

توسعه یک مدل ریاضی مکان‌یابی تسهیلات زنجیره تأمین حلقه بسته سبز با در نظر گرفتن اثر یادگیری

مقاله پژوهشی

سمانه جمشیدی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

امید بویرحسنی*، استادیار، گروه مهندسی صنایع، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: omidboyer@gmail.com

دریافت: ۹۸/۰۱/۱۹ - پذیرش: ۹۸/۰۴/۱۹

صفحه ۹۱-۱۰۵

چکیده

مسائل محیط زیست در قرن حاضر یک موضوع مهم جهانی است. بنابراین در سال‌های اخیر مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته سبز به طور فزاینده‌ای به عنوان یک نتیجه از قوانین و مقررات دولتی و انتظارات مصرف‌کنندگان افزایش یافته است. در این مطالعه تلاش شده است تا یک مدل مکان‌یابی تسهیلات برای یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سبز متشکل از تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مشتریان، مراکز بازیافت و انهدام ارائه شود. از این رو، یک مدل برنامه‌ریزی خطی ترکیبی دوهدفه جهت طراحی شبکه با در نظر گرفتن اهداف حداقل‌سازی هزینه‌های کل شبکه و میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در فرآیندهای حمل و نقل، تولید، بازیافت و انهدام پیشنهاد شده است. علاوه بر این، در طراحی هر شبکه، هزینه‌های عملیاتی تأثیر بسزایی در هزینه کل زنجیره تأمین دارد. بر این مبنای در این تحقیق سعی شده است با اضافه نمودن مباحث نمودار یادگیری در دو بخش تولید و بازیافت، زمان و هزینه‌های ساخت و بازیافت محصول را کاهش داده و اثر استفاده از این نمودار را بر روی کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین مورد مطالعه قرار دهد. برای حل مدل دو هدفه و نشان دادن موازنه بین اهداف از روش محدودیت اِپسیلون^۱ استفاده شده است. کاربردی بودن مدل با حل یک مثال عددی و تحلیل حساسیت نشان داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین سبز، زنجیره تأمین حلقه بسته، مدلسازی ریاضی، مکان‌یابی تسهیلات، منحنی یادگیری

۱- مقدمه

همچنین سودآوری بازیافت کالاهای دسته دوم از جمله مواردی بودند که سبب ایجاد زنجیره تأمین معکوس^۲ شدند (Zohal and Soleimani, 2016). مفهوم زنجیره تأمین حلقه بسته^۳، به نوعی شامل لجستیک روبه‌جلو^۴ و معکوس است. بکارگیری زنجیره تأمین روبه‌جلو به صورت جداگانه از زنجیره تأمین معکوس نه تنها سود مربوط به بهبود محصول را کاهش می‌دهد بلکه سبب افزایش هزینه‌ها نیز می‌گردد، با ادغام‌سازی زنجیره‌های تأمین روبه‌جلو و معکوس، یک زنجیره تأمین حلقه بسته ایجاد می‌گردد. این

لجستیک فرآیند برنامه‌ریزی، اجرا و کنترل جریان کارآمد و مؤثر و ذخیره‌سازی کالا، حمل و نقل، خدمات و اطلاعات از نقطه شروع به نقطه مصرف به منظور رفع نیازهای مشتری است. سابقاً این جریان شامل تمام فعالیت‌هایی می‌شد که مواد خام را به محصول نهایی تبدیل می‌کرد. به وجود آمدن قوانین و مقررات زیست‌محیطی جهت کاهش آلودگی‌های ناشی از تولید و رهاسازی محصولات استفاده شده در طبیعت، ایجاد تعهد برای تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان محصول در قبال کالاهای دارای نقص و قابل تعمیر و

یادگیری بر هزینه‌های ناشی از تولید محصولات، بازیافت و میزان مواد حمل شده در جریان‌های حمل و نقل در بین مراکز در زنجیره تأمین را مورد تحلیل قرار دهد. ساختار شبکه حلقه‌بسته و چند هدفه بودن مدل پیشنهادی، همچنین اضافه نمودن انبارها در بخش‌های تولید، توزیع و بازیافت در کنار استفاده از نمودار یادگیری در بخش‌های تولید و بازیافت جهت کاهش هزینه‌های ساخت از جمله مواردی هستند که مدل را به دنیای واقعی نزدیک‌تر می‌کند، بکارگیری تمامی این موارد در کنار هم، ساختاری را ایجاد می‌کند که در تحقیقات گذشته دیده نشده است. برای حل مدل از نرم‌افزار *GAMS* و از رویکرد ϵ -constraint استفاده شده است. نتایج حاصل از بکارگیری این روش حل نشان می‌دهد، بین اهداف مدل ناسازگاری وجود دارد. این ناسازگاری از طریق یک نمونه عددی براساس داده‌های تصادفی، نشان می‌دهد مدل پیشنهادی عملی و قابل اجرا است. مقاله حاضر از بخش‌هایی به شرح ذیل تشکیل شده است: ادبیات تحقیق در بخش ۲ بحث شده است. در بخش ۳ به بیان مسئله پرداخته می‌شود. در بخش ۴ مدل ریاضی نشان داده می‌شود، در بخش ۵ روش حل ارائه شده، سپس از طریق یک مثال عددی مدل حل می‌شود. در بخش ۶ نتایج مورد تحلیل قرار گرفته و در نهایت در بخش ۷ نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی آورده شده است.

۲-پیشینه پژوهش

ادبیات مرتبط با تحقیق حاضر شامل دو بخش است: بخش اول به تاریخچه زنجیره تأمین معکوس، حلقه بسته و سبز اشاره دارد و بخش دوم مربوط به بکارگیری نمودار یادگیری در زنجیره تأمین است. (Fleishmann et al. (2001). برای اولین بار بر روی مدل $MILP^V$ خود یک سیستم لجستیک (شامل حرکت روبه‌جلو و معکوس) یکپارچه را کار کردند. در این شبکه آنها برای اولین بار کالای مصرف شده توسط مشتری را جمع‌آوری کردند و پس از بازسازی مجدد، آنها را مجدداً توزیع کردند. در واقع می‌توان گفت اگرچه این یک شبکه حلقه‌بسته است، اما تولید و توزیع محصولات جدید در آن در نظر گرفته نشده است، بنابراین مدل می‌تواند با اغماض یکپارچه نامیده شود. (Salema et al. (2007).

زنجیره تضمین می‌کند که محصولات استفاده شده و دارای نقص، مجدداً به چرخه زنجیره تأمین برخواهندگشت و این خود سبب افزایش بهره‌وری و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و زائدات به جای‌مانده از محصولات می‌گردد (Lee et al., 2009). درجه اهمیت مسئله حمل و نقل مواد و محصولات و تأثیر آن بر انتشار گازهای گلخانه‌ای به ویژه گاز دی‌اکسیدکربن به اندازه‌ای است که به عنوان یکی از موضوعات مهم در زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز مطرح می‌شود و برای اکثر تصمیم‌گیرندگان یک انتخاب مطلوب می‌باشد و در سطحی از اهمیت قرار دارد که برای هیچ محقق قابل چشم‌پوشی نیست (talaei et al., 2016). از این‌رو کاهش آن در فرآیندهای حمل و نقل، تولید، بازیافت و انهدام به عنوان یکی از اهداف این پژوهش در نظر گرفته شده است. ساختار شبکه توزیع و مکان‌یابی جزء موضوعاتی هستند که در سطح استراتژیک ماتریس برنامه ریزی زنجیره تأمین مورد توجه واقع می‌شوند. این دو موضوع در واقع تشکیل دهنده شبکه لجستیک هستند، همچنین طراحی مناسب این شبکه می‌تواند نقش مثبتی بر اهداف زنجیره تأمین به خصوص کاهش هزینه‌ها، کاهش میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن، سطح پاسخگویی و کارایی داشته باشد. مقاله حاضر با اضافه نمودن نمودار یادگیری^۱ و بررسی اثر آن در کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز سعی دارد موضوعی را مورد بررسی قرار دهد که در تحقیقات سال‌های اخیر کمتر دیده شده است. فکر اصلی در تئوری منحنی یادگیری افزایش بهره‌وری یا کاهش ساعت کاری مورد نیاز برای تولید یک واحد محصول است. منحنی یادگیری ارتباط بین هزینه تولید یک واحد محصول را با تعداد تجمعی واحدهای تولید شده در طی زمان نشان می‌دهد (Jaber and Guiffrida, 2008). این مقاله یک مدل ریاضی چند هدفه زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز را ارائه می‌دهد. ساختار شبکه زنجیره تأمین در حرکت روبه‌جلو شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان است و در حرکت برگشتی شامل مراکز بازیافت و انهدام است. توابع هدف شامل کمینه‌سازی هزینه کل و کمینه‌سازی میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از فرآیندهای حمل و - نقل، تولید و بازیافت است. این تحقیق با اضافه نمودن نمودار یادگیری در دو بخش تولید و بازیافت سعی دارد اثر

