

A bi-level programming for design of reverse logistics network with incentive dependent-return under carbon-tax scheme

Akram Esmaili Aval, Farzad Dehghanian

A.Esmaili Aval, M.Sc. Student of Industrial Engineering- Ferdowsi University of Mashhad
F.Dehghanian, Assistant Professor of Industrial Engineering- Ferdowsi University of Mashhad

Keywords

Reverse logistics,
Facility location,
Bi-level
programming,
Carbon tax.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to provide a bi-level model to determine the optimal subsidy paid to a company engaged in collection and recovery of end of life products. The government is the leader and in order to achieve its maximum collection rate, pays a subsidy to the company for collection of a unit to end of life product and tries to minimize the subsidy. In order to collection and recovery of end of life products, the company as a follower needs to open collection and hybrid centers and purchase these products from owners referred to as customers. Customers can return their products according to the financial incentive offered by the company. The purpose of the follower's model is to maximize the company's profit with considering carbon tax. The model is solved with an exhaustive enumeration and heuristic method. Finally the model is applied on a sample case study and results are analyzed.

ارائه یک مدل دو سطحی برای طراحی شبکه لجستیک معکوس با بازگشت- های وابسته به قیمت و مالیات بر کربن

اکرم اسماعیلی اول ، فرزاد دهقانیان

چکیده:

هدف از این مقاله ارائه یک مدل دو سطحی به منظور تعیین یارانه بهینه تخصیص داده شده از طرف دولت به شرکت‌های جمع‌آوری و بازیابی محصولات برگشتی است. دولت به عنوان رهبر در مدل دو سطحی، به منظور دستیابی به حداکثر نرخ جمع‌آوری، به ازای هر واحد محصول جمع‌آوری شده توسط شرکت‌ها، به آن‌ها یک واحد یارانه می‌پردازد و در تلاش است تا یارانه پرداختی خود را کمینه کند. شرکت‌ها به عنوان پیرو، مراکزی را به منظور جمع‌آوری و بازیابی محصولات، تاسیس کرده و محصولات را از مشتریانی که مالک آن‌ها هستند، در ازای پرداخت مبلغی جمع‌آوری می‌کنند. مشتریان می‌توانند با توجه به مبلغ پیشنهاد شده توسط این شرکت‌ها، در مورد واگذاری محصولات خود تصمیم‌گیری کنند. هدف پیرو، بیشینه کردن سود خود با توجه به درآمدهای ناشی از بازیابی و هزینه‌های ناشی از ایجاد مراکز جمع‌آوری و بازیابی، حمل‌ونقل و همچنین مالیات بر کربن است. مدل طراحی شده با استفاده از دو روش شمارش کامل و ابتکاری و برای داده‌های واقعی برگرفته از شهر مشهد، حل شده است.

کلمات کلیدی

لجستیک معکوس،
مکان‌یابی تسهیلات،
برنامه‌ریزی دوسطحی،
مالیات بر کربن.

تاریخ وصول:

تاریخ تصویب:

اکرم اسماعیلی اول، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، akram.esmaeili69@gmail.com

فرزاد دهقانیان، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی، f.dehghanian@um.ac.ir

۱ مقدمه و مرور ادبیات

مقالات موجود در زمینه لجستیک به خصوص آن‌هایی که با جمع‌آوری و بازیابی محصولات سروکار دارند، بسیار غنی است [۱]. Jayaraman و همکارانش [۲]، Fleishman و همکارانش [۳]، Salema و همکارانش [۴] و Lu و Bostel [۵]، مساله لجستیک معکوس و رو به جلوی^۱ محصولات جدید و بازتولید شده را به صورت همزمان در نظر گرفتند تا تقاضای مشتری را برآورده کنند. آن‌ها یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط ارائه دادند که تسهیلات جمع‌آوری را در نظر نمی‌گرفت و فرض می‌کردند که مشتری محصولات برگشتی را مستقیماً به مراکز دمونتاز^۲ تحویل دهد. آن‌ها فرض کردند که تعداد محصولات برگشتی مشتریان، کاملاً مشخص است. El-Sayed و همکاران [۶]، یک مدل احتمالی طراحی شبکه که همزمان لجستیک معکوس و رو به جلو را در نظر می‌گرفت، ارائه دادند. مدل آن‌ها چند دوره‌ای و چند سطحی با تقاضای احتمالی در مسیر رفت و برگشت بود. سطوح شبکه در مسیر رو به جلو مراکز تامین کننده، تسهیلات و توزیع کننده و در مسیر برگشت دمونتاز، توزیع دوباره و مراکز دفن بود. هدف از مدل، تعیین مراکز و تخصیص مشتریان با هدف کمینه کردن هزینه بود.

همزمان با افزایش آگاهی‌های زیست محیطی، کاهش منابع، حذف ظرفیت‌های دفن در بسیاری از کشورها و وضع قوانین جدید توسط دولت‌ها به منظور جمع‌آوری محصولات برگشتی، که عمر مفید آن‌ها به پایان رسیده‌است، بحث لجستیک معکوس مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌است. لجستیک معکوس در تلاش است تا ارزش محصولاتی را که به پایان چرخه زندگی خود رسیده‌اند، از طریق بازیافت، بازتولید، نوسازی و غیره دوباره به دست آورد [۷]. لجستیک معکوس یک ابزار مدیریت کسب و کار است که می‌تواند دغدغه به دست آوردن مواد اولیه خام را کاهش دهد و در نتیجه سرعت نابودی محیط زیست را تقلیل دهد.

از طرفی بزرگترین چالش در مبحث جمع‌آوری محصولات برگشتی (محصولاتی که به پایان عمر خود رسیده‌اند) در لجستیک معکوس، عدم اطمینان از کمیت و کیفیت این محصولات می‌باشد [۸]. مشتریان یا در واقع صاحبان محصولات مختارند که محصولات خود را در اختیار شرکت‌های جمع‌آوری کننده قرار دهند، و همین امر است که باعث عدم قطعیت کمیت محصولات برگشتی می‌شود. یکی از سیاست‌های اتخاذ شده به منظور تشویق مشتریان برای همکاری با این شرکت‌ها، تشویق‌های مالی می‌باشد. قیمت تشویقی پیشنهاد شده بر روی مقدار محصولات جمع‌آوری شده تاثیر می‌گذارد بنابراین شرکت‌های زیادی از این روش استفاده می‌کنند تا مقدار محصول استفاده شده بیشتر را جمع‌آوری کنند. نیاز به مدیریت جمع‌آوری محصولات استفاده شده از طریق مکانیزم‌های تشویقی اولین بار توسط Guide و Van Wassenhove [۸] ارائه شد. Guide و همکارانش [۹]، یک مدل برای تعیین قیمت بهینه برای محصولات استفاده شده با کیفیت‌های متفاوت ارائه دادند. Aras و همکاران [۱۰] یک مدل غیر خطی مکان‌یابی - تخصیص مراکز جمع‌آوری با سیاست تشویقی ارائه دادند. آن‌ها فرض کردند که خود مشتری محصول را به مراکز جمع‌آوری تحویل می‌دهد. آن‌ها تمایل مشتری به منظور تحویل محصول با توجه به قیمت تشویقی پیشنهاد شده را با توزیع یکنواخت مدل‌سازی کردند. هدف مدل، تعیین مکان بهینه این مراکز و قیمت تشویقی به‌گونه‌ای بود که سود بیشینه گردد. آن‌ها برای حل مدل خود، از یک روش ابتکاری بر مبنای جستجوی ممنوعه استفاده کردند. Aras و همکارانش [۱۱] مقاله دیگری مشابه با مقاله قبلی خود ارائه دادند با این تفاوت که محصولات برگشتی را خود جمع‌آوری می‌کردند و همچنین تمایل مشتری برای تحویل محصول را با استفاده از توزیع راست مثلثی مدلسازی کردند.

یکی از سیاست‌هایی که می‌تواند روی فعالیتهای مربوط به لجستیک معکوس تاثیرگذار باشد سیاست‌های زیست‌محیطی مانند مالیات بر کربن است. طبق قانون مالیات بر کربن شرکت‌ها موظف هستند به ازای هر تن کربنی که تولید می‌کنند، مالیاتی را پرداخت کنند. به عنوان مثال استرالیا یکی از کشورهایی است که در حال حاضر، این قانون را به منظور اجبار شرکت‌ها برای کاهش آلاینده‌های زیست محیطی اجرا می‌کند. طبق این قانون ۳۰۰ شرکتی که بیشترین میزان آلاینده‌گی را دارند، مجبور خواهند بود به ازای هر تن آلاینده‌ای که تولید می‌کنند، جریمه‌ای معادل ۲۴ دلار آمریکا پرداخت نمایند [۱۲]. این موضوع بر روی محققان نیز بی‌تاثیر نبوده و علاقه بسیاری از آن‌ها را به سمت خود جلب کرده‌است. به عنوان مثال Krikke و همکارانش [۱۳] بحث کربن را مطرح کردند و به دنبال کمینه کردن کربن تولید شده در کنار سایر هزینه‌های یک شبکه لجستیک بودند.

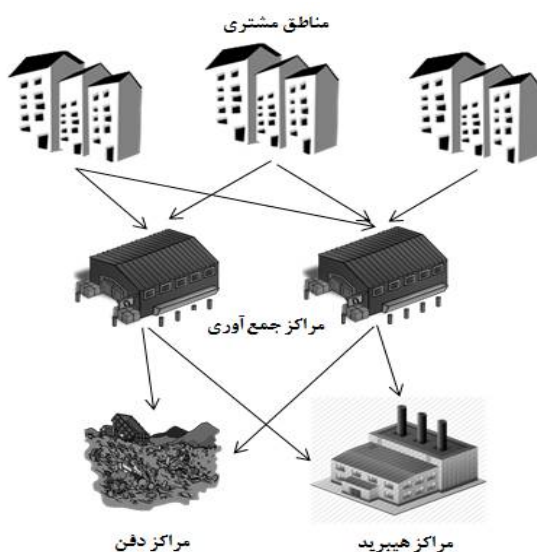
در تحقیق پیش‌رو، شرکت‌های مسئول در جمع‌آوری و بازیابی محصولات برگشتی، با ارائه تشویق‌های مالی آن‌ها (محصولات برگشتی مانند: محصولات پلاستیکی، کاغذی، الکترونیکی و...) را از صاحبانشان خریداری کرده و به منظور بازیابی، به مراکز مورد نظر منتقل می‌کنند. همچنین فرض بر این است که هزینه کربن به ازای تمامی عملیات‌ها در نظر گرفته می‌شود. در نظر گرفتن هزینه کربن در یک شبکه لجستیک معکوس، باعث افزایش هزینه‌های شرکت‌های درگیر در جمع‌آوری و بازیابی خواهد شد و ممکن است ادامه فعالیت برای شرکت سودآور نباشد، بنابراین لازم است این شرکت‌ها توسط دولت با پرداخت یارانه حمایت شوند. با توجه به اهمیت پرداخت یارانه در شبکه‌های لجستیک معکوسی که هزینه کربن در آن در نظر گرفته می‌شود،

¹ Forward

این تحقیق سعی دارد تا با توسعه‌ای بر مرجع [۱]، این خلا در زمینه ادبیات لجستیک معکوس را پوشش دهد. مساله فوق به صورت دو سطحی مدل-سازی شده‌است. در سطح اول دولت قرار دارد و در تلاش است تا بارانه پرداختی را کمینه کند و همزمان به حداقل نرخ جمع‌آوری مورد نظر خود دست یابد. در سطح دوم، شرکت قرار دارد که به دنبال بیشینه کردن سود حاصل از عملیات جمع‌آوری و بازیابی محصولات برگشتی است. بخش دوم به تعریف مسأله و ارائه مدل خواهد پرداخت. در بخش سوم، روش حل ارائه شده است. در ادامه، مدل پیشنهاد شده برای داده‌های مربوط به شهر مشهد، مورد بررسی قرار گرفته‌است. انتهای مقاله شامل جمع‌بندی و نتیجه‌گیری است.

