



DOI: 10.22084/IER.2023.27680.2124

## مدل ریاضی برای بهبود عملکرد زنجیره تأمین سبز با استفاده از مفهوم همزیستی صنعتی

سهراب عبدالله‌زاده<sup>۱\*</sup>، زهرا عاصم‌فرزانه<sup>۲</sup>

۱. دانشیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده فناوری‌های صنعتی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران  
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فناوری‌های صنعتی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران

### خلاصه

اکولوژی صنعتی، شناسایی و به‌کارگیری راه‌کارهایی باهدف کاهش آثار زیست‌محیطی محصولات و فرآیندهای سیستم‌های صنعتی است. همزیستی صنعتی یک کاربرد عملی از اکولوژی صنعتی است که شرکت‌های تولیدی با ایجاد یک شبکه، در زمینه تبادلات محلی آب، انرژی یا بازیافت ضایعات صنعتی، با یکدیگر همکاری می‌کنند. همزیستی صنعتی نقش مهمی در کاهش هزینه‌های کل در مدیریت زنجیره تأمین سبز و پایداری آن دارد تحقیقات پیشین در زمینه مدیریت زنجیره تأمین سبز، هر یک به‌نحوی با استفاده از ابزارهای مختلف به بهبود عملکرد آن پرداخته‌اند، اما کمتر به تأثیر مفهوم جدید و مؤثر همزیستی صنعتی پرداخته شده است. در پژوهش جاری برای اولین بار یک مدل ریاضی به‌منظور کاربرد مفهوم همزیستی صنعتی در مدیریت زنجیره تأمین سبز باهدف حداقل کردن هزینه‌های کل با حداقل انتشار کربن ارائه شده است. مدل پیشنهادی تک‌کالایی چنددوره‌ای بوده و کمبود تقاضا مجاز است. به‌منظور اعتبارسنجی، مدل پیشنهادی در صنعت فولاد با ۳۰ کارخانه طی ۲۲ دوره برنامه‌ریزی و با ۱۵ نوع ماده اولیه به‌کار گرفته شد. برای حل مدل از نرم‌افزار گمز استفاده شده است. نتایج حاصل از حل عددی مدل، بیشترین کاهش انتشار کربن و اثرات نامطلوب زیست‌محیطی با حداقل هزینه‌های کل در کارخانه‌ها را دارد. تحلیل حساسیت نشان داد که مقدار تابع هدف مدل نسبت به تغییرات پارامترهای مقدار محصول بازتولیدی، نرخ محصول برگشتی جمع‌آوری شده، مقدار محصول برگشتی، نرخ محصول دفع شده نهایی، جریمه پیشروی از حد مجاز انتشار کربن، بالا است. نتایج نشان‌دهنده همسویی سیاست‌های مدیریت زنجیره تأمین سبز و همزیستی صنعتی بود.

### اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۴۰۱/۱۲/۱۳

پذیرش ۱۴۰۲/۳/۲۶

(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:

مدیریت زنجیره تأمین سبز

همزیستی صنعتی

هزینه کل

انتشار کربن

### ۱. مقدمه

امروزه اقدامات ناخواسته و غیرمسئولانه توسط صنایع مختلف باعث ایجاد تهدیدهای جدی برای پایداری شده و ایجاد صنایع پایدار به یکی از اهداف اصلی شرکت‌ها تبدیل شده است [۱].

سازمان‌ها اکنون در تلاش‌اند تا با ادغام نگرانی‌های زیست‌محیطی در عملیات زنجیره تأمین، تأثیرات زیست‌محیطی را به حداقل برسانند. مدیریت زنجیره تأمین سبز<sup>۲</sup> بخش مهمی از مدیریت عملیات است و تأثیر به‌سزایی در حفظ محیط‌زیست از جمله محدودیت تولید گازهای

گلخانه‌ای، کاهش آلاینده‌ها و به خطر افتادن سلامت جامعه دارد [۲]. اکولوژی صنعتی<sup>۳</sup> یک اصل جدید در راستای دستیابی به توسعه پایدار و رویکردی سیستمی و مبتنی بر اصول اکولوژی و سیستم‌های مهندسی است که به بررسی تأثیر فعالیت‌های صنعتی بر محیط‌زیست می‌پردازد و باعث شناسایی، به‌کارگیری و اجرای راه‌کارهایی می‌شود که هدف از آن کاهش آثار مخرب زیست‌محیطی محصولات و فرآیندهای مرتبط با سیستم‌های صنعتی است [۳]. اکوسیستم صنعتی<sup>۴</sup> به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اکولوژی صنعتی،

2. Green Supply Chain Management

3. Industrial Ecology

4. Industrial ecosystem

\* نویسنده مسئول: سهراب عبدالله‌زاده

تلفن: ۰۴۴-۰۲۶۵-۳۱۹۸؛ پست الکترونیکی: s.abdollahzadeh@uut.ac.ir

بنابراین، پژوهش جاری در پی دستیابی به مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی با تلفیق مدیریت زنجیره تأمین سبز با مفهوم همزیستی صنعتی است. هدف اصلی در این پژوهش، کاهش هزینه کل شامل (هزینه‌های تولید، بازتولید، دفع، نگهداری، خرید اضطراری و هزینه پس‌افت)، و کاهش میزان انتشار کربن با استفاده از مفهوم همزیستی صنعتی در مدیریت زنجیره تأمین سبز است. با تلفیق مفهوم همزیستی صنعتی در زنجیره تأمین حلقه بسته سبز، در پژوهش جاری یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی تولید انباشته ظرفیت‌دار قطعی تک‌کالایی ارائه شده است. این مدل چندهدفه، علاوه بر کاهش هزینه‌های کل سیستم، اثرات مخرب زیست‌محیطی را با کاهش میزان انتشار کربن به حداقل می‌رساند. از مزایای دیگر این مدل، تعیین اطلاعات کلیدی عملکرد کارخانه‌ها از جمله میزان محصول برگشتی، محصول بازیافتی و محصول نهایی دفع شده از هر کارخانه به تفکیک دوره‌های برنامه‌ریزی است.

ساختار پژوهش جاری به این شکل است که در فصل دوم، مروری بر ادبیات پژوهش انجام می‌شود. فصل سوم به بیان مسأله اختصاص یافته است. مدل‌سازی پژوهش در فصل چهارم تشریح می‌شود. در فصل پنجم، حل عددی مدل، نتایج و بحث آورده شده است. فصل آخر اختصاص به نتیجه‌گیری نهایی است.

## ۲. مروری بر ادبیات پژوهش

### ۲-۱. مدیریت زنجیره تأمین سبز

مدیریت زنجیره تأمین سبز هم در ادبیات مدیریت زنجیره تأمین و هم در ادبیات مدیریت زیست‌محیطی ریشه دارد. به‌طور کلی مؤلفه "سبز" به رابطه و تأثیر بین مدیریت زنجیره تأمین و محیط طبیعی اشاره دارد [۱۱]. مبنای سبز شدن توسط پورتر و ون در لیند [۱۲] توضیح داده شده است و ایده آن‌ها این بود که سرمایه‌گذاری در سبز شدن می‌تواند صرفه‌جویی در منابع، بهبود بهره‌وری و حذف ضایعات باشد. مدیریت زنجیره تأمین سبز، انطباق عملیات زنجیره تأمین با الزامات زیست‌محیطی در تمامی مراحل به‌منظور حداکثر کردن میزان بهره‌وری و بهبود عملکرد کل زنجیره تأمین تعریف می‌شود. مدیریت زنجیره تأمین را می‌توان به سه دسته عملیات سبز، طراحی سبز و اهمیت مدیریت زنجیره تأمین سبز، طبقه‌بندی کرد [۱۱]. عناصر اصلی مدیریت زنجیره تأمین سبز در شکل (۱) آمده است.

مطابق شکل (۱)، عناصر اصلی در مدیریت زنجیره تأمین سبز عبارت‌اند از: لجستیک ورودی<sup>۱</sup>، زنجیره تأمین داخلی<sup>۲</sup>؛ لجستیک خروجی<sup>۳</sup>، حلقه بسته<sup>۴</sup>، بازیافت و استفاده مجدد<sup>۵</sup> و بازسازی<sup>۶</sup>.

به ایده استفاده مجدد از پسماندهای یک فرآیند صنعتی در فرآیند صنعتی دیگر اشاره دارد. با این کار، مصرف مواد و انرژی بهینه می‌شود؛ محصولات جانبی یک صنعت به‌عنوان مواد اولیه صنایع دیگر مصرف می‌شود؛ دفع زباله و اتلاف منابع کاهش یافته و از آلودگی بیش‌از حد محیط زیست جلوگیری می‌شود [۴].

طراحی شهرک‌های صنعتی باید با الهام از روابط اکولوژیک طبیعی انجام شود به‌گونه‌ای که موجب کمترین آثار مخرب بر طبیعت و جوامع انسانی شود [۵]. بخش مهمی از ضایعات کارخانه‌ها، قابلیت استفاده دوباره در فرآیند تولیدی آن کارخانه را از طریق لجستیک معکوس ندارد؛ درحالی‌که با مواد ورودی کارخانه‌های مجاور هم‌خوانی دارد. بنابراین، شبکه‌های همزیستی با به‌کارگیری ضایعات در کارخانه‌های مجاور، نقش مؤثرتری در حداقل سازی زباله‌های صنعتی و دستیابی به اهداف توسعه پایدار فراهم می‌کند [۶].

همزیستی صنعتی<sup>۱</sup> می‌تواند به‌عنوان استفاده محلی یا منطقه‌ای اکوسیستم صنعتی در نظر گرفته شود [۷]. همزیستی صنعتی، اشتراک ضایعات خروجی یک صنعت به‌عنوان ماده اولیه صنایع مجاور، اشتراک زیرساخت‌ها یا خدمات بین صنایع است که علاوه بر مزایای محیط زیستی و اجتماعی، مزیت‌های اقتصادی بسیاری برای صنایع مشترک در طرح به همراه دارد [۸].

