Archive of SID.ir

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید
IERPS
ISSN: 2345-2269

نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید

سال یازدهم، شماره بیست و دوم، بهار و تابستان ۱۴۰۲، صفحه ۹۷-۱۰۹
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/IER.2023.27680.2124

مدل ریاضی برای بهبود عملکرد زنجیره‌تأمین سبز با استفاده از مفهوم همزیستی صنعتی

سهراب عبداله‌زاده[1*]، زهرا عاصم‌فرزانه[2]

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

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
دریافت ۱۴۰۱/۱۲/۱۳
پذیرش ۱۴۰۲/۳/۲۶
(مقاله پژوهشی)

کلمات کلیدی:
مدیریت زنجیره‌تأمین سبز
همزیستی صنعتی
هزینه کل
انتشار کربن

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 زنجیره‌تأمین سبز و پایداری آن دارد تحقیقات پیشین در زمینه مدیریت زنجیره‌تأمین سبز، هریک 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 زنجیره‌تأمین 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 زنجیره‌تأمین سبز و همزیستی صنعتی بود.

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 زنجیره‌تأمین، تأثیرات زیست‌محیطی را به حداقل برسانند. مدیریت زنجیره‌تأمین سبز[2] بخش مهمی از مدیریت عملیات است و تأثیر به‌سزایی در حفظ محیط‌زیست ازجمله محدودیت تولید گازهای گلخانه‌ای، کاهش آلاینده‌ها و به خطر افتادن سلامت جامعه دارد [۲].

اکولوژی صنعتی[3] 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[4] به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های اکولوژی صنعتی،

* نویسنده مسئول: سهراب عبداله زاده
تلفن: ۳۱۹۸۰۲۶۵-۰۴۴؛ پست الکترونیکی: s.abdollahzadeh@uut.ac.i

2. Green Supply Chain Management
3. Industrial Ecology
4. Industrial ecosystem

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

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 کاهش‌یافته 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[1] می‌تواند به‌عنوان استفاده محلی یا منطقه‌ای اکوسیستم صنعتی درنظر 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 زنجیره‌تأمین 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 ازجمله 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 درنظر گرفته شود.

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

بنابراین، پژوهش جاری در پی دست‌یابی به مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی با تلفیق مدیریت زنجیره‌تأمین 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 زنجیره‌تأمین سبز است. با تلفیق مفهوم همزیستی صنعتی در زنجیره‌تأمین 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 ازجمله 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 زنجیره‌تأمین سبز

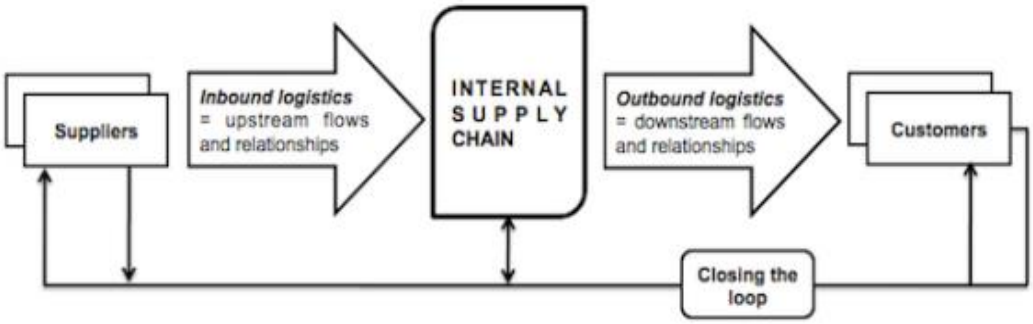
مدیریت زنجیره‌تأمین سبز هم در ادبیات مدیریت زنجیره‌تأمین و هم در ادبیات مدیریت زیست‌محیطی ریشه دارد. به‌طورکلی مؤلفه "سبز" به رابطه و تأثیر بین مدیریت زنجیره‌تأمین و محیط طبیعی اشاره دارد [۱۱]. مبانی سبز شدن توسط پورتر و ون در لیند [۱۲] توضیح داده شده است و ایده آن‌ها این بود که سرمایه‌گذاری در سبز شدن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