۲ تعریف مساله

شبکه لجستیک معکوس طراحی شده در این تحقیق دارای سه مرحله (سطح) می‌باشد. همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، مرحله اول مراکز مشتری، مرحله دوم مراکز جمع‌آوری و مرحله سوم مراکز هیبرید و دفن می‌باشد، که در مراکز هیبرید عملیات نوسازی، بازتولید و اوراق کردن به صورت یکجا انجام می‌شود. از این رو این مراکز هیبرید نامیده شده‌اند. استفاده از مراکز هیبرید در مقایسه با در نظر گرفتن مراکز جداگانه برای عملیات فوق، باعث صرفه‌جویی و کاهش هزینه‌ها می‌شود.



شکل ۱: شبکه لجستیک مدل

فرض کنید تعداد کل محصولات برگشتی بالقوه در دست مشتریان منطقه RP_i است. هر مشتری، که دارای یک واحد محصول برگشتی باشد، در صورتی حاضر خواهد بود که محصول خود را به مرکز جمع‌آوری Z تحویل دهد، که اولاً در شعاع پوشش آن مرکز باشد و ثانياً قیمت پیشنهاد شده توسط شرکت از قیمت مورد انتظار مشتری (EP) بیشتر باشد. EP متغیری است که برای توصیف رفتار این متغیر از توزیع یکنواخت $[a, b]$ ، استفاده شده‌است که در آن a و b به ترتیب حداقل و حداکثر قیمت مورد انتظار مناطق مشتری، برای تحویل یک واحد محصول برگشتی است. استفاده از توزیع یکنواخت باعث آسانی محاسبات می‌شود. این توزیع به طور مکرر در لجستیک معکوس استفاده شده‌است [۱۴]. با توجه به توزیع یکنواخت، چگالی احتمال و تابع توزیع تجمعی EP ، مطابق فرمول‌های (۱) و (۲) خواهد بود.

$$f(EP) = \frac{1}{b-a} \quad (1)$$

$$F(EP) = \frac{EP-a}{b-a} \quad (2)$$

وقتی یک مرکز جمع‌آوری قیمت تشویقی FI را به مناطق مشتری، پیشنهاد دهد، با توجه به این که قیمت تشویقی پیشنهادی در چه بازه‌ای قرار گیرد، درصد محصولات برگشتی که قابل جمع‌آوری است (RE)، مطابق رابطه ۳ می‌باشد:

$$RE = p(FI - EP \geq 0) = \begin{cases} 0 & FI \leq a \\ \frac{FI-a}{b-a} & a \leq FI \leq b \\ 1 & FI \geq b \end{cases} \quad (3)$$

پس از آن که محصولات در مراکز جمع‌آوری مورد بررسی و بازرسی قرار گرفت، به دو دسته تقسیم می‌شوند: دسته‌ای از محصولات به منظور بازتولید، نوسازی و اوراق به مراکز هیبرید منتقل می‌شوند و دسته دیگر محصولاتی هستند که قابل بازیابی نبوده و به منظور دفن به مراکز مربوطه انتقال داده می‌شوند. محصولات موجود در مراکز هیبرید پس از انجام عملیات بر روی آنها، با یک قیمت معین به فروش می‌رسد.

۱-۲ مفروضات مساله

مفروضات در نظر گرفته شده در این مساله به شرح زیر است:

- ۱- مکان مناطق مشتری مشخص است.
- ۲- مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز جمع‌آوری و هیبرید مشخص هستند.
- ۳- مکان مراکز دفن ثابت و از قبل مشخص است.
- ۴- هر مرکز جمع‌آوری دارای شعاع پوشش خاص خود است و مشتریان محصولات خود را به مراکز جمع‌آوری که در شعاع پوششان قرار می‌گیرند، تحویل خواهند داد.
- ۵- درصد محصولات برگشتی که تحت عملیات مختلف در مراکز هیبرید قرار می‌گیرند، مشخص است.

۲-۲ مدل ریاضی

در این قسمت بر اساس توضیحات بالا، مدل برنامه‌ریزی دو سطحی ارائه شده در این مقاله توضیح داده می‌شود. پارامترهای مورد استفاده جهت مدل-سازي مسأله به شرح جدول ۱ می‌باشند:

جدول ۱: تعریف پارامترها

پارامتر	توصیف
مجموعه‌ها	
I	مجموعه‌ای از مناطق مشتری، $I = \{1, \dots, I\}$
J	مجموعه‌ای از مکان‌های کاندید برای باز کردن مراکز جمع‌آوری، $J = \{1, \dots, J\}$
R	مجموعه‌ای از مکان‌های کاندید برای باز کردن مراکز هیبرید، $R = \{1, \dots, R\}$
F	مجموعه‌ای از مکان‌های ثابت برای دفن، $F = \{1, \dots, F\}$
D	مجموعه‌ای از عملیات موجود در مراکز هیبرید. (بازتولید، نوسازی و اوراق کردن)، $D = \{1, \dots, D\}$
L	مجموعه سطوح قیمت پیشنهاد شده به مشتری برای تحویل یک واحد محصول برگشتی، $L = \{1, \dots, L\}$
پارامترها	
F_j	هزینه ثابت باز کردن مرکز جمع‌آوری j
F_r	هزینه ثابت باز کردن مرکز هیبرید r
C_{jr}	هزینه متغیر جابه‌جایی یک واحد محصول برگشتی از مرکز جمع‌آوری j به مرکز هیبرید r
\hat{C}_{jf}	هزینه متغیر جابه‌جایی یک واحد محصول برگشتی از مرکز جمع‌آوری j به مرکز دفن f
π_j	هزینه بازرسی و مرتب‌سازی یک واحد محصول برگشتی در مرکز جمع‌آوری j
π_{rd}	هزینه انجام عملیات d بر روی یک واحد محصول برگشتی در مرکز هیبرید r
$\hat{\pi}_f$	هزینه دفن یک واحد محصول برگشتی در مرکز دفن f
β_j	مقدار کربن منتشر شده بر حسب تن، به ازای بازرسی و مرتب‌سازی یک واحد محصول برگشتی در مرکز جمع‌آوری j
β_{rd}	مقدار کربن منتشر شده بر حسب تن، به ازای انجام عملیات d بر روی یک واحد محصول برگشتی در مرکز هیبرید r

پارامتر	توصیف
μ_{jr}	مقدار کربن منتشر شده بر حسب تن، به ازای جابه‌جایی یک واحد محصول برگشتی از مرکز جمع‌آوری j به مرکز هیبرید r
μ_{jff}	مقدار کربن منتشر شده بر حسب تن، به ازای جابه‌جایی یک واحد محصول برگشتی از مرکز جمع‌آوری j به مرکز دفن f
RP_i	مقدار بالقوه محصولات برگشتی موجود در منطقه مشتری i
a	حداقل قیمت مورد انتظار مشتری برای تحویل یک واحد محصول برگشتی
b	حداکثر قیمت مورد انتظار مشتری برای تحویل یک واحد محصول برگشتی
EP	قیمت مورد انتظار مشتری، برای تحویل یک واحد محصول برگشتی
Ω	مالیات هر تن کربن منتشر شده
g_d	درآمد حاصل از فروش یک واحد محصول برگشتی که بر روی آن عملیات d انجام شده‌است
γ_d	درصدی از محصولات برگشتی که امکان انجام عملیات d بر روی آن‌ها وجود دارد
q_j	ظرفیت مرکز جمع‌آوری j
q_r	ظرفیت مرکز هیبرید r
d_j	شعاع پوشش مرکز جمع‌آوری j
v_{ij}	مقدار این پارامتر یک خواهد بود اگر منطقه مشتری i در شعاع پوشش مرکز جمع‌آوری j قرار بگیرد
t	حداقل نرخ جمع‌آوری مورد نظر دولت
متغیرهای تصمیم:	
S	مقدار یارانه پرداخت شده از طرف دولت به شرکت به ازای جمع‌آوری یک واحد محصول برگشتی
FI	قیمت تشویقی پیشنهاد شده به مشتریان برای تحویل یک واحد محصول برگشتی
RE	درصدی از محصولات برگشتی که از مناطق مشتری قابل جمع‌آوری است
Z_{ij}	مقداری از محصولات برگشتی که منطقه مشتری i به مرکز جمع‌آوری j انتقال می‌دهد
X_{jrd}	مقداری از محصولات برگشتی که از مرکز جمع‌آوری j به مرکز هیبرید r ، برای انجام عملیات d انتقال داده می‌شود
X_{jff}^F	مقداری از محصولات برگشتی که از مرکز جمع‌آوری j به مرکز دفن f برده می‌شود
Y_j	متغیر صفر و یک، که یک خواهد بود اگر مرکز جمع‌آوری j تاسیس شود و در غیر این صورت صفر
Y_r	متغیر صفر و یک، که یک خواهد بود اگر مرکز هیبرید r تاسیس شود و در غیر این صورت صفر
δ_l	متغیر صفر و یک، که یک خواهد بود که اگر سطح قیمت l به محصولات برگشتی تخصیص داده شود

بنابراین مدل برنامه‌ریزی دوسطحی ارائه شده به شکل زیر می‌باشد.