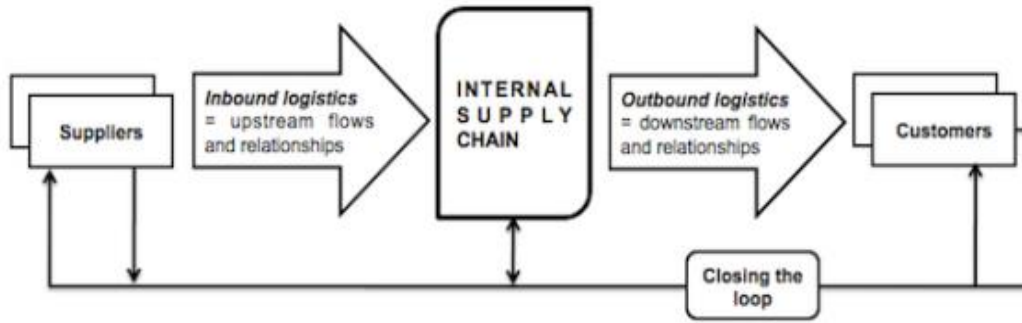
یکی از نکات مهم در مبانی همزیستی صنعتی، طراحی شبکه‌ها برای بهینه‌سازی تبادل ضایعات است. مدل‌های اولیه در طراحی و بهینه‌سازی همزیستی صنعتی، مفهومی و توصیفی بودند. این مدل‌ها در شبکه‌های بزرگ کارایی چندانی نداشتند. بنابراین، کاربرد مدل‌های ریاضی در طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده همزیستی صنعتی متداول شد. به‌طوری‌که تحقیقات در مورد محرک‌ها یا تحلیل موانع مدیریت زنجیره تأمین سبز روند روبه کاهشی را نشان می‌دهد درحالی‌که روند روبه رشدی در استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی ریاضی در مورد عملکرد زیست‌محیطی وجود دارد [۹].

تاکنون، روش‌های متعددی در این زمینه به‌کار رفته است که از جمله آن‌ها به طراحی شبکه برای مدیریت آب و اشتراک انواع انرژی می‌توان اشاره کرد. مطالعات مرتبط با همزیستی صنعتی بیشتر از منظر اکولوژی، انرژی، محیط زیست و دیدگاه‌های مدیریت مواد بررسی شده است. نکته مهم در مدل‌های موجود، تمرکز بر یک حالت تبادل، مانند آب یا انرژی است [۱۰]. درحالی‌که برای کاربردی شدن مدل در شهرک‌های صنعتی باید به‌طور همزمان، انتقال انواع مواد اولیه و ضایعات در نظر گرفته شود.

بررسی‌ها نشان‌دهنده این است که پژوهش‌های تلفیقی مفهوم همزیستی صنعتی در مدیریت زنجیره تأمین سبز برای ایجاد پایداری، بسیار محدود هستند. ضمناً طراحی شبکه‌ها برای بهینه‌سازی تبادل انرژی و ضایعات در این پژوهش‌ها تک‌هدفه است.

5. Closing the loop  
6. Recycling and re-use  
7. Remanufacturing

1. Industrial Symbiosis  
2. Inbound logistics  
3. Internal supply chain  
4. Outbound logistics



شکل (۱). عناصر مدیریت زنجیره تأمین سبز [۱۳]

صنعتی یک استراتژی اساسی بوم‌شناسی صنعتی است. تجزیه و تحلیل چرخه عمر و مدیریت و مدیریت زنجیره تأمین سبز رویکردهای مرتبط هستند [۱۵].

اکولوژی صنعتی دارای سه سطح متفاوت از نظر مقیاس‌های عملکرد است. اولین سطح مربوط به فعالیت‌های درون‌سازمانی است. دومین سطح مربوط به فعالیت‌های میان‌سازمانی بوده و شامل مفاهیمی مانند همزیستی صنعتی، اکو پارک‌های صنعتی و تحلیل چرخه حیات محصول است و آخرین سطح، مربوط به فعالیت‌های منطقه‌ای و جهانی و شامل تحلیل جریان مواد و انرژی و توسعه سیاست‌ها و برنامه‌های پایداری است [۱۶].

### ۲-۳. همزیستی صنعتی

همزیستی صنعتی یک زیرمجموعه از اکولوژی صنعتی است. این مفهوم توصیف می‌کند که چگونه شبکه‌ای از سازمان‌های گوناگون می‌تواند تغییرات زیست‌محیطی و تغییر فرهنگ درازمدت را ایجاد کرده و به اشتراک تعاملات متقابل سودآور و بهبود فرآیندهای تجاری و فنی کمک می‌کند. چرتو [۱۷] به گروهی از شرکت‌ها در صنایع مختلف که منابع مختلفی از جمله مواد، انرژی، آب و محصولات جانبی را برای کسب مزیت رقابتی به اشتراک می‌گذاشتند، بانام همزیستی صنعتی تعریف کرد. هدف همزیستی صنعتی ایجاد شبکه‌ای از نهادهای محلی به‌منظور کاهش اثرات کربن، به حداقل رساندن دفن زباله‌ها و صرفه‌جویی در منابع اولیه است [۱۸].

مفهوم زیربنایی همزیستی صنعتی استعاره‌ای از یک اکوسیستم صنعتی است که مانند یک اکوسیستم طبیعی عمل می‌کند (چرتو، ۲۰۰۰). جایگاه همزیستی صنعتی در اکولوژی صنعتی در شکل (۲) نشان داده شده است.

تمرکز همزیستی صنعتی بر قرابت جغرافیایی و مبادله منابع فیزیکی است. در عمل، استفاده از همزیستی صنعتی منجر به عملیات تجاری، بازیابی، استفاده مجدد از منابع باقیمانده و بهره‌وری مولد اقتصاد برای طولانی‌مدت می‌شود. مانیفست چرتوف [۲۰] به‌منظور تحقق تولید پایدار از اکولوژی صنعتی در سه سطح متفاوت از نظر مقیاس‌های عملکرد استفاده می‌کند.

### ۲-۲. اکولوژی صنعتی

اکولوژی یا بوم‌شناسی صنعتی، رویکرد جدیدی برای مطالعه جریان مواد و انرژی و اجرای استراتژی‌های تولید پایدار است. اکولوژی صنعتی مفهومی است که در آن یک سیستم صنعتی، هماهنگ با سیستم‌های اطراف خود و نه به‌صورت جدا از آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. اکولوژی صنعتی به دنبال بهینه‌سازی چرخه کل مواد از مواد اولیه تا مواد نهایی، اجزاء، محصول، ضایعات و دفع نهایی است. هدف اولیه اکولوژی صنعتی ارتقاء توسعه پایدار در سطوح محلی، منطقه‌ای، ملی و جهانی است.

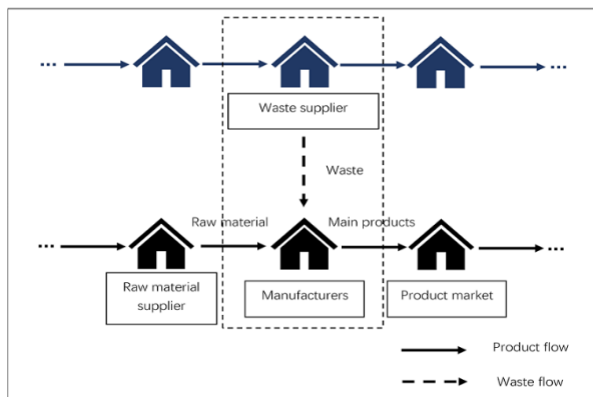
در ادبیات اکولوژی صنعتی، اصطلاح "اکوسیستم صنعتی" برای اولین بار توسط فروش و گالوپولوس در سال ۱۹۸۹ ظاهر شد. "در چنین سیستمی مصرف انرژی و مواد بهینه می‌شود، تولید زباله به حداقل می‌رسد و زائدات حاصل از یک فرآیند به‌عنوان ماده خام برای فرآیند دیگری عمل می‌کنند [۱۴].

اکولوژی صنعتی یک زمینه مطالعاتی بین‌رشته‌ای است که شامل مطالعه مرتبط با اکوسیستم صنعتی، همزیستی صنعتی، متابولیسم صنعتی<sup>۱</sup> و قوانین و مقررات برای توسعه و کاربردهای اکولوژی صنعتی است. هدف اصلی اکولوژی صنعتی، توسعه اکوسیستم‌های صنعتی تقریباً حلقه بسته است که متعادل، متنوع و به تدریج در حال تغییر در جزئیات از نظر مبادله مواد و انرژی است. در سیستم‌های مبتنی بر اکولوژی صنعتی، زائدات یک واحد، به‌عنوان مواد و انرژی در یک واحد دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این حالت از یک سو بر میزان درآمد واحد اول افزوده شده و از منابع طبیعی کمتری استفاده می‌شود و از سوی دیگر، به دلیل عدم ورود آلودگی‌ها به محیط، از هزینه‌های اجتماعی که قبلاً به جامعه تحمیل می‌شد، جلوگیری می‌شود.

اکولوژی صنعتی به بررسی تأثیر فعالیت‌های صنعتی به محیط زیست می‌پردازد و باعث شناسایی، به‌کارگیری و اجرای راه‌کارهایی می‌شود که هدف از آن کاهش آثار زیست‌محیطی محصول و فرآیندهای مرتبط با سیستم‌های صنعتی است [۳]. اکولوژی صنعتی یک مفهوم نوظهور برای ایجاد توسعه صنعتی پایدار از نظر زیست‌محیطی مناطق و شهرک‌های صنعتی است. بهینه‌سازی جریان مواد و انرژی در میان تأسیسات در مناطق خاص یا اکوسیستم‌های

1. Industrial metabolism

می‌شود. در زنجیره تأمین همزیستی کامل، مواد اولیه مورد نیاز همگی از تأمین‌کنندگان ضایعات تأمین می‌شود. ولی در حالت همزیستی ناقص، تعدادی از تأمین‌کنندگان ضایعات و تعدادی دیگر از تأمین‌کنندگان، مواد اولیه را تأمین می‌کنند [۲۸].



