فصلنامه مدیریت راهبردی در سیستم های صنعتی (مدیریت صنعتی سابق)
دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج
سال بیستم/ شماره ۷۱ / بهار ۱۴۰۴

طراحی زنجیره تامین سبز حلقه بسته با در نظر گرفتن پیش بینی تقاضا برای محصول پرینتر سه بعدی

فریده اعتمادی فرد
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی صنایع ، واحد الکترونیکی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
امیر رضا احمدی کشاورز (نویسنده مسئول)
استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
E-mail: ahmadikeshavarz1976@gmail.com
فرشته خلج
استادیار گروه مهندسی صنایع، واحد رباط کریم، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹ * تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

چکیده

این پژوهش به طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته (CLSC) با در نظر گرفتن پیش‌بینی تقاضا برای محصولات پرینتر سه بعدی می‌پردازد. معماری شبکه طراحی شده شامل هشت سطح مختلف است: مراکز پرینتر سه بعدی (DPC)، مراکز درمان (TC)، مراکز بازیافت (RC)، مشتریان رشته (FC)، مراکز پردازش (PC)، مراکز جمع‌آوری (CC)، بازارها و کاربران نهایی. این شبکه با هدف استفاده از بطری‌های PET بازیافتی برای تولید فیلامنت‌های پرینتر سه بعدی، کاهش هزینه‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی طراحی شده است. برای بهینه‌سازی این شبکه، یک مدل ریاضی به فرم برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) توسعه داده شده که هدف آن کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های ثابت، حمل‌ونقل و انتشار کربن است. مدل پیشنهادی با رویکرد چند سناریویی، عدم قطعیت در پیش‌بینی تقاضا را در نظر می‌گیرد و برای هر سناریو احتمال وقوع مشخصی تعریف شده است. محدودیت‌های مدل شامل محدودیت‌های ظرفیت، تعادل جریان، تخصیص و ارتباط بین گره‌های شبکه می‌باشد. برای حل این مدل بهینه‌سازی پیچیده، از الگوریتم‌های فرابتکاری الگوریتم ژنتیک (GA) و شبیه‌سازی تبرید (SA) استفاده شده است. کدگذاری کروموزوم‌ها شامل بخش‌های باینری برای مکان‌یابی و تخصیص مراکز و بخش پیوسته برای جریان مواد است. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند به طور مؤثری هزینه‌های کل زنجیره تأمین را کاهش دهد و همزمان اهداف زیست‌محیطی را با استفاده از بازیافت بطری‌های PET برآورده سازد. این پژوهش با رویکردی کاربردی–توسعه‌ای، راهکاری مؤثر برای مدیریت پایدار زنجیره تأمین در صنعت پرینت سه بعدی ارائه می‌دهد که می‌تواند به کاهش هزینه‌های تولید فیلامنت و بهبود عملکرد زیست‌محیطی این صنعت کمک شایانی نماید.

کلمات کلیدی: پرینتر سه بعدی، پیش بینی تقاضا، حلقه بسته، زنجیره تامین سبز.

۱-مقدمه

الف) معرفی زنجیره تامین حلقه بسته

زنجیره تامین حلقه بسته به مجموعه فعالیت‌های مرتبط با تامین، تولید و توزیع و همچنین فرآیندهای بازیافت و استفاده مجدد از ضایعات و محصولات مستعمل اشاره دارد. این رویکرد شامل دو بخش لجستیک پیشرو (تامین، تولید و توزیع) و لجستیک معکوس (بازیافت و استفاده مجدد) است (Ehioghae et al., 2023). زنجیره تامین حلقه بسته شامل دو جریان مستقیم و معکوس است که در دو دهه اخیر توجه متخصصان مدیریت تولید را به خود جلب کرده است (Ahmadi & Amin, 2019). تلاش‌ها در زمینه بازیافت و فعالیت‌های لجستیکی، سازمان‌ها را به سمت بستن حلقه زنجیره تامین و ایجاد زنجیره تامین حلقه بسته سوق داده است. این ساختار می‌تواند به اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی سازمان به طور همزمان دست یابد.

ب) اهمیت مسائل زیست محیطی در زنجیره تامین

امروزه موفقیت بلند مدت سازمان‌ها نه تنها به سودآوری، بلکه به رویکرد آنها نسبت به مسائل زیست محیطی و آینده‌نگری در حوزه پایداری وابسته است (Mohammad Esmaeil & Fattahzadeh, 2021). توجه به مسائل زیست محیطی می‌تواند تضمین کننده موفقیت زنجیره تامین و مزیت رقابتی در بلندمدت باشد (Ghahremani-Nahr et al., 2019).

محصولات معیوب و ضایعات همیشه یک چالش مهم برای تولیدکنندگان بوده است. کارشناسان دریافته‌اند که بازیافت محصول و استفاده مجدد از محصولات، ضایعات و بقایای محصول نه تنها اثرات مضر برای محیط زیست را کاهش می‌دهد، بلکه موقعیت رقابتی شرکت‌ها را در بازار بهبود می‌بخشد. با این استراتژی می‌توان شبکه‌های زنجیره تامین را به طور قابل توجهی بازسازی کرد و منافع اقتصادی را به حداکثر رساند (Feizollahi et al., 2019).

ج) تصمیمات استراتژیک در زنجیره تامین سبز حلقه بسته

مهمترین تصمیمات استراتژیک در زنجیره تامین، طراحی شبکه کارآمد است. یک تصمیم‌گیرنده می‌تواند عوامل متعددی را برای طراحی بهینه‌تر یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در نظر بگیرد. این عوامل شامل هزینه‌ها، مقررات دولتی، انتشار CO_2، خطرات و اختلالات عملیاتی، ابعاد اجتماعی، عدم قطعیت در پارامترها، قابلیت اطمینان شبکه و سایر موارد می‌شود. در این میان، فقدان اطلاعات دقیق به همراه پویایی و پیچیدگی زنجیره تأمین، احتمالاً بزرگ‌ترین چالش‌های پیش‌رو محسوب می‌شوند (Wei et al., 2015).

د) معرفی فناوری پرینتر سه بعدی و اهمیت آن

پرینتر سه‌بعدی مجموعه‌ای از فرآیندها را شامل می‌شود که در آن مواد به صورت کنترل‌شده به یکدیگر متصل می‌شوند تا یک شیء سه‌بعدی ساخته شود (Talaei et al., 2016). اشیاء سه‌بعدی از طریق قرار دادن متوالی لایه‌ها بر روی یک سطح مقطع دوبعدی شکل می‌گیرند (Abhijith et al., 2023). این روند شباهت زیادی به مکانیزم چاپ سنتی دارد که طی آن جوهر روی کاغذ پاشیده می‌شود.

در سال‌های اخیر، فناوری چاپ سه‌بعدی که با عنوان «ساخت افزودنی» نیز شناخته می‌شود، توانسته است رؤیاهای علاقه‌مندان به کارآفرینی و سرگرمی‌های خانگی را به واقعیت تبدیل کند. امروزه با توجه به پوشش گسترده رسانه‌ها در این زمینه، شاهد افزایش روزافزون استفاده از پرینترهای سه‌بعدی همراه با کاربردها و دستاوردهای نوین هستیم (Rezapour et al., 2015). در مقابل، چاپ سه‌بعدی قابلیت کاهش نیاز به ذخیره‌سازی سنتی قطعات و محصولات را داراست. این امکان به کسب‌وکارها اجازه می‌دهد تا به جای نگهداری موجودی از قطعات یا محصولاتی که ممکن است در آینده استفاده شوند یا حتی بدون استفاده باقی بمانند، محصولات مورد نیاز را مستقیماً بر اساس تقاضا تولید کنند. از این طریق نیاز به موجودی زیاد اقلام از میان برداشته می‌شود (Meyliana et al., 2021).

توانایی چاپ سه‌بعدی در تولید سریع قطعات و محصولات می‌تواند تأثیر مثبتی بر تجربه مشتریان داشته باشد. کسب‌وکارها قادر خواهند بود محصولات را با سرعت و دقت بیشتری تولید کنند، زمان انجام سفارش‌ها را کاهش داده و محصولات را سریع‌تر به مشتریان تحویل دهند (Govindan et al., 2015). افزون بر این، چاپ سه‌بعدی به کسب‌وکارها امکان می‌دهد تا قطعات و

محصولات سفارشی تولید کنند که به‌واسطه روش‌های تولید سنتی تولید آنها ممکن نیست. این قابلیت می‌تواند بازارهای جدیدی برای کسب‌وکارها ایجاد کند و محصولاتی منطبق با نیازهای خاص مشتریان ارائه دهد (Wu et al., 2020).

ظهور تجارت الکترونیک و استفاده گسترده از دستگاه‌های تلفن همراه نیاز به نوآوری و پاسخگویی سریع را برای خرده‌فروشان افزایش داده است. این مسئله همچنین نیاز به رضایت فوری و تحویل سریع، حتی در همان روز، را تقویت می‌کند (Amin & Zhang, 2013).

ه) ارتباط فناوری پرینتر سه بعدی با زنجیره تامین سبز حلقه بسته

فناوری پرینت سه‌بعدی، با قابلیت تولید بر اساس تقاضا و کاهش ضایعات، می‌تواند نقش کلیدی در توسعه زنجیره تأمین حلقه بسته ایفا کند. این فناوری نه‌تنها امکان بازیافت مواد اولیه مانند بطری‌های PET را فراهم می‌کند، بلکه با کاهش نیاز به حمل‌ونقل گسترده و انبارداری سنتی، اثرات زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند. از این‌رو، این پژوهش بر طراحی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته برای محصولات پرینت سه‌بعدی تمرکز دارد.

۲-روش شناسی پژوهش

الف) اهمیت و ضروت تحقیق

زنجیره تأمین سبز حلقه بسته برای محصولات پرینتر سه‌بعدی از چندین جنبه حائز اهمیت است که در ادامه به تشریح آنها می‌پردازیم:

- بررسی زنجیره تأمین سبز برای طراحی محصولات پرینتر سه‌بعدی

فناوری پرینت سه‌بعدی به عنوان یکی از ارکان اصلی انقلاب صنعتی چهارم، پتانسیل قابل توجهی برای تغییر الگوهای تولید سنتی دارد. طراحی زنجیره تأمین سبز برای این محصولات می‌تواند به کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهینه‌سازی مصرف منابع کمک کند. با توجه به رشد سریع بازار جهانی پرینترهای سه‌بعدی که تا سال ۲۰۲۹ به ارزش ۸۴ میلیارد دلار خواهد رسید، بررسی و طراحی زنجیره تأمین سبز برای این صنعت ضرورتی انکارناپذیر است.

- فواید و طراحی پایدار فناوری پرینتر سه‌بعدی

فناوری پرینت سه‌بعدی مزایای متعددی نسبت به روش‌های تولید سنتی دارد. این فناوری امکان تولید محصولات را بر اساس تقاضا فراهم می‌کند، در نتیجه نیاز به ذخیره‌سازی گسترده محصولات و قطعات را کاهش می‌دهد. همچنین، این فناوری به کسب‌وکارها اجازه می‌دهد تا محصولات سفارشی تولید کنند که با روش‌های تولید سنتی امکان‌پذیر نیست. این قابلیت می‌تواند بازارهای جدیدی ایجاد کند و محصولاتی منطبق با نیازهای خاص مشتریان ارائه دهد (Wu et al., 2020).