$$\text{Min } S \quad (4)$$

Subject to

$$\sum_i \sum_j Z_{ij} \geq t \sum_i RP_i \quad (5)$$

$$\text{maximize } \Pi_{net} = \sum_i \sum_j Z_{ij} \times S + \sum_j \sum_r \sum_d X_{jrd} \times g_d - \sum_i \sum_j Z_{ij} \times FI - \sum_j F_j \times Y_j - \sum_r F_r \times Y_r - \sum_i \sum_j Z_{ij} \times \pi_j - \sum_j \sum_r \sum_d X_{jrd} \times (\pi_{rd} + c_{jr}) - \sum_j \sum_f X_{jff}^F \times (\pi_f + c_{jf}) - \Omega \times (\sum_i \sum_j Z_{ij} \times \beta_j + \sum_j \sum_r \sum_d X_{jrd} \times (\beta_{rd} + \mu_{jr})) + \sum_j \sum_f X_{jff}^F \times \mu_{jff} \quad (6)$$

$$\sum_j Z_{ij} \leq RE \times RP_i \quad i \in I \quad (7)$$

$$\sum_r X_{jrd} = \sum_i \gamma_d \times Z_{ij} \quad j \in J; d \in D \quad (8)$$

$$\sum_f X_{jff}^F = \sum_i \sum_d (1 - \gamma_d) \times Z_{ij} \quad j \in J \quad (9)$$

$$\sum_i Z_{ij} \leq q_j \times Y_j \quad j \in J \quad (10)$$

$$\sum_j \sum_d X_{jrd} \leq q_r \times Y_r \quad r \in R \quad (11)$$

$$Z_{ij} \leq q_j \times Y_j \times v_{ij} \quad i \in I; j \in J \quad (12)$$

$$FI \geq 0, RE \geq 0 \quad (13)$$

$$Z_{ij} \geq 0 \quad i \in I; j \in J \quad (14)$$

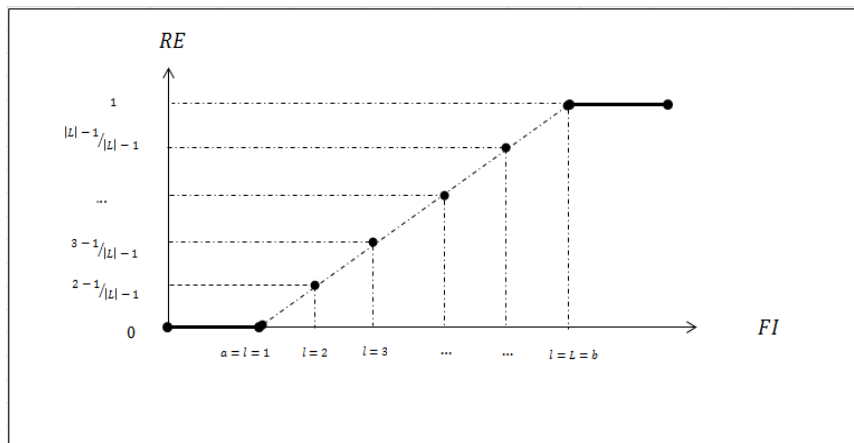
$$X_{jrd} \geq 0 \quad j \in J; r \in R; d \in D \quad (15)$$

$$X_{jff}^F \geq 0 \quad j \in J; f \in F \quad (16)$$

$$Y_j, Y_r \in \{0,1\} \quad j \in J; r \in R \quad (17)$$

معادله (۴)، تابع هدف سطح اول را نشان می‌دهد و مقدار بارانه پرداختی توسط دولت را کمینه می‌کند. محدودیت (۵)، تنها محدودیت سطح اول مساله می‌باشد و تضمین می‌کند که حداقل نرخ جمع‌آوری مدنظر دولت، برآورده گردد. معادله (۶)، تابع هدف سطح دوم می‌باشد که مقدار درآمد حاصل از جمع‌آوری و بازیابی محصولات برگشتی را بیشینه می‌کند. محدودیت (۷)، تضمین می‌کند که مقدار محصولات جمع‌آوری شده از مناطق مشتریان، نباید از کل محصولات بالقوه موجود بیشتر باشد. محدودیت (۸) و (۹)، به ترتیب مربوط به تعادل جریان بین مراکز جمع‌آوری و هیبرید و مراکز جمع‌آوری و دفن است. محدودیت (۱۰) و (۱۱)، مربوط به محدودیت ظرفیت مراکز جمع‌آوری و هیبرید است. محدودیت (۱۲)، مربوط به شعاع پوشش بوده و به مناطقی اجازه اختصاص به یک مرکز جمع‌آوری را می‌دهد که در شعاع پوشش آن قرار گیرد. محدودیت‌های (۱۷) - (۱۳)، نیز نوع متغیرها را نشان می‌دهند.

همانطور که مشاهده می‌کنید عبارت $Z_{ij} \times FI$ در تابع هدف غیر خطی می‌باشد. به منظور خطی کردن این عبارت از شیوه به کار رفته در مرجع [۱۴] استفاده می‌کنیم. بدین صورت که قیمت تشویقی پیشنهاد شده را به L سطح قیمت تقسیم می‌کنیم. درصد محصولات برگشتی مطابق شکل ۲ می‌باشد.



شکل ۲: درصد محصولات برگشتی با توجه به قیمت پیشنهادی

برای محصولات برگشتی، تنها یک سطح قیمت قابل تعریف است، بنابراین برای برقراری این موضوع، رابطه زیر باید لحاظ گردد.

$$\sum_l \delta_l = 1 \quad (18)$$

به عنوان مثال فرض کنید که ۵ سطح قیمت تعریف کرده‌ایم ($L=5$). در صورتی که فرضاً سطح قیمت ۲ انتخاب شود، درصد محصولات برگشتی مطابق با توزیع یکنواخت به صورت $\frac{2-1}{|S|-1}$ ، خواهد شد. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، a سطح قیمت ۱ و b ، به عنوان سطح قیمت L در نظر گرفته شده‌است. با توجه به توضیحات داده شده در بالا، در نتیجه RE مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\sum_l \left(\frac{l-1}{L-1} \right) \times \delta_l = RE \quad (19)$$

لازم به تذکر است، اگرچه قیمت تشویقی به L سطح تقسیم شده است، اما با افزایش تعداد سطوح، این تابع گسسته به یک تابع پیوسته تبدیل خواهد شد و تخمین قابل قبولی برای قیمت تشویقی به دست خواهد آمد. بنابراین عبارت غیر خطی تابع هدف به صورت زیر خواهد شد:

$$\sum_i \sum_j Z_{ij} \times a + \sum_i \sum_j \sum_l Z_{ij} \times \delta_l \times \left(\frac{l-1}{L-1}\right) \times (b-a) \quad (20)$$

اما همانطور که مشاهده می شود، عبارت $Z_{ij} \times \delta_l$ غیر خطی است. بدین منظور به جای این عبارت در تابع هدف، از متغیر W_{ijl} استفاده و علاوه بر روابط (۱۸) و (۱۹)، محدودیت های زیر به مساله اضافه می شود.

$$W_{ijl} \leq M \times \delta_l \quad (21)$$

$$W_{ijl} \geq Z_{ij} - M \times (1 - \delta_l) \quad (22)$$

$$W_{ijl} \leq Z_{ij} \quad (23)$$

$$W_{ijl} \geq 0 \quad (24)$$

که در آن M یک عدد بسیار بزرگ است.

۳ روش حل

مسائل دو سطحی جز پیچیده ترین مسائل در حوزه تحقیق در عملیات محسوب می شوند. Ben-Ayed و Blair [۱۵] ثابت کردند که مسائل برنامه ریزی دو سطحی NP-hard هستند. بنابراین، حل این مسائل به صورت دقیق بسیار زمان بر است، و اصولاً برای مسائلی با اندازه های کوچک، قابل کاربرد است. با توجه به این موضوع، برای حل این مسائل نیاز به الگوریتم های ابتکاری کارا به منظور دستیابی به جواب های مطلوب و نزدیک بهینه و در زمان کوتاه وجود دارد.

۳-۱ روش شمارش کامل

برای حل مدل با استفاده از این روش، از کوچکترین مقدار یارانه یعنی $S = 0$ شروع می کنیم و سطح دوم را با استفاده از CPLEX حل می کنیم. در صورتی که جواب بهینه به دست آمده، حداقل نرخ جمع آوری دولت را برآورده کند، پس به جواب مورد نظر دست پیدا کردیم، در غیر این صورت، مقدار یارانه را به اندازه یک واحد افزایش می دهیم و مساله سطح دوم را دوباره حل می کنیم.

۳-۲ الگوریتم ابتکاری

برای تولید یک الگوریتم ابتکاری، ابتدا نیاز به ساخت یک جواب اولیه داریم. انتخاب یک جواب اولیه خوب، نقش مهمی در کارایی الگوریتم و رسیدن آن به یک جواب مطلوب دارد.

۳-۳ تولید جواب اولیه

در این روش، مقدار سود تقریبی که باز شدن هر مرکز می تواند در مقدار تابع هدف ایجاد کند، محاسبه شده و با توجه به این مقدار، تعیین می شود که کدام یک از مراکز شرایط لازم برای باز شدن را دارند.

گام ۱- تعیین سود واحد محصول در مراکز مختلف

در گام اول، مقدار سود واحدی که یک محصول در هر یک از مراکز ایجاد می کند، محاسبه می شود. این مقدار طبق روابط ذیل به دست می آید. رابطه (۲۵)، مقدار سود به ازای جمع آوری یک واحد محصول در مرکز جمع آوری z برای هر سطح قیمت l را نشان می دهد. رابطه (۲۶)، مقدار سود واحد برای انجام عملیات d در مرکز هیبرید z ، در صورتی که با مرکز جمع آوری z در ارتباط باشد را نشان می دهد و رابطه (۲۷)، مقدار سود به ازای دفن یک واحد محصول انتقال داده شده از مرکز جمع آوری z به مرکز دفن f است.

$$pro_co_{jl} = s - \pi_j - \Omega \times \beta_j - a - \left(\frac{l-1}{l-1}\right) \times (b - a) \quad (25)$$

$$pro_hy_{rjd} = g_d - \pi_{rd} - \Omega \times (\beta_{rd} + \mu_{jr}) - c_{jr} \quad (26)$$

$$pro_dis_{fj} = -\pi_f - c_{jf} - \Omega \times \mu_{jf} \quad (27)$$

با توجه به رابطه (27)، می‌توان برای هر یک از مراکز جمع‌آوری، مرکز دفنی که کمترین مقدار هزینه را داشته باشد، محاسبه کرد. مینیمم هزینه لازم، برای دفن محصولات مرکز جمع‌آوری z_r با « min_dis_j » نشان می‌دهیم.