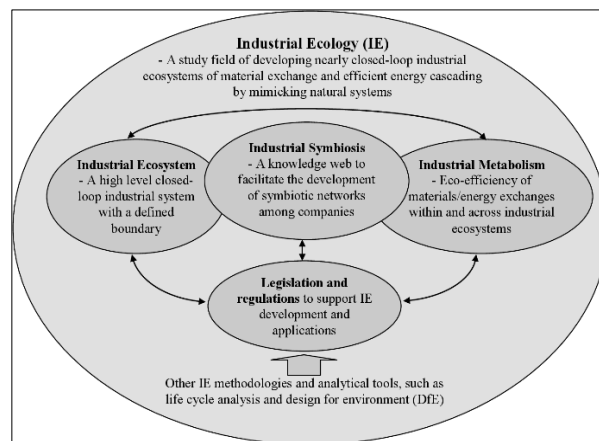
شکل (۳). زنجیره تأمین همزیستی [۲۷]

چنگ و همکاران [۲۷] به تجزیه و تحلیل مدل قیمت و درآمد بهینه تأمین‌کننده و تولیدکننده در زنجیره تأمین همزیستی پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان‌دهنده این بود که بین سطح درآمد و درجه همزیستی در زنجیره تأمین همزیستی رابطه وجود دارد. ضمناً تغییر ساختار قدرت بر مزایای نسبی تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان در زنجیره تأمین همزیستی تأثیر خواهد گذاشت.

جمع‌بندی و خلاصه پیشینه پژوهش مرتبط با موضوع زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن مفهوم همزیستی صنعتی در جدول (۱) آمده است.

در پژوهش جاری به منظور بهبود عملکرد زنجیره تأمین سبز به واسطه مفهوم همزیستی صنعتی، یک مسأله تولید انباشته پویای ظرفیت‌دار به همراه تولید و بازتولید در یک زنجیره تأمین حلقه بسته باهدف کاهش انتشارات کربن و حداقل‌سازی هزینه‌ها پیشنهاد گردیده است. به عبارتی اگر تولیدکننده از حد مجاز در انتشار کربن فراتر رود، می‌بایست جریمه بپردازد، و مدل ریاضی ساخته شده و تشریح می‌شود. این مدل تک‌محصولی، چنددوره‌ای و با افق برنامه‌ریزی محدود است که کمبود تقاضا در آن مجاز است. هدف مدل به حداقل رساندن هزینه کل تولید و بازتولید محصول و برگشتی با کمترین تولید کربن است.

مدل تولید انباشته ظرفیت‌دار قطعی برای تک‌محصول معرفی می‌گردد، که توسط تولید و بازتولید بر افق برنامه‌ریزی محدود، برنامه‌ریزی می‌گردد؛ به طوری که تقاضا در هر دوره در طول افق برنامه‌ریزی می‌تواند تأمین شود. ضمن اینکه تمامی هزینه‌ها نیز حداقل می‌شوند، هزینه‌ها شامل: (۱) هزینه‌های تولید (تولید محصول، بازتولید و دفن) (۲) هزینه‌های نگهداری (۳) هزینه‌های خرید اضطراری (۴) هزینه‌های پس‌افت و جریمه پیشروی از حد مجاز انتشار کربن است [۳۱]. مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته برای مسأله تولید انباشته در یک محیط قطعی فرموله می‌شود.



شکل (۲). جایگاه همزیستی صنعتی در اکولوژی صنعتی [۱۹]

مفهوم همزیستی صنعتی در دهه ۱۹۹۰ شکل گرفته است. ابتدا، از مدل‌های مفهومی و جدول‌های هدف‌گذاری در طراحی پارک صنعتی اکولوژیک و بهینه‌سازی همزیستی صنعتی استفاده می‌شد. به علت ناکارآمدی مدل‌های مفهومی در طراحی شبکه‌های بزرگ، پژوهشگران به استفاده از مدل‌های ریاضی روی آوردند که تا حدی، طراحی و بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده را آسان کرده است [۲۱]. از جمله مدل‌های ریاضی به انواع برنامه‌ریزی‌های خطی، غیرخطی و عدد صحیح می‌توان اشاره کرد که عموماً و بر مبنای نوع تبادل مانند آب توسعه یافته است. لاولیدی الحلوفاقی [۲۲] مدلی غیرخطی را برای تبادل آب در سطح پارک‌های صنعتی اکولوژیک ارائه کردند که هدف آن حداقل‌سازی هزینه تأمین و تبادل آب در سطح پارک بود. با توجه به ضعف مدل‌های خطی در تعیین اتصالات شبکه و اهمیت تبادل انرژی حرارتی در بهبود عملکرد اقتصادی و محیط زیستی صنایع، کیم و همکاران [۲۳] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی را برای تبادل انرژی حرارتی ارائه کردند. نظر به اینکه مدل‌های غیرخطی از حیث روش حل در ردیف مدل‌های سخت قرار می‌گیرد، رویکردهای مدل‌سازی به سمت مدل‌های خطی گرایش یافت. در سال‌های اخیر بیشتر مدل‌ها بر پایه مدل‌های مختلط عدد صحیح خطی توسعه یافته است [۲۴، ۲۵].

#### ۲-۴. زنجیره تأمین همزیستی

همزیستی صنعتی و زنجیره تأمین هر دو روابط بین سازمانی هستند که مبتنی بر جریان محصول هستند، اما هنوز تفاوت قابل توجهی دارند. بسیاری از تحقیقات در این زمینه‌ها باهدف کاهش ضایعات بین سازمان‌ها انجام شده است، حتی اگر به‌طور شگفت‌انگیزی توجه کمی به همزیستی صنعتی در تحقیقات زنجیره تأمین وجود دارد [۲۶]. در تحقیقات زنجیره تأمین، هدف کاهش ضایعات در یک شرکت است؛ درحالی‌که در همزیستی صنعتی، هدف کاهش ضایعات در کل سیستم شرکت‌ها است.

در شکل (۳) زنجیره تأمین همزیستی نشان داده شده است.

در زنجیره تأمین همزیستی، تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان به دلیل رابطه عرضه و تقاضای ضایعات، زنجیره تأمین همزیستی جدیدی را تشکیل داده و به جای محصولات، زائدات بین آن‌ها مبادله

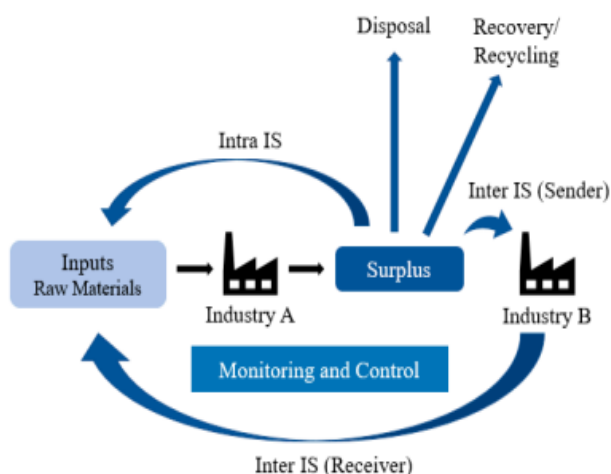
جدول (۱). خلاصه مطالعات در حوزه زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن مفهوم همزیستی صنعتی

سال	نویسنده	هدف	حوزه مطالعه			
			مدیریت زنجیره سبز	اکولوژی صنعتی	همزیستی صنعتی	زنجیره تأمین همزیستی
منبع	نوع مدل					
۲۰۰۷	سیرواسترا	چارچوب و مرجع برای مدیریت زنجیره تأمین سبز	*			[۱۱]
۲۰۰۹	لاولیدی	حداقل سازی هزینه تأمین و تبادل آب در سطح اکو پارک صنعتی		*	*	[۲۲]
۲۰۱۲	سرکیس	چارچوبی برای روابط و جریان‌ها در مدیریت زنجیره تأمین سبز	*			[۱۳]
۲۰۱۵	تسخیری	طراحی شبکه بهینه تبدیل زباله به انرژی در پارک		*	*	[۲۹]
۲۰۱۸	گابور	بررسی همزیستی صنعتی از دیدگاه همکاری در زنجیره تأمین		*		[۳۰]
۲۰۱۹	نوپو	مدل ریاضی برای بهینه‌سازی تخصیص جریان مواد بین شرکت‌ها در یک همزیستی صنعتی		*	*	[۲۵]
۲۰۲۰	ونزوئلا	فرمول‌بندی و بهینه‌سازی برای طراحی شبکه مواد یک اکو پارک صنعتی		*		[۲۴]
۲۰۲۱	چنگ	رابطه بین سطح درآمد و درجه همزیستی در زنجیره تأمین همزیستی		*	*	[۲۷]
۲۰۲۳	پژوهش جاری		*	*	*	NLP

## ۲. بیان مسأله

در نتیجه، در پژوهش جاری یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی تولید انباشته ظرفیت‌دار قطعی تک‌کالایی باهدف بررسی تأثیر کاربرد مفهوم همزیستی صنعتی در مدیریت زنجیره تأمین سبز ارائه شده است. با حل این مدل، برنامه تولید و بازتولید محصول و بازگشتی با حداقل هزینه کل و کمترین انتشار کربن در دوره‌های مختلف برای کارخانه‌ها محاسبه می‌شود.

به منظور مدل‌سازی ریاضی، جریان مواد، محصول و مازادها مورد نیاز است. آزودو [۳۵]، جریان مواد اولیه و مازاد و مقاصد آن‌ها از جمله دفع، بازیافت/بازتولید و شیوه‌های همزیستی صنعتی (درون صنعتی، بین صنعتی) را مطابق شکل (۴) به تصویر کشیده است.