- امکان ایجاد طرح‌های بهینه‌شده با توپولوژی

پرینتر سه‌بعدی روشی کاملاً جدید در طراحی محصولات ارائه می‌دهد و امکان ایجاد طرح‌های بهینه‌شده با توپولوژی را فراهم می‌کند (Griffith et al., 2021).

این طراحی مجدد به این معناست که بخش چاپ‌شده سه‌بعدی می‌تواند همان عملکرد بخش اصلی را ارائه دهد، اما با استفاده کمتر از مواد، عملکرد آن را به حداکثر برساند (Cima et al., 2020).

این بهینه‌سازی توپولوژیک به کاهش مصرف مواد و در نتیجه کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی منجر می‌شود.

- کاهش مصرف مواد و انرژی در طول تولید

یکی از مزایای اصلی فناوری پرینت سه‌بعدی، قابلیت «تجمیع بخشی» است. شرکت‌ها قادر خواهند بود طراحی قطعاتی را که از چندین جزء تشکیل شده‌اند، مجدداً اصلاح کرده و آنها را به‌صورت یک واحد یکپارچه چاپ کنند. این فرآیند موجب کاهش مصرف مواد و انرژی در طول تولید می‌شود، زیرا قطعات کمتری برای تولید، جوش دادن یا پیچ کردن در مونتاژ نیاز خواهد بود (Wang et al., 2024). به علاوه، یکپارچه‌سازی قطعات می‌تواند محصولاتی با دوام و عملکرد بهتر ارائه دهد.

- کاهش شدید مصرف مواد در طول تولید با استفاده از پرینتر سه‌بعدی

در حوزه تولید سنتی، دو چالش اساسی وجود دارد: مصرف مواد و بهره‌وری انرژی در تولید سنتی، همیشه بخش‌هایی از مواد وجود دارند که بخشی از محصول نهایی نیستند و دورریز محسوب می‌شوند (Zhao et al., 2020). فناوری پرینت سه‌بعدی با استفاده از روش ساخت افزایشی، تنها مواد مورد نیاز را مصرف می‌کند و ضایعات را به حداقل می‌رساند. این امر به‌ویژه در مورد بازیافت بطری‌های PET و تبدیل آنها به فیلامنت‌های پرینتر سه‌بعدی، اهمیت بالایی دارد.

- استفاده از بطری‌های PET بازیافتی

یکی از نوآوری‌های اصلی این پژوهش، طراحی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته با هدف استفاده از بطری‌های PET بازیافتی برای تولید فیلامنت‌های پرینتر سه بعدی است. این رویکرد نه تنها به کاهش هزینه‌های تولید فیلامنت کمک می‌کند، بلکه آلودگی‌های زیست‌محیطی را نیز کاهش می‌دهد. با توجه به قیمت بالای فیلامنت‌های تولید شده از مواد اولیه، استفاده از مواد بازیافتی می‌تواند راه‌حلی مؤثر برای کاهش هزینه‌ها و افزایش دسترسی به این فناوری باشد.

- پیش‌بینی تقاضا و بهینه‌سازی زنجیره تأمین

پیش‌بینی دقیق تقاضا یکی از چالش‌های اصلی در مدیریت زنجیره تأمین است. در صنعت پرینت سه‌بعدی، با توجه به تکامل سریع فناوری و نوسانات بازار، این چالش پیچیده‌تر می‌شود. طراحی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته با در نظر گرفتن پیش‌بینی تقاضا می‌تواند به بهینه‌سازی موجودی، کاهش هزینه‌ها و بهبود سطح خدمات منجر شود.

- کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی

با توجه به افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی و تغییرات اقلیمی، طراحی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته برای محصولات پرینتر سه‌بعدی می‌تواند به کاهش انتشار کربن، کاهش مصرف انرژی و کاهش ضایعات کمک کند. این پژوهش با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های ثابت، حمل‌ونقل و انتشار کربن، گامی مهم در جهت توسعه پایدار صنعت پرینت سه‌بعدی برمی‌دارد.

در مجموع، اهمیت و ضرورت این تحقیق در بهینه‌سازی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته برای محصولات پرینتر سه‌بعدی، با توجه به مزایای اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی آن، کاملاً مشهود است. این پژوهش می‌تواند راهکاری مؤثر برای مدیریت پایدار زنجیره تأمین در صنعت پرینت سه بعدی ارائه دهد که به کاهش هزینه‌های تولید فیلامنت و بهبود عملکرد زیست‌محیطی این صنعت کمک شایانی نماید.

ب) اهداف پژوهش

بررسی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته با در نظر گرفتن پیش‌بینی تقاضای مشتریان

هدف اصلی این پژوهش، طراحی و بهینه‌سازی یک زنجیره تأمین سبز حلقه بسته برای محصولات پرینتر سه‌بعدی با در نظر گرفتن پیش‌بینی تقاضای مشتریان است. این پژوهش با رویکردی کاربردی–توسعه‌ای، به دنبال ارائه راهکاری مؤثر برای مدیریت پایدار زنجیره تأمین در صنعت پرینت سه بعدی است که بتواند به کاهش هزینه‌های تولید فیلامنت و بهبود عملکرد زیست‌محیطی این صنعت کمک کند.

- پیش‌بینی تقاضای مشتری

یکی از اهداف مهم این پژوهش، توسعه مدلی برای پیش‌بینی دقیق تقاضای مشتریان در بازار پرینترهای سه‌بعدی است. با توجه به تغییرات مداوم بازار و پویایی صنعت پرینت سه‌بعدی، پیش‌بینی تقاضا اهمیت ویژه‌ای دارد. این پژوهش با استفاده از رویکرد چند سناریویی، عدم قطعیت در پیش‌بینی تقاضا را در نظر می‌گیرد و برای هر سناریو احتمال وقوع مشخصی تعریف می‌کند.

- به حداقل رساندن اثرات زیست‌محیطی

کاهش اثرات زیست‌محیطی از اهداف اصلی این پژوهش است. مدل ریاضی توسعه داده شده در این پژوهش به فرم برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP)، با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های ثابت، حمل‌ونقل و انتشار کربن طراحی شده است.

این پژوهش با تمرکز بر استفاده از بطری‌های PET بازیافتی برای تولید فیلامنت‌های پرینتر سه بعدی، به دنبال کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی است. بازیافت بطری‌های PET و تبدیل آنها به فیلامنت‌های پرینتر سه‌بعدی، علاوه بر کاهش هزینه‌های تولید، به کاهش ضایعات پلاستیکی و آلودگی محیط زیست نیز کمک می‌کند.

- استفاده از زنجیره تأمین حلقه بسته

این پژوهش به طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته می‌پردازد که شامل هشت سطح مختلف است:
مراکز پرینتر سه بعدی (DPC)
مراکز درمان (TC)
مراکز بازیافت (RC)
مشتریان رشته (FC)
مراکز پردازش (PC)
مراکز جمع‌آوری (CC)
بازارها (شرکت‌های بازیافت)
کاربران نهایی
در این زنجیره تأمین حلقه بسته، جریان مواد به دو صورت مستقیم و معکوس طراحی شده است:
جریان مستقیم:
رشته‌ها از مراکز بازیافت به مراکز پرینتر سه بعدی منتقل می‌شوند.
محصولات چاپ شده از مراکز پرینتر سه بعدی به مشتریان ارسال می‌شوند.
جریان معکوس:
ضایعات فرآیند چاپ از مراکز پرینتر سه بعدی به مراکز درمانی ارسال می‌شوند.
بخشی از محصولات برگشتی از مشتریان به مراکز درمانی فرستاده می‌شوند.
بطری‌های PET از کاربران نهایی به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شوند.
بطری‌های جمع‌آوری شده پس از جداسازی مواد اضافی به مراکز پردازش فرستاده می‌شوند.
بطری‌های پردازش شده و فشرده‌شده (عدل‌ها) به بازارها و مراکز درمانی منتقل می‌شوند.

- تکرارپذیری فرآیند

یکی دیگر از اهداف این پژوهش، طراحی فرآیندی تکرارپذیر برای تولید فیلامنت‌های پرینتر سه‌بعدی از بطری‌های PET بازیافتی است. این فرآیند باید به گونه‌ای طراحی شود که قابلیت تکرار داشته باشد و بتواند به طور مداوم بطری‌های PET را به فیلامنت‌های با کیفیت تبدیل کند.

برای حل مدل بهینه‌سازی پیچیده این پژوهش، از الگوریتم‌های فراابتکاری الگوریتم ژنتیک (GA) و شبیه‌سازی تبرید (SA) استفاده شده است. کدگذاری کروموزوم‌ها شامل بخش‌های باینری برای مکان‌یابی و تخصیص مراکز و بخش پیوسته برای جریان مواد است.

- دستیابی به پایداری زیستی در تولید محصولات

هدف نهایی این پژوهش، دستیابی به پایداری زیستی در تولید محصولات پرینتر سه‌بعدی است. این پایداری از طریق:
استفاده از مواد بازیافتی (بطری‌های PET) به جای مواد اولیه ، کاهش ضایعات در فرآیند تولید ،کاهش انتشار کربن در زنجیره تأمین، بهینه‌سازی حمل و نقل و کاهش مصرف سوخت ، طراحی شبکه‌ای کارآمد برای جمع‌آوری و بازیافت محصولات مستعمل حاصل می‌شود. این پژوهش با ارائه یک مدل بهینه‌سازی چند هدفه، به دنبال ایجاد توازن بین اهداف اقتصادی (کاهش هزینه‌ها) و اهداف زیست‌محیطی (کاهش انتشار کربن) است.

در نهایت، این پژوهش با رویکردی جامع به طراحی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته برای محصولات پرینتر سه‌بعدی، به دنبال ارائه راهکاری است که بتواند به توسعه پایدار این صنعت کمک کند و همزمان با کاهش هزینه‌های تولید، اثرات زیست‌محیطی را نیز به حداقل برساند.

ج) مرور ادبیات

مطالعات پیشین در زمینه زنجیره تامین سبز حلقه بسته برای پرینتر سه بعدی عمدتا در ۶ محور کلیدی زیر دسته بندی میشوند:

۱. پیش‌بینی تقاضا و مدیریت عدم قطعیت

مطالعات روی روش‌های پیش‌بینی و مدیریت شرایط نامطمئن بازار، اکثراً مبتنی بر مدل‌های ترکیبی یادگیری ماشین و رویکردهای تصادفی هستند.

نمونه منابع:

- Kang, Y., & Kim, J. (2022).
- Liu, H., & Zhang, Y. (2023).
- Zhang, Y., et al. (2023).
- Nazari Gooran, A., et al. (2020).

۲. مواد و تولید پایدار

تمرکز بر استفاده از مواد پایدار، ارزیابی چرخه عمر و توسعه فرآیندهای سازگار با محیط زیست دارد.