گام ۲- تعیین اولویت مراکز جمع‌آوری و هیبرید

در این گام با توجه به سود محاسبه شده در مرحله قبل، مقدار کل سود تقریبی که هر یک از مراکز ایجاد می‌کند را محاسبه می‌کنیم. با توجه به این سود، اولویت هر یک از مراکز تعیین می‌شود. یعنی، آن مرکزی که سود بیشتری دارد، اولویت بیش‌تری برای باز شدن خواهد داشت. رابطه (28)، سود تقریبی به ازای هر مرکز جمع‌آوری و رابطه (29)، سود تقریبی به ازای هر مرکز هیبرید را نشان می‌دهد.

$$W_{coj} = \left(\frac{\sum_r \sum_d \gamma_d \times pro_hy_{rdj}}{R}\right) + (1 - \sum_d \gamma_d) \times min_dis_j + pro_co_{jl} \times q_j - F_j \quad (28)$$

$$Wh_r = (\sum_d \gamma_d \times pro_hy_{rd} + \sum_j (c_{jr} + (\Omega \times \mu_{jr}))) / J \times q_r - F_r \quad (29)$$

در رابطه (29) مقدار pro_hy_{rd} برابر با مقدار pro_hy_{rjd} است با این تفاوت که هزینه‌های مربوط به ارتباط با مرکز جمع‌آوری z_r حذف شده است.

گام ۳- تولید جواب اولیه

برای تولید جواب اولیه، از مرکز جمع‌آوری با بالاترین اولویت شروع می‌کنیم، و اگر این مرکز حداقل ۵۰ درصد مناطق جمع‌آوری را پوشش دهد، آن را انتخاب می‌کنیم. انتخاب مراکز جمع‌آوری تا زمانی که مجموع ظرفیت مراکز باز شده، از کل محصولات قابل جمع‌آوری با توجه به سطح قیمت مورد نظر بیشتر باشد، ادامه دارد. پس از تعیین مراکز جمع‌آوری، نوبت به مراکز هیبرید است. از آن‌جا که $\sum_d \gamma_d$ درصد از محصولات جمع‌آوری شده به مراکز هیبرید منتقل می‌شود، بنابراین با توجه به این مقدار، تعداد مراکز هیبرید مورد نیاز، بر اساس اولویت تعیین شده، باز می‌شود.

۳-۱- ساختار کلی الگوریتم

الگوریتم پیشنهادی، ترکیبی از الگوریتم شبیه‌سازی تیریدی (SA) و روش شمارش کامل است. هدف از به‌کارگیری SA، جستجوی سریع برای دستیابی به مقدار یارانه نزدیک بهینه است. پس از آن که به این مقدار رسیدیم به منظور جستجوی دقیق‌تر از روش شمارش کامل استفاده می‌کنیم. به منظور سرعت بخشیدن به این الگوریتم، از یک روش تقریبی به منظور تخصیص مراکز مشتری به مراکز جمع‌آوری و مراکز جمع‌آوری به مراکز هیبرید، در SA استفاده می‌کنیم.

در ابتدا مقدار $S = 0$ قرار می‌دهیم و به ازای سطوح قیمت مختلف، الگوریتم SA را انجام می‌دهیم. در صورت برقراری شرط توقف، الگوریتم SA پایان می‌یابد، در غیر این صورت، مقدار S را به اندازه دو واحد افزایش می‌دهیم (این کار به منظور افزایش سرعت الگوریتم در رسیدن به مقدار نرخ جمع‌آوری مورد نظر است) و الگوریتم SA را تکرار می‌کنیم.

به منظور توقف الگوریتم SA، از دو سیاست استفاده می‌کنیم:

سیاست اول: در این سیاست، پس از آن که به نصف نرخ جمع‌آوری مورد نظر دولت رسیدیم، توقف می‌کنیم و مقدار یارانه را ذخیره می‌کنیم. پس از پایان الگوریتم SA، با استفاده از الگوریتم شمارش کامل، اطراف مقدار یارانه ذخیره شده را جستجو می‌کنیم.

سیاست دوم: در این سیاست، پس از آن که به حداقل نرخ جمع‌آوری مورد نظر دولت دست یافتیم، نصف مقدار یارانه به‌دست آمده را ذخیره کرده و توقف می‌کنیم (از آن‌جا که در الگوریتم مقدار یارانه را هر بار دو واحد افزایش می‌دادیم، برای رسیدن به مقدار یارانه دقیق‌تر، ابتدا یارانه به دست آمده را نصف کرده و سپس اطراف آن را جستجو می‌کنیم) و مانند قبل، از الگوریتم شمارش کامل برای جستجو دقیق‌تر در اطراف یارانه ذخیره شده، استفاده می‌کنیم. قبل از بیان الگوریتم، ابتدا به معرفی نمادهای به کار رفته در آن می‌پردازیم. این نمادها در جدول ۲ نمایش داده شده‌است.

جدول ۲: نمادهای به کار رفته در الگوریتم ابتکاری

پارامتر	توضیح	پارامتر	توضیح
T_0	دمای اولیه الگوریتم	$New\ Score$	تابع هدف جواب جدید
T_f	دمای نهایی	$Current\ Solution$	جواب فعلی
α	نرخ کاهش دما در الگوریتم	$Best\ Solution$	بهترین جواب شناخته شده

بهترین تابع هدف شناخته شده	<i>Best Score</i>	شمارنده تکرار در هر دما	<i>iter</i>
نرخ برگشت بهترین جواب شناخته شده	<i>RP_opt</i>	دمای تکرار <i>iter</i> ام	<i>T_{iter}</i>
نرخ برگشت جواب فعلی	<i>Rate_re</i>	حداکثر تکرار انجام شده در هر دما	<i>max_iter</i>
اختلاف تابع هدف بهترین جواب از جواب جدید	$\Delta cost$	جواب جدید	<i>New Solution</i>

۳-۳-۲- گام‌های الگوریتم

در شکل ۳ ساختار کلی الگوریتم تا قبل از شمارش کامل نمایش داده شده است.

```

Inputs:  $\alpha, T_f, T_0, max\_iter$ ;
Output:  $S$ ;
Set  $S = 0$ ;
Permission = True;
While (Permission) do
  While ( $l < |L|$ ) do
    Current Solution := Initialization();
    Best Score := Score (Current Solution), Best Solution := Current Solution;
    Set the initial parameters as  $iter = 0$  and  $T_{iter} := T_0$ ;
    While ( $T_{iter} > T_f$ ) do
      While ( $iter < max\_iter$ ) do
        Local Search (Current Solution);
        If (New Score > Best Score) then
          Best Score := New Score;
          Current Solution := New Solution;
          Best Solution := Current Solution;
          RP_opt := Rate_re;
        End
      Else
         $\Delta cost = Best\ Score - New\ Score$ ;
        If  $U(0,1) \leq \exp(-\frac{\Delta cost}{T_{iter}})$  then
          Current Solution := New Solution;
        End
      End
       $iter = iter + 1$ ;
    End
     $T_{iter} := T_{iter} \times \alpha$ ;
  End
  If ( $RP\_opt \geq t$ ) then
    Break;
  End
Else
  If ( $l < |L|$ ) then
     $l = l + 1$ ;
  End
  Else
     $l = 0$ ;
     $S = S + 1$ ;
  End
End
End
Permission := False;
End
Return  $S$ 

```

شکل ۳: ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی

۳-۳-۳- روش تقریبی تخصیص و محاسبه تابع هدف سطح دوم

هدف از روش تخصیص تقریبی ارائه شده، تعیین این است که، هر مرکز چه مقدار سود در تابع هدف ایجاد می‌کند. در این روش پس از باز کردن مراکز جمع‌آوری و هیبرید، ابتدا از مرکز جمع‌آوری با ماکزیمم اولویت شروع کرده و به اندازه مینیمم بین ظرفیت آن مرکز و مقدار محصول برگشتی جمع‌آوری نشده، تخصیص می‌دهیم و همزمان مقدار سودی که ایجاد می‌شود را به‌صورت تقریبی محاسبه می‌کنیم. پس از مشخص شدن این قسمت، نوبت به مراکز هیبرید می‌رسد که مانند مراکز جمع‌آوری، از مرکز هیبرید با بالاترین اولویت شروع کرده و به اندازه مینیمم ظرفیت آن مرکز و محصولات جمع‌آوری شده موجود در مراکز جمع‌آوری، تخصیص می‌دهیم.

۳-۳-۳-۱- محاسبه مقدار تابع هدف به ازای مراکز جمع‌آوری باز شده

به منظور محاسبه مقدار تابع هدف به‌صورت تقریبی، به ازای تمامی مراکز جمع‌آوری باز شده، گام‌های زیر را انجام می‌دهیم.
گام ۱: شمارنده op_iter را برابر صفر قرار دهید.
گام ۲: چک کردن شرط توقف:

- در صورتی که، شمارنده از تعداد مراکز جمع‌آوری باز شده کمتر باشد ($op_iter < op_co$) به گام ۳، در غیر این صورت به گام ۵ بروید.
- گام ۳: مقدار رابطه زیر را به ازای مراکز جمع‌آوری باز شده، محاسبه کنید.

$$Ef_coj = (pro_cojl - (1 - \sum_a \gamma_d) \times min_dis_j) \times min_rp - F_j \quad (30)$$

- عبارت اول و دوم، همانطور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، به ترتیب، مقدار سود واحد مرکز جمع‌آوری j و هزینه دفن برای این مرکز است. لازم به ذکر است که در هنگام محاسبه این مقدار در الگوریتم SA، مقدار l مشخص است. عبارت min_rp مینیمم بین ظرفیت مرکز جمع‌آوری j و مقدار محصول برگشتی جمع‌آوری نشده است که پس از محاسبه مقدار بالا، min_rp به‌روز می‌شود.
- گام ۴: یک واحد به شمارنده op_iter بیفزایید و به گام ۲ برگردید.
- گام ۵: جمع کردن مقدار Ef_coj بر روی z های باز شده و گزارش این مقدار.

۳-۳-۳-۲- محاسبه مقدار تابع هدف به ازای مراکز هیبرید باز شده

برای محاسبه مقدار تابع هدف به ازای مراکز هیبرید باز شده، مطابق گام‌های بخش قبل عمل می‌کنیم. تنها تفاوت این دو، در گام ۳ است که به شرح زیر می‌باشد:
گام ۳: رابطه زیر را به ازای مراکز هیبرید باز شده محاسبه کنید.

$$EF_hyr = \left(\sum_a \lambda_d \times pro_hyrd - \frac{\sum_j c_{jr} + \Omega \times \mu_{jr}}{op_co} \right) \times min_rec - F_r \quad (31)$$

- در رابطه بالا عبارت اول، مقدار سود واحد ایجاد شده در مرکز هیبرید r و عبارت دوم متوسط هزینه‌های مربوط به حمل و نقل بین مرکز هیبرید مربوطه، با مراکز جمع‌آوری باز شده، است که در نهایت، در مقدار min_rec (مینیمم بین ظرفیت مرکز هیبرید و محصولات جمع‌آوری شده تخصیص نیافته به مراکز هیبرید) ضرب می‌شود. بعد از محاسبه این رابطه عبارت min_rec به‌روز می‌شود.
- در نهایت مجموع مقادیر $\sum_r EF_hyr$ و $\sum_j Ef_coj$ بر روی مراکز باز شده، مقدار تقریبی تابع هدف سطح دوم را نشان می‌دهد.