ارائه شد. در مدل پیشنهادی علاوه بر حداقل سازی هزینه‌ها از جمله هزینه‌های حمل و نقل، انتشار کربن نیز بهینه‌سازی شد. (Zhao et al. (2016) یک مدل چند هدفه جهت مدیریت شبکه زنجیره تأمین سبز ارائه دادند که هدف آن کمینه‌سازی ریسک های ذاتی مواد پراختر، هزینه انتشار کربن ناشی از فرآیند حمل و هزینه‌های اقتصادی بود و سه سناریو جهت بهبود مدیریت زنجیره تأمین سبز ارائه شد. Bazen et al. (2017)، به بررسی اثر انرژی و انتشار کربن در یک زنجیره تأمین حلقه‌بسته با مکانیزم‌های متفاوت پرداختند و به مقایسه دو مدل بر اساس مدیریت موجودی سنتی و مدیریت موجودی توسط مشتری پرداخته شد. این مقاله سه مسئله مهم زیست‌محیطی شامل انرژی مورد استفاده در فرآیندهای تولید و بازیافت، انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های تولید و حمل و نقل و تعداد دفعات بازیافت را مورد بررسی قرار می‌دهد، سپس نتایج بدست آمده از دو مدل را در کاهش هزینه‌ها و با توجه به مسائل مهم زیست-محیطی در طیف گسترده‌ای از نرخ‌های تولید با هم مقایسه می‌کند. برای نخستین بار Wright, (1936) به بیان یک رابطه ریاضی بین کار مستقیم مورد نیاز برای تولید بدنه یک هواپیما و تعداد هواپیماهای تولید شده پرداخت و توضیح داد که چگونه هزینه‌های کار مستقیم ساخت یک هواپیما خاص با افزایش تعداد تجمعی تولید به وسیله یادگیری کاهش می‌یابد. این نظریه توسط دیگر تولیدکنندگان هواپیما مورد تأیید قرار گرفت (Xu et al., 2011).

(Chen and Chang, (2010) به بررسی عملکرد بازیافت نسبت به اثر نفوذ و اثر یادگیری پرداختند و بیان داشتند که اثر یادگیری از طریق تجربه کارکنان رخ می‌دهد و سیاست-های زیست‌محیطی تأثیر قابل توجهی بر یادگیری سازمانی و افزایش عملکرد بازیافت دارد. (Jaber et al. (2010) به بررسی یک زنجیره تأمین سه سطحی شامل تأمین‌کننده، تولیدکننده و خرده فروش پرداختند که در آن بهبود مستمر عملیات ساخت تحت نمودار یادگیری صورت می‌گیرد. کاهش زمان‌های راه‌اندازی و بهبود کیفیت محصول از طریق حذف دوباره‌کاری به عنوان نتیجه بکارگیری نمودار یادگیری در کاهش زمان تولید محصول استفاده شد، از طرف دیگر با بررسی نتایج مشخص شد که اثرات ناشی از فراموشی و افزایش زمان‌های راه‌اندازی سبب افزایش هزینه‌های زنجیره

پس از اصلاح نقاط ضعف فلیشمن، مقاله‌ای ارائه دادند با مدل کلی‌تر از یک شبکه لجستیک پیشرو و معکوس، در این تحقیق محصولات برگشتی و هزینه‌ها با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط مدلسازی شد.

(El-Sayed et al. (2010) یک مدل لجستیک با حرکت برگشتی را تحت ریسک توسعه دادند. در این پژوهش با تقسیم مشتریان به دو بخش دارای تقاضای تصادفی و تقاضای قطعی سعی در حداکثر نمودن سود کلی مورد انتظار و کاهش هزینه‌ها از جمله هزینه‌های حمل و نقل داشتند. (Ashfari et al. (2014) نیز با اضافه نمودن هدف کیفی افزایش رضایت‌مندی مشتری در کنار هدف کمی کاهش هزینه، مدل ریاضی چندمحصولی و چنددوره‌ای را ارائه دادند، که در آن به دنبال استقرار محل بهینه جهت احداث انبار و تعیین تعداد بهینه محصولات در زنجیره تأمین معکوس بودند و برای حل مدل خود از روش فراابتکاری استفاده نمودند. (Niknegad and Petrovic, (2014) یک مدل بهینه سازی جدید با چند خط بازیافت، چندسطحی و چنددوره‌ای معرفی کردند، که دارای زمان‌های انتظار مختلف، مقدار بازگشت و کیفیت بازگشت در شبکه لجستیک معکوس بود. آستانه‌های کیفی که خط بازیافت محصولات برگشتی را مشخص می‌کردند در این مدل بکار گرفته شد. شبکه ارائه شده دارای یک خط تولید پیشرو سنتی و دو خط بازیافت شامل تعمیر و تولید مجدد و یک خط دفع ضایعات بود. (Sarraffa et al. (2015) در پژوهشی به یکپارچه‌سازی شبکه زنجیره تأمین روبه‌جلو پرداختند. در این پژوهش با تأکید بر کمینه کردن هزینه و کاهش زمان متوسط تأخیر، سعی در محاسبه توابع هدف با استفاده از داده‌های هزینه‌ای، سفارشات عقب افتاده، هزینه حمل و نقل و هزینه تسهیلات نمودند و همچنین مکان بهینه تسهیلات تعیین گردید. (Ernesto et al. (2015) به بررسی چرخه لجستیک در زنجیره تأمین غیرمشارکتی پرداختند. در این پژوهش با تأکید بر افزایش کیفیت و کاهش هزینه چرخه حمل و نقل، از روش برنامه‌ریزی چند هدفه استفاده شد.

(Fareeduddin et al. (2015) به بررسی اثر سیاست های (خط مشی‌های) کربن بر طراحی زنجیره تأمین حلقه‌بسته پرداختند. در این تحقیق به طور مشخص مکانیزم‌های قانونی در زنجیره تأمین حلقه‌بسته جهت محدود کردن انتشار کربن

قیمت‌گذاری، تولید و تصمیم‌گیری‌های مربوط به خرید بکار بردند. تحقیق حاضر سعی دارد با گسترش مدل ریاضی از طریق گسترش شبکه به صورت حلقه‌بسته علاوه بر هدف کاهش هزینه‌ها هدف سبز بودن را نیز اضافه نماید و همچنین با اضافه نمودن انبارها و هزینه‌های نگهداری در سطوح تولید، توزیع و بازیافت مدل را به دنیای واقعی نزدیک‌تر کند. موضوع اصلی مورد مطالعه، تأثیر یادگیری بر هزینه‌های ناشی از تولید محصولات، بازیافت و میزان مواد حمل شده در جریان‌های حمل بین مراکز در زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز می‌باشد که تاکنون در تحقیقات پیشین در کنار چنین شبکه‌گسترده‌ای آورده نشده است. در جدول ۱ خلاصه تحقیقات پیشین آورده شده است، در این جدول توابع هدف، هزینه‌ها و خصوصیات مدل، نوع ساختار شبکه زنجیره تأمین به صورت تفکیک شده در هر تحقیق آورده شده است.

تأمین می‌گردد. در دو تحقیق ذکر شده سعی شد هزینه یادگیری به هزینه‌های دیگر شبکه اضافه شود و تأثیر منحنی یادگیری بر کاهش هزینه‌ها در شبکه زنجیره تأمین یک طرفه مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. (Xu et al. (2011), یک زنجیره تأمین دو سطحی شامل چند خرده‌فروش و کانال‌های توزیع را ارائه دادند، که در آن پژوهش سعی در وارد نمودن یک ایده از منحنی یادگیری فروش در هزینه ارتقاء داشتند. در این تحقیق در مورد اینکه چگونه رقابت خرده‌فروش و منحنی یادگیری فروش بر روی سود و کانال‌های تصمیم‌گیری توزیع تأثیر می‌گذارد مورد بحث قرار گرفت. (Lee et al. (2009), یک مدل زنجیره تأمین دو دوره‌ای متشکل از یک تولیدکننده و یک خرده‌فروش را مطرح کردند که در آن با نرخ یادگیری تصادفی، هزینه تولید در دوره دوم به صورت خطی تولید در اولین دوره را کاهش می‌داد. آنها نرخ یادگیری متوسط و تغییرپذیری یادگیری را در