مطابق شکل (۱)، عناصر اصلی در مدیریت زنجیره‌تأمین سبز عبارت‌اند از: لجستیک ورودی[2]، زنجیره‌تأمین داخلی[3]؛ لجستیک خروجی[4]، حلقه بسته[5]، بازیافت و استفاده مجدد[6] و بازسازی[7].

1. Industrial Symbiosis
2. Inbound logistics
3. Internal supply chain
4. Outbound logistics
5. Closing the loop
6. Recycling and re-use
7. Remanufacturing

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل (۱). عناصر مدیریت زنجیره‌تأمین سبز [۱۳]

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 موردبررسی 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 گالووپولوس 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[1] 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 به‌تدریج در حال تغییر در جزییات ازنظر 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 یک‌سو بر میزان درآمد واحد اول افزوده شده و از منابع طبیعی کمتری استفاده می‌شود و از سوی دیگر، به‌دلیل 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 ازنظر زیست‌محیطی مناطق و شهرک‌های صنعتی است. بهینه‌سازی جریان مواد و انرژی در میان تأسیسات در مناطق خاص یا اکوسیستم‌های صنعتی یک استراتژی اساسی بوم‌شناسی صنعتی است. تجزیه‌وتحلیل چرخه عمر و مدیریت و مدیریت زنجیره‌تأمین سبز رویکردهای مرتبط هستند [۱۵].

اکولوژی صنعتی دارای سه سطح متفاوت ازنظر مقیاس‌های عملکرد است. اولین سطح مربوط به فعالیت‌های درون‌سازمانی است. دومین سطح مربوط به فعالیت‌های میان سازمانی 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 ازجمله 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].

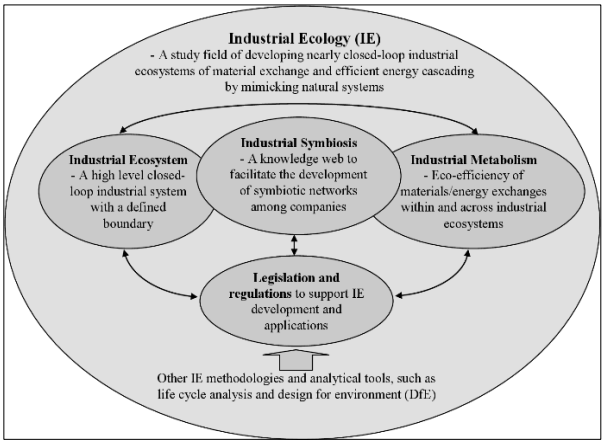
مفهوم زیربنایی همزیستی صنعتی استعاره‌ای از یک اکوسیستم صنعتی است که مانند یک اکوسیستم طبیعی عمل می‌کند (چرتو، ۲۰۰۰). جایگاه همزیستی صنعتی در اکولوژی صنعتی در شکل (۲) نشان داده شده است.

تمرکز همزیستی صنعتی بر قرابت جغرافیایی و مبادله منابع فیزیکی است. در عمل، استفاده از همزیستی صنعتی منجربه 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 ازنظر مقیاس‌های عملکرد استفاده می‌کند.

1. Industrial metabolism

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



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

مفهوم همزیستی صنعتی در دهه ۱۹۹۰ شکل گرفته است. در ابتدا، از مدل‌های مفهومی و جدول‌های هدف‌گذاری در طراحی پارک صنعتی اکولوژیک و بهینه‌سازی همزیستی صنعتی استفاده می‌شد. به‌علت 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]. ازجمله 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 الحلواقی [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.