شکل (۴). جریان کلی مواد و مازاد در پژوهش [۳۵]

توسعه صنعتی با ایجاد زیرساخت‌ها اقتصادی، امکان رشد فناوری را فراهم کرده و نقش مهمی در توسعه اقتصادی دارد. اما این دستاوردهای اقتصادی، اغلب بدون در نظر گرفتن ملاحظات زیست‌محیطی بوده و موجب آسیب‌های جدی به آن می‌شود. مصرف بی‌رویه منابع طبیعی، انتشار کربن، گرمایش زمین و بیماری‌های روحی و جسمی، نمونه‌هایی از این آسیب‌ها است [۳۲]. بنابراین، مجتمع‌های صنعتی باید با در نظر گرفتن روابط اکولوژیک طبیعی طراحی شوند تا کمترین آثار تخریبی را بر طبیعت و جوامع انسانی داشته باشند [۵]. بر همین اساس، مفاهیم نوینی مانند پارک‌های صنعتی اکولوژیک و همزیستی صنعتی در ادبیات صنعتی توسعه یافته است [۳۳]. یکی از اقدامات مهم در همزیستی صنعتی، طراحی شبکه‌ها برای بهینه‌سازی تبادل مازادها است. روش‌های متعددی از جمله طراحی شبکه برای مدیریت ضایعات، آب و اشتراک انواع انرژی انجام شده است.

ادبیات مدیریت زنجیره تأمین نشان می‌دهد که تحقیقات محدودی نقش‌های همزیستی صنعتی را در رابطه با توسعه پایداری زیست‌محیطی زنجیره تأمین بررسی کرده‌اند [۳۴]. مطالعات همزیستی صنعتی اغلب از منظر اکولوژی و شبکه‌سازی، تبادل انرژی، آب، و محیط زیست و دیدگاه‌های مدیریت مواد به صورت مجزا بررسی کرده‌اند. این مطالعات کمک شایانی به حفظ محیط زیست، سلامتی جسمی و روانی و کاهش هزینه‌های صنایع کرده‌اند. با این حال، پژوهشی وجود ندارد که کاربرد همزیستی صنعتی را از دیدگاه اقتصادی و زیست‌محیطی در مدیریت زنجیره تأمین سبز در قالب مدل‌سازی ریاضی بیان کند.

1. Non Linear Programming
2. Fuzzy mixed integer linear programming
3. Multi Criteria Decision Making

این جریان‌های مواد، محصول و مازادها، در مدل‌سازی پژوهش جاری مورد استفاده قرار گرفته است. شرح این جریان‌ها عبارت‌اند از:

مازاد<sup>۱</sup>: به یکی از خروجی‌های فرآیند تولیدی اشاره دارد که با محصول نهایی مطابقت ندارد که می‌تواند شامل ضایعات، محصولات جانبی، انرژی، گرما یا آب باشد.

دفع<sup>۲</sup>: یک مازاد ارزش‌گذاری نشده و حذف می‌شود. مثلاً به محل دفن زباله فرستاده می‌شود.

بازتولید یا بازیافت<sup>۳</sup>: مجموعه عملیاتی که امکان استفاده مجدد از مازاد و به‌دست آوردن مواد مشابه را فراهم می‌سازد.

همزیستی بین صنعتی (ارسالی)<sup>۴</sup>: این مازاد به‌صورت خارجی توسط شرکت دیگری ارزش‌گذاری می‌شود. متقابلاً در همزیستی بین صنعتی (دریافتی)، مازاد صنایع دیگر در شرکت وارد می‌شود تا به‌عنوان ورودی یک فرآیند خاص استفاده شود.

همزیستی درون صنعتی<sup>۵</sup>: مازاد به‌صورت داخلی در شرکت ارزش‌گذاری می‌شود، که می‌تواند در فرآیندی که منشأ مازاد است یا سایر فرآیندهای تولید داخلی استفاده شود. نوآوری پژوهش عبارت‌اند از:

- مدل ریاضی باهدف حداقل کردن هزینه‌های کل شامل هزینه‌های تولید، نگهداری، خرید اضطراری و هزینه‌های پس‌افت تقاضا.
- بررسی همسویی سیاست‌های مدیریت زنجیره تأمین سبز و همزیستی صنعتی.
- کاهش انتشار کربن توسط کارخانه‌ها با در نظر گرفتن جریمه برای عبور از حد مجاز انتشار کربن توسط کارخانه‌ها.
- برنامه‌ریزی تولید و بازتولید محصول و ارائه سایر اطلاعات کلیدی عملکرد کارخانه‌ها در دوره‌های برنامه‌ریزی.
- تحلیل حساسیت مقدار تابع هدف مدل نسبت به تغییرات پارامترهای مختلف و شناسایی پارامترهایی با حساسیت بالا.

### ۳. مدل‌سازی پژوهش

#### ۳-۱. مفروضات مدل

- تقاضا قطعی است اما در طول افق برنامه‌ریزی بسته به زمان تغییر می‌کند.
- هزینه خرید اضطراری به‌عنوان جریمه در نظر گرفته شده است.
- در شروع هر دوره زمانی، هیچ موجودی از محصول یا برگشتی وجود ندارد.
- ظرفیت‌های تولید و بازتولید محدود است و ممکن است با یکدیگر همپوشانی داشته باشند.
- دو گزینه برای محصول برگشتی وجود دارد: (۱) بازتولید (۲) دفع.
- مقدار محصول برگشتی دوره‌ای متناسب با مقدار محصول، تعیین

می‌شود.

- محصول بازتولید شده می‌تواند به‌عنوان محصول فروخته شوند.
- اگر تولیدکننده از سطح مجاز انتشار کربن برای هر دوره فراتر رود، می‌بایست جریمه بپردازد.

#### ۳-۲. عناصر مدل

##### اندیس‌ها

اندیس دوره‌ها در افق برنامه‌ریزی  $t, t', t'' = 0, \dots, T$

منابع برای تولید یا بازتولید  $k = 1, \dots, K$

دوره بهره‌برداری از محصول  $U \leq T$

اندیس کارخانه‌ها  $m = 1, \dots, M$

##### پارامترها

MS<sub>m</sub> هزینه راه‌اندازی تولید هر دوره برای کارخانه m

RS<sub>m</sub> هزینه راه‌اندازی بازتولید هر دوره برای کارخانه m

MN<sub>m</sub> مقدار محصول تولیدی در کارخانه m

RN<sub>m</sub> مقدار محصول بازتولیدی در کارخانه m

C<sub>km</sub> مقدار منبع از نوع k موجود در هر دوره در کارخانه m

CM<sub>km</sub> مقدار منبع از نوع k موردنیاز برای تولید محصول در کارخانه m

CR<sub>km</sub> مقدار منبع k موردنیاز برای بازتولید در کارخانه m

SC<sub>m</sub> هزینه خرید اضطراری هر واحد محصول برای کارخانه m

BC<sub>tm</sub> هزینه پس‌افت تقاضا بعد از دوره t برای کارخانه m

HS<sub>m</sub> هزینه نگهداری هر واحد محصول تولیدی برگشتی کارخانه m

CE<sub>m</sub> محدودیت انتشار کربن در هر دوره برای کارخانه m

HR<sub>m</sub> هزینه نگهداری هر واحد محصول بازتولید برگشتی برای کارخانه m

CC<sub>m</sub> جریمه برای پیشروی از حد مجاز کربن در هر دوره برای کارخانه m

ME<sub>m</sub> میزان انتشار کربن ناشی از تولید محصول در کارخانه m

RE<sub>m</sub> میزان انتشار کربن ناشی از بازتولید در کارخانه m

MM یک عدد بزرگ مثبت

G<sub>m</sub> نرخ بازیافت برای هر دوره در کارخانه m

FR<sub>m</sub> هزینه تولید محصول در کارخانه m

FC هزینه بازتولید در کارخانه m

DC<sub>m</sub> هزینه دفع در کارخانه m

D<sub>tm</sub> تقاضای محصول در دوره t برای کارخانه m

P<sub>m</sub> نرخ محصول برگشتی در دوره t برای کارخانه m

P'<sub>t</sub> نرخ محصول دفع شده نهایی برای دوره t

D'<sub>t</sub> تقاضای کل در دوره t

4. Inter Industrial Symbiosis—Sender

5. Industrial coexistence

1. Surplus

2. Disposal

3. Recovery/Recycling

محدودیت‌ها	متغیرهای تصمیم
$IS_{tm} = 0 \forall m, \forall t = 0$ (۲)	مقدار تولید محصول در دوره t در کارخانه m
$IR_{tm} = 0 \forall m, \forall t = 0$ (۳)	مقدار بازتولید در دوره t در کارخانه m
$R_{tm} = 0 \forall m, t \in T, t \leq U$ (۴)	مقدار محصول برگشتی بازتولید شده در دوره t برای کارخانه m
$R_{tm} = G_m [D_{(t-U)m} + \sum_{t'=1}^{t-U-1} V_{(t',t-u,m)} - S_{tm}] \forall t \in T, t > u$ (۵)	مقدار محصول برگشتی دفع شده در دوره t برای کارخانه m
$MN_m \cdot x_{tm} + RN_m \cdot Y_{tm} + IS_{tm} + S_{tm} + \sum_{t'=t+1}^T B_{tt'm} = D_{tm} + \sum_{t'=1}^{T-1} B_{tt'm} + IS_{tm} \forall m, \forall t \in T$ (۶)	مقدار محصول برگشتی نگهداری شده در انبار در پایان دوره t در کارخانه m
$IR_{tm} - IR_{(t-1)m} + RN_m \cdot Y_{tm} + Z_{tm} = P_m R_{tm} \forall m, \forall t \in T$ (۷)	مقدار کمبود محصول در دوره t در کارخانه m
$CM_{km} \cdot X_{tm} + CR_{km} \cdot Y_{tm} \leq C_{km} \forall m, t \in T, k$ (۸)	مقدار تقاضای تأمین دوره t تأمین شده توسط تولید یا بازتولید در دوره t در کارخانه m
$X_{tm} \leq MM \cdot MO_{tm} \forall m, t \in T$ (۹)	مقدار تقاضای تأمین دوره t تأمین شده توسط تولید یا بازتولید در دوره t در کارخانه m
$Y_{tm} \leq MM \cdot IM_{tm} \forall m, t \in T$ (۱۰)	مقدار تقاضای تأمین دوره t تأمین شده توسط تولید یا بازتولید در دوره t-u در کارخانه m
$ME_m \cdot MN_m \cdot X_{tm} + RE_m \cdot RN_m \cdot Y_{tm} - CE_m \leq O_{tm} \forall m$ (۱۱)	متغیر باینری صفر و یک برای راه‌اندازی تولید در دوره t برای کارخانه m
$\sum_{m=1}^M R_{tm} = W_t \forall m, t \in T$ (۱۲)	متغیر باینری صفر و یک برای راه‌اندازی بازتولید در دوره t برای کارخانه m
$W_t - W_t P'_t = D'_t \forall t \in T$ (۱۳)	مقدار انتشار کربن بیش‌ازحد مجاز در دوره t برای کارخانه m
	کل محصول دفع شده در دوره t