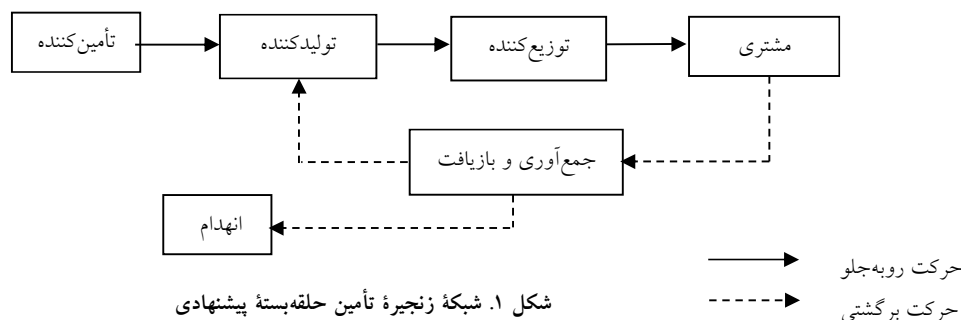
جدول ۱. خلاصه تحقیقات پیشین

محقق	تابع هدف			پارامترهای هزینه						ویژگی‌های مدل			جریان حمل و نقل	
	سود / هزینه	سبز بودن	متوسط تأخیر رضایت مشتری	هزینه تسهیلات	هزینه حمل و نقل	هزینه نگهداری	هزینه کمبود	هزینه انتشار GHG/CO ₂	هزینه مواد / محصول	چند دوره‌ای	چند محصولی	رو به جلو	برگشتی	حلقه بسته
بازن و همکاران (۲۰۱۷)	*	*		*	*	*	*	*						*
ژائو و همکاران (۲۰۱۷)	*	*		*	*	*	*	*				*		
زحل و سلیمانی (۲۰۱۶)	*	*		*	*	*	*	*						*
طلایی و همکاران (۲۰۱۶)	*	*		*	*	*	*	*			*			*
صرافها و همکاران (۲۰۱۵)	*	*	*	*	*	*	*	*			*			*
فاردودین و همکاران (۲۰۱۵)	*	*		*	*	*	*	*			*			*
اشفاری و همکاران (۲۰۱۴)	*	*		*	*	*	*	*			*			*
امین زاده و ژانگ (۲۰۱۳)	*	*		*	*	*	*	*			*		*	
تسانو و شین (۲۰۱۲)	*	*		*	*	*	*	*			*			*
کیزو و همکاران (۲۰۱۱)	*	*		*	*	*	*	*			*			*
جابر و همکاران (۲۰۱۰)	*	*		*	*	*	*	*			*			*
ال سید و همکاران (۲۰۱۰)	*	*		*	*	*	*	*			*			*

۳- تعریف مسئله

فرض‌های مدل پیشنهادی شامل موارد زیر است:
 واحدهای در نظر گرفته شامل: تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مشتریان، مرکز بازیافت و انهدام.
 مدل چند دوره‌ای در نظر گرفته شده است.
 مکان تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان و مشتریان ثابت و از قبل تعیین شده است.
 تمامی پارامترهای هزینه و قیمت‌ها قطعی است.
 ظرفیت وسایل نقلیه و تسهیلات محدود است.
 تعداد تسهیلاتی که می‌توانند باز باشند محدود است.
 محصولات بازیافتی در مراکز بازیافت و محصولات غیرقابل بازیافت در مراکز انهدام، حذف می‌شوند.
 انتشار گاز دی‌اکسیدکربن توسط وسایل نقلیه در هر کیلومتر طبق مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده برابر با ۵۰۰ گرم بر کیلومتر در نظر گرفته شده است (Talai et al. 2016).

در این بخش شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته پیشنهادی توصیف می‌شود. شکل ۱ نمای شماتیک مدل را که شبکه‌ای شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، مشتریان، مراکز بازیافت و انهدام است را نشان می‌دهد. مراکز بازیافت محصولات برگشتی را به اجزاء اولیه ساخت محصول تفکیک می‌کنند، این اجزاء در صورت سالم بودن و قابل تعمیر بودن به عنوان مواد اولیه نو مجدداً وارد فرآیند ساخت می‌شوند و در صورت غیرقابل تعمیر بودن به مرکز انهدام فرستاده می‌شوند. محصولات بعد از ساخت به مراکز توزیع فرستاده شده و بعد از آن به دست مشتری می‌رسند، محصولات استفاده شده نیز بعد از جمع‌آوری به مراکز بازیافت تحویل داده می‌شوند.



۴- مدل‌سازی ریاضی

این بخش به معرفی مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم که در مدل‌سازی مسئله استفاده شده‌اند، می‌پردازد.

۴-۱- توابع هدف

مدل پیشنهادی دارای دو تابع هدف است. تابع هدف اول به کمینه‌سازی هزینه کل شبکه شامل هزینه‌های حمل و نقل، سفارش‌دهی، نگهداری، احداث، خرید، تولید، توزیع، بازیافت و انهدام می‌پردازد. تابع هدف دوم مربوط به کمینه‌سازی میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن حاصل از جریان‌های حمل و نقل، فرآیندهای تولید و بازیافت است، بنابراین توابع هدف می‌توانند به صورت معادلات ۱ و ۲ مرتب شوند.

$$\begin{aligned}
 \min Z_1 = & \left[\sum_i \sum_j \sum_n \sum_t F1_{injt} h1_{nt} S1_{ij} \right. \\
 & + \sum_j \sum_k \sum_t F2_{jkt} h2_t S2_{jk} \\
 & \sum_c \sum_t F3_{kct} h2_t S3_{kc} \\
 & \sum_r \sum_t F4_{crt} h2_t S4_{cr} \\
 & \sum_d \sum_t F5_{rat} h2_t S5_{rd} \\
 & \left. \sum_n \sum_j \sum_t F6_{rnt} h1_{nt} S6_{rj} \right] \\
 & + \sum_n \sum_t X_{int} orde_{int} \\
 & + \sum_n \sum_j \sum_t F1_{injt} Purc_{int}
 \end{aligned} \quad (1)$$

مراکز توزیع k در پایان دوره t و بخش چهارم هزینه‌های نگهداری محصول برگشتی در مراکز بازیافت r را نشان می‌دهد. عبارت پنجم به هزینه‌های نگهداری مواد نوع n بازیافت شده از مراکز بازیافت r اشاره دارد و در نهایت عبارت آخر هزینه‌های ثابت احداث مراکز بالقوه بازیافت r و مراکز بالقوه انهدام d را نشان می‌دهد. جهان امروز با مسائلی چون گرم شدن زمین، انواع آلودگی‌ها، افزایش مقدار گازهای گلخانه‌ای و... مواجه است. بنابراین حفظ محیط‌زیست و استراتژی‌های مربوط به آن خیلی زود در اولویت برنامه‌ها، به عنوان یک نوآوری مهم سازمانی قرار گرفت. فعالیت‌های صنعتی و حمل و نقل‌های مربوط به شبکه‌های زنجیره تأمین از مهم‌ترین منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای به خصوص دی‌اکسیدکربن به شمار می‌روند، کنترل انتشار گازهای گلخانه‌ای در سرتاسر شبکه یکی از حیاتی‌ترین چالش‌ها در سازمان‌ها محسوب می‌شود. با این حال، در مسائل زنجیره تأمین سبز با توجه به پیچیدگی این مسائل، ارایه یک مدل که قابلیت حل داشته باشد، بسیار حائز اهمیت است. تابع هدف دوم در این پژوهش به کمینه‌سازی میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از فرآیندهای حمل و نقل در بین گره‌های شبکه، تولید، بازیافت و انهدام می‌پردازد. همچنین فرض بر این است که هر یک از تسهیلات، بسته به میزان تقاضایی که تأمین می‌کنند، مقدار مشخصی آلاینده‌گی دارند و در مورد وسایل حمل و نقل، مقدار آلاینده‌گی به میزان فاصله توسط وسیله نقلیه وابسته است. در ادامه، پارامترهایی که در مدلسازی شبکه زنجیره تأمین پیشنهادی برای در نظر گرفتن جنبه زیست‌محیطی استفاده شده‌اند، معرفی می‌شوند.