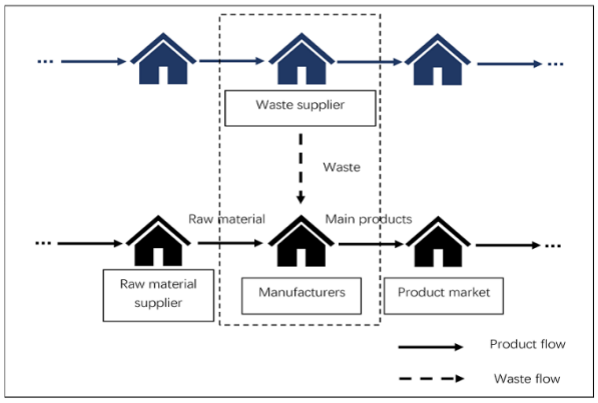
با توجه به ضعف مدل‌های خطی در تعیین اتصالات شبکه و اهمیت تبادل انرژی حرارتی در بهبود عملکرد اقتصادی و محیط زیستی صنایع، کیم و همکاران [۲۳] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی را برای تبادل انرژی حرارتی ارائه کردند. نظر به اینکه مدل‌های غیرخطی از حیث روش حل در ردیف مدل‌های سخت قرار می‌گیرد، رویکردهای مدل‌سازی به‌سمت مدل‌های خطی گرایش یافت. در سال‌های اخیر بیشتر مدل‌ها بر پایه مدل‌های مختلط عدد صحیح خطی توسعه یافته است [۲۵,۲۴].

۲-۴. زنجیره‌تأمین همزیستی

همزیستی صنعتی و زنجیره‌تأمین هر دو روابط بین سازمانی هستند که مبتنی بر جریان محصول هستند، اما هنوز تفاوت قابل‌توجهی 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 زنجیره‌تأمین وجود دارد [۲۶]. در تحقیقات زنجیره‌تأمین، هدف کاهش ضایعات در یک شرکت است؛ درحالی‌که در همزیستی صنعتی، هدف کاهش ضایعات در کل سیستم شرکت‌ها است.

در شکل (۳) زنجیره‌تأمین همزیستی نشان داده شده است.

در زنجیره‌تأمین همزیستی، تأمین‌کنندگان و تولیدکنندگان به‌دلیل رابطه عرضه و تقاضای ضایعات، زنجیره‌تأمین همزیستی جدیدی را تشکیل داده و به‌جای محصولات، زائدات بین آن‌ها مبادله می‌شود. در زنجیره‌تأمین همزیستی کامل، مواد اولیه موردنیاز 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). زنجیره‌تأمین همزیستی [۲۷]

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

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

در پژوهش جاری به‌منظور بهبود عملکرد زنجیره‌تأمین سبز به‌واسطه مفهوم همزیستی صنعتی، یک مسأله تولید انباشته پویای ظرفیت‌دار به‌همراه تولید و بازتولید در یک زنجیره‌تأمین حلقه بسته باهدف کاهش انتشارات کربن و حداقل‌سازی هزینه‌ها پیشنهاد گردیده است. به‌عبارتی 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؛ به‌طوری‌که 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.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

جدول (۱). خلاصه مطالعات در حوزه زنجیره‌تأمین سبز با درنظر گرفتن مفهوم همزیستی صنعتی