نمونه منابع:

- Santander, P., et al. (2020).
- Wang, L., et al. (2020).
- Khorshidvand, R., et al. (2021).

۳. عملیات حلقه بسته و لجستیک معکوس

مطالعاتی درباره طراحی، بهینه‌سازی و پیاده‌سازی لجستیک معکوس و بازیافت محصولات چاپگر سه‌بعدی.

نمونه منابع:

- Chen, S., et al. (2023).
- Srinivasan, R., & Goel, R. (2021).
- Fakhrzad, M. B., & Goodarzian, F. (2019).

۴. بلاک‌چین و تحلیل داده

پژوهش‌هایی در زمینه به‌کارگیری فناوری بلاک‌چین و روش‌های داده‌محور برای شفافیت و کارایی زنجیره تأمین.

نمونه منابع:

- Ghahremani-Nahr, J., et al. (2020).
- Kumar, S., et al. (2021).
- Müller, M., & Schmid, M. (2024).

۵. ملاحظات اقتصادی و اجتماعی

بررسی آثار اقتصادی و اجتماعی زنجیره تأمین و تحلیل هزینه‌ها و پیامدهای اجتماعی آن.

نمونه منابع:

- Brown, T., et al. (2023).
- Luthin, M., et al. (2023).
- Bagheri, J. (2018).

۶. پیشرفت‌های تکنولوژیکی

مطالعات روی فناوری‌های نوین همچون تولید افزودنی، اینترنت اشیا و هوش مصنوعی.

نمونه منابع:

- Jones, P., et al. (2022).
- Kazancoglu, Y., et al. (2022).
- Smith, A., et al. (2021).

جدول شماره (۱): مرور ادبیات

ردیف	نویسندگان	سال انتشار	مدل ریاضی	حلقه بسته	سبز بودن	بررسی تقاضا	چند دوره ای	پرینتر سه بعدی	عدم قطعیت	روش حل
۱	Nazari Gooran, A., et al.	۲۰۲۰	تصادفی دو مرحله ای	✓	✓	✓	✓	–	✓	الگوریتم ژنتیک
۲	Khorshidvand, R., et al.	۲۰۲۱	NLP	✓	✓	✓	–	–	✓	الگوریتم آرامش لاگرانژی
۳	Fakhrzad, M. B., & Goodarzian, F.	۲۰۱۹	MILP	✓	✓	✓	✓	–	✓	روش خیمنز – ترابی هسینی
۴	Ahmadpour, L., & Mirzazadeh, A.	۲۰۱۵	MILP/MINLP	✓	–	✓	✓	–	✓	آزادسازی لاگرانژ–بهینه سازی استوار
۵	Morshedi, S.	۲۰۱۹	MINLP	–	✓	✓	–	–	–	لکسیکوگراف
۶	Bagheri, J.	۲۰۱۸	چند هدفه	✓	✓	✓	–	–	✓	LP-METRIC – رویکرد بهینه سازی استوار
۷	Kazancoglu, Y., & Ozkan-Ozen, Y. D.	۲۰۲۲	MILP	✓	✓	✓	–	–	✓	آرامش لاگرانژی
۸	Ghahremani-Nahr, J., et al.	۲۰۲۰	MIP	✓	✓	✓	✓	–	✓	الگوریتم ژنتیک
۹	Sazvar, Z., et al..	۲۰۲۱	MILP	✓		✓	✓	–	✓	LP-METRIC
۱۰	Liu, Z., et al.	۲۰۲۳	تصادفی دو مرحله‌ای ریسک‌گریز	✓	–	✓	–	–	✓	ازدحام ساده (SSO)، الگوریتم ژنتیک (GA) و (PSO)
۱۱	Jaryani, A., & Zegordi, S. H.	۲۰۲۱	MINLP	–	✓	✓	–	–	✓	رویکرد بهینه سازی استوار
۱۲	The Present Staudy	۲۰۲۵	MILP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	الگوریتم شبیه سازی تبرید و ژنتیک

با توجه به تحلیل شکاف‌های تحقیقاتی و طبقه‌بندی مطالعات پیشین، پژوهش حاضر می‌تواند با تمرکز بر موارد زیر به پر کردن شکاف‌های موجود کمک کند:

- توسعه مدل جامع: ارائه یک مدل جامع که همزمان به پیش‌بینی تقاضا، سبز بودن، حلقه بسته بودن، چند دوره‌ای بودن و ویژگی‌های خاص محصولات پرینتر سه‌بعدی توجه کند.
- بهبود روش‌های پیش‌بینی تقاضا: توسعه روش‌های پیش‌بینی تقاضا که بتوانند با تغییرات ناگهانی بازار و نوسانات تقاضا در صنعت پرینت سه‌بعدی مقابله کنند.
- ارزیابی اقتصادی استفاده از مواد پایدار: انجام تحلیل هزینه–فایده دقیق برای استفاده از مواد پایدار مانند بطری‌های PET بازیافتی در تولید فیلامنت‌های پرینت سه‌بعدی.
- توسعه چارچوب عملیاتی برای لجستیک معکوس: ارائه یک چارچوب عملیاتی برای پیاده‌سازی مؤثر لجستیک معکوس در زنجیره تأمین پرینترهای سه‌بعدی.

- بررسی کاربرد فناوری‌های نوظهور: بررسی امکان استفاده از فناوری‌های نوظهور مانند بلاک‌چین، یادگیری ماشین و اینترنت اشیا در بهبود کارایی زنجیره تأمین.
- ادغام معیارهای زیست‌محیطی و اقتصادی: توسعه روش‌هایی برای ادغام معیارهای زیست‌محیطی (مانند ردپای کربن) و اقتصادی در فرآیند تصمیم‌گیری.
- مطالعه موردی صنعت پرینتر سه بعدی : انجام مطالعه موردی برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی در یک محیط صنعتی.

پژوهش حاضر می‌تواند به طور قابل توجهی به پیشرفت دانش در زمینه طراحی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته برای محصولات پرینتر سه‌بعدی کمک کند و راه را برای تحقیقات آینده در این زمینه هموار سازد.

د) مبانی نظری پژوهش

۱) زنجیره تامین سبز

به مجموعه‌ای از فرآیندهایی که در مراحل طراحی، تولید، مصرف و بازیافت یک محصول به کار می‌رود و در آن تلاش می‌شود تا ضایعات به حداقل رسیده و انرژی‌های تجدیدپذیر جایگزین انرژی‌های تجدیدناپذیر شوند «زنجیره تأمین سبز» گفته می‌شود (Govindan & Malomfalean, 2024).

زنجیره تامین سبز شامل ادغام شیوه‌های دوست‌دار محیط زیست در زنجیره سنتی تامین با هدف دستیابی به توسعه پایدار است. با توجه به افزایش مسئولیت اجتماعی سازمان‌ها، تغییر در روش سنتی مدیریت زنجیره تأمین الزامی است. در این راستا، سبز شدن زنجیره تأمین و تلاش برای تحقق اهداف توسعه پایدار، از مهم‌ترین راهکارهای اجرایی محسوب می‌شود (Fazli-Khalaf et al., 2021).

زنجیره تأمین سبز به در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی در زنجیره تأمین سنتی سازمان اشاره دارد. این مفهوم تمام مراحل مرتبط با طراحی محصول، تأمین مواد اولیه، فرآیند تولید، تحویل محصول نهایی به مشتری، و مدیریت محصول پس از اتمام عمر مفید آن را شامل می‌شود (Fattahi, 2020). به طور خلاصه، زنجیره تأمین سبز فرآیندی است که در آن از ورودی‌های دوست‌دار محیط زیست استفاده می‌شود و این ورودی‌ها به خروجی‌هایی تبدیل می‌شوند که در پایان چرخه عمر، قابل اصلاح یا بازمصرف هستند (Fathollahi-Fard, 2018).

در پی چالش‌های زیست‌محیطی نظیر گرم شدن زمین، گسترش آلودگی‌ها و افزایش گازهای گلخانه‌ای که می‌توانند تهدیدی جدی برای بقای بشر به شمار آیند، حفاظت از محیط‌زیست و تدوین استراتژی‌های پایدار به‌سرعت به یکی از اولویت‌های اصلی سازمان‌ها بدل شد. این موضوع نه تنها به عنوان بخشی از مسئولیت اجتماعی سازمان‌ها مطرح گردید، بلکه در قالب نوآوری‌هایی راهبردی در فرآیندهای مدیریتی نمود یافت. از آنجا که سازمان‌ها موظف بودند ضمن حفظ سودآوری و مزیت رقابتی، اثرات زیست‌محیطی و ضایعات تولید را کاهش دهند، *مفهوم* زنجیره تأمین سبز شکل گرفت. این رویکرد به سرعت توانست نگاه‌ها را به خود معطوف کرده و نقش مهمی در ایجاد تعادل میان توسعه پایدار و نیازهای رقابتی ایفا کند (Fakhrzad & Goodarzian, 2019).

۲) استراتژی زنجیره تامین سبز

پورتر در استراتژی زنجیره تأمین سبز، سه استراتژی عمده شامل تمایز، تمرکز و کاهش *هزینه* را به عنوان راهبردهای کلی برای دستیابی به مزیت رقابتی پایدار معرفی کرده است. او اظهار می‌دارد که شرکت‌هایی که به طور همزمان از دو استراتژی تمایز و کاهش هزینه استفاده می‌کنند، موفقیت بیشتری در کسب مزیت رقابتی خواهند داشت.

استراتژی‌های زنجیره تأمین به دو دسته کلی پاسخگویی و کارایی تقسیم می‌شوند. زنجیره تأمین سبز با ترکیب این دو استراتژی، از یک سو با بهره‌گیری از مزایایی مانند صرفه‌جویی در مصرف منابع، انرژی، اشتغال بهینه انبارها، جلوگیری از حمل‌ونقل مازاد، کاهش آلودگی و استفاده از مواد خام سازگار با محیط زیست، کارایی را افزایش داده و هزینه‌ها را کاهش می‌دهد؛ از سوی دیگر، با معرفی نوآوری در طراحی و تولید محصولات سبز و قابل بازیافت، ضمن کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی، پاسخگویی را تقویت می‌کند و تمایز را به همراه دارد.

ترکیب هم‌زمان این دو استراتژی، یعنی کاهش هزینه‌ها از طریق کارایی و ایجاد تمایز از طریق پاسخگویی، امکان دستیابی به مزیت رقابتی پایدار را برای شرکت‌ها فراهم می‌کند (Das et al., 2020).

۳) اهمیت زنجیره تامین حلقه بسته

زنجیره تامین حلقه بسته رویکرد غالب در مدیریت تولید عصر حاضر است. در اقتصاد امروز، موفقیت بلندمدت هر سازمان نه تنها به سودآوری آن بستگی دارد بلکه به دیدگاه سازمان نسبت به آینده بشر و زمینه وابسته است. توجه به مسائل زیست‌محیطی می‌تواند موفقیت زنجیره تامین و مزیت رقابتی را در بلندمدت تضمین کند (Das et al., 2020).