### ۳-۴. تشریح مدل

مطابق مدل فوق، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح آمیخته قطعی تک‌کالایی برای مسأله تولید انباشته با پارامترهای مختلف معرفی شده است. مدل از تعدادی کارخانه تولیدی تشکیل شده است که با یکدیگر از طریق فرآیند همزیستی صنعتی در تعامل‌اند. مقدار محصول برگشتی دوره‌ای متناسب با مقدار محصول است که قبل از دوره فعلی برای مشتریان مشخص است. دو گزینه برای محصول برگشتی وجود دارد که شامل بازتولید و دفع است. برای درک مفهوم همزیستی صنعتی در مدیریت زنجیره تأمین سبز، ضایعات هر کارخانه به‌جای راه‌سازی در محیط‌زیست، مستقیماً به محل تصفیه ضایعات هدایت می‌گردند. در محل تصفیه، بخشی از مواد طی فرآیند تصفیه به مواد قابل مصرف تبدیل شده و به‌عنوان مواد اولیه به کارخانه هدف ارسال می‌گردند؛ بخش دیگر مواد که قابل استفاده مجدد نمی‌باشند، به مرکز دفع پسماند ارسال می‌گردند.

تابع هدف مسأله از نوع کمینه‌سازی و شامل حداقل کردن مقادیر کل هزینه‌ها شامل: هزینه‌های تولید (تولید محصول، بازتولید و دفع)، هزینه‌های نگهداری (محصول، محصول برگشتی)، هزینه‌های خرید اضطراری، هزینه‌های پس‌افت و جریمه پیشروی از حد مجاز انتشار کربن است.

محدودیت (۲) بیانگر آن است مقدار محصول نگهداری شده در انبار تمام کارخانه‌ها هنگام شروع برنامه‌ریزی (t=0) برابر با صفر است. محدودیت (۳) مقدار محصول برگشتی نگهداری شده در انبار تمام کارخانه‌ها هنگام شروع برنامه‌ریزی (t=0) برابر با صفر است. محدودیت (۴) مقدار محصول برگشتی دفع شده بعد از شروع افق برنامه‌ریزی برابر با صفر است. محدودیت (۵) میزان محصول برگشتی دفع شده را

### ۳-۳. مدل ریاضی

تابع هدف:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (MS_m \cdot MO_{tm}) \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (FR_m \cdot X_{tm}) \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (FC_m \cdot Y_{tm}) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (RS_m \cdot IM_{tm}) + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (DC_m \cdot Z_{tm}) \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (HS_m \cdot IS_{tm}) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (HR_m \cdot IR_{tm}) + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (SC_m \cdot S_{tm}) \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M (CC_m \cdot O_{tm}) \\ & + \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{t'=t+1}^T BC_{tm} \cdot N_{t't''m} \end{aligned} \quad (1)$$

مختلف کارخانه‌ها از جمله فاصله با شهر و موارد مشابه، در دامنه  $0/2$  تا  $0/8$  قرار داشت. به این منظور از تابع یکنواخت Uniform (0.2,0.8) استفاده شد. با فرمول نویسی در نرم‌افزار اکسل، این اعداد برای تمام ۳۰ کارخانه محاسبه شد. پارامترهای  $MM$ ،  $T$ ،  $K$  و  $M$  هم اعداد ثابتی بودند. نتایج به‌دست آمده برای پارامترهای  $MS_m$  تا  $CC_m$  برای ۱۵ کارخانه اول در جدول (۳) آمده است.

جدول (۲). پارامترهای مدل ارائه شده

پارامتر	تابع توزیع	پارامتر	تابع توزیع
$MS_m$	Uniform (1,3)	$ME_m$	Uniform (0.2,0.3)
$RS_m$	Uniform (3,5)	$RE_m$	Uniform (0.2,0.9)
$MN_m$	Uniform (1,3)	$G_m$	Uniform (2,5)
$RN_m$	Uniform (1,2)	$FR_m$	Uniform (9,10)
$C_{km}$	Uniform (20,23)	$FC_m$	Uniform (18,20)
$CM_{km}$	Uniform (12,13)	$DC_m$	Uniform (22,30)
$CR_{km}$	Uniform (15,20)	$D_{im}$	Uniform (3,5)
$SC_m$	Uniform (20,50)	$P_m$	Uniform (0.2,0.3)
$BC_{im}$	Uniform (30,35)	$P'_t$	Uniform (0.8,1.0)
$HS_m$	Uniform (10,15)	$D'_t$	Uniform (10,15)
$CE_m$	Uniform (0.2,0.8)	$DI_{(t-u)_m}$	Uniform (0.2,0.3)
$HR_m$	Uniform (10,12)	$T$	22
$MM$	100	$k$	25
$CC_m$	Uniform (0.1,0.2)	$M$	30

کنترل می‌کند. محدودیت (۶) توازن تولید و بازتولید و تقاضا را برقرار می‌سازد. محدودیت (۷) کنترل‌کننده ظرفیت نگهداری کالا در انبار است. در محدودیت (۸)، مقدار منبع موجود برای هر دوره در هر کارخانه باید کمتر یا برابر با مجموع مقدار منبع موردنیاز برای هر تولید یا بازتولید باشد. محدودیت (۹) مقدار تولید در هر دوره باید کمتر یا برابر با یک متغیر باینری (صفر و یک) برای راه‌اندازی تولید باشد. محدودیت (۱۰) مقدار بازتولیدی در هر دوره باید کمتر یا برابر با یک متغیر باینری (صفر و یک) برای راه‌اندازی بازتولید باشد. محدودیت (۱۱) مقدار حد مجاز انتشار کربن در هر دوره از هر کارخانه نباید از مجموع کربن منتشر شده ناشی از تولید و کربن منتشر شده ناشی از بازتولید پیشروی کند. محدودیت (۱۲) مجموع محصول برگشتی دفع شده از کارخانه‌ها و در لحظه  $m=1$  برابر با کل محصول دفع شده وارد شده به مرکز تصفیه است. محدودیت (۱۳) مقدار تقاضای کارخانه هدف برابر است با تفاضل کل محصول دفع شده وارد شده به مرکز تصفیه و محصول دفع شده نهایی با نرخ تغییر  $t$ .

#### ۴. حل عددی مدل، نتایج و بحث

##### ۴-۱. حل عددی مدل

مدل پیشنهادی پژوهش جاری در ۳۰ کارخانه صنعت فولاد طی ۲۲ دوره برنامه‌ریزی و با ۲۵ منبع، به‌منظور تعیین مقادیر دقیق متغیرهای مسأله به‌کار گرفته شد. به‌منظور حل عددی مدل، نیاز به اطلاعات عملکردی کارخانه‌ها بود. ولی با توجه به این‌که جمع‌آوری اطلاعات از تمام کارخانه‌ها عملاً مقدور نبود، بنابراین یکی از کارخانه‌ها به‌عنوان مرجع در نظر گرفته شد. دامنه تغییرات پارامترها تخمین زده شد. درنهایت، پارامترهای مدل و اطلاعات پایه مسأله مطابق جدول (۲) است.

هزینه در دامنه ۱ تا ۳ قرار داشت. به این منظور از تابع یکنواخت Uniform (1,3) استفاده شد. همچنین، پارامتر  $CE_m$  محدودیت انتشار کربن برای هر کارخانه در هر دوره است. این پارامتر بسته به شرایط

##### ۴-۲. اعتبارسنجی مدل

برای حل مدل از نرم‌افزار گمز استفاده شده است. مدل ریاضی پیشنهادی در مدت‌زمان (۲۷:۱۵:۰۰) حل شده و براساس تعداد کارخانه‌ها، شاخص منابع و داده‌های موجود، مقدار تابع هدف  $3743/197$  به‌دست آمد.

به‌منظور اعتبارسنجی، مدل پیشنهادی پژوهش جاری ابتدا در مقیاس کوچک و فقط با دو کارخانه و در افق برنامه‌ریزی ۲ دوره زمانی حل شد. هم‌زمان در محیط اکسل، جواب‌های به‌دست آمده حاصل از حل مدل با نتایج نرم‌افزار اکسل مورد مقایسه قرار گرفته و کنترل شدند. در مقیاس بزرگ با ۳۰ کارخانه و ۲۱ دوره هم نتایج به‌دست آمده برای متغیرهای تصمیم هم از نظر مقدار و هم از نظر علامت مورد بررسی و کنترل قرار گرفت.

