشان می‌دهد.

هدف مدل پیشنهادی این تحقیق حمایت از تصمیم‌گیری از شاغلان بازیابی خودروهای EOL است. این مدل شبکه لجستیک معکوس، تعداد و مکان کارخانه‌ها و جریان مواد بین این کارخانه‌ها را برای شرکت سایپا معین کرده است. این شبکه تمام عملیات لجستیک معکوس برای خودروهای EOL مانند جمع‌آوری، جداسازی، نوسازی، پردازش و فرآوری (خرد کردن)، بازیافت، استفاده مجدد و تبدیل به ضایعات را بیان می‌کنند. این مدل پیشنهادی با نمونه‌هایی در اندازه‌های مختلف و یک نمونه با مطالعه موردی خودروهای فرسوده شرکت

سایپا حل شده است.

این مدل کاربردهای مورد واقعی را با این رویکرد بهبود می‌بخشد، همچنین محاسبه زمان برای تصمیم‌گیری‌های استراتژیک حتی برای مسائل با اندازه بزرگ با استفاده از این مدل به اندازه کافی سریع است. رویکرد مدل‌سازی به کار برده شده در این مدل می‌تواند به صنایع دیگر تطبیق داده شود. در مقایسه تحقیق با تحقیق مشابه دهقانیان و همکاران با عنوان مدل بازیابی پایدار محصولات برای تجهیزات الکتریکی از طریق شبیه‌سازی نتایج یکسانی مشاهده گردید [۱۷]. سرانجام می‌توان بیان کرد این مطالعه نشان می‌دهد که مدل شبکه لجستیک معکوس نه تنها برای محیط زیستی سودمند است، که می‌تواند موجب ایجاد انگیزه و فوائد اقتصادی و اجتماعی برای تولیدکنندگان شود.

۹- پیشنهادات محقق برای تحقیقات آتی

با انجام تحقیق حاضر علاوه بر استخراج نتایج آن با موضوعاتی روبه‌رو شدیم که به منظور راهنمایی برای سایر محققان می‌توان موارد زیر را پیشنهاد کرد.

- باتوجه به این‌که یکی از ویژگی‌های مهم شبکه‌های جریان معکوس عدم قطعیت است، پیشنهاد می‌شود مدل ارائه شده در این تحقیق به صورت فازی طراحی و حل شود.
- پیشنهاد می‌شود یک مدل لجستیک معکوس پایدار برای صنایع مختلف (مانند صنعت لبنیات) با توجه به پیش‌فرض‌های آن صنعت طراحی گردد.
- پیشنهاد می‌شود مدل برنامه‌ریزی لجستیک معکوس پایدار در این تحقیق از طریق الگوریتم‌های فرا ابتکاری دیگری حل و نتایج آن با نتایج این تحقیق مقایسه شود.
- پیشنهاد می‌شود معیارهای مؤثر در لجستیک معکوس پایدار در هر سه حوزه اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی در صنایع مختلف شناسایی و وزن‌دهی شوند.

۱۰- پی‌نوشت‌ها

1. Non-Dominated Solution
2. Variable Neighborhood Search (VNS)
3. Quality
4. Diversity

5. Run time
6. Problem

۱۱- منابع

- [1] Zahedi, H., Najafi, G. , (2007) Expantion of Sustainable development, management researches in Iran. 10 (4), 43-76.
- [2] Rayat Pisha, H. , Ahmadi, K. , Abbasnejad (2016) applying the qualitative approach meta syntheses for provide a comprehensive model of assessment of the sustainability in supply chain, modern researches in decision making. 1(1),127-151.
- [3] Khodadad Hosseini, H., Shafiee Roodposhti, M., Khord Naeig, A., Mohammadian, M. (2014) Conceptualizing the Model for Realization of Sustainable Marketing in I.R. Iran's Automotive Industry. 18(1),25-53.
- [4] Chan, F.T.S., Chan, H.K., Jain, V. (2012)A framework of reverse logistics for the automobile industry. International Journal of Production Research. 50 (5), 1318–1331.
- [5] Sasikumar, P., Kannan, G., Haq, N. (2010) A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery – a case of truck tire remanufacturing. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 49, 1223–1234.
- [6] Tuzkaya, G., Gulsun, B., Onsel, S. (2011)A methodology for the strategic design of reverse logistics networks and its application in the Turkish white goods industry. International Journal of Production Research. 49 (15), 4543–4571.
- [7] Lee, D.H., Dong, M. (2008) A heuristic approach to logistics network design for end of lease computer products recovery. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. 44, 455–474.
- [8] Demirel, N.O., Gokcen, H. (2008)A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 39, 1197–1206.

- [9] Eur. J. Oper. Res. 103, 1–17. Gomes, M.I., Barbosa-Povoa, A.P., Novais, A.Q. (2011) Modelling a recovery network for WEEE: a case study in Portugal. Waste Manage. 31, 1645–1660.
- [10] Alumur, S.A., Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., Verter, V. (2012) Multi-period reverse logistics network design. European Journal of Operational Research. 220, 67–78
- [11] Dat, L.Q., Linh, D.T.T., Chou, S.Y., Yu, V.F. (2012) Optimizing reverse logistics costs for recycling end-of-life electrical and electronic products, Expert Systems with Applications, 6380–6387.
- [12] Kannan, D., Diabat, A., Alrefaei, M., Govindan, K., Yong, G. (2012) A carbon footprint based reverse logistics network design model. Resources, Conservation and Recycling. 67, 75–79.
- [13] Das, K., Chowdhury, A. (2012) Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. International Journal of Production Economics, 135, 209–221.
- [14] Chen, K.C., Huang, S.H., Lian, I.W. (2010) The development and prospects of the end-of-life vehicle recycling system in Taiwan. Waste Manage. 30, 1661–1669.
- [15] Min, H., Ko, H.J., Ko, C.S. (2006) A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns, Omega. 56–69.
- [16] Deb K, Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan T. (2002), A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II. IEEE Transactions on Evolutionary computations; 6:182–97.
- [17] Dehghanian, F., Mansour S., (2009), Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. Resources, Conservation and Recycling, 53, 559–570.