۳-۳-۴- ساختار همسایگی

همسایگی‌های به‌کار رفته در الگوریتم ارائه شده، تعویض^۳ و حذف^۴ می‌باشد. منظور از تعویض جابه‌جایی یک مرکز باز، با یک مرکز بسته می‌باشد. نحوه استفاده از این همسایگی‌ها در الگوریتم SA به صورت زیر می‌باشد:

³ Swap

⁴ Drop

- ۱- تنظیم دمای اولیه و تنظیم مقدار ماکزیمم تکرار.
- ۲- هر مرکز جمع‌آوری باز، با تمام مراکز جمع‌آوری بسته جابه‌جا می‌شود و آن که بیشترین بهبود را داشته باشد انتخاب می‌شود. برای تصمیم به پذیرش این جواب مطابق گام‌های شکل ۳ عمل شود.
- ۳- گام قبل برای مراکز هیبرید نیز انجام می‌شود.
- ۴- دما را تنظیم کرده و ماکزیمم تکرار را دوباره برابر با مقدار قبلی خود قرار دهید.
- ۵- در صورتی که بهترین جواب بهبود داده شود به گام ۲ برگردید در غیر این صورت به گام بعد بروید.
- ۶- همسایگی حذف را برای تمامی مراکز جمع‌آوری انجام دهید و حذفی که بیشترین بهبود را داشته انتخاب و برای پذیرش این جواب مطابق گام‌های SA عمل کنید.
- ۷- گام قبل را برای مراکز هیبرید نیز انجام دهید.
- ۸- دما را تنظیم کنید و ماکزیمم تکرار را دوباره برابر با مقدار قبلی خود قرار دهید.
- ۹- در صورتی که بهترین جواب بهبود یابد به گام ۶ بروید، در غیر این صورت، خارج شوید.

۳-۴-۱ تعویض در مراکز جمع‌آوری و هیبرید

این نوع همسایگی برای مراکز جمع‌آوری و هیبرید یکسان است، فرض کنید ده مکان برای مرکز جمع‌آوری در نظر گرفته شده‌است که چهار مرکز ۲، ۴، ۵ و ۷ باز است. ۷ آخرین مرکز جمع‌آوری باز شده، است. در شکل ۴ نحوه نمایش جواب به تصویر کشیده شده است. فرض کنید به‌عنوان مثال، اگر بخواهیم مرکز ۲ را با مرکز ۸ تعویض کنیم، ۴ حالت به‌وجود می‌آید.

۲	۴	۵	۷
---	---	---	---

شکل ۴: نحوه نمایش جواب

۱. ظرفیت مرکز ۸ از مجموع ظرفیت مرکز ۲ و مقدار ظرفیت استفاده شده در مرکز ۷ بیشتر باشد.
۲. ظرفیت مرکز ۸ از ظرفیت مرکز ۲ بیشتر باشد، اما از مجموع ظرفیت مرکز ۲ و ظرفیت استفاده شده مرکز ۷ کمتر باشد.
۳. ظرفیت مرکز ۸ از ظرفیت مرکز ۲ کمتر باشد و اختلاف این دو از ظرفیت باقیمانده مرکز ۷ کمتر باشد.
۴. ظرفیت مرکز ۸ از ظرفیت مرکز ۲ کمتر باشد و اختلاف این دو از ظرفیت باقیمانده مرکز ۷ بیشتر باشد.

در حالت یک مرکز ۸ جایگزین مرکز ۲ شده و چون نیازی به مرکز ۷ نیست، حذف شده و مرکز ۸ به عنوان آخرین مرکز برچسب می‌خورد. در حالت ۲ مرکز ۸ جایگزین مرکز ۲ می‌شود و به اندازه تفاوت ظرفیت مرکز ۸ و ۲ از ظرفیت استفاده شده مرکز ۷ به مرکز ۸ جابه‌جا می‌شود. در حالت سوم، مرکز ۸ جایگزین ۲ می‌شود و مقدار مازاد ظرفیت مرکز ۲ نسبت به مرکز ۸، به مرکز هفت منتقل می‌شود. در حالت آخر چون ظرفیت باقیمانده مرکز ۷ پاسخگوی تفاوت ظرفیت دو مرکز ۸ و ۲ نیست، نیاز به باز شدن یک مرکز دیگر می‌باشد که از بین مراکز باز نشده، آن که اولویت بالاتری دارد انتخاب می‌شود، فرض کنید این مرکز ۹ است. نمایش جواب بعد از انجام این همسایگی‌ها به ترتیب در شکل ۵، شکل ۶، شکل ۷ و شکل ۸ نشان داده شده است.

۸	۴	۵	۷
---	---	---	---

شکل ۶: نحوه نمایش جواب در حالت دو

۴	۵	۸
---	---	---

شکل ۵: نحوه نمایش جواب در حالت یک

۸	۴	۵	۷	۹
---	---	---	---	---

شکل ۸: نحوه نمایش جواب در حالت چهار

۸	۴	۵	۷
---	---	---	---

شکل ۷: نحوه نمایش جواب در حالت سه

در صورتی که مرکز جمع‌آوری آخر، یعنی مرکز ۷ را بخواهیم با یک مرکز دیگر، به‌عنوان مثال، با مرکز ۳ تعویض کنیم، دو حالت به‌وجود می‌آید:
 ۱: ظرفیت مرکز جمع‌آوری ۳ از ظرفیت استفاده شده مرکز ۷ بیشتر باشد، در این صورت مرکز ۳ جایگزین مرکز ۷ می‌شود و به عنوان مرکز آخر برچسب می‌خورد.

۲: ظرفیت مرکز جمع‌آوری ۳ از ظرفیت استفاده شده مرکز ۷ کمتر باشد، در این حالت نیاز به باز شدن یک مرکز دیگر علاوه بر مرکز هفت است. نحوه انتخاب این مرکز بر اساس اولویت تعریف شده می‌باشد. به عنوان مثال فرض کنید مرکز ۹ اولویت بالاتری دارد. در این صورت، این مرکز به عنوان مرکز آخر برچسب می‌خورد. نحوه نمایش جواب در دو حالت در شکل ۹ و شکل ۱۰ نشان داده شده‌است.

۲	۴	۵	۳	۹
---	---	---	---	---

شکل ۱۰: نحوه نمایش جواب در حالت دو

۲	۴	۵	۳
---	---	---	---

شکل ۹: نحوه نمایش جواب در حالت یک

۳-۳-۲ حذف در مراکز جمع‌آوری و هیبرید

هنگام حذف یک مرکز جمع‌آوری، باید به این نکته توجه داشت که با حذف این مرکز، ممکن است ظرفیت استفاده شده یک مرکز هیبرید تغییر کند و یا حتی حذف گردد. مثال قبل را در نظر بگیرید، فرض کنید مراکز هیبرید ۲، ۳ و ۶ نیز باز هستند و مرکز ۶ آخرین مرکزی است که تخصیص به آن صورت گرفته شده است. فرض کنید مرکز جمع‌آوری ۲ قرار است حذف گردد. لازم به ذکر است که تنها $\sum_d \lambda_d$ از ظرفیت مراکز جمع‌آوری باز شده به مراکز هیبرید منتقل می‌شود.

۱. $\sum_d \lambda_d$ درصد از ظرفیت مرکز جمع‌آوری ۲ کمتر از مقدار ظرفیت استفاده شده آخرین مرکز هیبرید، یعنی ۶ باشد. در این حالت با حذف مرکز جمع‌آوری ۲ تنها ظرفیت استفاده شده مرکز هیبرید ۶ تغییر می‌کند. بنابراین باید $\sum_d \lambda_d$ درصد از ظرفیت مرکز جمع‌آوری ۲ را از ظرفیت استفاده شده مرکز هیبرید ۶ کم کنیم.

۲. $\sum_d \lambda_d$ درصد ظرفیت مرکز جمع‌آوری ۲ بزرگتر یا مساوی مقدار ظرفیت استفاده شده مرکز ۶ باشد. در این حالت مرکز هیبرید ۶ حذف می‌شود و مرکز هیبرید قبل از آن یعنی ۳ به عنوان آخرین مرکز هیبرید باز شده، برچسب می‌خورد و ظرفیت استفاده شده آن به روز می‌گردد.

نمایش جواب مراکز هیبرید و جمع‌آوری در این دو حالت، در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

۲	۳
---	---

شکل ۱۲: نمایش مراکز هیبرید پس از حذف مرکز جمع‌آوری ۲

۴	۵	۷
---	---	---

شکل ۱۱: نمایش جواب بعد از حذف مرکز جمع‌آوری ۲

حذف در مراکز هیبرید، نیز مانند مراکز جمع‌آوری است. هنگام حذف یک مرکز هیبرید باید در نظر بگیریم که، چند تا از مراکز جمع‌آوری حذف خواهد شد.

۳-۳-۵ روش شمارش کامل در الگوریتم

پس از انجام الگوریتم SA و مشخص شدن مقدار k با استفاده از روش شمارش کامل، اطراف k را جستجو می‌کنیم. ابتدا با استفاده از سیپلکس برای مقدار S بدست آمده از الگوریتم SA، نرخ جمع‌آوری را به‌دست می‌آوریم. برای نرخ جمع‌آوری، دو حالت ممکن است به‌وجود آید، یا این نرخ از نرخ مورد نظر دولت بیشتر و یا کمتر خواهد بود. گام‌های الگوریتم برای این دو نرخ متفاوت است. در ادامه به تشریح این دو حالت می‌پردازیم.

-اگر نرخ جمع‌آوری به‌دست آمده، از نرخ مورد نظر دولت کمتر باشد:

گام ۱: افزایش مقدار یارانه به اندازه دو واحد.

گام ۲: حل مساله سطح دوم، با استفاده از CPLEX و محاسبه مقدار نرخ برگشت:

- در صورتی که نرخ جمع‌آوری کم‌تر از مقدار مورد نظر دولت باشد، به گام یک برگردید، در غیر این صورت، مقدار یارانه را برابر S قرار داده و به گام ۳ بروید.
- گام ۳: کم کردن مقدار یارانه به اندازه یک واحد.
- گام ۴: انجام CPLEX و محاسبه مقدار نرخ جمع‌آوری:
- در صورتی که نرخ جمع‌آوری کم‌تر از نرخ جمع‌آوری مورد نظر دولت باشد، مقدار S را به عنوان یارانه بهینه در نظر بگیرید، در غیر این صورت، مقدار S همین مرحله، به عنوان یارانه بهینه اعلام می‌شود.
- در صورتی که نرخ جمع‌آوری به‌دست آمده، از نرخ جمع‌آوری دولت بیش‌تر باشد:
- گام ۱: مقدار یارانه را برابر با S قرار دهید.
- گام ۲: کاهش مقدار یارانه به اندازه دو واحد.
- گام ۳: حل مساله سطح دوم با استفاده از CPLEX و محاسبه مقدار نرخ جمع‌آوری:
- در صورتی که نرخ جمع‌آوری بیش‌تر از t باشد، مقدار یارانه را برابر S قرار داده و به گام ۲ برمی‌گردید، در غیر این صورت، به گام ۴ بروید.
- گام ۴: افزایش مقدار یارانه به اندازه نیک واحد.
- گام ۵: انجام CPLEX و محاسبه مقدار نرخ جمع‌آوری.
- در صورتی که نرخ جمع‌آوری کم‌تر از t باشد، مقدار S را به عنوان یارانه بهینه در نظر بگیرید، در غیر این صورت، مقدار S همین مرحله را به عنوان S بهینه گزارش کنید.