α : میزان گاز CO_2 منتشر شده در هر کیلو متر توسط وسیله نقلیه مورد نظر (کامیون)؛

β : میزان گاز CO_2 منتشر شده هر واحد محصول طی فرآیند ساخت در مراکز تولید؛

γ : میزان گاز CO_2 منتشر شده طی فرآیند بازیافت برای هر محصول برگشتی؛

θ : میزان گاز CO_2 منتشر شده طی فرآیند انهدام برای هر محصول غیرقابل بازیافت؛

$$\min Z_2 = \alpha \left[\sum_i \sum_n \sum_j \sum_t S_{ij} \frac{F1_{inj}t}{v1_{inj}} \right]$$

$$\begin{aligned} & \sum_t Y_{jt} Prod_{jt} \\ & \sum_c \sum_t F3_{kct} Dis_{kt} \\ & \sum_r \sum_t F4_{crt} Brok_{rt} \\ & \sum_d \sum_t F5_{rat} Disp_{at} \\ & \sum_n \sum_j \sum_t F6_{rnjt} Inco_{rnt} \\ & \sum_j \sum_t Hm_{nj} Im_{njt} \\ & \sum_t Hp_j Ip1_{jt} \\ & \sum_t Hd_k Ip2_{kt} \\ & \sum_t Hr1_r Ir1_{rt} \\ & \sum_n \sum_t Hr2_{rn} Ir2_{rnt} \\ & Fix1_r W_r + \sum_d Fix2_d U_d \end{aligned}$$

معادله ۱ عبارت اول به مجموع هزینه‌های حمل و نقل بین مراکز موجود در شبکه اشاره دارد. بخش اول هزینه حمل و نقل مواد اولیه نوع n بین مراکز تأمین i و کارخانه j ، بخش دوم هزینه حمل و نقل بین کارخانه j و مراکز توزیع k ، بخش سوم هزینه حمل و نقل بین مراکز توزیع k و مراکز مشتری c ، بخش چهارم هزینه حمل و نقل بین مراکز مشتری c و مراکز بازیافت r ، بخش پنجم هزینه حمل و نقل بین مراکز بازیافت r و مراکز انهدام d ، و بخش ششم هزینه حمل و نقل مواد بازیافت شده نوع n را در بین مراکز بازیافت r و مرکز تولید j نشان می‌دهد. عبارت دوم هزینه‌های به ترتیب سفارش‌دهی و خرید مواد اولیه نوع n از تأمین‌کننده i ، هزینه‌های تولید محصول در کارخانه j ، هزینه‌های توزیع محصول در مراکز توزیع k ، هزینه‌های بازیافت در مراکز بالقوه بازیافت r و هزینه‌های انهدام در مراکز بالقوه انهدام را نشان می‌دهد. عبارت سوم به میزان درآمد حاصل از مواد بازیافت شده نوع n توسط مرکز بازیافت r که به کارخانه j فرستاده می‌شود اشاره دارد. عبارت چهارم در بخش اول هزینه‌های نگهداری مربوط به مواد اولیه نوع n در پایان دوره t ، در بخش دوم هزینه‌های نگهداری محصول در کارخانه j در پایان دوره t ، بخش سوم هزینه‌های نگهداری محصول در

$$Ir1_{rt} = Ir1_{rt-1} + \sum_c F4_{crt} - RP_{rt} \quad \forall r, t \quad (10)$$

$$Ir2_{rnt} = Ir2_{rt-1} + RP_{rnt} \times \delta_{rnt} \times \omega - \sum_j F6_{rnjt} \quad \forall r, n, t \quad (11)$$

$$\sum_j F1_{injt} \leq Cap1_{in} \times X_{int} \quad \forall i, n, t \quad (12)$$

$$Ip1_{jt-1} + \sum_k F2_{jkt} \leq Cap2_j \quad \forall j, t \quad (13)$$

$$Ip2_{kt-1} + \sum_c F3_{kct} \leq Cap3_k \quad \forall k, t \quad (14)$$

$$Ir1_{rt-1} + RP_{rt} \leq Cap4_r \times W_r \quad \forall r, t \quad (15)$$

$$X3_{dt} \leq Capmax5_d \times U_d \quad \forall d, t \quad (16)$$

$$X3_{dt} \geq Capmin5_d \times U_d \quad \forall d, t \quad (17)$$

$$Im_{njt} \geq ssm_{nj} \quad \forall n, j, t \quad (18)$$

$$Im_{njt} \leq Vm_{nj} \quad \forall n, j, t \quad (19)$$

$$Ip1_{jt} \leq Vp1_j \quad \forall j, t \quad (20)$$

$$Ip2_{kt} \leq Vp2_k \quad \forall k, t \quad (21)$$

$$Ir1_{rt} \leq Vr1_r \quad \forall r, t \quad (22)$$

$$F1_{injt}, F2_{jkt}, F3_{kct}, F4_{crt}, F5_{rdt}, F6_{rnjt}, Y_{jt}, X3_{rdt}, Im_{int}, Ip1_{jt}, Ip2_{kt}, Ir1_{rt}, Ir2_{rnt}, RP_{rt} \geq 0 \quad (23)$$

$$X_{int}, W_r, U_d \in \{0,1\} \quad (24)$$

محدودیت ۳ بیان می‌کند که تقاضا در بازارها باید به طور کامل ارضا شوند. محدودیت ۴ بیان می‌کند درصدی از محصولات برگشتی از بازارهای تقاضا جهت بازیافت جمع-آوری می‌شوند. محدودیت ۵ بیان می‌کند مقدار مواد امحاء شده با درصدی از مواد تفکیک شده غیرقابل بازیافت برابر است. محدودیت ۶ برابری مقدار مواد امحاء شده با میزان مواد غیرقابل بازیافت را نشان می‌دهد. محدودیت‌های ۷-۱۱ میزان سطح موجودی در هر دوره را با در نظر گرفتن مقدار باقی مانده از دوره قبل در انبارهای مراکز تولید، توزیع و بازیافت نشان می‌دهد که در محاسبه هزینه‌های نگهداری در هر دوره و محدودیت‌های ظرفیتی مراکز مورد استفاده قرار می‌گیرند. محدودیت‌های ۱۲-۱۷ مربوط به محدودیت‌های ظرفیت هر یک از مراکز می‌باشند و از ایجاد جریان‌های

$$\begin{aligned} & + \sum_j \sum_k \sum_t S_{jk} \frac{F2_{jkt}}{v2_{jk}} \\ & + \sum_k \sum_c \sum_t S_{kc} \frac{F3_{kct}}{v3_{kc}} \\ & + \sum_c \sum_r \sum_t S_{cr} \frac{F4_{crt}}{v4_{cr}} \\ & + \sum_r \sum_d \sum_t S_{rd} \frac{F5_{rdt}}{v5_{rd}} \\ & + \sum_r \sum_n \sum_j \sum_t S_{rj} \frac{F6_{rnjt}}{v6_{rnj}} \\ & + [\beta (\sum_j \sum_t Y_{jt}) \\ & + \gamma (\sum_r \sum_t RP_{rt}) \\ & + \theta (\sum_r \sum_d \sum_t F5_{rdt})] \end{aligned} \quad (2)$$

رابطه ۲ از دو بخش اصلی تشکیل شده است. در بخش اول مقدار کل گاز دی‌اکسیدکربنی که به واسطه حمل و نقل وسایل نقلیه در بین گره‌های شبکه در محیط انتشار می‌یابد، محاسبه می‌شود و در بخش دوم، مقدار کل گاز دی‌اکسید-کربنی را که از فرآیندهای تولید، بازیافت و انهدام در محیط انتشار می‌یابد به ازای هر واحد محصول مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

۴-۲- محدودیت‌ها

در ادامه مدل محدودیت‌های مدل ریاضی شبکه مفروض به طور کامل تشریح می‌شوند.

$$\sum_k F3_{kct} = Dem_{ct} \quad \forall c, t \quad (3)$$

$$\sum_r F4_{crt} = \lambda_{ct} \times Dem_{ct} \quad \forall r, t \quad (4)$$

$$RP_{rt} \times \eta = \sum_d F5_{rdt} \quad \forall r, t \quad (5)$$

$$X3_{dt} = \sum_r F5_{rdt} \quad \forall d, t \quad (6)$$

$$Im_{njt} = Im_{njt-1} + \sum_i F1_{injt} + \sum_r F6_{rnjt} - (Ur_n \times Y_{jt}) \quad \forall j, n, t \quad (7)$$

$$Ip1_{jt} = Ip1_{jt-1} + Y_{jt} - \sum_k F2_{jkt} \quad \forall j, t \quad (8)$$

$$Ip2_{kt} = Ip2_{kt-1} + \sum_j F2_{jkt} - \sum_c F3_{kct} \quad \forall k, t \quad (9)$$

برخلاف مدل‌های تک هدفه و به دلیل وجود چند هدف متعارض، به جای تنها یک جواب، مجموعه‌ای از جواب‌ها حاصل می‌شود. برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. روش بکار برده شده در پژوهش حاضر روش دقیق ϵ -constraint است. در این روش برای پیدا کردن هر چه بیشتر جوابهای پارتو باید مقادیر را به تدریج افزایش داده و مسأله دوباره حل شود. از آنجایی که مدل بکار برده شده در این تحقیق دارای دو تابع هدف است با در نظر گرفتن مقدار بهینه تابع هدف اول و بدست آوردن مقادیر بهترین جواب و بدترین جواب برای تابع هدف دوم، نقاط اسیلون را از تقسیم‌بندی این محدوده بدست می‌آوریم و به ازای هر نقطه می‌بایست مدل در نرم-افزار اجرا شود و جواب‌های بهینه ثبت گردند. در این روش یکی از توابع هدف برای بهینه‌سازی انتخاب می‌شود و سایر توابع هدف تبدیل به محدودیت با یک حد بالای ϵ می‌شوند (Amin and zhang, 2013).

$$\text{Min } z = z_1$$

$$\text{s.t} \quad (27)$$

$$z_2 \leq \epsilon$$

$$\text{Eqs. (3)-(24)}$$

۶- نتایج محاسباتی

در ادامه جهت اعتبارسنجی مدل پیشنهادی و نشان دادن کاربرد عملی آن، از یک مثال عددی استفاده می‌شود و تحلیل حساسیت نتایج مدل نیز ارائه خواهد شد.