جدول (۳). مقادیر پارامترها برای ۱۵ کارخانه

m	$MS_m$	$RS_m$	$MN_m$	$RN_m$	$C_{km}$	$CM_{km}$	$CR_{km}$	$SC_m$	$BC_m$	$HS_m$	$CE_m$	$HR_m$	$CC_m$
۱	۱	۳	۱	۱	۲۱	۱۲	۱۹	۳۶	۳۳	۱۳	۰/۷	۱۰	۰/۱
۲	۲	۳	۱	۱	۲۲	۱۲	۱۸	۳۸	۳۳	۱۴	۰/۷	۱۰	۰/۲
۳	۲	۳	۱	۱	۲۰	۱۲	۱۵	۲۰	۳۲	۱۴	۰/۸	۱۰	۰/۱
۴	۲	۴	۱	۱	۲۰	۱۲	۱۷	۲۶	۳۲	۱۲	۰/۸	۱۱	۰/۱
۵	۱	۳	۱	۱	۲۰	۱۲	۱۶	۲۰	۳۰	۱۳	۰/۴	۱۱	۰/۱
۶	۲	۳	۲	۱	۲۲	۱۲	۱۵	۳۷	۳۴	۱۲	۰/۳	۱۰	۰/۱
۷	۲	۳	۲	۱	۲۲	۱۲	۱۷	۴۴	۳۳	۱۴	۰/۶	۱۱	۰/۲
۸	۲	۳	۱	۱	۲۰	۱۲	۱۹	۴۵	۳۴	۱۴	۰/۷	۱۰	۰/۱
۹	۲	۳	۱	۱	۲۲	۱۲	۱۷	۴۱	۳۳	۱۴	۰/۳	۱۱	۰/۱
۱۰	۱	۳	۱	۱	۲۲	۱۲	۱۹	۲۳	۳۴	۱۱	۰/۴	۱۱	۰/۱
۱۱	۱	۳	۲	۱	۲۰	۱۲	۱۵	۳۰	۳۳	۱۴	۰/۲	۱۰	۰/۱
۱۲	۲	۴	۲	۱	۲۱	۱۲	۱۶	۲۵	۳۲	۱۴	۰/۴	۱۰	۰/۱
۱۳	۱	۴	۱	۱	۲۲	۱۲	۱۶	۴۷	۳۰	۱۲	۰/۶	۱۱	۰/۱
۱۴	۱	۳	۲	۱	۲۱	۱۲	۱۷	۳۶	۳۲	۱۴	۰/۴	۱۰	۰/۲
۱۵	۱	۳	۱	۱	۲۰	۱۲	۱۹	۴۱	۳۳	۱۳	۰/۸	۱۰	۰/۲



۳-۳. نتایج و بحث

مقادیر متغیرهای تصمیم‌گیری حاصل از حل مدل به شرح جدول (۴) است.

جدول (۶). مقدار محصول برگشتی دفع شده

$(R_{tm})$					
$M_t$	۱	۲	۳	۴	۵
۴	۰/۴۴۹	۰/۶۰۵	۰/۳۴۵	۰	۰
۵	۰/۴۴۱	۰/۵۱۵	۰/۲۷۱	۰	۰
۶	۰/۵۳۲	۰/۵۶۱	۰/۰۰۲	۰	۰
۷	۰/۴۷۲	۰/۴۹۲	۰/۴۳۴	۰	۰
۸	۰/۵۶۷	۰/۴۱۳	۰/۰۷۸	۰	۰
۱۰	۰/۵۴۸	۰/۶	۱/۰۱۶	۰	۰
$M_t$	۶	۷	۸	۹	۱۰
۴	۱/۲۵۳	۰/۵۹۱	۰/۶۱۱	۰/۹۹۳	۰/۷۲۸
۵	۰/۹۶۶	۰/۶۵۵	۰/۵۰۶	۱/۰۳۳	۰/۶۲۳
۶	۱/۰۴۹	۰/۵۲۱	۰/۶۲۸	۱/۰۶۲	۰/۵۵۲
۷	۱/۲۸۴	۰/۵۱۹	۰/۵۶۵	۰/۷۸۷	۰/۶۳۴
۸	۰/۹۸۹	۰/۶۷	۰/۴۸	۱/۰۲۸	۰/۶۶۸
۱۰	۱/۰۱۷	۰/۶۹۵	۰/۶۱۸	۱/۰۶۸	۰/۵۴۲

یکی دیگر از خروجی‌های مدل ریاضی پیشنهادی، محاسبه مقادیر محصول و برگشتی نگهداری شده در انبار در پایان هر دوره است. به‌عنوان نمونه، مقدار محصول در دوره ۲۱ و محصول برگشتی در دوره ۵ که در انبار نگهداری شده‌اند، در جدول (۷) آمده است.

جدول (۷). مقدار محصول تولیدی و برگشتی نگهداری شده در انبار در پایان دوره

موجودی محصول در انبار $(IS_{tm})$						
$M_t$	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۲۱	۲/۰۸۵	۱/۷۵۹	۱/۰۱۷	۱/۶۴۷	۲/۷۹۱	۱/۷۱۶
موجودی محصول برگشتی در انبار $(IR_{tm})$						
$M_t$	۱	۲	۳	۴	۵	۶
۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۲۸۴

مقدار کمبود محصول در دوره‌های مختلف به تفکیک کارخانه محاسبه گردید. تنها کارخانه‌های ۴ و ۵ در ۱۸ دوره همواره با کمبود مواجه بودند. مقادیر این کمبودها برای دو کارخانه در ۱۰ دوره به شرح جدول (۸) است.

یکی از خروجی‌های مهم مدل ریاضی پیشنهادی پژوهش جاری، مقدار انتشار کربن بیش‌از حد مجاز به تفکیک کارخانه و دوره‌های برنامه‌ریزی است. این مقادیر در جدول (۹) آمده است. بیشترین تولید کربن بیش‌از حد مجاز متعلق به کارخانه ۳ تا دوره ۲۰ برنامه‌ریزی است. تا دوره ۲۲ تنها کارخانه ۳ کربن بیش‌از حد مجاز تولید کرده است. دلیل این امر داشتن تولید محصول به میزان ۱/۵۷۸ تن در دوره ۲۲، بازتولید محصول برگشتی به میزان ۰/۲۱۷ تن در

جدول (۴). مقدار تولید و بازتولید در دوره‌ها

تولید $(X_{tm})$							
$m_t$	۲	۳	۴	۵	۷	۸	۹
۲۲	۱/۵۷۱	۱/۵۷۸	۱/۶۵۷	۱/۶۰۵	۱/۵۶۷	۱/۴۵۴	۱/۶۱۳
$m_t$	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
۲۲	۱/۵۸۱	۱/۵۸۷	۱/۵۹۳	۱/۵۶۸	۱/۵۹۶	۱/۵۶۵	۱/۵۸۶
$m_t$	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳
۲۲	۱/۵۷۴	۱/۵۷۷	۱/۴۳۳	۱/۱۷	۱/۵۸۷	۱/۵۹۸	۱/۵۵۱
$m_t$	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰
۲۲	۱/۵۶۹	۱/۵۶۷	۱/۵۶۲	۱/۵۸۴	۱/۵۸۵	۱/۵۹۲	۱/۳۶۳
محصول بازتولید $(Y_{tm})$							
$m_t$	۱	۳	۶	۱۵	۲۰	۲۶	
۴	۰	۰/۲۱۷	۰/۱۹۲	۰	۰	۰	
۵	۰	۰/۲۰۵	۰	۰	۰/۲۰۸	۰	
۶	۰	۰/۳۰۹	۰/۱۹۷	۰	۰/۲۲۳	۰	
۷	۰	۰/۳۹۳	۰/۱۹۷	۰	۰/۲۲۳	۰	
۹	۰	۰/۴۰۲	۰/۳۳۲	۰/۲۹۱	۰/۱۷۶	۰/۱۵۳	

اطلاعات مقادیر محصول برگشتی بازتولید شده برای ۲۱ دوره محاسبه شد. به‌دلیل اختصار در آمارها، صرفاً به‌عنوان نمونه برای ۱۰ دوره در جدول (۵) آمده است.

جدول (۵). مقدار محصول برگشتی بازتولید شده

$Z_{tm}$							
$m_t$	۱	۲	۳	۷	۸	۹	۱۰
۴	۰/۱۳۲	۰/۱۴۹	۰	۰/۱۲۲	۰/۱۵۳	۰/۲۳۹	۰/۱۶
۵	۰/۱۳	۰/۱۲۷	۰	۰/۱۳۵	۰/۱۲۷	۰/۲۴۷	۰/۱۲۷
۶	۰/۱۵۶	۰/۱۳۹	۰	۰/۱۰۸	۰/۱۵۷	۰/۲۵۴	۰/۱۲۲
۷	۰/۱۳۹	۰/۱۲۱	۰	۰/۱۰۷	۰/۱۴۱	۰/۱۸۸	۰/۱۴
۸	۰/۱۶۶	۰/۱۰۲	۰	۰/۱۳۹	۰/۱۲	۰/۲۴۶	۰/۱۴۷
۹	۰/۱۶	۰/۱۱۹	۰	۰/۱۱۱	۰/۱۵۱	۰/۲۳۷	۰/۱۶۷
۱۰	۰/۱۶۱	۰/۱۴۸	۰	۰/۱۴۴	۰/۱۵۵	۰/۲۵۶	۰/۱۱۹۹

با توجه به اطلاعات جدول (۵)، تنها ۷ کارخانه بازتولید محصول برگشتی داشتند. البته کارخانه ۳ تنها در دوره ۱۸ و به میزان ۰/۲۲۵ بازتولید داشته است که به‌دلیل اختصار در آمارها، در این جدول درج نشده است.

مقادیر محصول برگشتی دفع شده برای ۱۰ کارخانه و ۱۰ دوره برنامه‌ریزی به شرح جدول (۶) است. برای کارخانه‌های ۴ و ۵ این مقادیر

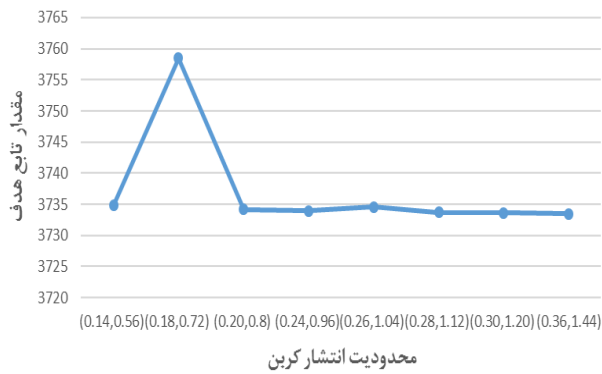
۴-۴. تحلیل حساسیت

در این بخش به تحلیل حساسیت تابع هدف نسبت به تغییر برخی از پارامترهای مدل پرداخته می‌شود. مقادیر و نمودارهای مرتبط با تحلیل حساسیت پارامتر محدودیت انتشار کربن به‌عنوان نمونه، ارائه شده است. یکی از پارامترهای کلیدی در تحقیق جاری، میزان انتشار کربن از کارخانه بود. بنابراین، با ثابت نگه‌داشتن پارامترهای مسأله و با ایجاد درصدهای مختلفی از تغییر (۵۰٪ تا -۵۰٪) در پارامتر انتشار کربن، مقادیر تابع هدف به‌ازای این تغییرات مطابق جدول (۱۱) به‌دست آمد.