محصولات معیوب و ضایعات همواره یک چالش مهم برای تولیدکنندگان بوده است. آنها دریافته‌اند که بازیافت کالا و استفاده مجدد از محصولات، ضایعات و بقایای محصولات نه تنها باعث کاهش اثرات زیان‌آور برای محیط زیست می‌شود، بلکه جایگاه رقابتی آنها در بازار را بهبود می‌بخشد. با این استراتژی می‌توان به‌طور قابل توجهی شبکه‌های زنجیره تامین را بازسازی کرده و مزایای اقتصادی را حداکثر نمود (de Melo Sathler et al., 2019).

از این منظر تلاش‌ها در زمینه فعالیت‌های بازیافتی و لجستیکی موجب شده تا سازمان‌ها بر بسته شدن حلقه زنجیره تامین و ایجاد زنجیره تامین حلقه بسته متمرکز شوند. این ساختار می‌تواند همزمان اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی سازمان را محقق سازد. زنجیره تامین حلـقه بسته هر دو جریان مستقیم و معکوس را در بر می‌گیرد که در طول دو دهه گذشته توجه متخصصان مدیریت تولید را به خود جلب کرده است (Eriksson, 2023).

۴) پیش بینی تقاضا

تقاضا به معنی داشتن تمایل و توانایی برای خرید کالا یا خدمت است؛ مثل این که در ساعت اخیر، هزار نفر در سراسر ایران یا صد نفر در سایت دیجی‌کالا متقاضی خرید یک مدل خاص از لپتاپ باشند. زیاد بودن تقاضا فرصت خوبی برای عرضه‌کنندگان است، زیرا بدون نگرانی از فروخته نشدن محصولاتشان، ظرفیت تولید را افزایش می‌دهند و به سود بیشتری می‌رسند. ضمن این که در بازارهای رقابتی، افزایش تقاضا نسبت به عرضه باعث رشد قیمت تعادلی محصول در بازار می‌شود (Hosseini-Motlagh et al., 2024).

اما مقدار تقاضا ثابت نمی‌ماند و به مرور در بازارهای مختلف تغییر می‌کند. پیش‌بینی تقاضا به معنی تخمین زدن مقدار تقاضا در زمان آینده است، مثل این که پیش‌بینی کنیم فردا تعداد افرادی که در پاساژ پایتخت ولیعصر برای خرید یک مدل خاص از لپتاپ مراجعه می‌کنند ۲۰٪ کم‌تر از امروز خواهد بود، یا تخمین بزنیم با افزایش ده درصدی قیمت لپتاپ، تقاضا برای آن ۲۱٪ کاهش می‌یابد. با پیش‌بینی تقاضا می‌توانیم برای آینده برنامه‌ریزی کنیم. مثلاً اگر بدانیم تقاضا برای محصول‌مان قرار است به شکل مستمر و پایدار افزایش یابد، برای افزایش ظرفیت تولید و بهره‌برداری از این فرصت برنامه‌ریزی می‌کنیم (Rezayat et al., 2024).

هدف اصلی پیش‌بینی تقاضا، شناسایی دقیق نیازهای آینده بازار و کمک به تصمیم‌گیری بهتر در مدیریت زنجیره تامین است. با این کار، شرکت‌ها می‌توانند موجودی را بهینه کنترل کنند، تولید را مطابق نیاز واقعی برنامه‌ریزی نمایند، قیمت‌گذاری مناسبی انجام دهند و برنامه‌های بازاریابی مؤثرتری داشته باشند. پیش‌بینی تقاضا در این پژوهش به صورت سناریوهای مختلف و با لحاظ عدم قطعیت انجام شده تا باعث کاهش هزینه‌ها، بهبود خدمات و کاهش ضایعات و آثار زیست‌محیطی شود.

۵) پرینتر سه بعدی

پرینت سه بعدی فرآیندی است که از طراحی به کمک کامپیوتر یا CAD برای ایجاد اشیاء لایه به لایه استفاده می‌کند. پرینت سه بعدی معمولاً در صنایع تولیدی و خودروسازی استفاده می‌شود، جایی که ابزارها و قطعات با استفاده از چاپگرهای سه بعدی ساخته می‌شوند (Alizadeh et al., 2020).

همانطور که قابلیت‌های چاپ سه بعدی همچنان در حال رشد است، ارزش آن نیز افزایش می‌یابد.تخمین زده می‌شود تا سال ۲۰۲۹، صنعت چاپ سه بعدی به ارزش ۸۴ میلیارد دلار برسد. این رشد به این معنی است که ما ملزم به تعامل با محصولات و حتی خانه‌ها و ساختمان‌های ساخته شده با پرینت سه بعدی هستیم.

پرینت سه بعدی نیز صنعت مراقبت‌های بهداشتی را تکان می‌دهد. در سال ۲۰۲۰، همه‌گیری Covid-19 بیمارستان‌ها را تحت تأثیر قرار داد و نیاز به تجهیزات حفاظت فردی را افزایش داد. بسیاری از مراکز مراقبت‌های بهداشتی به پرینت سه بعدی روی آوردند تا کارکنان خود را با تجهیزات حفاظتی بسیار مورد نیاز و همچنین قطعات تعمیر ونتیلاتور خود تامین کنند (Alinaghian et al., 2021).

پرینترهای سه بعدی بر خلاف پرینتر های معمولی که چیزی را روی کاغذ و به صورت دوبعدی چاپ میکنند؛ میتواند با استفاده از متریال مخصوص اجسام را به صورت سه بعدی پرینت بگیرد. این متریال ممکن است پلاستیک ذوب شده یا یک نوع پودر باشد که با استفاده از CAD هر جسمی را در شکل و اندازه های مختلف میکند.

این تکنولوژی در اکثر صنایع از اهمیت بالایی برخوردار است و به سرعت در حال همه گیری است. به طوری که قبل از ساخت یک ساختمان بزرگ یا یک ماشین جدید با استفاده از پرینتر های سه بعدی یک مدل از آن را میسازند. با این روش به راحتی میتوانند از ضعف های کار خود آگاه شوند بدون اینکه هزینه و زمان زیادی برای آن هدر بدهند (Abazari et al., 2021).

۳- بحث و نتایج

پژوهش حاضر به منظور طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته با در نظر گرفتن پیش‌بینی تقاضا برای محصولات پرینتر سه بعدی انجام شده است. این تحقیق با رویکردی کاربردی–توسعه‌ای و به صورت مرحله‌ای انجام گردیده که در ادامه به تشریح مراحل مختلف آن می‌پردازیم:

الف) معرفی شبکه CLSC پیشنهادی

در این پژوهش، یک شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته (CLSC) برای محصولات پرینتر سه بعدی طراحی شده است. هدف اصلی این شبکه، استفاده از بطری‌های PET بازیافتی برای تولید فیلامنت‌های پرینتر سه بعدی است که منجر به کاهش هزینه‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌گردد.

در سال‌های اخیر علاقه زیادی به استفاده از فناوری‌های پرینتر سه‌بعدی وجود داشته است که مزیت‌های رقابتی مانند صرفه‌جویی در زمان، سفارشی‌سازی و کیفیت رضایت‌بخش را فراهم می‌کند. با این حال، یکی از چالش‌های اصلی در این صنعت، قیمت بالای فیلامنت‌های تولیدی است که می‌تواند بر میزان مصرف این محصول تأثیر منفی بگذارد.

استفاده از مواد بازیافتی مانند بطری‌های PET برای تولید فیلامنت، راهکاری مؤثر برای کاهش هزینه‌ها و همچنین کاهش اثرات زیست‌محیطی است. این رویکرد نه تنها به تبدیل ضایعات به محصولات با ارزش می‌انجامد، بلکه مشکلات زیست‌محیطی را نیز کاهش می‌دهد.

معماری هشت سطحی شبکه

شبکه CLSC طراحی شده (شکل ۱) ترکیبی از دو شبکه فرعی است و از هشت سطح تشکیل شده است:

مرکز پرینتر سه بعدی (DPC)**:** مراکزی که عملیات چاپ سه بعدی در آنها انجام می‌شود. این مراکز فیلامنت‌های دریافتی از مراکز بازیافت را برای تولید محصولات نهایی استفاده می‌کنند.

مرکز درمان (TC)**:** مراکزی که فرآیند بازیافت و تبدیل ضایعات به مواد قابل استفاده را انجام می‌دهند. این مراکز ضایعات فرآیند چاپ و محصولات برگشتی را دریافت کرده و آنها را برای استفاده مجدد آماده می‌سازند.

مرکز بازیافت (RC): مراکزی که به تولید رشته‌های پرینتر سه بعدی از مواد بازیافتی می‌پردازند. این مراکز مواد اولیه را از مراکز درمان دریافت کرده و فیلامنت‌های قابل استفاده در پرینترهای سه بعدی تولید می‌کنند.

مشتری رشته (FC)**:** مصرف‌کنندگان نهایی محصولات چاپ سه بعدی که محصولات تولید شده را از مراکز پرینتر سه بعدی دریافت می‌کنند و ممکن است بخشی از محصولات را به دلایل مختلف بازگردانند.

مرکز پردازش (PC)**:** مراکزی که بطری‌های PET را مرتب‌سازی و فشرده‌سازی می‌کنند. این مراکز بطری‌های جمع‌آوری شده را پس از جداسازی مواد اضافی به بسته‌های فشرده (عدل) تبدیل می‌کنند.

مرکز جمع‌آوری (CC)**:** مراکزی که به جمع‌آوری بطری‌های PET از کاربران نهایی می‌پردازند. این مراکز اولین نقطه تماس در جریان معکوس هستند که بطری‌های مصرف شده را از کاربران دریافت می‌کنند.

بازارها (شرکت‌های بازیافت)**:** خریداران عمده مواد بازیافتی که بخشی از بطری‌های پردازش شده را برای مصارف دیگر خریداری می‌کنند.

کاربران نهایی**:** مصرف‌کنندگانی که بطری‌های PET را مصرف کرده و آنها را به مراکز جمع‌آوری تحویل می‌دهند.

جریان مواد در شبکه

جریان مواد در این شبکه به دو صورت مستقیم و معکوس طراحی شده است:

جریان مستقیم:

فیلامنت‌ها (رشته‌ها) از مراکز بازیافت به مراکز پرینتر سه بعدی منتقل می‌شوند.

محصولات چاپ شده از مراکز پرینتر سه بعدی به مشتریان ارسال می‌شوند.

جریان معکوس:

ضایعات فرآیند چاپ از مراکز پرینتر سه بعدی به مراکز درمانی ارسال می‌شوند.

بخشی از محصولات برگشتی از مشتریان به مراکز درمانی فرستاده می‌شوند.