۶-۱- تشریح نمونه عددی

این تحقیق علاوه بر این که به دنبال تعیین میزان مواد حمل شده در بین مراکز شبکه و بررسی تأثیر آن بر تابع هزینه و میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن است، می‌خواهد نمودار یادگیری را نیز در کنار آن به مدل اضافه کند تا اثر بکارگیری این نمودار را بر هزینه‌های زنجیره تأمین مورد تحلیل قرار دهد. در این بخش کاربردی بودن مدل پیشنهادی از طریق ارائه یک نمونه عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجا که تخمین پارامترها در دنیای واقعی سخت است، پارامترها به صورت تصادفی از توزیع یکنواخت بدست می‌آیند. مکان-های بالقوه برای مراکز بازیافت و انهدام از توزیع یکنواخت

بیشتر از مقادیر مجاز ظرفیتی در بین مراکز موجود در شبکه جلوگیری می‌کنند. محدودیت‌های ۱۸-۲۲ حدود مجاز برای میزان موجودی در انبارهای مواد اولیه در مراکز تولید و بازیافت، محصول نهایی در مراکز تولید و توزیع و محصولات برگشتی و مواد بازیافت شده را در انبارهای مراکز بازیافت نشان می‌دهند و در نهایت دو محدودیت آخر متغیرهای صفر و یک و غیرمنفی را معرفی می‌کنند.

۴-۳- کاربرد نمودار یادگیری در مدل

در بسیاری از صنایع مهارت در کار به تجربه در تولید مربوط می‌شود، یک کارگر با تجربه بیشتر کارآمدتر از یک کارگر با تجربه کمتر است، نمودار یادگیری نیز از این مفهوم مشتق می‌شود. به طور مشخص می‌توان گفت نیاز به نیروی کار به عنوان ورودی و هزینه‌های (زمان‌های) اضافه شده با افزایش تجمعی محصول خروجی طبق رابطه (۲۵) کاهش می‌یابد.

$$Y_i = AX_i^{-r} \quad (25)$$

X_i : تعداد تجمعی محصولات در تولید i ام

Y_i : قیمت (هزینه) محصول در تولید i ام

A : هزینه اولین واحد تولید شده

r : نسبت پیشرفت

$$F = 2^{-r} \quad (26)$$

رابطه (۲۶) نشان می‌دهد که هزینه‌های تولید کاهش می‌یابد زمانی که تولید تجمعی دو برابر شود. برای مثال اگر F ، ۹۰ درصد باشد، به این معناست که هزینه به ۹۰ درصد کاهش می‌یابد زمانی که حجم تولید تجمعی دو برابر شود، در صورت داشتن داده‌های قدیمی می‌توان نسبت پیشرفت F را با رگرسیون برآورد نمود (Tsuchiya and kobayshi, 2004).

۵- روش حل

هدف از بهینه‌سازی چند هدفه یافتن مجموعه جواب‌های پارتو^۱ مسئله مورد نظر است. بسیاری از مسائل دنیای واقعی شامل بهینه‌سازی همزمان چندین هدف است که در برخی موارد ممکن است با یکدیگر در تضاد باشند، در این مسائل

۱۰۱×۹۹۹۳ است. میزان تولید و میزان محصول حمل شده خروجی نرم افزار، قبل از بکارگیری نمودار یادگیری مطابق جدول ۵ می باشد. بکارگیری نمودار یادگیری سبب کاهش زمان تولید واحد محصول شده و تعداد محصول بیشتری در مدت زمان مشخصی ساخته می شود، در نتیجه تعداد محصول تولید شده و مقدار مواد حمل شده در بین مراکز موجود در شبکه مطابق جدول ۶ در طی دوره با افزایش تعداد تولید، افزایش می یابد.

جدول ۵. مقادیر تولید و محصول حمل شده قبل از یادگیری (برحسب واحد محصول)

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
Y_1	۲۸۰۰	۲۴۰۰	۴۵۰۰	۱۲۰۰	۲۳۶۰	۲۴۴۰
F_{21}	۶۰۰	۲۰۰	۱۳۰۰	۰	۱۵۹	۲۴۰
F_{22}	۲۲۰۰	۲۲۰۰	۲۲۰۰	۲۲۰۰	۲۲۰۰	۲۲۰۰

جدول ۶. مقادیر تولید و محصول حمل شده بعد از یادگیری (برحسب واحد محصول)

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
Y_1	۳۳۰۰	۳۳۵۰	۴۵۰۰	۷۵۰	۲۳۰۰	۲۵۰۰
F_{21}	۱۱۰۰	۱۵۰	۱۰۷۵	۰	۱۰۰	۳۰۰
F_{22}	۲۲۰۰	۲۲۰۰	۲۴۲۵	۱۷۵۰	۲۲۰۰	۲۲۰۰

مقادیر بدست آمده از رابطه (۲۵) برای پارامترهای هزینه تولید و بازیافت بعد از استفاده از نمودار یادگیری، مطابق جدول ۷ می باشد.

جدول ۷. هزینه تولید و بازیافت (برحسب واحد پولی)

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
pro_1	۵	۵/۲۲	۴/۶۴	۵/۸۲	۵/۰۶	۵/۱۶
bro_1	۴/۰۸	۷/۵	۴/۲۵	۴/۹۶	۴/۹	۷/۲
bro_2	۵/۳۶	۴/۲۵	۸/۲	۸/۵	۷/۷	۷/۶

بین صفر و صد حاصل شده اند و فواصل بین گره های شبکه به روش اقلیدوسی بدست می آیند. داده های مربوط به میزان انتشار گاز دی اکسید کربن از مقاله (Talaei et al.(2016) اتخاذ شده اند. نمونه مورد بررسی در این پژوهش شامل، دو تأمین کننده، یک تولیدکننده، دو توزیع کننده، دو بازار تقاضا، دو مکان بالقوه بازیافت، دو مکان بالقوه انهدام، دو نوع مواد اولیه، شش دوره زمانی و یک نوع محصول است. جداول ۲ و ۳ موجود در پیوست مقادیر مربوط به پارامترهای بکار برده شده در نمونه آزمایشی که از توزیع یکنواخت با تولید اعداد تصادفی حاصل شده اند در تابع هدف اول و تابع هدف دوم در دوره اول را نشان می دهند. جدول ۴ مقادیر پارامترهای هزینه تولید و بازیافت را قبل از استفاده از نمودار یادگیری نشان می دهد.

جدول ۴. مقادیر پارامترهای هزینه تولید و بازیافت (برحسب واحد پولی)

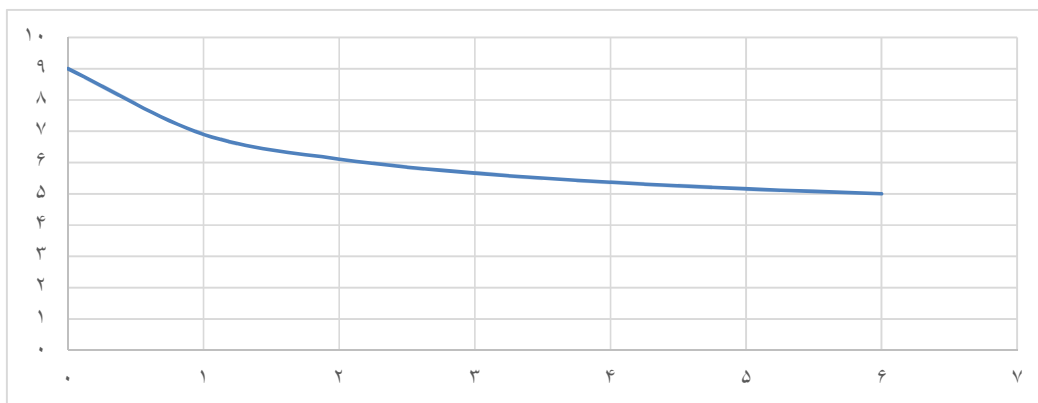
	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6
pro_1	۹	۹/۱	۸/۹	۹/۲	۸/۸	۹
bro_1	۷	۷/۵	۷/۴	۷/۳	۷/۸	۷/۲
bro_2	۷	۷/۱	۸/۲	۸/۵	۷/۷	۷/۶