جدول (۱۱). تحلیل حساسیت انتشار کربن

محدودیت انتشار کربن (CE <sub>m</sub> )		
مقدار تابع هدف	بازه تغییرات	
۳۷۳۵/۳۹۷	۰/۱۴	۰/۵۶
۳۷۵۹/۷۹۲	۰/۱۸	۰/۷۲
۳۷۳۴/۵۶۴	۰/۲۰	۰/۸۰
۳۷۳۴/۱۹۷	۰/۲۴	۰/۹۶
۳۷۳۳/۹۰۹	۰/۲۶	۱/۰۴
۳۷۳۴/۵۸۶	۰/۲۸	۱/۱۲
۳۷۳۳/۶۳۵	۰/۳۰	۱/۲۰
۳۷۳۴/۱۲۶	۰/۳۶	۱/۴۴

نمودار تحلیل حساسیت تابع هدف نسبت به پارامتر محدودیت انتشار کربن در شکل (۵) آمده است.



شکل (۵). تحلیل حساسیت نسبت به انتشار کربن

مطابق نمودار شکل (۵) به‌ازای تغییر در میزان محدودیت انتشار کربن، مقدار هزینه کل ابتدا به‌صورت خطی و با شیب بسیار زیاد افزایش یافته است و سپس با همان شیب کاهش یافته و در ادامه، با یک شیب نسبتاً ثابت روبه کاهش است. این بدان معنی است که در ابتدای ایجاد محدودیت انتشار کربن، کارخانه‌ها مهارت لازم برای ایجاد تعادل در میزان محصول تولیدی و آلودگی حاصل از آن را ندارند. ولی با گذشت زمان و کسب مهارت لازم در کنترل گاز کربن منتشر شده، موفق به کاهش کل هزینه‌های سیستم شده‌اند.

مقدار تابع هدف نسبت به تغییرات سایر پارامترها با شیب زیاد یا کم به‌صورت افزایشی یا کاهش‌ی بود. جمع‌بندی تحلیل حساسیت تابع

دوره ۴ نداشتن برگشتی از بازتولید است. این کارخانه از نظر عملکردی بیشترین نقش را در بازتولید محصول برگشتی داشته است. همچنین در دوره ۲۲ کلیه کارخانه‌ها کربن غیرمجاز تولید کرده‌اند. دلیل این امر هم تلاش کارخانه‌ها برای انجام تعهدات برای تأمین تقاضا در پایان دوره برنامه‌ریزی است. این موضوع توسط جدول شماره (۱۰) تولید و بازتولید که عمدتاً در دوره ۲۲ است، تأیید می‌گردد. کل محصول دفع شده از کارخانه‌ها و وارد شده به مرکز تصفیه به تفکیک دوره‌های برنامه‌ریزی در جدول (۱۰) آمده است.

جدول (۸). مقدار کمبود محصول در کارخانه‌ها

کمبود محصول (S <sub>tm</sub> )					
M <sub>t</sub>	۴	۶	m <sub>t</sub>		۵
			۴	۶	
۱	۰/۲۷۳	۰/۲۶۶	۶	۰/۲۳۵	۰/۲۸۹
۲	۰/۲۰۵	۰/۲۵۱	۷	۰/۰۲۱۸	۰/۲۴۷
۳	۰/۲۵۸	۰/۲۴۸	۸	۰/۲۹۹	۰/۲۷
۴	۰/۲۳	۰/۲۴۷	۹	۰/۲۱۲	۰/۲۴۱
۵	۰/۰۵۵	۰/۲۳۴	۱۰	۰/۲۴۸	۰/۲۹۹

جدول (۹). مقدار انتشار کربن بیش‌ازحد مجاز

O <sub>tm</sub>						
m <sub>t</sub>	۱	۲	۳	۴	۶	۷
۹	۰	۰	۰/۱۰۶	۰	۰	۰
۱۱	۰	۰	۰/۰۷۱	۰	۰	۰
۱۳	۰	۰	۰/۱	۰	۰	۰
۱۵	۰	۰	۰/۱۰۱	۰	۰	۰
۱۷	۰	۰	۰/۰۷	۰	۰	۰
۲۰	۰	۰	۰/۰۴	۰	۰	۰
۲۲	۰/۹۵۷	۰/۲۰۶	۰/۵۲۱	۰/۸۱۲	۰/۶۹۲	۰/۵۷۹
m <sub>t</sub>	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۴
m <sub>t</sub>	۱۵	۱۶	۱۸	۱۹	۲۰	۲۳
m <sub>t</sub>	۲۵	۲۶	۲۸	۲۹	۳۰	۲۲

جدول (۱۰). کل محصول دفع شده واردشده به مرکز تصفیه

t	۴	۵	۶	۷	۸	۹
W <sub>t</sub>	۲۲/۹۱۴	۲۲/۸۴۴	۲۲/۵۲	۲۲/۸۱۴	۲۲/۴۸۲	۲۳/۲۳۹
t	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵
W <sub>t</sub>	۲۲/۸۱۵	۲۲/۳۷۵	۲۲/۰۱۲	۲۲/۳۸۶	۲۲/۵۹۲	۲۲/۸۷
t	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۱	۲۲
W <sub>t</sub>	۲۲/۰۱۷	۲۲/۶۸۹	۲۲/۸۲۶	۲۲/۵۱۷	۲۲/۰۷۵	۲۲/۷۲۶

زنجیره‌تأمین سبز و همزیستی صنعتی کاملاً منطبق بر یکدیگر بوده و همسو و هم‌راستا با یکدیگر هستند. نتایج پژوهش جاری از نظر نوع مدل ریاضی و کاهش انتشار کربن با مطالعات لاولیدی و ژانگ همسویی دارد. همچنین، از نظر کاهش ضایعات با مطالعات گابور و تسخیری تطابق دارد. نزدیک‌ترین مطالعه به پژوهش جاری، مطالعه گابور است. عدم دسترسی به اطلاعات واقعی کارخانه‌ها و تخمین پارامترهای مدل، از مهم‌ترین محدودیت‌های پژوهش جاری بود. با انجام پژوهش مشابهی می‌توان علاوه بر ابعاد زیست‌محیطی و اقتصادی، بعد اجتماعی همزیستی صنعتی را هم مورد بررسی قرار داد.

### مراجع

- [1] A. A. King and M. J. Lenox, "Industry Self-Regulation without Sanctions.pdf," *Academy of Management Journal*, vol. 43, no. 4, pp. 698–716, 2000.
- [2] M. L. Tseng, M. S. Islam, N. Karia, F. A. Fauzi, and S. Afrin, "A literature review on green supply chain management: Trends and future challenges," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 141, no. November 2018, pp. 145–162, 2019, doi: 10.1016/j.resconrec.2018.10.009.
- [3] M. Trevisan, L. F. Nascimento, L. R. da R. G. Madruga, D. M. Neutzling, P. S. Figueiró, and M. B. Bossle, "Ecologia Industrial, Simbiose Industrial e Ecoparque Industrial: conhecer para aplicar," *Sist. Gestão*, vol. 11, no. 2, pp. 204–15, 2016, doi: 10.20985/1980-5160.2016.v11n2.993.
- [4] Brings Jacobsen N, "Industrial Symbiosis in Kalumborg, Denmark," *J. Ind. Ecol.*, vol. 10, no. 1, p. 18, 2006.
- [5] E. O'Dwyer, K. Chen, H. Wang, A. Wang, N. Shah, and M. Guo, "Optimisation of wastewater treatment strategies in eco-industrial parks: Technology, location and transport," *Chem. Eng. J.*, vol. 381, p. 122643, 2020.
- [6] S. Hennequin, V. T. Ho, H. A. Le Thi, H. Nouinou, and D. Roy, "Industrial symbioses: Bi-objective model and solution method," in *Optimization of Complex Systems: Theory, Models, Algorithms and Applications*, 2020, pp. 1054–1066.
- [7] U. Awan, "Industrial ecology in support of sustainable development goals," in *Responsible consumption and production*, Springer, 2022, pp. 370–380.
- [8] L. Fraccascia, I. Giannoccaro, and V. Albino, "Ecosystem indicators for measuring industrial symbiosis," *Ecol. Econ.*, vol. 183, p. 106944, 2021.
- [9] S. Badi and N. Murtagh, "Green supply chain management in construction: A systematic literature review and future research agenda," *J. Clean. Prod.*, vol. 223, pp. 312–322, 2019.
- [10] M. Boix, L. Montastruc, C. Azzaro-Pantel, and S. Domenech, "Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks: a literature review," *J. Clean. Prod.*, vol. 87, pp. 303–317, 2015.
- [11] S. K. Srivastava, "Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review," *Int. J. Manag. Rev.*, vol. 9, no. 1, pp. 53–80, 2007, doi: 10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x.
- [12] M. Porter and C. Van der Linde, "Green and competitive: ending the stalemate," *Dyn. eco-efficient Econ. Environ. Regul. Compet. Advant.*, vol. 33, pp. 120–134, 1995.
- [13] J. Sarkis, "A boundaries and flows perspective of green supply chain management," *Supply Chain Manag. an Int. J.*, vol. 17, no. 2, pp. 202–216, 2012.
- [14] R. A. Frosch and N. E. Gallopoulos, "Strategies for manufacturing," *Sci. Am.*, vol. 261, no. 3, pp. 144–153,

هدف مدل پیشنهادی پژوهش جاری نسبت به تغییرات پارامترها در جدول (۱۲) آمده است.