سال	نویسنده	هدف	حوزه مطالعه: مدیریت زنجیره سبز	حوزه مطالعه: اکولوژی صنعتی	حوزه مطالعه: همزیستی صنعتی	حوزه مطالعه: زنجیره‌تأمین همزیستی	نوع مدل	منبع
۲۰۰۷	سیرواسترا	چارچوب و مرجع برای مدیریت زنجیره‌تأمین سبز	*				-	[۱۱]
۲۰۰۹	لاولیدی	حداقل سازی هزینه تأمین و تبادل آب در سطح اکو پارک صنعتی		*	*		NLP[1]	[۲۲]
۲۰۱۲	سرکیس	چارچوبی برای روابط و جریان‌ها در مدیریت زنجیره‌تأمین سبز	*				-	[۱۳]
۲۰۱۵	تسخیری	طراحی شبکه بهینه تبدیل زباله به انرژی در پارک		*	*		FMILP[2]	[۲۹]
۲۰۱۸	گابور	بررسی همزیستی صنعتی از دیدگاه همکاری در زنجیره‌تأمین			*		-	[۳۰]
۲۰۱۹	نوینو	مدل ریاضی برای بهینه‌سازی تخصیص جریان مواد بین شرکت‌ها در یک همزیستی صنعتی		*	*		NLP	[۲۵]
۲۰۲۰	ونزوئلا	فرمول‌بندی و بهینه‌سازی برای طراحی شبکه مواد یک اکو پارک صنعتی		*			MCDM[3]	[۲۴]
۲۰۲۱	چنگ	رابطه بین سطح درآمد و درجه همزیستی در زنجیره‌تأمین همزیستی			*	*		[۲۷]
۲۰۲۳	پژوهش جاری		*		*	*	NLP	

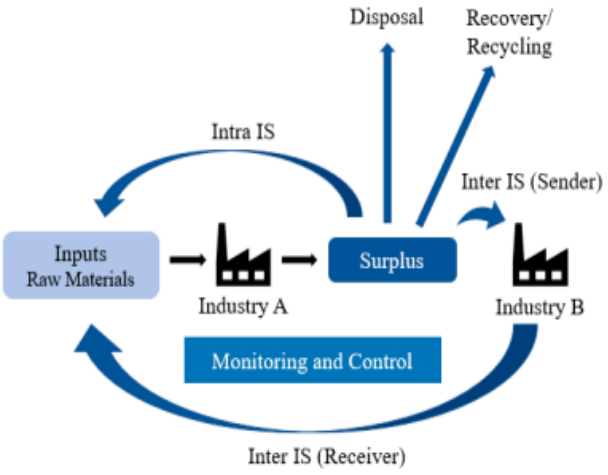
۲. بیان مسأله

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 درنظر 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 درنظر گرفتن روابط اکولوژیک طبیعی طراحی شوند تا کمترین آثار تخریبی را بر طبیعت و جوامع انسانی داشته باشند [۵]. برهمین 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 ازجمله طراحی شبکه برای مدیریت ضایعات، آب و اشتراک انواع انرژی انجام شده است.

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

درنتیجه، در پژوهش جاری یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی غیرخطی تولید انباشته ظرفیت‌دار قطعی تک‌کالایی باهدف بررسی تأثیر کاربرد مفهوم همزیستی صنعتی در مدیریت زنجیره‌تأمین 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.

به‌منظور مدل‌سازی ریاضی، جریان مواد، محصول و مازادها موردنیاز است. آزودو [۳۵]، جریان مواد اولیه و مازاد و مقاصد آن‌ها ازجمله 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]

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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

این جریان‌های مواد، محصول و مازادها، در مدل‌سازی پژوهش جاری مورد استفاده قرارگرفته است. شرح این جریانات عبارت‌اند از:

مازاد[1]: 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[2]: یک مازاد ارزش‌گذاری نشده و حذف می‌شود. مثلاً به محل دفن زباله فرستاده می‌شود.

بازتولید یا بازیافت[3]: مجموعه عملیاتی که امکان استفاده مجدد از مازاد و به‌دست آوردن مواد مشابه را فراهم می‌سازد.