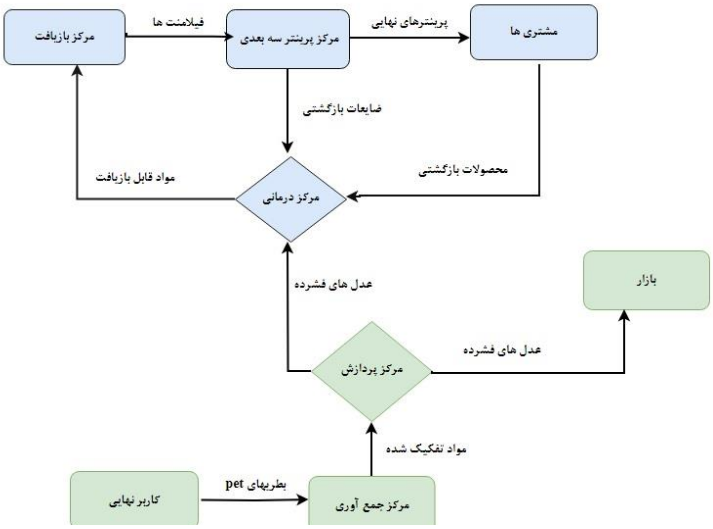
بطری‌های PET از کاربران نهایی به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شوند.

بطری‌های جمع‌آوری شده پس از جداسازی مواد اضافی به مراکز پردازش فرستاده می‌شوند.

بطری‌های پردازش شده و فشرده‌شده (عدل‌ها) به بازارها و مراکز درمانی منتقل می‌شوند.

این چرخه بسته مواد، امکان استفاده مجدد از منابع را فراهم می‌کند و با کاهش نیاز به مواد خام جدید، به کاهش اثرات زیست‌محیطی و هزینه‌های تولید کمک می‌کند.

برای بهینه‌سازی این شبکه، یک مدل ریاضی به فرم برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) توسعه داده شده که هدف آن کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های ثابت، حمل‌ونقل و انتشار کربن است. مدل پیشنهادی با رویکرد چند سناریویی، عدم قطعیت در پیش‌بینی تقاضا را نیز در نظر می‌گیرد و برای هر سناریو احتمال وقوع مشخصی تعریف شده است.



شکل شماره (۱): شبکه CLSC پرینتر سه بعدی پیشنهادی

در این پژوهش، یک مدل ریاضی به فرم برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) برای طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته با هدف استفاده از بطری‌های PET بازیافتی برای تولید فیلامنت‌های مورد استفاده در پرینترهای سه بعدی ارائه شده است. مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی تقاضا و با هدف کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های ثابت، حمل‌ونقل و انتشار کربن، به دنبال ارائه راهکاری کارآمد برای صنعت پرینت سه‌بعدی است.

ب) مفروضات مدل پیشنهادی:

مفروضات اصلی مدل زنجیره تامین سبز حلقه بسته برای محصولات پرینتر سه بعدی به شرح زیر است:

- شبکه زنجیره تامین از هشت سطح مختلف تشکیل شده و جریان مواد در آن به دو صورت مستقیم و معکوس طراحی شده است. هدف اصلی شبکه، استفاده از بطری‌های PET بازیافتی برای تولید فیلامنت‌های پرینتر سه بعدی است که منجر به کاهش هزینه‌ها و آلودگی‌های زیست‌محیطی می‌گردد.
- تابع هدف مدل، کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های ثابت، حمل‌ونقل و انتشار کربن است. عدم قطعیت در پیش‌بینی تقاضا با رویکرد چند سناریویی در نظر گرفته شده و برای هر سناریو، احتمال وقوع مشخصی (δ_s) تعیین شده است.
- هر یک از مراکز دارای ظرفیت مشخص و محدودی هستند. درصد مشخصی از محصولات (α) از مشتریان به سیستم برمی‌گردد و ضریب تبدیل مشخصی (β) برای تبدیل بطری‌های PET به فیلامنت پرینتر سه بعدی وجود دارد.
- هر مشتری دقیقاً به یک مرکز پرینتر سه بعدی و یک مرکز درمانی تخصیص می‌یابد و هر کاربر نهایی دقیقاً به یک مرکز جمع‌آوری تخصیص می‌یابد. تعادل جریان در تمام
  گره‌های شبکه باید حفظ شود.

ج) مجموعه‌ها، اندیس‌ها و پارامترها

در مدل پیشنهادی، تعریف اندیس‌ها، مجموعه‌ها و پارامترهای مرتبط با تقاضا، ظرفیت ها، هزینه ها و ... در جداول زیر تشریح گردیده است.

جدول شماره (۱): پارامترهای مرتبط با پیش بین تقاضا

پارامتر	تعریف
Dns	تقاضای پیش‌بینی شده مشتری n در سناریو s
Des	تقاضای پیش‌بینی شده (میزان بطری PET قابل جمع‌آوری) از کاربر نهایی e در سناریو s
δ_s	احتمال وقوع سناریو s
α	درصد محصولات برگشتی از مشتریان
β	ضریب تبدیل بطری PET به رشته پرینتر سه بعدی

جدول شماره (۳): مجموعه ها و اندیس ها

اندیس ها	تعریف	مجموعه
i∈I	مجموعه مراکز پرینتر سه بعدی	I
j∈J	مجموعه مراکز درمانی	J
k∈K	مجموعه مراکز بازیافت	K
t∈T	مجموعه مراکز پردازش	T
l∈L	مجموعه مراکز جمع‌آوری	L
n∈N	مجموعه مشتریان رشته	N
m∈M	مجموعه بازارها	M
e∈E	مجموعه کاربران نهایی	E
s∈S	مجموعه سناریوهای پیش‌بینی تقاضا	S

جدول شماره (۲): پارامترهای مرتبط با ظرفیت و انتشار کربن

تعریف	پارامتر	تعریف	پارامتر
ظرفیت مرکز پرینتر سه بعدی i	Capi	هزینه انتشار کربن برای تولید هر واحد رشته از مرکز بازیافت k به مرکز پرینتر سه بعدی i	EC_{ki}
ظرفیت مرکز درمانی j	Capj	هزینه انتشار کربن برای حمل هر واحد ضایعات از مرکز پرینتر سه بعدی i به مرکز درمانی j	EC_{ij}
ظرفیت مرکز بازیافت k	Capk	هزینه انتشار کربن برای حمل هر واحد محصول از مرکز پرینتر سه بعدی i به مشتری n	EC_{in}
ظرفیت مرکز پردازش t	Capt	هزینه انتشار کربن برای حمل هر واحد محصول برگشتی از مشتری n به مرکز درمانی j	EC_{nj}
ظرفیت مرکز جمع‌آوری l	Capl	هزینه انتشار کربن برای حمل هر واحد بطری PET از کاربر نهایی e به مرکز جمع‌آوری l	EC_{el}
یک عدد بزرگ مثبت	M	هزینه انتشار کربن برای حمل هر واحد بطری PET از مرکز جمع‌آوری l به مرکز پردازش t	EC_{lt}
قیمت هر واحد انتشار کربن	Pcarbon	هزینه انتشار کربن برای حمل هر واحد عدل از مرکز پردازش t به بازار m	EC_{tm}
		هزینه انتشار کربن برای حمل هر واحد عدل از مرکز پردازش t به مرکز درمانی j	EC_{tj}

جدول شماره (۳): پارامترهای مرتبط با هزینه

تعریف	پارامتر	تعریف	پارامتر
هزینه ارسال هر واحد ضایعات از مرکز پرینتر سه بعدی i به مرکز درمانی j	SC_{ij}	هزینه ثابت احداث مرکز پرینتر سه بعدی i	FC_i
هزینه حمل و نقل هر واحد محصول از مرکز پرینتر سه بعدی i به مشتری n	TC_{in}	هزینه ثابت احداث مرکز درمانی j	FC_j
هزینه حمل و نقل هر واحد محصول برگشتی از مشتری n به مرکز درمانی j	TC_{nj}	هزینه ثابت احداث مرکز بازیافت k	FC_k
هزینه حمل و نقل هر واحد بطری PET از کاربر نهایی e به مرکز جمع‌آوری l	TC_{el}	هزینه ثابت احداث مرکز پردازش t	FC_t
هزینه حمل و نقل هر واحد بطری PET از مرکز جمع‌آوری l به مرکز پردازش t	TC_{lt}	هزینه ثابت احداث مرکز جمع‌آوری l	FC_l
هزینه حمل و نقل هر واحد عدل از مرکز پردازش t به بازار m	TC_{tm}	هزینه فرآوری هر واحد در مرکز درمانی j	RC_j
هزینه حمل و نقل هر واحد عدل از مرکز پردازش t به مرکز درمانی j	TC_{tj}	هزینه جمع‌آوری هر واحد بطری PET از کاربر نهایی e	CC_e
		هزینه تولید هر واحد رشته از مرکز بازیافت k به مرکز پرینتر سه بعدی i	PC_{ki}

جدول شماره (۴): متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم پیوسته		متغیرهای تصمیم باینری	
تعریف	متغیر	تعریف	متغیر
مقدار رشته ارسالی از مرکز بازیافت k به مرکز پرینتر سه بعدی i در سناریو s	xkis	اگر مرکز پرینتر سه بعدی i احداث شود ۱، در غیر این صورت ۰	yi
مقدار ضایعات ارسالی از مرکز پرینتر سه بعدی i به مرکز درمانی j در سناریو s	xijs	اگر مرکز درمانی j احداث شود ۱، در غیر این صورت ۰	yj
مقدار محصول ارسالی از مرکز پرینتر سه بعدی i به	xins	اگر مرکز بازیافت k احداث شود ۱، در غیر این صورت ۰	yk

		مشتری n در سناریو s	
yt	اگر مرکز پردازش t احداث شود ۱، در غیر این صورت ۰	xnjs	مقدار محصول برگشتی از مشتری n به مرکز درمانی j در سناریو s
yl	اگر مرکز جمع‌آوری l احداث شود ۱، در غیر این صورت ۰	xels	مقدار بطری PET ارسالی از کاربر نهایی e به مرکز جمع‌آوری l در سناریو s
zin	اگر مشتری n به مرکز پرینتر سه بعدی i تخصیص یابد ۱، در غیر این صورت ۰	xlts	مقدار بطری PET ارسالی از مرکز جمع‌آوری l به مرکز پردازش t در سناریو s
znj	اگر مشتری n به مرکز درمانی j تخصیص یابد ۱، در غیر این صورت ۰	xtms	مقدار عدل ارسالی از مرکز پردازش t به بازار m در سناریو s
zel	اگر کاربر نهایی e به مرکز جمع‌آوری l تخصیص یابد ۱، در غیر این صورت ۰	xtjs	مقدار عدل ارسالی از مرکز پردازش t به مرکز درمانی j در سناریو s

د) تابع هدف و محدودیت ها

تابع هدف مدل به صورت کمینه‌سازی مجموع هزینه‌های مورد انتظار در تمام سناریوهای پیش‌بینی تقاضا تعریف می‌شود:
که این تابع هدف شامل چهار بخش اصلی هزینه‌های ثابت احداث مراکز، هزینه‌های تولید و فرآوری ، هزینه‌های حمل و نقل وهزینه‌های انتشار کربن است.