۶-۲- نتایج

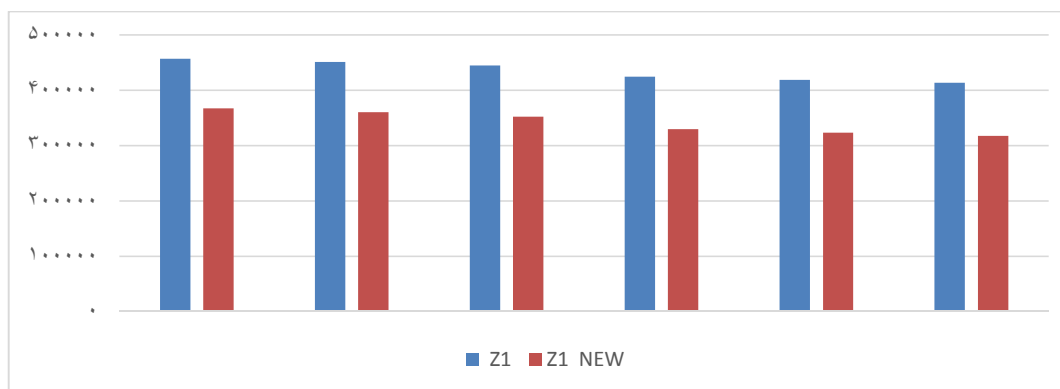
در این تحقیق، مدل به وسیله نرم افزار *GAMS 24.1.2* که نرم افزار بهینه سازی مناسبی برای حل مسائل برنامه ریزی خطی ترکیبی است، حل شده است. همه محاسبات بر روی یک کامپیوتر شخصی (دارای سیستم عامل ۳۲ بیتی، ریزپردازنده ۱/۶۷ گیگا هرتزی و حافظه داخلی ۲ گیگا بیتی) انجام گرفته است.

۶-۲-۱- حالت بهینه توابع هدف

مقدار تابع هدف اول (هزینه کل) در مسئله آزمایشی $۴/۱۳۱۷۰ \times ۱۰^۶$ است. مقدار بهینه تابع هدف دوم



شکل ۲. نمودار یادگیری و روند کاهش هزینه



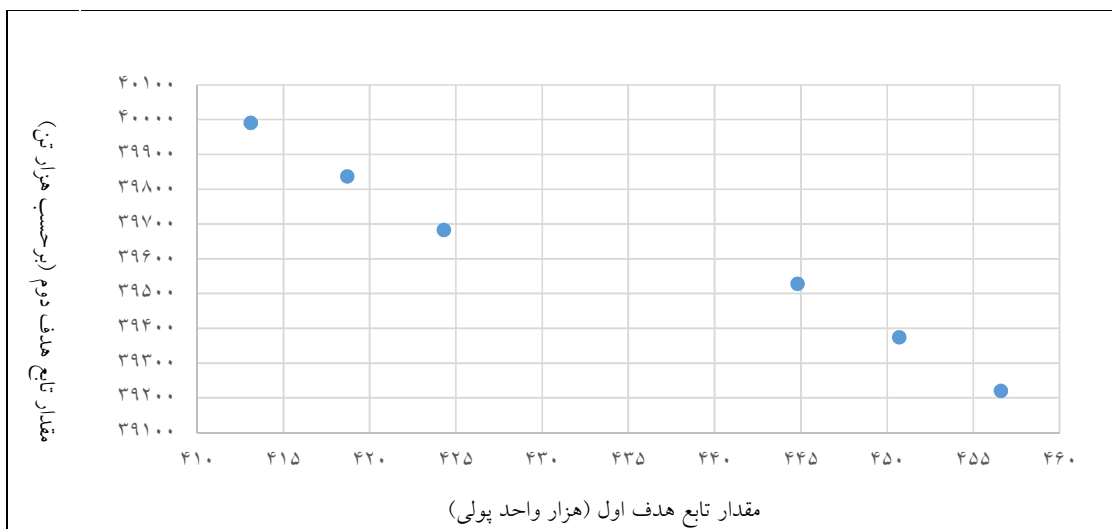
شکل ۳. مقایسه نتایج تابع هدف اول قبل و بعد بکارگیری نمودار یادگیری

این تغییر مطابق جدول ۸ کاهش یافته است و همچنین تابع هدف دوم با افزایش مقدار حمل در بین گره‌های شبکه و همچنین افزایش مقدار محصول در فرآیندهای ساخت، بازیافت و انهدام، افزایش می‌یابد. مکان‌های مناسب جهت احداث مراکز بازیافت و انهدام نیز در این جدول مشخص شده است.

شکل ۲ کاهش متوسط هزینه تولید هر واحد محصول را به ازای تولید تجمعی در طی ۶ دوره زمانی نشان می‌دهد. شکل ۳ به طور واضح گویای تأثیر یادگیری بر هزینه‌های شبکه زنجیره تأمین است. کاهش میزان تابع هدف طی شش دوره استفاده از فرآیند یادگیری اثری است که فرآیند یادگیری از خود به‌جای گذاشته است. تابع هدف اول بعد از

جدول ۸. نتایج روش محدودیت اپسیلون، قبل و بعد از نمودار یادگیری

ϵ_j	Z_1 (10^6 * واحد پول)	Z_2 (10^11 * کیلو گرم)	Z_{1new} (10^6 * واحد پول)	مراکز جمع آوری و بازیافت احداث شده	مراکز انهدام احداث شده
۳/۹۲۲	۴/۵۶۶۱۴	۳/۹۲۲	۳/۶۷۰۷۰	۱،۲	۲
۳/۹۳۷۴	۴/۵۰۶۹۸	۳/۹۳۶۰	۳/۶۰۲۸۰	۱،۲	۲
۳/۹۵۲۸	۴/۴۴۸۱۲	۳/۹۵۰	۳/۵۲۱۵۰	۱،۲	۲
۳/۹۶۸۲	۴/۲۴۳۰۰	۳/۹۶۸۰	۳/۲۹۴۸۰	۱	۲
۳/۹۸۳۶	۴/۱۸۷۳۵	۳/۹۸۳۰	۳/۲۳۱۰۰	۱	۲
۳/۹۹۹۰	۴/۱۳۱۷۰	۳/۹۹۹۰	۳/۱۷۰۷۰	۱	۲



شکل ۴. نمودار جواب‌های بهینه توابع هدف Z_1 و Z_2

بازیافت محصول را به دنبال دارد، در نتیجه میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن نیز کاهش می‌یابد.

جدول ۷. تحلیل حساسیت توابع هدف نسبت به تغییر در تقاضا

Z_2 (۱۰٪)	Z_1 (۱۰٪)	تقاضا
۴/۳۱۹	۴/۵۲۷۴	(+۸) درصد
۴/۱۹۸	۴/۳۲۸۴	(+۵) درصد
۴/۱۱۹	۴/۲۵۰۰	(+۳) درصد
۳/۹۹۹	۴/۱۳۰۶	۰ درصد
۳/۸۵۷	۳/۹۸۸۷	(-۳) درصد
۳/۷۹۹	۳/۹۳۲۵	(-۵) درصد
۳/۶۷۹	۳/۸۱۴۴	(-۸) درصد

با توجه به جدول ۶ ملاحظه می‌شود که با افزایش تقاضا، شاهد افزایش تابع هدف اول و تابع هدف دوم می‌باشیم و در شرایط کاهش تقاضا نیز شاهد کاهش توابع هدف هستیم.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل دو هدفه عدد صحیح مختلط جهت مکان‌یابی تسهیلات در یک شبکه زنجیره تأمین حلقه- بسته سبز مورد بررسی قرار گرفت. مراکز موجود در این شبکه شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، بازارهای تقاضا، مراکز بازیافت و انهدام است. این مدل با ادغام هر دو جریان روبه‌جلو و برگشتی و همچنین با در

نمودار حاصل از ترسیم اهداف مدل مورد مطالعه نشان می‌دهد که بین اهداف مدل ناسازگاری وجود دارد، چرا که با افزایش مقدار تابع هدف دوم مقدار تابع هدف اول کاهش می‌یابد، به دلیل متناقض بودن اهداف با یکدیگر، پیدا کردن یک جواب بهینه که به طور همزمان توابع را کمینه کند، دشوار است. با این حال می‌توان مجموعه‌ای از جواب‌ها را یافت که بهترین تعامل را بین اهداف برقرار کند به طوری که بهبود نمی‌یابد مگر این‌که سبب بدتر شدن هدف دیگر شود.