در روش شمارش کامل، مقدار افزایش یارانه، یک واحد در نظر گرفته شده است، اما در روش‌های فوق به منظور کاهش فضای جستجو، ابتدا مقدار افزایش دو واحد خواهد بود، سپس به منظور جستجوی دقیق‌تر و رسیدن به مقدار بهینه یارانه روش شمارش کامل، مقدار افزایش یک واحد خواهد شد.

۴- نتایج محاسباتی

تمامی الگوریتم‌های ابتکاری ارائه شده، در محیط Visual C++ 2010، کدنویسی شده و برای حل مساله با روش شمارش کامل از ILOG CPLEX 12/3 استفاده شده است. همچنین همه نمونه‌ها بر روی رایانه‌ای با سیستم عامل ۳۲ بیتی و پردازنده ۲/۹۳ GHz و حافظه داخلی ۳/۴۹ GB، اجرا شده است.

۴-۱- نحوه ایجاد نمونه مسائل

به منظور بررسی عملکرد مدل، ۷۶ نمونه مساله تهیه شده است. در تمامی این مثال‌ها، تعداد سطوح قیمت (L)، قیمت کربن (Ω)، تعداد عملیات انجام شده در مرکز هیبرید (D) و تعداد مراکز دفن (F)، ثابت و به‌ترتیب برابر با ۵، ۱۹، ۳ و ۵ واحد در نظر گرفته شده است. هزینه حمل‌ونقل و همچنین کربن تولید شده در حمل‌ونقل بین مراکز مختلف، یکسان و به‌ترتیب برابر با ۱/۱ و ۰/۰۰۰۰۷۵ واحد است. فرض شده که تعداد مراکز مشتری، جمع‌آوری و هیبرید با هم برابر است، و ابعاد در نظر گرفته شده ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ است. به ازای هر یک از این ابعاد، چندین نمونه مساله ایجاد شده است. داده‌های مورد نیاز برای این نمونه مسائل، به‌صورت تصادفی و با استفاده از توزیع‌های یکنواخت توصیف شده در جدول ۳، تولید شده است. تعداد مسائل تولید شده نیز در ادامه و در جدول ۴ نمایش داده شده است.

جدول ۳: نحوه تولید نمونه مساله

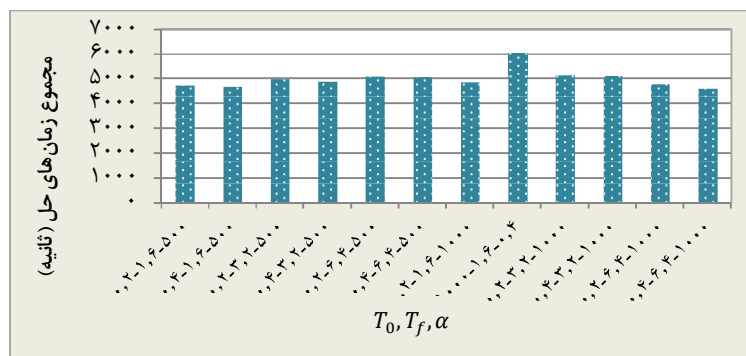
پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
F_j	$\sim \text{uni}[۳۰۰۰،۵۵۰۰]$	a	$\sim \text{uni}[۱،۲]$
F_r	$\sim \text{uni}[۱۰۰۰۰،۶۵۰۰۰]$	b	$\sim \text{uni}[۲،۳]$
π_j	$\sim \text{uni}[۱،۵]$	g_a	$\sim \text{uni}[۱۷،۲۰]$
π_{rd}	$\sim \text{uni}[۵،۲۰]$	d_j	$\sim \text{uni}[۵۰،۱۰۰]$
π_f	$\sim \text{uni}[۱،۴]$	q_j	$\sim \text{uni}[۵۰۰،۷۵۰۰]$
β_j	$\sim \text{uni}[۰/۰۰۰۱/۰۰۰۱]$	\dot{q}_r	$\sim \text{uni}[۵۰۰،۷۵۰۰]$
β_{rd}	$\sim \text{uni}[۰/۰۰۰۱/۰۱۵]$	d_j	$\sim \text{uni}[۵۰۰،۱۵۰۰۰]$

جدول ۴: ابعاد مسائل تولید شده و تعداد نمونه‌ها

شماره	ابعاد مساله $I \times J \times R$	تعداد نمونه
۱	۵۰×۵۰×۵۰	۱۲
۲	۶۰×۶۰×۶۰	۱۲
۳	۷۰×۷۰×۷۰	۱۲
۴	۸۰×۸۰×۸۰	۱۲
۵	۹۰×۹۰×۹۰	۱۲

۲-۴- تحلیل پارامترهای الگوریتم SA

هر یک از پارامترهای الگوریتم SA، یعنی دمای اولیه، نرخ کاهش دما و دمای نهایی تأثیری زیادی بر روی کیفیت و زمان جواب‌های به‌دست‌آمده، می‌گذارد، بنابراین، تعیین مقدار مناسب برای هر یک از پارامتر، اهمیت فراوانی دارد. از این رو برای مقدار دهی مناسب به این پارامترها، دو مقدار ۱۰۰۰ و ۵۰۰ برای دمای اولیه، سه نرخ ۱/۶، ۳/۲ و ۶/۴ برای دمای نهایی و دو مقدار ۰/۲ و ۰/۴ به عنوان نرخ کاهش در نظر گرفته شده است. سپس ۱۵ نمونه از داده‌ها به عنوان نمونه آزمایشی، با استفاده از الگوریتم SA و با در نظر گرفتن ۱۲ ترکیب مختلف حل شده‌اند. شکل ۱۳، نمودار تجمعی زمان حل هر یک از مقادیر متفاوت پارامترها برای ۱۵ نمونه را نشان می‌دهد. از آنجا که الگوریتم‌های ارائه شده در نهایت با شمارش کامل به مقدار بهینه تابع هدف می‌رسند، بنابراین، تنها زمان حل این نمونه‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود، ترکیب پارامترهای (۰/۴، ۶/۴، ۱۰۰۰)، کمترین زمان حل برای ۱۵ نمونه را فراهم می‌سازد، بنابراین، این ترکیب از پارامترها، به عنوان پارامترهای بهینه در الگوریتم SA انتخاب شده‌اند.



شکل ۱۳: نمودار زمان تجمعی برای ترکیب‌های مختلف

۳-۴- تجزیه و تحلیل نتایج

در این قسمت نتایج الگوریتم شمارش کامل، روش ابتکاری با سیاست توقف یک و دو، که به ترتیب روش یک، دو و سه نامیده شده‌اند، به تفکیک ابعاد مساله، مورد مقایسه قرار می‌گیرند. جدول ۵، نتایج مربوط به حل نمونه‌ها برای سه روش مختلف را نشان می‌دهد. در این جدول، برای هر روش، بهترین مقدار تابع هدف (Best Objective)، بهترین مقدار یارانه (S)، زمان حل (Time) بر حسب ثانیه و GAP ارائه شده است. مقدار GAP در روش شمارش کامل، تفاوت کران بالا و پایین و در دو روش دیگر، تفاوت بین بهترین مقدار تابع هدف سطح دو در آن روش، با روش شمارش کامل است. لازم به ذکر است که مقادیر نشان داده شده در هر ردیف، میانگین نتایج حاصل از حل نمونه‌های مختلف در هر بعد مساله را نشان می‌دهد که در ستون اول شماره بعد مساله نمایش داده می‌شود.

همانطور که مشاهده می‌شود، برای تمامی مسائل، زمان حل روش سوم نسبت به روش دوم و روش دوم نسبت به روش اول، کمتر است. همچنین برای بعد اول، سه روش به جواب بهینه رسیده‌اند و مقدار GAP در سه روش صفر است، برای سایر ابعاد روش دوم و سوم به مقدار تابع هدف بهتری نسبت به روش شمارش کامل رسیده‌اند، در نتیجه همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار GAP منفی شده‌است.

جدول ۵: نتایج محاسباتی برای ابعاد مختلف

size	روش شمارش کامل				روش ابتکاری با سیاست توقف ۱				روش ابتکاری با سیاست توقف ۲			
	Best objective	s	Time	GAP %	Best objective	s	Time	GAP %	Best objective	s	Time	GAP %
۱	۱۹۶۳۸۹/۲	۹/۰۴	۲۹۱۵/۵	۰	۱۹۶۳۸۹/۲	۹/۰۴	۱۵۱/۳۸	۰	۱۹۶۳۸۹/۲	۹/۰۴	۴۱/۲۱	۰
۲	۱۵۸۵۱۹/۳	۷/۵۵	۶۲۶۴/۱۸	۰/۰۸	۱۶۲۰۱۹/۶	۸/۴	۹۳۸/۹۲	-۱/۴۶	۱۶۲۰۱۹/۶	۸/۴	۳۹۱/۸۸	-۱/۴۶
۳	۲۰۸۹۳۱/۱	۸/۲۱	۱۰۶۴۹/۴۹	۰/۲۱	۲۳۲۱۲۴/۸	۹/۲	۱۶۱۳/۷۹	-۱۰/۳	۲۳۲۱۲۴/۸	۹/۲	۲۰۲/۷	-۱۰/۳
۴	۲۱۲۳۷۰	۶/۲۵	۲۵۳۴۷,۷	۲۳/۶	۲۹۴۶۶۳/۲۳	۸,۷۵	۲۹۷۹/۸	-۴۳۴/۸	۲۹۴۶۶۳/۲۳	۸,۷۵	۱۵۱۴/۳	-۴۳۴/۸
۵	۲۴۶۶۲۱/۶	۷/۲	۲۸۹۸۸/۳۷	۳/۸۲	۲۷۱۸۵۳/۲	۸/۰۸	۳۱۲۵/۷۹	-۲۴/۱	۲۷۱۸۵۳/۲	۸/۰۸	۱۵۶۵/۳۳	-۲۴/۱

۵- مطالعه موردی

یکی از مهم‌ترین سر فصل‌های بازیافت، بازیافت فلزات از صنایع مختلف فلزی از جمله آلومینیوم است. ظروف و ضایعات آلومینیومی به هر شکلی که باشد قابل بازیافت است. بنابراین فویل آلومینیومی، قوطی‌های نوشابه، کنسرو، بشقاب، چارچوب پنجره‌ها و حتی تراشه‌های آلومینیوم در کارگاه‌ها و حلقه‌های آلومینیومی در بازکن‌ها را می‌توان جمع‌آوری و بازیافت کرد. بازیافت یک قوطی آلومینیومی در مقایسه با تولید همان قوطی از مواد خام اولیه باعث کاهش آلودگی به میزان ۹۷ درصد و کاهش آلودگی هوا به میزان ۹۵ درصد می‌شود. تولید آلومینیوم از آلومینیوم بازیافت شده، نسبت به تولید آن از سنگ معدن به ۹۰ درصد انرژی کم‌تر نیاز دارد. آلومینیوم فلزی است که صد درصد قابل بازیافت بوده و محدودیتی در تعداد دفعات بازیافت وجود ندارد. با توجه به اهمیت آلومینیوم و مزایای آن، مدل ارائه شده در این مقاله برای بازیافت آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفته‌است. حوزه مورد مطالعه شهر مشهد، مرکز استان خراسان رضوی و دومین کلان شهر ایران در نظر گرفته شده‌است.