$$\min z = \sum_{s\in S} \delta_S (f_1 + f_2 + f_3)$$

$$f_1 = \sum_{i\in I} FC_i . y_i + \sum_{j\in J} FC_j . y_j + \sum_{k\in K} FC_k . y_k + \sum_{t\in T} FC_t . y_t + \sum_{l\in L} FC_l . y_l$$

$$f_2 = \sum_k \sum_i PC_{ki} . x_{kis} + \sum_i \sum_j SC_{ij} . x_{ijs} + \sum_i \sum_n TC_{in} . x_{ins} + \sum_n \sum_j TC_{nj} . x_{njs}$$
$$+ \sum_e \sum_l TC_{el} . x_{els} + \sum_l \sum_t TC_{lt} . x_{lts} + \sum_t \sum_m TC_{tm} . x_{tms} + \sum_t \sum_j TC_{tj} . x_{tjs} + \sum_e \sum_l CC_e . x_{els} + \sum_j RC_j . (\sum_i x_{ijs} + \sum_n x_{njs} + \sum_t x_{tjs})$$

$$f_3 = p_{carbon} . (\sum_k \sum_i EC_{ki} . x_{kis} + \sum_i \sum_j EC_{ij} . x_{ijs} + \sum_i \sum_n EC_{in} . x_{ins}$$
$$+ \sum_n \sum_j EC_{nj} . x_{njs} + \sum_e \sum_l EC_{el} . x_{els} + \sum_l \sum_t EC_{lt} . x_{lts} + \sum_t \sum_m EC_{tm} . x_{tms} + \sum_t \sum_j EC_{tj} . x_{tjs})$$

محدودیت ها:

$$1) \sum_{i\in I} x_{ins} = D_{ns} \forall n \in N, s \in S$$
$$2) \sum_{l\in L} x_{els} = D_{es} \forall e \in E, s \in S$$
$$3) \sum_{n\in N} x_{ins} \le cap_i . y_i \forall i \in I, s \in S$$
$$4) \sum_{i\in I} x_{ijs} + \sum_{n\in N} x_{njs} + \sum_{t\in T} x_{tjs} \le cap_j . y_j \forall j \in J, s \in S$$
$$5) \sum_{i\in I} x_{kis} \le cap_k . y_k \forall k \in K, s \in S$$
$$6) \sum_{l\in L} x_{lts} \le cap_t . y_t \forall t \in T, s \in S$$
$$7) \sum_{e\in E} x_{els} \le cap_i . y_l \forall l \in L, s \in S$$
$$8) \sum_{k\in K} x_{kis} = \sum_{n\in N} x_{ins} + \sum_{j\in J} x_{ijs} \forall i \in I, s \in S$$
$$9) \sum_{e\in E} x_{els} = \sum_{t\in T} x_{lts} \forall l \in L, s \in S$$
$$10) \sum_{l\in L} x_{lts} = \sum_{m\in M} x_{tms} + \sum_{j\in J} x_{tjs} \forall t \in T, s \in S$$
$$11) \sum_{j\in J} x_{njs} = \alpha . D_{ns} \forall n \in N, s \in S$$
$$12) \sum_{i\in I} x_{kis} = \beta . (\sum_{j\in J} \sum_{n\in N} x_{njs} + \sum_{t\in T} \sum_{j\in J} x_{tjs}) \forall k \in K, s \in S$$
$$13) \sum_{i\in I} z_{in} = 1 \forall n \in N$$
$$14) \sum_{j\in J} z_{nj} = 1 \forall n \in N$$
$$15) \sum_{l\in L} z_{el} = 1 \forall e \in E$$

$$16) x_{ins} \le M.z_{in} \forall i \in I, n \in N, s \in S$$
$$17) x_{njs} \le M.z_{nj} \forall n \in N, j \in J, s \in S$$
$$18) x_{els} \le M.z_{el} \forall e \in E, l \in L, s \in S$$
$$19) x_{kis}, x_{ijs}, x_{ins}, x_{njs}, x_{els}, x_{lts}, x_{tms}, x_{tjs} \ge .\forall k, i, j, n, e, l, t, m, s$$
$$20) y_i, y_j, y_k, y_t, y_l, z_{in}, z_{nj}, z_{el} \in \{0.1\} \forall i, j, k, t, l, n, e$$

محدودیت‌های مدل بشرح زیرند:

محدودیت ۱: تضمین تأمین کامل نیاز نقاط تولید

این محدودیت اطمینان می‌دهد که تمام تقاضای مواد اولیه در نقاط تولید برای هر مقصد به طور کامل تأمین می‌شود. این امر از بروز کمبود در خطوط تولید جلوگیری می‌کند.

محدودیت ۲: تطابق دقیق جریان محصول با تقاضای مشتریان

این محدودیت تضمین می‌کند که محصولات ارسالی از مراکز لجستیک به مراکز توزیع دقیقاً برابر با میزان تقاضای مشتریان باشد. این محدودیت از تولید مازاد یا کمبود محصول جلوگیری می‌کند.

محدودیت‌های ۳ تا ۷: رعایت محدودیت‌های ظرفیت تسهیلات

این گروه از محدودیت‌ها تضمین می‌کنند که میزان جریان مواد و محصولات در هر گره از شبکه (مراکز تولید، انبارها، مراکز توزیع و بازیافت) از ظرفیت تعیین‌شده برای آنها فراتر نرود. این محدودیت‌ها برای اطمینان از قابلیت عملیاتی شدن طرح زنجیره تأمین ضروری هستند.

محدودیت‌های ۸ تا ۱۰: حفظ تعادل ورودی و خروجی مواد

این محدودیت‌ها تضمین می‌کنند که در هر گره از شبکه، میزان مواد ورودی با مواد خروجی در تعادل باشد. به عبارت دیگر، قانون بقای جرم در سیستم رعایت شده و از انباشتگی یا کمبود غیرمنطقی مواد در گره‌های شبکه جلوگیری می‌شو

محدودیت ۱۱ تا ۱۵: بهینه‌سازی الگوی توزیع و ارتباط در شبکه

این محدودیت‌ها الگوی ارتباط بین گره‌های مختلف شبکه را تنظیم می‌کنند و به ساده‌سازی طراحی شبکه و کاهش پیچیدگی‌های عملیاتی کمک می‌کنند.

محدودیت‌های ۱۶ تا ۱۸: تضمین جریان فقط در مسیرهای فعال

این محدودیت‌ها تضمین می‌کنند که جریان کالا تنها در مسیرهایی برقرار باشد که در طراحی شبکه فعال شده‌اند.

محدودیت ۱۹: غیرمنفی بودن متغیرهای جریان

این محدودیت تضمین می‌کند که تمام متغیرهای مربوط به جریان مواد و محصولات مقادیر غیرمنفی داشته باشند، زیرا جریان منفی از نظر فیزیکی غیرممکن است.

محدودیت ۲۰: باینری بودن متغیرهای تصمیم‌گیری

این محدودیت تضمین می‌کند که متغیرهای مربوط به تصمیم‌گیری درباره فعال‌سازی تسهیلات و مسیرها، فقط مقادیر صفر یا یک (خیر یا بله) داشته باشند. این محدودیت برای تصمیمات مربوط به احداث تسهیلات یا برقراری ارتباط بین گره‌های شبکه ضروری است.

این مدل ریاضی یک چارچوب جامع برای طراحی و بهینه‌سازی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته برای محصولات پرینتر سه بعدی ارائه می‌دهد. به دلیل پیچیدگی محاسباتی بالای این مدل(NP-hard) ، از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند الگوریتم ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید برای حل آن استفاده می‌شود که در بخش‌های بعدی به تفصیل توضیح داده خواهند شد.

ه) الگوریتم‌های حل مدل

برای حل مدل بهینه‌سازی فوق که یک مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP) است، از دو روش فراابتکاری استفاده شده است:

۱. الگوریتم ژنتیک (GA):

الگوریتم ژنتیک در این مدل یک روش فراابتکاری قدرتمند برای بهینه‌سازی شبکه پیچیده زنجیره تأمین است که شامل تصمیمات استراتژیک مکان‌یابی تسهیلات و تصمیمات تاکتیکی جریان مواد می‌شود. این الگوریتم با الهام از فرآیند تکامل طبیعی، راه‌حل‌های نزدیک به بهینه را برای این مسئله چندهدفه و پیچیده ارائه می‌دهد.

کدگذاری کروموزوم ها

هر کروموزوم از دو بخش اصلی تشکیل شده است:

بخش باینری: شامل متغیرهای تصمیم باینری برای مکان‌یابی مراکز مختلف (پرینتر سه‌بعدی، درمانی، بازیافت، پردازش و جمع‌آوری) و تخصیص (ارتباط بین مشتریان، کاربران نهایی و مراکز)

متغیرهای yi، yj، yk، yt، yl برای نمایش احداث یا عدم احداث مراکز مختلف

متغیرهای zin، znj، zel برای نمایش تخصیص مشتریان و کاربران نهایی به مراکز مختلف

بخش پیوسته: شامل متغیرهای تصمیم حقیقی برای تعیین مقادیر جریان مواد بین مراکز مختلف در سناریوهای مختلف

متغیرهای xkis، xijs، xins، xnjs، xels، xlts، xtms، xtjs برای نمایش مقادیر جریان مواد بین مراکز مختلف در سناریوهای مختلف

چرخه اجرای الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک با ایجاد جمعیت اولیه از راه‌حل‌های تصادفی معتبر آغاز می‌شود که شامل متغیرهای باینری برای مکان‌یابی و تخصیص و متغیرهای پیوسته برای جریان مواد است. سپس برازندگی هر کروموزوم براساس تابع هدف (کمینه‌سازی هزینه‌ها) محاسبه می‌شود. در مرحله بعد، والدین با روش چرخ رولت انتخاب شده و عملیات تقاطع (یک یا دو نقطه‌ای برای بخش باینری و حسابی برای بخش پیوسته) و جهش (با احتمال کم) روی آنها اعمال می‌شود. کروموزوم‌های جدید با مکانیزم‌های اصلاح و ترمیم، معتبر می‌شوند تا محدودیت‌های مسئله را رعایت کنند. در نهایت با استفاده از راهبرد نخبه‌گرایی، بهترین کروموزوم‌ها به نسل بعد منتقل می‌شوند. این چرخه تا رسیدن به شرط توقف (تعداد نسل مشخص یا عدم بهبود در چند نسل متوالی) ادامه می‌یابد

۲. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA):

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (Simulated Annealing) یک روش فراابتکاری قدرتمند است که از فرآیند فیزیکی تبرید فلزات در علم متالورژی الهام گرفته شده است. در این فرآیند، فلز ابتدا تا دمای بسیار بالا گرم می‌شود و سپس به تدریج سرد می‌شود تا به یک ساختار بلوری با حداقل انرژی (بهینه) برسد. مشابه این فرآیند، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در جستجوی راه‌حل بهینه یا نزدیک به بهینه در فضای جستجوی وسیع مانند مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی و پیوسته عمل می‌کند.

اصل اساسی این الگوریتم، امکان پذیرش موقت راه‌حل‌های ضعیف‌تر با یک احتمال مشخص است که به الگوریتم اجازه می‌دهد از بهینه‌های محلی فرار کرده و به سمت بهینه سراسری حرکت کند. این احتمال با کاهش پارامتر دما (T) به تدریج کاهش می‌یابد.