۶-۳- تحلیل حساسیت^۹

در تحلیل حساسیت به دنبال آن هستیم تا بدانیم تغییر در متغیرهای مستقل در یک محدوده مشخص چگونه می‌تواند بر روی متغیرهای وابسته تأثیر بگذارند. تغییر در مقدار پارامتر تقاضا به میزان ۳، ۵ و ۸ درصد افزایش و کاهش، نشان می‌دهد که خروجی مدل برای توابع هدف، متغیرهای جریان، میزان تولید، میزان بازیافت و انهدام متناسب با افزایش و کاهش تقاضا افزایش و کاهش می‌یابند. مقدار انتشار گاز دی‌اکسیدکربن حاصل از حمل و نقل نیز با افزایش مقدار تقاضا به نسبت مقادیر اضافه شده به دلیل محدود بودن ظرفیت حمل افزایش می‌یابد، یعنی با افزایش مقدار تقاضا مقدار جریان‌های حمل و نقل در بین مراکز زنجیره نیز افزایش می‌یابند که این خود سبب افزایش میزان انتشار گاز دی‌اکسیدکربن خواهد شد، همچنین کاهش میزان تقاضا، کاهش میزان حمل و نقل، کاهش مقدار تولید و

-Amin, S. H., & Zhang, G., (2013), "A multiobjective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return". *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), pp.4165-4176.

-Bazan, E., Jaber, M. Y., & Zanoni, S. (2017). Carbon emissions and energy effects on a two-level manufacturer-retailer closed-loop supply chain model with remanufacturing subject to different coordination mechanisms. *International Journal of Production Economics*, 183, pp.394-408.

-Chen, Y.T., Chang, D.S., (2010), "Diffusion effect and learning effect: an examination on MSW recycling". *Journal of Cleaner Production*, (18) 5, pp.496-503.

-El-Sayed, M., Afia, N., & El-Kharbotly, A., (2010), "A stochastic model for forward-reverse logistics network design under risk. *Computers & Industrial Engineering*, (58)3, pp.423-431.

-Ernesto, D.R, Santibanez-Gonzalez, Diabat, A. (2015), "Modeling logistics service providers in a non-cooperative supply chain". *Applied Mathematical Modelling*, (40)13-14, pp.6340-6358.

-Fareeduddin, M., Hassan, A., Syed, M. N., & Selim, S. Z. (2015), "The impact of carbon policies on closed-loop supply chain network design. *Procedia CIRP*, 26, pp.335-340.

-Jaber, M. Y., & Guiffrida, A. L., (2008). Learning curves for imperfect production processes with reworks and process restoration interruptions. *European journal of operational research*, 189(1), pp.93-104.

-Jaber, M.Y., Bonny, M., & Guiffrida, A. L., (2010), "Coordinating a three-level supply chain with learning-based continuous improvement. *International journal of production economics*, (127)1, pp.27-38.

-Lee, A. H., Kang, H. Y., Hsu, C. F., & Hung, H. C., (2009). A green supplier selection model for high-tech industry. *Expert systems with applications*, 36(4), pp.7917-7927.

-Fleischmann, M., Beullens, P., BLOEMHOF-RUWAARD, J. M., & Van Wassenhove, L. N. (2001). The impact of product recovery on

نظرفرگرفتن برخی از جنبه‌های انتشار گاز دی‌اکسیدکربن به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز پرداخته است. روش مورد استفاده برای حل مدل روش ϵ -constraint است. این روش قادر است بین اهداف اقتصادی و زیست-محیطی تعادل برقرار کند. نتایج نشان می‌دهند که بکارگیری نمودار یادگیری زمان تولید یک واحد محصول را کاهش می‌دهد و در مدت زمان کمتری می‌توان به تعداد محصول مورد تقاضا دست یافت. همچنین افزایش تعداد تسهیلات و یا تغییر چیدمان تسهیلات نسبت به حالت بهینه به افزایش سود شبکه کمک می‌کند. این امکان به واسطه کاهش انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در پی حمل و نقل در بین گره‌های شبکه و اجرای هر یک از فرآیندهای تولید، توزیع، بازیافت و انهدام بر روی هر یک از محصولات تحقق می‌یابد و تعادل بشر دوستانه‌ای بین اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی برقرار می‌کند. کاربردی بودن مدل توسعه داده شده و مؤثر بودن روش حل ϵ -constraint توسط نمونه عددی در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت.

با توجه به شکل‌گیری آینده جامعه بشری، جهت توسعه مدل پیشنهاد می‌شود اهداف اجتماعی نیز در کنار ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی بکار برده شود.

پیشنهاد می‌شود از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری برای حل مدل استفاده شود و نتایج حاصل از آن با نتایج مدل پیشنهادی از لحاظ زمان حل و مقادیر تابع هدف مقایسه گردد.

۸- پی‌نوشت‌ها

1. ϵ -constraint
2. Reverse Logistics
3. Closed-Loop Supply Chain
4. Forward Supply Chain
5. Facility Location
6. Learning Curve
7. Mixed Integer Linear Programing
8. Pareto Solutions
9. Sensitivity Analysis

۹- مراجع

-Ashfari, H., Sharifi, M., Elmekaway, T-Y., Peng, Q., (2014), "Facility Location decisions within integrated forward/reserve logistics under on certainty". *Procedia CIRP*, (17), pp.606-610.

analytic approach. Journal of Cleaner Production, 142, pp.1085-1097.

-Zohal, M., Soleimani, H., (2016), "Developing an Ant colony Approach for green-loop supply chain network design: A case study in gold industry". Journal of cleaner production, (133), pp.314-337.

پیوست

مجموعه‌ها

- I: مجموعه بالقوه تأمین‌کنندگان ($i=1, \dots, I$)
 J: مجموعه تولیدکنندگان ($j=1, \dots, J$)
 K: مجموعه توزیع‌کنندگان ($k=1, \dots, K$)
 C: مجموعه مشتریان ($c=1, \dots, C$)
 R: مجموعه بالقوه مراکز بازیافت ($r=1, \dots, R$)
 D: مجموعه بالقوه مراکز انهدام ($d=1, \dots, D$)
 N: نوع مواد اولیه ($n=1, \dots, N$)
 T: دوره‌های زمانی ($t=1, \dots, T$)

پارامترها

- Dem_{ct} : میزان تقاضای مشتری C در دوره t
 $h1_{nt}$: هزینه حمل و نقل هر واحد ماده اولیه نوع n از مراکز تأمین به مراکز تولید و از مراکز بازیافت به مراکز تولید در دوره t در هر کیلومتر؛
 $h2_t$: هزینه حمل و نقل هر واحد محصول بین مراکز تولید، توزیع، مشتریان، بازیافت و انهدام در دوره t در هر کیلومتر؛
 $Fix1_r$: هزینه ثابت بازگشایی مرکز بازیافت r
 $Fix2_d$: هزینه ثابت بازگشایی مرکز انهدام d
 $v1_{inj}$: ظرفیت حمل ماده n از تأمین‌کننده i به کارخانه j
 $v2_{jk}$: ظرفیت حمل از کارخانه j به توزیع‌کننده k
 $v3_{kc}$: ظرفیت حمل از مرکز توزیع k به مشتری c
 $v4_{cr}$: ظرفیت حمل از مشتری c به مرکز جمع‌آوری r
 $v5_{rd}$: ظرفیت حمل از مرکز بازیافت r به مرکز انهدام d
 $v6_{mj}$: ظرفیت حمل ماده n از مرکز بازیافت r به کارخانه j
 $S1_{ij}$: فاصله تأمین‌کننده i از کارخانه j (فاصله بر اساس روش اقلیدوسی محاسبه شده‌اند)؛

logistics network design. Production and operations management, 10(2), pp.156-173.

-Niknegad, A. Petrovic, D., (2014). Optimisation of integrated reverse logistics networks with different product recovery routes. European Journal of Operational Research, (238)1, pp.143-154.

-Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q., (2007), "An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty". European Journal of Operational Research, 179(3), pp.1063-1077.

-Sarrafha, k., Rahmati, S.h., Akhavan Niaki, S.T., & Zaretalab, A., (2015), "A bi-objective integrated procurement, production, and distribution Problem of a multi-echelon supply chain network design: A new tuned MOEA, Computers & Operations Research", (54), pp.35-51.

-Tsuchiya, H., & Kobayashi, O., (2004). Mass production cost of PEM fuel cell by learning curve. International Journal of Hydrogen Energy, 29(10), pp.985-990.

-Talaee, M., Moghaddam, B. F., Pishvae, M. S., Bozorgi-Amiri, A., & Gholamnejad, S. (2016). A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: a numerical illustration in electronics industry. Journal of Cleaner Production, 113, pp.662-673.

-Tsao, Y. C., & Sheen, G. J. (2012). Effects of promotion cost sharing policy with the sales learning curve on supply chain coordination. Computers & Operations Research, 39(8), pp.1872-1878.

-Wright, T. P., (1936), "Factors affecting the cost of airplanes. Journal of aeronautical sciences, 3(4), pp.122-128.

-Xu, K., Chiang, W. Y. K., & Liang, L., (2011), "Dynamic pricing and channel efficiency in the presence of the cost learning effect. International Transactions in Operational Research, 18(5), pp.579-604.