به منظور اعتبارسنجی و آزمایش مدل تمام ۱۳ منطقه شهرداری شهر مشهد در نظر گرفته شده‌است. در این ۱۳ منطقه ۱۵۴ محله وجود دارد که تعداد و مکان این محله‌ها با توجه به نقشه مرزبندی مناطق، نواحی و محلات شهر مشهد تا پایان فروردین ۹۲ بدست آمده‌اند [۱۶]. هر یک از این محلات به عنوان یک منطقه مشتری در نظر گرفته شده‌است و مقدار محصولات آلومینیومی برگشتی هر یک از محلات، با توجه به جمعیت آن‌ها و میزان کل محصولات آلومینیومی جمع‌آوری شده از شهر مشهد، مطابق با آمار موجود در سازمان مدیریت پسماند مشخص شده‌است [۱۷]. این مراکز به عنوان مکان‌های بالقوه برای باز کردن مراکز جمع‌آوری نیز در نظر گرفته شده‌اند. شهرک صنعتی توس واقع در ۱۳ جاده مشهد-قوچان، شهرک صنعتی کلات در ۶ جاده مشهد-کلات و شهرک صنعتی کاویان در ۴۵ کیلومتری جاده مشهد-فریمان به عنوان مکان‌های بالقوه برای تأسیس کارخانه بازیافت آلومینیوم، انتخاب شده‌اند. همانطور که قبلاً بیان شد، آلومینیوم به طور صد درصد قابل بازیافت می‌باشد، در نتیجه، گزینه دفن و هزینه‌های مربوط به آن در نظر گرفته نشده‌است. فاصله بین نقاط مختلف با استفاده از نرم‌افزار google map محاسبه شده‌است. از آن‌جا که خود مشتری محصول را به مرکز جمع‌آوری تحویل می‌دهد، شعاع پوشش کم و برای تمامی محله‌ها یکسان و برابر ۱/۵ کیلومتر در نظر گرفته شده‌است. نرخ برگشت مورد نظر دولت، ۸۵ درصد است. از آن‌جا که در این مطالعه فقط گزینه بازیافت مدنظر است، در نتیجه $d=1$ می‌باشد. مقدار پارامترهای a و b به ترتیب ۴۰۰۰ و ۸۰۰۰ ریال است و قیمت هر واحد آلومینیوم تولید شده با توجه به قیمت آلومینیوم در بازار ۳۹۰۰۰ ریال برآورد شده‌است. تعداد سطوح قیمت ۵ در نظر گرفته شده‌است.

مقدار کربن آزاد شده در فعالیت‌های مختلف مطابق جدول ۶ می‌باشد [۱۸]. هرچند در ایران قانون مالیات بر کربن وجود ندارد، ولی فرض می‌کنیم این مقدار برابر با ۱۵ دلار است که تقریباً میانگینی از مقادیر مالیات بر کربن در اروپا و استرالیا می‌باشد. این مقدار با توجه به نرخ دلار، به ریال تبدیل شده‌است.

جدول ۶: مقدار کربن منتشر شده

نوع فعالیت	کربن منتشر شده (گرم)
حمل و نقل (به ازای واحد در هر کیلومتر)	۷۵
مرکز جمع‌آوری (به ازای واحد محصول)	۱
بازیافت (به ازای واحد محصول)	۳۷۵

سایر پارامترهای مساله مانند هزینه‌های متغیر و ثابت در مراکز جمع‌آوری و بازیافت با استفاده از پروژه امکان‌سنجی در این زمینه محاسبه شده‌است.

۳-۲- نتایج حل

پس از حل مدل با استفاده از روش شمارش کامل، مقدار بهینه یارانه، ۶۵۰ و مقدار بهینه تابع هدف سطح دوم به ازای مقدار بهینه یارانه، ۸۹۹۰۷۱۵۵۰۶ ریال شد. مکان بهینه مراکز جمع‌آوری و نحوه تخصیص مراکز مشتری به مراکز جمع‌آوری، در شکل ۱۴ نمایش داده شده‌است. مراکز جمع‌آوری باز شده با نماد مربع نشان داده شده‌است. این مراکز علاوه بر پوشش محله‌هایی که در آن قرار می‌گیرند سایر محله‌هایی که در شکل با خط به این مراکز وصل شده‌اند، را نیز پوشش می‌دهند. محله‌هایی که به هیچ یک از مراکز تخصیص داده نشده‌اند یا در شعاع پوشش این مراکز نبودند، یا ظرفیت مراکز جمع‌آوری کافی نبوده و یا تخصیص این مراکز صرفه اقتصادی نداشته‌است. از بین مراکز بازیافت، مرکز واقع در شهرک صنعتی کلات به عنوان مکان بهینه انتخاب شد.



شکل ۱۴: نقشه مراکز جمع‌آوری باز شده

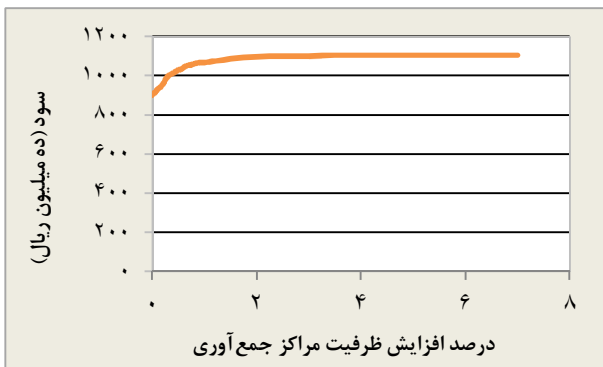
سایر مقادیر بهینه متغیرها در جدول ۷ نشان داده شده‌است.

جدول ۷: مقدار بهینه پارامترها

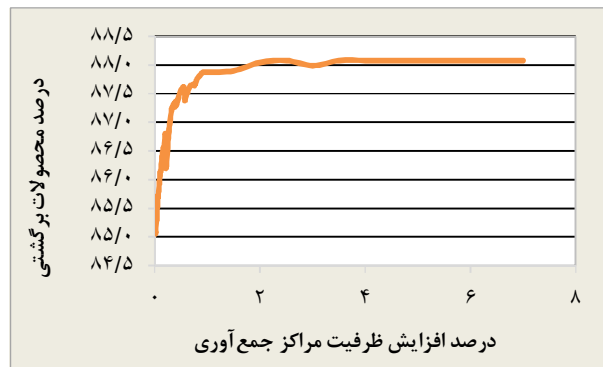
متغیر	مقدار بهینه
FI	۸۰۰
RE	۱
δ_l	۴

۶- آنالیز حساسیت

به منظور بررسی قابلیت کاربرد مدل ارائه شده، آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مهم و تاثیرگذار مدل انجام شده‌است. به منظور انجام آنالیز حساسیت روی این پارامترها در هر مورد، سایر پارامترها ثابت باقی می‌ماند. ابتدا اثر تغییر ظرفیت مراکز جمع‌آوری را بر روی مقدار تابع هدف و میزان محصولات جمع‌آوری شده بررسی می‌کنیم. از آنجا که ظرفیت مراکز متفاوت است، این تغییرات با اضافه کردن درصدی به مقدار قبلی آن بدست می‌آید. همانطور که در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ مشخص است، با افزایش مقدار ظرفیت مراکز تابع هدف و درصد محصولات جمع‌آوری شده تا سطح خاصی افزایش می‌یابد اما از آن نقطه به بعد این مقادیر ثابت می‌مانند. با استفاده از این دو نمودار می‌توان حداقل درصد افزایش ظرفیت مراکز جمع‌آوری که به ازای آن حداکثر سود و حداکثر مقدار جمع‌آوری حاصل می‌شود را به دست آوریم. این مقدار ۳/۵ درصد می‌باشد.

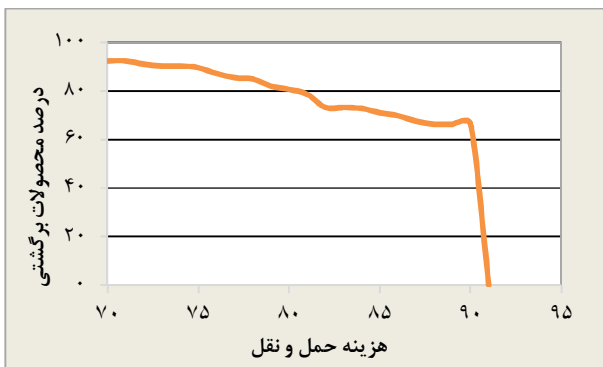


شکل ۱۶: سود شرکت به ازای تغییر ظرفیت مراکز جمع آوری

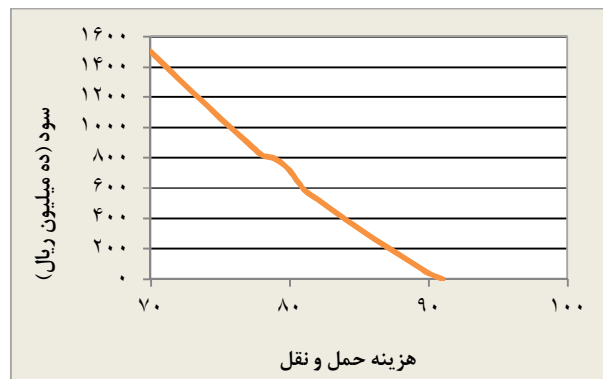


شکل ۱۵: درصد محصولات جمع آوری شده به ازای تغییر ظرفیت مراکز جمع آوری

پارامتر بعدی که تغییرات آن می‌تواند بر روی سود شرکت و مقدار محصول جمع‌آوری شده به شدت تاثیر بگذارد، هزینه حمل‌ونقل است. همانطور که در شکل ۱۷ و **Error! Reference source not found.** مشخص است با یک افزایش کوچک در هزینه حمل‌ونقل، موارد ذکر شده در بالا به سرعت تغییر می‌کند و با شیب تندی تقریباً در هزینه حمل‌ونقل ۹۰ تومان به صفر می‌رسد. همچنین نمودار شکل ۱۸ نشان می‌دهد که در هزینه حمل‌ونقل ۷۸ تومان، درصد محصولات برگشتی کمتر از ۸۵ درصد است. در این نقطه لازم است تا مقدار یارانه پرداخت شده از طرف دولت، دوباره محاسبه گردد تا نرخ جمع‌آوری مورد نظر دولت برآورده شود.