همزیستی بین صنعتی (ارسالی)[4]: 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[5]: 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 زنجیره‌تأمین سبز و همزیستی صنعتی.
- کاهش انتشار کربن توسط کارخانه‌ها با درنظر 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 درنظر گرفته‌شده 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

t, t', t''	اندیس دوره‌ها در افق برنامه‌ریزی $t, t', t'' = 0, \ldots, T$
k	منابع برای تولید یا بازتولید $k = 1, \ldots, K$
U	دوره بهره‌برداری از محصول $U \leq T$
m	اندیس کارخانه‌ها $m = 1, \ldots, M$

پارامترها

MS_m	هزینه راه‌اندازی تولید هر دوره برای کارخانه m
RS_m	هزینه راه‌اندازی بازتولید هر دوره برای کارخانه m
MN_m	مقدار محصول تولیدی در کارخانه m
RN_m	مقدار محصول بازتولیدی در کارخانه m
C_{km}	مقدار منبع از نوع k موجود در هر دوره در کارخانه m
CM_{km}	مقدار منبع از نوع k موردنیاز برای تولید محصول در کارخانه m
CR_{km}	مقدار منبع k موردنیاز برای بازتولید در کارخانه m
SC_m	هزینه خرید اضطراری هر واحد محصول برای کارخانه m
BC_{tm}	هزینه پس‌افت تقاضا بعد از دوره‌t برای کارخانه m
HS_m	هزینه نگهداری هر واحد محصول تولیدی برگشتی کارخانه m
CE_m	محدودیت انتشار کربن در هر دوره برای کارخانه m
HR_m	هزینه نگهداری هر واحد محصول بازتولید برگشتی برای کارخانه m
CC_m	جریمه برای پیشروی از حد مجاز کربن در هر دوره برای کارخانه m
ME_m	میزان انتشار کربن ناشی از تولید محصول در کارخانه m
RE_m	میزان انتشار کربن ناشی از بازتولید در کارخانه m
MM	یک عدد بزرگ مثبت
G_m	نرخ بازیافت برای هر دوره در کارخانه m
FR_m	هزینه تولید محصول در کارخانه m
FC	هزینه بازتولید در کارخانه m
DC_m	هزینه دفع در کارخانه m
D_{tm}	تقاضای محصول در دوره t برای کارخانه m
P_m	نرخ محصول برگشتی در دوره t برای کارخانه m
P'_t	نرخ محصول دفع شده نهایی برای دوره t
D'_t	تقاضای کل در دوره t

1. Surplus
2. Disposal
3. Recovery/Recycling
4. Inter Industrial Symbiosis—Sender
5. Industrial coexistence

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

متغیرهای تصمیم

X_{tm}	مقدار تولید محصول در دوره t در کارخانه m
Y_{tm}	مقدار بازتولید در دوره t در کارخانه m
Z_{tm}	مقدار محصول برگشتی بازتولید شده دوره t برای کارخانه m
R_{tm}	مقدار محصول برگشتی دفع شده دوره t برای کارخانه m
IS_{tm}	مقدار محصول نگهداری شده در انبار در پایان دوره t در کارخانه m
IR_{tm}	مقدار محصول برگشتی نگهداری شده در انبار در پایان دوره t در کارخانه m
S_{tm}	مقدار کمبود محصول در دوره t در کارخانه m
$B_{tt'm}$	مقدار تقاضای tامین دوره تأمین‌شده توسط تولید یا بازتولید در دوره t´ در کارخانه m
$N_{t't''m}$	مقدار تقاضای t´امین دوره تأمین‌شده توسط تولید یا بازتولید در دوره t'' در کارخانه m
$V_{t',t-u,m}$	مقدار تقاضای t'امین دوره تأمین‌شده توسط تولید یا بازتولید در دوره t-u در کارخانه m
MO_{tm}	متغیر باینری صفر و یک برای راه‌اندازی تولید در دوره t برای کارخانه m
IM_{tm}	متغیر باینری صفر و یک برای راه‌اندازی بازتولید در دوره t برای کارخانه m
O_{tm}	مقدار انتشار کربن بیش‌ازحد مجاز در دوره t برای کارخانه m
W_t	کل محصول دفع شده در دوره t