- Zhao, R., Liu, Y., Zhang, N., & Huang, T. (2017). An optimization model for green supply chain management by using a big data

- Prod_{jt}: هزینه تولید هر واحد محصول توسط کارخانه j در دوره t ؛
- Brok_{rt}: هزینه بازیافت هر واحد از محصول در مرکز بازیافت r در دوره t ؛
- Disp_{dt}: هزینه انهدام هر واحد از مواد غیرقابل بازیافت در مرکز انهدام d در دوره t ؛
- Hm_{nj}: هزینه نگهداری یک واحد مواد اولیه n در کارخانه j ؛
- Hp_j: هزینه نگهداری یک واحد محصول در کارخانه j ؛
- Hd_k: هزینه نگهداری یک واحد محصول در مرکز توزیع k ؛
- Hr_{1r}: هزینه نگهداری یک واحد محصول برگشتی در مرکز بازیافت r ؛
- Hr_{2m}: هزینه نگهداری یک واحد مواد اولیه تفکیک شده غیرقابل بازیافت n در مرکز بازیافت r ؛
- متغیرهای تصمیم**
- F1_{injt}: مقدار مواد اولیه n ارسالی از تأمین‌کننده i به کارخانه j در دوره t ؛
- F2_{jkt}: مقدار محصول ارسالی از کارخانه j به توزیع‌کننده k در دوره t ؛
- F3_{kct}: مقدار محصول ارسالی از مرکز توزیع k به مشتری c در دوره t ؛
- F4_{cr}: مقدار محصول برگشتی از مشتری c به مرکز بازیافت r در دوره t ؛
- F5_{rdt}: مقدار محصول غیرقابل بازیافت برگشتی از مرکز بازیافت r به مرکز انهدام d در دوره t ؛
- F6_{mjt}: مقدار مواد اولیه n برگشتی از مرکز بازیافت r به کارخانه j در دوره t ؛
- Y_{jt}: مقدار محصول تولید شده در کارخانه j در دوره t ؛
- X3_{dt}: مقدار محصول غیرقابل بازیافت در مرکز انهدام d در دوره t ؛
- Im_{njt}: سطح موجودی پایان دوره مواد اولیه n در کارخانه j در دوره t ؛
- S2_{jk}: فاصله کارخانه j از توزیع‌کننده k ؛
- S3_{kc}: فاصله توزیع‌کننده k از مشتری c ؛
- S4_{cr}: فاصله مشتری c از مرکز بازیافت r ؛
- S5_{rd}: فاصله مرکز بازیافت r از مرکز انهدام d ؛
- S6_{rj}: فاصله مرکز بازیافت r از کارخانه j ؛
- Cap1_{in}: ظرفیت تأمین‌کننده i برای تأمین مواد اولیه n ؛
- Cap2_j: ظرفیت تولیدکننده j ؛
- Cap3_k: ظرفیت توزیع‌کننده k ؛
- Cap4_r: ظرفیت مرکز بازیافت r ؛
- Capmin5_d: حداقل ظرفیت مرکز انهدام d ؛
- Capmax5_d: حداکثر ظرفیت مرکز انهدام d ؛
- Ssm_{nj}: حداقل موجودی مواد اولیه n در کارخانه j ؛
- Vp1_j: حجم انبار محصول در کارخانه j ؛
- Vp2_k: حجم انبار محصول در مرکز توزیع k ؛
- Vr1_r: حجم انبار محصولات برگشتی در مرکز بازیافت r ؛
- Vm_{nj}: حجم انبار مواد اولیه n در کارخانه j ؛
- λ : نرخ برگشت محصولات از مشتری c به مرکز بازیافت r ؛
- ω : درصد مواد برگشتی قابل تفکیک به مواد اولیه؛
- $\eta (1-\omega)$: درصد مواد برگشتی غیرقابل تفکیک به مواد اولیه؛
- δ_{mt} : درصد مواد اولیه قابل بازیافت به مواد اولیه n در مرکز بازیافت r در دوره t ؛
- αr_n : تعداد مواد اولیه مورد نیاز نوع n برای تولید یک واحد محصول؛
- RP_{rt}: مقدار محصول برگشتی در مرکز بازیافت r در دوره t ؛
- Inco_{mt}: قیمت فروش هر واحد مواد اولیه n بازیافتی از مرکز بازیافت r ؛
- Orde_{int}: هزینه سفارش مواد اولیه n از تأمین‌کننده i در دوره t ؛
- Purc_{int}: قیمت خرید هر واحد مواد اولیه n از تأمین‌کننده i در دوره t ؛

$\sim U(500, 1500)$	۱۰۰۰	$Vp1_j$
$\sim U(500, 1500)$	۱۱۰۰, ۱۰۰۰	$Vp2_k$
$\sim U(1000, 2000)$	۱۵۰۰, ۱۵۰۰	$Vr1_r$
$\sim U(500, 1500)$	۱۰۰۰	Vm_{nj}
$\sim U(5, 10)$	۹	$Prod_{jt}$
$\sim U(6, 9)$	۷,۷	$Brok_{rt}$
$\sim U(3, 5)$	۳/۵, ۴	$Disp_{at}$
$\sim U(0, 0/5)$	۰/۰۲, ۰/۰۱	Hm_{jn}
$\sim U(0, 0/5)$	۰/۲	Hp_j
$\sim U(0, 0/5)$	۰/۲, ۰/۱	Hd_k
$\sim U(0, 0/5)$	۰/۲, ۰/۱	$Hr1_r$
$\sim U(0, 0/5)$	۰/۰۱, ۰/۰۱	$Hr2_m$

جدول ۲. مقادیر مربوط به نمونه عددی در تابع هدف دوم

پارامتر	مقدار	دامنه تغییر
α	۵۰۰	$\sim U(545, 555)$
β	۲۳۵۰۰۰۰	$\sim U(2300000, 2400000)$
γ	۲۵۰۰۰۰	$\sim U(240000, 255000)$
θ	۲۱۰۰۰	$\sim U(20000, 22000)$

$Ip1_{jt}$: سطح موجودی پایان دوره محصول در کارخانه j در دوره t ؛

$Ip2_{kt}$: سطح موجودی پایان دوره محصول در مرکز توزیع k در دوره t ؛

$Ir1_{rt}$: سطح موجودی پایان دوره محصول برگشتی در مرکز بازیافت r در دوره t ؛

$Ir2_{mt}$: سطح موجودی پایان دوره مواد اولیه n بازیافت شده در مرکز بازیافت r در دوره t ؛

X_{int} : متغیر باینری، اگر مواد اولیه n از تأمین کننده i تهیه شود ۱، در غیر اینصورت ۰؛

W_r : متغیر باینری، اگر مرکز بازیافت در مکان بالقوه r احداث و راه اندازی شود ۱، در غیر اینصورت ۰؛

U_d : متغیر باینری، اگر مرکز انهدام در مکان بالقوه d احداث و راه اندازی شود ۱، در غیر اینصورت ۰؛

جدول ۱. مقادیر مربوط به نمونه عددی در تابع هدف اول

پارامتر	مقدار	دامنه تغییر
$h1_{nt}$	۰/۰۰۲, ۰/۰۰۱	$\sim U(0/001, 0/002)$
$h2_t$	۰/۰۰۱	$\sim U(0/001, 0/003)$
$Fix1_r$	۱۴۰۰۰, ۱۶۰۰۰	$\sim U(13000, 17000)$
$Fix2_d$	۱۴۰۰۰, ۱۳۰۰۰	$\sim U(12000, 15000)$
$V1_{inj}$	۷۰۰, ۸۰۰	$\sim U(600, 800)$
$V2_{jk}$	۸۰۰, ۸۰۰	$\sim U(550, 950)$
$V3_{kc}$	۷۰۰, ۸۰۰	$\sim U(600, 800)$
$V4_{er}$	۲۰۰, ۲۵۰	$\sim U(150, 300)$
$V5_{rd}$	۲۸۰, ۳۰۰	$\sim U(250, 400)$
$V6_{rnj}$	۱۸۰, ۳۰۰	$\sim U(150, 400)$
$Cap1_{in}$	۲۵۰۰, ۳۰۰۰ ۳۱۰۰, ۳۲۰۰	$\sim U(2000, 3500)$
$Cap2_j$	۳۵۰۰	$\sim U(3000, 4000)$
$Cap3_k$	۲۲۰۰, ۲۰۰۰	$\sim U(1500, 2500)$
$Cap4_r$	۳۰۰۰	$\sim U(2000, 3500)$
$Capmin5_d$	۲۲۰۰, ۲۰۰۰	$\sim U(1500, 2500)$
$Capmax5_d$	۲, ۲	$\sim U(1, 5)$
Ssm_{nj}	۲۵۰, ۲۰۰	$\sim U(200, 300)$