فرمول ۱ (محاسبه دمای اولیه)

$$to = \Delta f_{\min} + 0.1(\Delta f_{\max} - \Delta f_{\min})$$

- T_0: دمای اولیه
- Δf_min: حداقل تغییر در تابع هدف
- Δf_max: حداکثر تغییر در تابع هدف

این فرمول از دامنه تغییرات تابع هدف برای تعیین دمای اولیه استفاده می‌کند.

فرمول ۲ (تعدیل دما)

$$t_i = t_0 - ix\left(\frac{t_0 - t_f}{n}\right)(i = 1.....,n)$$

- t_i: دمای در مرحله i
- t_{i-1}: دمای در مرحله قبلی (i-1)
- ix: ضریبی که در مسئله تعریف می‌شود
- T_0- t_f: دمای نهایی
- n: تعداد مراحل

فرمول ۳ (تعدیل دما)

$$t_i = t_0 - \left(\frac{(t_0 - t_f)(n+1)}{n}\left(1 - \frac{1}{(j+1)}\right)(i = 1....,n)\right.$$

- t_i: دمای در مرحله i
- t_{i-1}: دمای در مرحله قبلی (i-1)
- T_0- t_f: دمای نهایی
- n: تعداد مراحل
- j: شمارنده

فرمول ۴ (تعدیل دما)

$$t_i = \frac{1 - tgh\left(\left(\frac{10i}{n}\right) - 5\right.}{2}(t_0 - t_f) + t_f\ (i = 1.....,n)$$

- t_i: دمای در مرحله i
- t_0: دمای اولیه
- T_0-t_f: دمای نهایی
- n: تعداد مراحل
- tanh: تابع تانژانت هیپربولیک

این فرمول از تابع تانژانت هیپربولیک برای کاهش دما استفاده می‌کند که باعث کاهش سریع‌تر دما در ابتدا و کاهش آهسته‌تر در انتها می‌شود.

و) مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها

جدول ۱ مقایسه نتایج ارائه شده، عملکرد دو روش فراابتکاری الگوریتم ژنتیک (GA) و شبیه‌سازی تبرید (SA) را در حل مسائل مختلف با اندازه‌های متفاوت برای مدل برنامه‌ریزی خطی مختلط عدد صحیح (MILP) زنجیره تأمین سبز حلقه بسته نشان می‌دهد. این جدول چندین معیار عملکردی مهم را برای هر الگوریتم در ۲۴ مسئله آزمایشی با پیچیدگی‌های مختلف اندازه‌گیری کرده است.

معیارهای اصلی مقایسه در جدول

۱. هزینه کل: مقدار تابع هدف بهینه‌شده که نشان‌دهنده کل هزینه‌های سیستم زنجیره تأمین است (بر حسب ریال).
۲. زمان محاسبات: مدت زمان لازم برای رسیدن به راه‌حل نهایی (بر حسب ثانیه).
۳. درصد انحراف نسبی (RPD): نشان‌دهنده فاصله نسبی راه‌حل الگوریتم از بهترین راه‌حل شناخته شده است.

RPD = (هزینه راه‌حل الگوریتم − هزینه بهترین راه‌حل) / هزینه بهترین راه‌حل × ۱۰۰٪

زمان ضربه (Hit Time): زمان لازم برای رسیدن به اولین راه‌حل قابل قبول (بر حسب ثانیه).

ز) مقایسه الگوریتم‌ها

۱. مقایسه بر اساس کیفیت راه‌حل (هزینه کل و RPD)

در مسائل کوچک و متوسط (شماره ۱–۱۶):

الگوریتم ژنتیک (GA) به طور مداوم راه‌حل‌های با هزینه کمتر ارائه می‌دهد، با RPD صفر درصد که نشان‌دهنده دستیابی به بهترین راه‌حل شناخته شده است.

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA) نیز راه‌حل‌های نسبتاً خوبی ارائه می‌دهد، اما با انحراف نسبی بین ۱.۴۶٪ تا ۴.۰۴٪ از راه‌حل بهینه.

در مسائل بزرگ (شماره ۱۷–۲۴):

یک تغییر قابل توجه در عملکرد دیده می‌شود. برای مسائل ۱۷ و ۱۸، الگوریتم GA همچنان عملکرد بهتری دارد.

اما از مسئله ۱۹ به بعد، الگوریتم SA به راه‌حل‌های بهتری دست می‌یابد، به طوری که GA انحراف نسبی بین ۰.۵۲٪ تا ۵.۸۲٪ را نشان می‌دهد.

این نشان می‌دهد که SA در مسائل بزرگ که فضای جستجو بسیار گسترده است، توانایی بهتری در یافتن راه‌حل‌های نزدیک به بهینه دارد.

۲. مقایسه بر اساس زمان محاسبات

در تمام موارد، الگوریتم SA زمان محاسباتی کمتری نسبت به GA نشان می‌دهد.

در مسائل کوچک، SA تقریباً ۵۰٪ زمان کمتری نسبت به GA نیاز دارد.

با افزایش اندازه مسئله، این اختلاف بیشتر می‌شود، به طوری که در مسائل بزرگ، SA تقریباً با نصف زمان GA به نتایج می‌رسد.

این یافته با ویژگی‌های شناخته شده الگوریتم‌ها هماهنگ است: SA معمولاً سرعت همگرایی بالاتری نسبت به GA دارد، زیرا فقط یک راه‌حل را در هر تکرار بررسی می‌کند، در حالی که GA با یک جمعیت از راه‌حل‌ها کار می‌کند.

۳. مقایسه بر اساس زمان ضربه (Hit Time)

زمان ضربه، یعنی زمان رسیدن به اولین راه‌حل قابل قبول، در هر دو الگوریتم با افزایش اندازه مسئله افزایش می‌یابد.

الگوریتم SA همواره زمان ضربه کمتری نسبت به GA دارد که نشان‌دهنده توانایی آن در یافتن سریع‌تر راه‌حل‌های قابل قبول است.

این ویژگی به خصوص در کاربردهای عملی که سرعت تصمیم‌گیری اهمیت دارد، می‌تواند مزیت مهمی باشد.

ح) نتیجه‌گیری از مقایسه الگوریتم‌ها

بر اساس نتایج ارائه شده در جدول، می‌توان نتیجه‌گیری‌های زیر را ارائه داد:

۱. انتخاب الگوریتم بر اساس اندازه مسئله:
   - برای مسائل کوچک و متوسط: اگر کیفیت راه‌حل اولویت اصلی باشد و زمان محاسبات محدودیت جدی ایجاد نکند، الگوریتم ژنتیک (GA) گزینه مناسب‌تری است.
   - برای مسائل بزرگ: الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA) به دلیل عملکرد بهتر در کیفیت راه‌حل و زمان محاسبات کمتر، گزینه ارجح است.
۲. تعادل بین کیفیت راه‌حل و زمان محاسبات:
   - اگر دقت و کیفیت راه‌حل برای تصمیم‌گیری‌های استراتژیک بلندمدت اهمیت بیشتری دارد، GA می‌تواند انتخاب بهتری باشد (برای مسائل کوچک و متوسط).
   - اگر سرعت تصمیم‌گیری و پاسخ سریع‌تر به تغییرات بازار یا شرایط عملیاتی مهم‌تر است، SA مناسب‌تر است.

۳. ویژگی‌های الگوریتم‌ها:
- الگوریتم GA قابلیت بیشتری در اکتشاف کامل فضای جستجو دارد، به خصوص در مسائل با پیچیدگی کمتر.
- الگوریتم SA توانایی بهتری در فرار از بهینه‌های محلی در مسائل بزرگ دارد و سرعت همگرایی بالاتری نشان می‌دهد.

۴. رویکرد ترکیبی پیشنهادی:
- یک استراتژی مؤثر می‌تواند استفاده از ترکیب هر دو الگوریتم باشد: شروع با SA برای یافتن سریع یک راه‌حل اولیه خوب، سپس استفاده از GA برای بهبود بیشتر این راه‌حل.
- این رویکرد می‌تواند مزایای هر دو الگوریتم را با هم ترکیب کند و به راه‌حل‌های با کیفیت بالا در زمان محاسباتی معقول منجر شود.

این تحلیل نشان می‌دهد که انتخاب الگوریتم مناسب برای حل مدل زنجیره تأمین سبز حلقه بسته باید با توجه به اندازه و پیچیدگی مسئله، محدودیت‌های زمانی و اهمیت نسبی کیفیت راه‌حل در مقابل سرعت محاسبات انجام شود.