۳-۳. مدل ریاضی

تابع هدف:

$$\begin{aligned}\text{Min } Z = &\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}(MS_m.MO_{tm}) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}(FR_m.X_{tm}) \\ &+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}(FC_m.Y_{tm}) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}(RS_m.IM_{tm}) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}(DC_m.Z_{tm}) \\ &+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}(HS_m.IS_{tm}) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}(HR_m.IR_{tm}) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}(SC_m.S_{tm}) \\ &+ \sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}(CC_m.O_{tm}) + \sum_{m=1}^{M}\sum_{t'=1}^{T-1}\sum_{t''=t+1}^{T}BC_{tm}.N_{t't''m}\end{aligned} \quad (۱)$$

محدودیت‌ها

$$IS_{tm} = 0 \forall m, \forall t = 0 \quad (۲)$$

$$IR_{tm} = 0 \forall m, \forall t = 0 \quad (۳)$$

$$R_{tm} = 0 \forall m, t \in T, t \le U \quad (۴)$$

$$R_{tm} = G_m[D_{(t-U)m} + \sum_{t'=1}^{t-U-1} V_{(t',t-u,m)} - S_{tm}] \forall t \in T, t > u \quad (۵)$$

$$MN_m.x_{tm} + RN_m.Y_{tm} + IS_{tm} + S_{tm} + \sum_{t'=t+1}^{T} B_{tt'm} = D_{tm} + \sum_{t'=1}^{T-1} B_{tt'm} + IS_{tm} \forall m, \forall t \in T \quad (۶)$$

$$IR_{tm} - IR_{(t-1)m} + RN_m.Y_{tm} + Z_{tm} = P_m R_{tm} \quad \forall m, \forall t \in T \quad (۷)$$

$$CM_{km}.X_{tm} + CR_{km}.Y_{tm} \le C_{km} \forall m, t \in T, k \quad (۸)$$

$$X_{tm} \le MM.MO_{tm} \forall m, t \in T \quad (۹)$$

$$Y_{tm} \le MM.IM_{tm} \forall m, t \in T \quad (۱۰)$$

$$ME_m.MN_m.X_{tm} + RE_m.RN_m.Y_{tm} - CE_m \le O_{tm} \forall m \quad (۱۱)$$

$$\sum_{m=1}^{M} R_{tm} = W_t \forall m, t \in T \quad (۱۲)$$

$$W_t - W_t P_t' = D_t' \forall t \in T \quad (۱۳)$$

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 زنجیره‌تأمین سبز، ضایعات هر کارخانه به‌جای رهاسازی 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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

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 منتشرشده 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 درنظر گرفته شد. دامنه تغییرات پارامترها تخمین زده شد. درنهایت، پارامترهای مدل و اطلاعات‌پایه 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 مختلف کارخانه‌ها ازجمله فاصله با شهر و موارد مشابه، در دامنه ۰/۲ تا ۰/۸ 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 ارائه‌شده

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_{tm}	Uniform (3,5)
SC_m	Uniform (20,50)	P_m	Uniform (0.2,0.3)
BC_{tm}	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)	$D1_{(t-u)m}$	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

۴-۲. اعتبارسنجی مدل

برای حل مدل از نرم‌افزار گمز استفاده شده است. مدل ریاضی پیشنهادی در مدت‌زمان (۰:۱۵:۲۷) حل شده و براساس تعداد کارخانه‌ها، شاخص منابع و داده‌های موجود، مقدار تابع هدف ۳۷۴۳/۱۹۷ 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 ازنظر مقدار و هم ازنظر 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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۴-۳. نتایج و بحث

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

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	۰/۱۳۷
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 به‌شرح جدول (۶) است. برای کارخانه‌های ۴ و ۵ این مقادیر فقط در دوره ۲۲ به‌ترتیب ۱/۴۳ و ۱/۰۱۱ تن 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 به‌شرح 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 بیش‌ازحد مجاز متعلق به کارخانه ۳ تا دوره ۲۰ برنامه‌ریزی است. تا دوره ۲۲ تنها کارخانه ۳ کربن بیش‌ازحد 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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