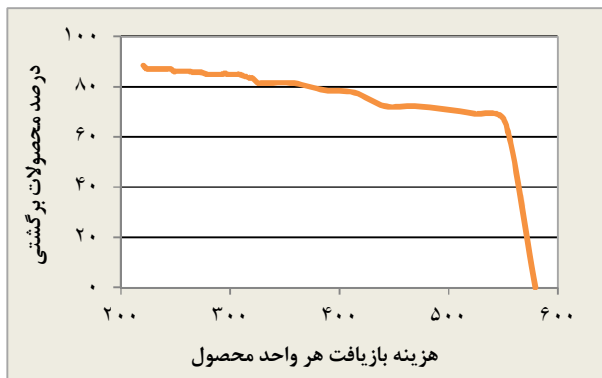


شکل ۱۸: درصد محصولات برگشتی جمع‌آوری شده به ازای تغییر هزینه حمل‌ونقل

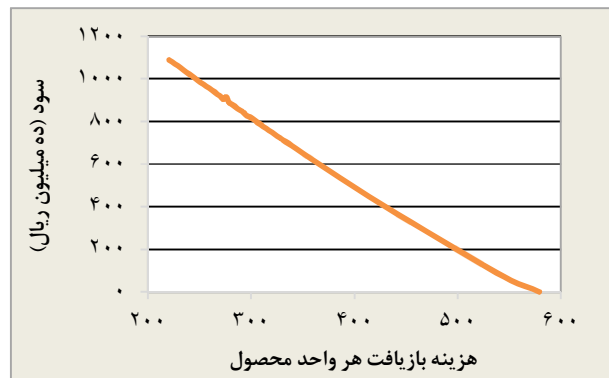


شکل ۱۷: سود شرکت به ازای تغییر هزینه حمل‌ونقل

یکی دیگر از پارامترهای تاثیرگذار بر روی مدل هزینه بازیافت یک واحد محصول می‌باشد. با توجه به شکل ۱۹ و شکل ۲۰ به ازای ثابت بودن سایر پارامترها برای هزینه نزدیک ۶۰۰ واحد، مقدار سود شرکت و مقدار محصولات جمع‌آوری شده صفر می‌باشد. در واقع به ازای این هزینه، ادامه این فعالیت برای شرکت سودآور نمی‌باشد. همچنین به ازای هزینه بازیافت ۲۷۸ تومان، درصد محصولات برگشتی کمتر از نرخ جمع‌آوری مورد نظر دولت یعنی ۸۵ درصد خواهد بود.

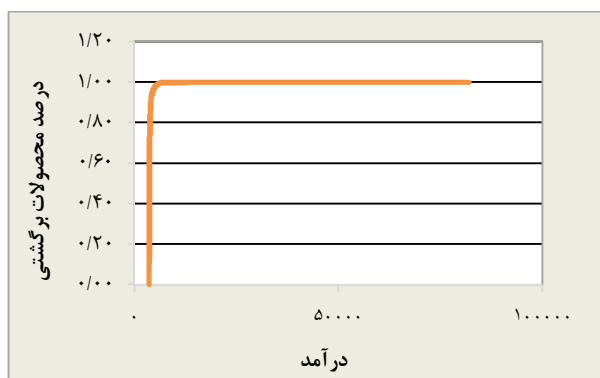


شکل ۲۰: درصد محصولات برگشتی جمع آوری شده به ازای تغییر هزینه بازیافت

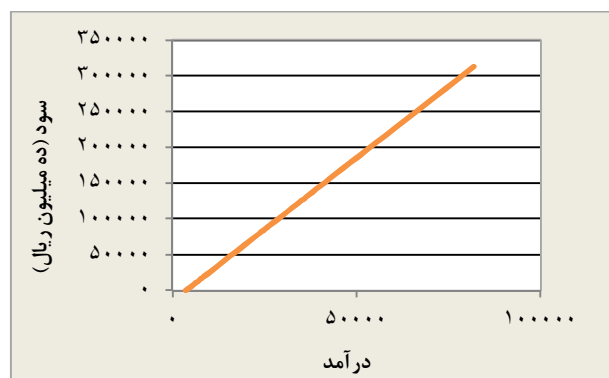


شکل ۱۹: سود شرکت به ازای تغییر هزینه بازیافت

با افزایش درآمد حاصل از فروش هر واحد آلومینیوم بازیافت شده، سود شرکت هم افزایش می‌یابد. این مسئله در شکل ۲۱ نشان داده شده‌است، اما همانطور که در شکل ۲۲ پیداست، درصد محصولات جمع‌آوری شده با افزایش درآمد، به سرعت افزایش می‌یابد اما بعد از مدتی ثابت می‌شود. به ازای درآمد ۱۳۶۰۰ تومان تقریباً تمامی محصولات برگشتی جمع‌آوری خواهد شد.



شکل ۲۲: درصد محصولات برگشتی جمع آوری شده به ازای تغییر درآمد



شکل ۲۱: سود شرکت به ازای تغییر درآمد

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مدل خطی و دو سطحی به منظور طراحی شبکه لجستیک معکوس ارائه گردیده‌است. در سطح اول دولت (رهبر) به شرکت‌های (پیرو) درگیر در جمع‌آوری و بازیابی محصولات برگشتی به ازای جمع‌آوری هر واحد محصول، یارانه پرداخت می‌کند و از پیرو می‌خواهد تا حداقل نرخ جمع‌آوری مورد نظرش برآورده گردد و همزمان سعی دارد، یارانه پرداخت شده را کمینه کند. از طرف دیگر، شرکت در تلاش است تا سود حاصل از عملیات جمع‌آوری و بازیابی را بیشینه کند. در شبکه لجستیک ارائه شده مالیات بر کربن نیز در نظر گرفته شده‌است. به منظور حل مساله، چندین روش ارائه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در ادامه به منظور بررسی عملکرد و کارایی، مدل ارائه شده برای داده‌های حاصل از شهر مشهد به کار گرفته شده‌است. با توجه به افزایش جمعیت، افزایش محصولات برگشتی، کاهش منابع اولیه و کاهش مکان مناسب برای دفن این مدل می‌تواند کاربرد زیادی در سیاست‌های بازیابی کشور داشته‌باشد.

به منظور تحقیقات آتی، در نظر گرفتن مسیریابی به صورت همزمان و استفاده از سایر توابع احتمالی به منظور مدل‌سازی تمایلات مشتری برای برگشت محصولات، پیشنهاد می‌شود.

- [۱] Aksent D., Aras N., & Karaarslan A. G., “*Design and analysis of government subsidized collection systems for incentive-dependent returns*”, Production Economics, Vol. 119, No. 2, Jun. 2009, PP. 308-327.
- [۲] Jayaraman V., Guide V.D.R., & Srivastava R.A., “*closed-loop logistics model for remanufacturing*”, Journal of the Operational Research Society, Vol. 50, No. 5, May. 1999, PP. 497-508.
- [۳] Fleischmann M., Beullens P., Bloemhof-Ruwaard J.M., & Van Wassenhove L.N., “*The impact of product recovery on logistics network design*”, Production and Operations Management, Vol. 10, No. 2, Jun. 2001, PP. 156-173.
- [۴] Salema M.I., Póvoa A.P.B., & Novais A.Q., “*A warehouse-based design model for reverse logistics*”, Journal of the Operational Research Society, Vol. 57, No. 6, Jun. 2006, PP. 615-629.
- [۵] Lu Z., & Bostel N., “*A facility location model for logistics systems including reverse flows: the case of remanufacturing activities*”, Computers & Operations Research, Vol. 34, No. 2, Feb. 2007, PP. 299-323.
- [۶] El-Sayed M., Afia N., & El-Kharbotly A., “*A stochastic model for forward-reverse logistics network design under risk*”, Computers & Industrial Engineering, Vol. 58, No. 3, Apr. 2010, PP. 423-431.
- [۷] Mafakheri F., & Nasiri F., “*Revenue sharing coordination in reverse logistics*”, Cleaner Production, Vol. 59, Nov. 2013, PP. 1-12.
- [۸] Guide V.D.R., & Van Wassenhove L. N., “*Managing product returns for remanufacturing*”, Production and Operations Management, Vol. 10, No. 2, July. 2001, PP. 142-155.
- [۹] Guide V.D.R., Teunter R., & Van Wassenhove L. N., “*Matching demand and supply to maximize profits from remanufacturing*”, Manufacturing and Service Operations Management, Vol. 5, No. 4, Oct. 2003, PP. 303-316.
- [۱۰] Aras N., & Aksent D., “*Locating collection centers for distance- and incentive dependent returns*”, Production Economics, Vol. 111, No. 2, Feb. 2008, PP. 316-333.
- [۱۱] Aras N., Aksent D., & Tanugur A. G., “*Locating collection centers for incentive-dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles*”, European Journal of Operational Research, Vol. 191, No. 3, Dec. 2008, PP. 1223-1240.
- [۱۲] Lee K.H., “*Carbon accounting for supply chain management in the automobile industry*”, Cleaner Production, Vol. 36, Nov. 2012, PP. 83-93.
- [۱۳] Krikke H., “*Impact of closed-loop network configurations on carbon footprints: A case study in copiers*”, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 55, No. 12, Oct. 2011, PP. 1196-1205.
- [۱۴] Keyvanshokoh E., Fattahi M., Seyed-Hosseini S.M., & Tavakkoli-Moghaddam R.A., “*dynamic pricing approach for returned products in integrated forward/reverse logistics network design*”, Applied Mathematical Modelling, Vol. 37, No. 24, Dec. 2013, PP. 10182-10202.
- [۱۵] Ben-Ayed O., & Blair C.E., “*Computational difficulties of bilevel linear programming*”, Operations Research, Vol. 38, No. 3, May-June. 1990, PP. 556-560.
- [۱۶] <https://www.mashhad.ir/>.
- [۱۷] <https://wmo.mashhad.ir/>.
- [۱۸] <http://www.carbontax.org/>.