### جدول (۱۲). تحلیل حساسیت تابع هدف نسبت به پارامترهای مدل

پارامتر	تغییرات تابع هدف	حساسیت	نتیجه
مقدار محصول بازتولیدی	کاهش با شیب زیاد	زیاد	کاهش انتشار کربن و کاهش آلودگی
نرخ محصول برگشتی	افزایش با شیب نسبتاً زیاد	زیاد	افزایش هزینه‌های کل سیستم
مقدار محصول برگشتی به محل بازیافت	افزایش با شیب نسبتاً زیاد	زیاد	افزایش هزینه‌های کل سیستم
نرخ محصول دفع شده نهایی	افزایش با شیب نسبتاً زیاد	زیاد	افزایش آلودگی محیط‌زیست
محدودیت انتشار کربن	شیب بالا افزایشی، شیب بالا کاهش و در درازمدت، شیب ملایم کاهش	کم	کنترل آلودگی زیست‌محیطی و کاهش هزینه‌های کل سیستم
جریمه پیشروی از حد مجاز کربن	افزایش با شیب نسبتاً زیاد	زیاد	افزایش هزینه‌های کل سیستم
میزان انتشار کربن ناشی از تولید	افزایش با شیب نسبتاً زیاد	زیاد	افزایش هزینه‌های کل سیستم

### ۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در پژوهش جاری یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی تولید انباشته ظرفیت‌دار قطعی تک‌کالایی برای بررسی تأثیر مفهوم همزیستی صنعتی در مدیریت زنجیره‌تأمین سبز معرفی گردید. هدف پژوهش، حداقل کردن همزمان هزینه‌های کل شامل هزینه‌های تولید، نگهداری، خرید اضطراری، هزینه‌های پس‌افت و کاهش انتشار کربن بود. مدل به‌گونه‌ای طراحی شده است که با استفاده از مفهوم همزیستی صنعتی، بیشترین استفاده از ضایعات توسط کارخانه‌ها انجام گرفته و با اعمال جریمه پیشروی از حد مجاز انتشار کربن توسط کارخانه‌ها، کمترین مقدار کربن انتشار یابد. مدل ریاضی پیشنهادی پژوهش جاری روی ۳۰ کارخانه صنعت فولاد در ۲۲ دوره برنامه‌ریزی و با ۱۵ نوع ماده اولیه و یک محصول به‌کار گرفته شد. با حل مدل، یک برنامه تولید و بازتولید محصول با حداقل هزینه کل و کمترین تولید کربن به تفکیک هر کارخانه تعیین شد. همچنین، اطلاعات کلیدی عملکردی کارخانه‌ها در دوره‌های برنامه‌ریزی محاسبه شد. تحلیل حساسیت نشان داد که مقدار تابع هدف مدل نسبت به تغییرات پارامترهای مقدار محصول بازتولیدی، نرخ محصول برگشتی، مقدار محصول برگشتی به محل بازیافت، نرخ محصول دفع شده نهایی، جریمه پیشروی از حد مجاز کربن و میزان انتشار کربن ناشی از تولید، بالا است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهد سیاست‌های مدیریت

- 1319–1324, 2019.
- [26] V. Vasara, "Reporting of Green Supply Chain Management and Industrial Symbiosis," 2015.
- [27] C. Che, X. Zhang, Y. Chen, L. Zhao, and Z. Zhang, "A model of waste price in a symbiotic supply chain based on Stackelberg algorithm," *Sustainability*, vol. 13, no. 4, p. 1740, 2021.
- [28] J. R. Stock and S. L. Boyer, "Developing a consensus definition of supply chain management: A qualitative study," *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.*, vol. 39, no. 8, pp. 690–711, 2009, doi: 10.1108/09600030910996323.
- [29] M. S. Taskhiri, S. K. Behera, R. R. Tan, and H.-S. Park, "Fuzzy optimization of a waste-to-energy network system in an eco-industrial park," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 17, pp. 476–489, 2015.
- [30] G. Herczeg, R. Akkerman, and M. Z. Hauschild, "Supply chain collaboration in industrial symbiosis networks," *J. Clean. Prod.*, vol. 171, pp. 1058–1067, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.046.
- [31] Z. Pan, J. Tang, and O. Liu, "Capacitated dynamic lot sizing problems in closed-loop supply chain," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 198, no. 3, pp. 810–821, 2009, doi: 10.1016/j.ejor.2008.10.018.
- [32] O. Genc, G. van Capelleveen, E. Erdis, O. Yildiz, and D. M. Yazan, "A socio-ecological approach to improve industrial zones towards eco-industrial parks," *J. Environ. Manage.*, vol. 250, p. 109507, 2019.
- [33] M. A. Shariat, S. Iranzadeh, and A. Bafandeh Zende, "Identifying and Ranking Factors Affecting the Realization of Sustainable Production with a Shift from Industrial to Ecological Production (Case Study: Private Industrial Manufacturing Companies in Semnan)," *Public Manag. Res.*, vol. 10, no. 37, pp. 177–201, 2017.
- [34] M. Leigh and X. Li, "Industrial ecology, industrial symbiosis and supply chain environmental sustainability: A case study of a large UK distributor," *J. Clean. Prod.*, vol. 106, pp. 632–643, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.09.022.
- [35] J. Azevedo et al., "Industrial symbiosis implementation potential—An applied assessment tool for companies," *Sustainability*, vol. 13, no. 3, p. 1420, 2021.
- 1989.
- [15] Q. Zhu and R. P. Cote, "Integrating green supply chain management into an embryonic eco-industrial development: a case study of the Guitang Group," *J. Clean. Prod.*, vol. 12, no. 8–10, pp. 1025–1035, 2004.
- [16] M. R. Chertow, "INDUSTRIAL SYMBIOSIS: Literature," *Annu. Rev. Energy Environ.*, vol. 25, pp. 313–337, 2000.
- [17] X. Li and R. Xiao, "Analyzing network topological characteristics of eco-industrial parks from the perspective of resilience: A case study," *Ecol. Indic.*, vol. 74, pp. 403–413, 2017.
- [18] Q. Wang, P. Deutz, and Y. Chen, "Building institutional capacity for industrial symbiosis development: A case study of an industrial symbiosis coordination network in China," *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 1571–1582, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.146.
- [19] E. A. Lowe and L. K. Evans, "Industrial ecology and industrial ecosystems," *J. Clean. Prod.*, vol. 3, no. 1–2, pp. 47–53, 1995.
- [20] M. R. Chertow, "Industrial symbiosis: literature and taxonomy," *Annu. Rev. Energy Environ.*, vol. 25, no. 1, pp. 313–337, 2000.
- [21] L. T. Biegler and I. E. Grossmann, "Retrospective on optimization," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 28, no. 8, pp. 1169–1192, 2004.
- [22] E. M. Lovelady and M. M. El-Halwagi, "Design and integration of eco-industrial parks for managing water resources," *Environ. Prog. Sustain. Energy An Off. Publ. Am. Inst. Chem. Eng.*, vol. 28, no. 2, pp. 265–272, 2009.
- [23] S. H. Kim, S.-G. Yoon, S. H. Chae, and S. Park, "Economic and environmental optimization of a multi-site utility network for an industrial complex," *J. Environ. Manage.*, vol. 91, no. 3, pp. 690–705, 2010.
- [24] G. Valenzuela-Venegas, G. Vera-Hofmann, and F. A. Díaz-Alvarado, "Design of sustainable and resilient eco-industrial parks: Planning the flows integration network through multi-objective optimization," *J. Clean. Prod.*, vol. 243, p. 118610, 2020.
- [25] H. Nouinou, D. Roy, and S. Hennequin, "Mathematical modelling for flows optimization within an industrial symbiosis," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp.



DOI: 10.22084/IER.2023.27680.2124

## A Mathematical Model for Improving Green Supply Chain Performance Using the Concept of Industrial Symbiosis

S. Abdollahzadeh<sup>1\*</sup>, Z. Asem Farzaneh<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Department of Industrial Technologies, Urmia University of Technology (UUT), Urmia, Iran.

<sup>2</sup> Master's student in industrial engineering, Department of Industrial Technologies, Urmia University of Technology (UUT), Urmia, Iran.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 2023/3/4

Accepted: 2023/6/16

#### Keywords:

Green Supply Chain Management  
Industrial Symbiosis  
Environment  
Total Cost  
Carbon Emission

### ABSTRACT

Industrial ecology is the identification and application of solutions aimed at reducing the environmental effects of products and processes of industrial systems. Industrial symbiosis is a practical application of industrial ecology where manufacturing companies cooperate by creating a network in the field of local exchange of water, energy, or industrial waste recycling. Industrial symbiosis plays an important role in reducing total costs in green supply chain management and its sustainability. Previous researches in the field of green supply chain management have somehow improved its performance by using different tools, but less on the impact of the new and effective industrial symbiosis concept has been discussed. In the current research, for the first time, a mathematical model is presented to apply the concept of industrial symbiosis in green supply chain management to minimize total costs with minimal carbon emissions. The proposed model is a multi-period single product and the lack of demand is allowed. To validate, the proposed model was used in the steel industry with 30 factories during 22 planning periods and with 15 types of raw materials. GAMS software is used to solve the model. The results of the numerical solution of the model have the greatest reduction of carbon emissions and adverse environmental effects with minimum total costs in factories. The sensitivity analysis showed that the value of the objective function of the model is high in relation to the changes in the parameters of the amount of the reproduced product, the rate of the collected return product, the amount of the returned product, the rate of the final disposed product, and the penalty for exceeding the permitted carbon emission limit. The results showed the alignment of green supply chain management policies and industrial coexistence.

\* Corresponding author. S. Abdollahzadeh

Tel.: 044-31980265; E-mail address: s.abdollahzadeh@uut.ac.ir