دوره ۴ نداشتن برگشتی از بازتولید است. این کارخانه ازنظر 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

	S_{tm} (کمبود محصول)				
M_t	۴	۶	m_t	۴	۵
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_{tm}					
m_t	۱	۲	۳	۴	۶	۷
۷	۰	۰	۰/۹۸	۰	۰	۰
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_t	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۴
۲۲	۰/۳۶۷	۰/۰۶۳	۰/۲۰۱	۰/۱۳۲	۰/۲۲۸	۰/۷۹۳
m_t	۱۵	۱۶	۱۸	۱۹	۲۰	۲۳
۲۲	۰/۱۸۹	۰/۵۴۳	۰/۰۱۸	۰/۵۶۹	۰/۱۳۲	۰/۴۸۸
m_t	۲۵	۲۶	۲۸	۲۹	۳۰	
۲۲	۰/۰۰۴	۰/۲۲۱	۰/۰۹۱	۰/۴۸۶	۰/۱۵۷	

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

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

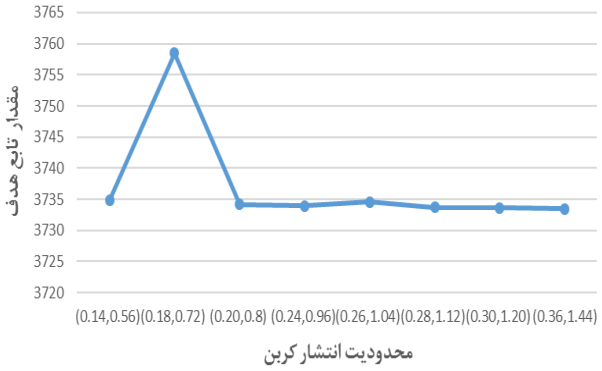
۴-۴. تحلیل حساسیت

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_m)		
	بازه تغییرات	مقدار تابع هدف
۰/۵۶	۰/۱۴	۳۷۳۵/۳۹۷
۰/۷۲	۰/۱۸	۳۷۵۹/۷۹۲
۰/۸۰	۰/۲۰	۳۷۳۴/۵۶۴
۰/۹۶	۰/۲۴	۳۷۳۴/۱۹۷
۱/۰۴	۰/۲۶	۳۷۳۳/۹۰۹
۱/۱۲	۰/۲۸	۳۷۳۴/۵۸۶
۱/۲۰	۰/۳۰	۳۷۳۳/۶۳۵
۱/۴۴	۰/۳۶	۳۷۳۴/۱۲۶

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 باگذشت 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

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

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 کاهشی و در درازمدت، شیب ملایم کاهشی	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 انجام‌گرفته 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 زنجیره‌تأمین سبز و همزیستی صنعتی کاملاً منطبق بر یکدیگر بوده و همسو و هم‌راستا با یکدیگر هستند. نتایج پژوهش جاری ازنظر نوع مدل ریاضی و کاهش انتشار کربن با مطالعات لاولیدی و ژانگ همسویی دارد. همچنین، ازنظر 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 Kalumdborg, 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,

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

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 Zendeh, “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, “I NDUSTRIAL S YMBIOSIS : 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.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

IERPS Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

ISSN: 2345-2269

Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems

Spring and Summer 2023, Volume 11., No. 22., pp. 97-109
www.ier.basu.ac.ir

DOI: 10.22084/IER.2023.27680.2124

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

S. Abdollahzadeh[1*], Z. Asem Farzaneh[2]

[1.] Associate Professor, Department of Industrial Technologies, Urmia University of Technology (UUT), Urmia, Iran.
[2.] 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 Upply 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

Archive of SID.ir