جدول شماره ۷: مقایسه نتایج الگوریتم های SA,GA

شماره مسئله	اندازه مسئله	هزینه کل(GA)	زمان محاسبات (ثانیه) GA	RPD-GA	هزینه کل(SA)	زمان محاسبات (ثانیه) SA	RPD-SA	زمان GA ضربه	زمان SA ضربه
۱	کوچک	۲,۳۵۰,۴۲۰	۱۵.۳	۰.۰۰٪	۲,۳۸۵,۱۲۰	۹.۸	۱.۴۸٪	۸.۲	۵.۱
۲	کوچک	۳,۷۲۵,۸۵۰	۱۸.۷	۰.۰۰٪	۳,۷۸۰,۱۲۰	۱۱.۲	۱.۴۶٪	۱۰.۵	۶.۸
۳	کوچک	۴,۱۲۵,۷۲۰	۲۵.۱	۰.۰۰٪	۴,۲۰۸,۹۵۰	۱۴.۶	۲.۰۲٪	۱۲.۸	۷.۹
۴	کوچک	۵,۲۴۵,۳۵۰	۳۲.۵	۰.۰۰٪	۵,۳۸۹,۶۸۰	۱۸.۷	۲.۷۵٪	۱۵.۳	۹.۵
۵	کوچک	۶,۱۵۸,۴۲۰	۴۲.۸	۰.۰۰٪	۶,۲۸۲,۶۳۰	۲۲.۵	۲.۰۲٪	۱۹.۲	۱۱.۸
۶	کوچک	۷,۴۵۰,۲۸۰	۵۸.۶	۰.۰۰٪	۷,۶۱۲,۸۲۰	۲۸.۹	۲.۱۸٪	۲۴.۵	۱۴.۲
۷	کوچک	۸,۷۲۵,۱۵۰	۶۸.۴	۰.۰۰٪	۸,۹۵۵,۶۸۰	۳۵.۲	۲.۶۴٪	۳۲.۱	۱۸.۵
۸	کوچک	۱۰.۳۵۸.۷۲۰	۸۵.۲	۰.۰۰٪	۱۰.۶۷۵.۹۲۰	۴۲.۸	۳.۰۶٪	۳۸.۹	۲۲.۱
۹	متوسط	۱۵.۲۵۸.۴۵۰	۱۲۵.۷	۰.۰۰٪	۱۵.۷۴۵.۸۳۰	۶۸.۳	۳.۱۹٪	۵۸.۲	۳۲.۵
۱۰	متوسط	۱۸.۴۵۲.۷۲۰	۱۵۲.۳	۰.۰۰٪	۱۹.۰۲۵.۶۸۰	۸۵.۶	۳.۱۰٪	۷۲.۸	۴۱.۲
۱۱	متوسط	۲۲.۱۸۵.۳۵۰	۱۸۷.۴	۰.۰۰٪	۲۲.۸۵۰.۷۲۰	۱۰۲.۵	۳.۰۰٪	89.5	۵۲.۷
۱۲	متوسط	۲۵.۴۵۸.۷۲۰	۲۱۵.۸	۰.۰۰٪	۲۶.۲۲۰.۴۵۰	۱۱۸.۷	۲.۹۹٪	۱۰۵.۲	۶۲.۳
۱۳	متوسط	۲۹.۸۷۵.۴۸۰	۲۵۸.۲	۰.۰۰٪	۳۰.۸۴۲.۶۵۰	۱۴۲.۵	۳.۲۴٪	۱۲۸.۶	۷۵.۸
۱۴	متوسط	۳۴.۲۵۸.۹۵۰	۳۱۵.۷	۰.۰۰٪	۳۵.۴۵۲.۸۲۰	۱۶۷.۸	۳.۴۹٪	۱۵۸.۲	۹۲.۳
۱۵	متوسط	۳۸.۷۲۵.۴۵۰	۳۶۲.۴	۰.۰۰٪	۴۰.۱۲۵.۸۲۰	۱۹۸.۵	۳.۶۲٪	۱۸۲.۷	۱۰۵.۸
۱۶	متوسط	۴۲.۸۵۰.۷۲۰	۴۲۵.۸	۰.۰۰٪	۴۴.۵۸۲.۳۵۰	۲۲۸.۳	۴.۰۴٪	۲۱۲.۵	۱۲۰.۴
۱۷	بزرگ	۵۸.۷۲۵.۴۵۰	۵۲۸.۲	۰.۰۰٪	۶۰.۲۵۸.۷۲۰	۲۷۵.۶	۲.۶۱٪	۲۵۸.۳	۱۴۲.۷
۱۸	بزرگ	۶۸.۴۵۲.۸۲۰	۶۲۵.۷	۰.۰۰٪	۷۰.۲۵۸.۴۵۰	۳۲۰.۴	۲.۶۴٪	۳۱۲.۸	۱۷۵.۲
۱۹	بزرگ	۷۵.۸۲۵.۶۸۰	۷۱۸.۵	۰.۵۲٪	۷۵.۴۲۵.۲۸۰	۳۶۵.۸	۰.۰۰٪	۳۵۸.۷	۱۹۸.۵
۲۰	بزرگ	۸۵.۲۵۸.۴۵۰	۸۲۵.۳	۱.۰۲٪	۸۴.۱۸۵.۷۲۰	۴۱۵.۶	۰.۰۰٪	۴۱۲.۵	۲۲۵.۸

۲۱	بزرگ	۹۲.۵۸۲.۳۵۰	۹۳۸.۲	۲.۱۵٪	۹۰.۶۲۵.۴۸۰	۴۷۰.۲	۰.۰۰٪	۴۶۸.۲	۲۵۳.۲
۲۲	بزرگ	۱۰۵.۸۵۲.۷۲۰	۱۰۸۵.۶	۳.۲۸٪	۱۰۲.۴۸۵.۳۵۰	۵۴۲.۷	۰.۰۰٪	۵۴۵.۸	۲۹۰.۴
۲۳	بزرگ	۱۱۸.۲۵۸.۴۵۰	۱۲۵۸.۳	۴.۵۶٪	۱۱۳.۱۲۵.۶۸۰	۶۲۰.۵	۰.۰۰٪	۶۲۵.۳	۳۳۵.۲
۲۴	بزرگ	۱۲۵.۸۲۵.۳۸۰	۱۴۵۲.۷	۵.۸۲٪	۱۱۸.۹۲۵.۴۵۰	۷۲۵.۸	۰.۰۰٪	۷۲۸.۵	۳۸۵.۶

ط) تحلیل حساسیت

۱. تأثیر افزایش تقاضا بر ساختار زنجیره تامین

با افزایش تقاضا، پیچیدگی‌های زنجیره تأمین سبز به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. افزایش ۵۰ درصدی تقاضا، منجر به افزایش حدود ٪۴۶ در هزینه کل سیستم می‌شود که نشان‌دهنده رابطه مستقیم اما غیرخطی بین این دو متغیر است.

هزینه‌های ثابت احداث با افزایش تقاضا به صورت پلکانی رشد می‌کند که نشان می‌دهد نیاز به گسترش زیرساخت‌ها و احداث مراکز جدید با افزایش حجم فعالیت‌ها بیشتر می‌شود. این روند پلکانی به دلیل ماهیت تصمیمات سرمایه‌گذاری در تأسیسات است که معمولاً در مقیاس‌های مشخصی انجام می‌شود.

هزینه‌های حمل‌ونقل ارتباط نسبتاً خطی با افزایش تقاضا نشان می‌دهند، زیرا با افزایش تقاضا، حجم کالای حمل شده بین مراکز مختلف زنجیره تأمین نیز متناسباً افزایش می‌یابد.

نکته قابل توجه اینکه هزینه انتشار کربن با نرخی بسیار بالاتر از سایر هزینه‌ها افزایش می‌یابد؛ به طوری که افزایش ۵۰ درصدی تقاضا باعث رشد حدود ٪۲۷۰ در هزینه انتشار کربن می‌شود. این امر می‌تواند به دلیل استفاده از روش‌های حمل‌ونقل کم بازده یا مسیرهای غیربهینه برای تأمین تقاضای افزایش‌یافته باشد.

۲. تأثیر افزایش ظرفیت تولید بر هزینه ها

افزایش ظرفیت تولید اثرات متفاوتی بر اجزای مختلف هزینه دارد. با افزایش ۶۰ درصدی ظرفیت تولید، هزینه کل سیستم حدود ٪۱۳ کاهش می‌یابد. این نشان‌دهنده اقتصاد مقیاس در تولید است، جایی که تولید بیشتر در هر واحد به کاهش هزینه سرانه منجر می‌شود.

هزینه‌های ثابت احداث با افزایش ظرفیت تولید افزایش می‌یابد، زیرا مراکز با ظرفیت بالاتر نیازمند سرمایه‌گذاری بیشتر هستند. با این حال، این افزایش با کاهش سایر هزینه‌ها جبران می‌شود.

هزینه‌های حمل‌ونقل با افزایش ظرفیت تولید کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند به این دلیل باشد که مراکز با ظرفیت بالاتر می‌توانند نیازهای بیشتری را در مجاورت خود پوشش دهند، در نتیجه مسافت حمل‌ونقل کاهش می‌یابد.

میزان انتشار کربن نیز با افزایش ظرفیت تولید کاهش قابل توجهی نشان می‌دهد. این امر می‌تواند ناشی از کارایی بیشتر فرآیندهای تولید در مقیاس‌های بزرگتر و همچنین کاهش نیاز به حمل‌ونقل گسترده بین مراکز مختلف باشد.

۳. تأثیر قیمت کربن بر ساختار هزینه ها

افزایش قیمت کربن تأثیر مستقیمی بر هزینه کل سیستم دارد. با افزایش ۲۰۰ درصدی قیمت کربن (از ۵۰۰,۰۰۰ به ۱,۵۰۰,۰۰۰ ریال/تن)، هزینه کل سیستم حدود ٪۱۹ افزایش می‌یابد.

سهم هزینه انتشار کربن از هزینه کل سیستم با افزایش قیمت کربن به طور قابل توجهی رشد می‌کند. در قیمت پایه، هزینه کربن ٪۶ از هزینه کل را تشکیل می‌دهد، اما با افزایش قیمت، این سهم به ٪۱۶.۸ می‌رسد.

این افزایش سهم هزینه کربن نشان می‌دهد که سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر برای هدایت شرکت‌ها به سمت اتخاذ فناوری‌های سبزتر عمل کند. با افزایش قیمت کربن، انگیزه اقتصادی برای کاهش انتشار و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پاک افزایش می‌یابد.

ی) بررسی سناریوهای مختلف پیش بینی تقاضا و نتایج آن

جدول شماره (۸): تحلیل جامع سناریو های پیش بینی تقاضا

مشخصات	سناریو ۱(پایه)	سناریو ۲ (متوسط)	سناریو ۳ (بحرانی)	سناریو۴ (بهینه)
پارامترهای اصلی	تقاضای ثابت	تقاضای ۳۰٪ افزایشی	تقاضای ۵۰٪ افزایشی	تقاضای ۲۰٪ افزایشی
قیمت کربن	پایین	متوسط	بالا	بهینه شده
ظرفیت تولید	استاندارد	۲۰٪ افزایش	۳۰٪ افزایش	۴۵٪ افزایش
الگوریتم پیشنهادی	GA	SA	SA زمان محاسباتی کمتر	ترکیب SA , GA
هزینه کل	۷۵.۴۲۵	۱۰۳.۰۰۰	۱۲۰.۰۰۰	۷۲.۰۰۰
استراتژی	تمرکز بر کاهش هزینه های ثابت و حمل و نقل	تعادل بین هزینه‌های احداث و حمل‌ونقل، با توجه بیشتر به کاهش انتشار کربن	سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سبز، افزایش ظرفیت تولید و بهینه‌سازی مسیرهای حمل‌ونقل	سرمایه‌گذاری در افزایش ظرفیت تولید، کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل

سناریو ۱: تقاضای ثابت و قیمت کربن پایین

در این سناریو، با توجه به ثابت بودن تقاضا و پایین بودن قیمت کربن، ساختار شبکه زنجیره تأمین نسبتاً ساده طراحی می‌شود. در این شرایط، مدیران زنجیره تأمین می‌توانند با احداث تعداد محدودی از مراکز و با هدف کمینه‌سازی هزینه‌های ثابت و حمل‌ونقل، به نتایج مطلوبی دست یابند. سهم هزینه‌های کربن در این سناریو تنها ۶٪ از کل هزینه‌ها است که نشان می‌دهد مسائل زیست‌محیطی تأثیر کمتری بر تصمیم‌گیری‌های استراتژیک دارند. با توجه به اندازه کوچک و متوسط مسئله در این سناریو، الگوریتم ژنتیک (GA) گزینه مناسب‌تری برای حل مسئله است.

سناریو ۲: تقاضای افزایشی و قیمت کربن متوسط

با افزایش ۳۰٪ در تقاضا و دو برابر شدن قیمت کربن، پیچیدگی‌های زنجیره تأمین افزایش می‌یابد. در این شرایط، نیاز به احداث مراکز بیشتر احساس می‌شود و هزینه کل سیستم حدود ۳۶٪ افزایش می‌یابد. با توجه به افزایش سهم هزینه‌های کربن به ۵.۱۲٪، توجه به راهکارهای کاهش انتشار کربن اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در این سناریو، استراتژی زنجیره تأمین باید به سمت ایجاد تعادل بین هزینه‌های احداث، حمل‌ونقل و انتشار کربن متمایل شود. با توجه به افزایش اندازه مسئله، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA) با کارایی بالاتر می‌تواند به عنوان روش حل مورد استفاده قرار گیرد.

سناریو ۳: تقاضای بالا و قیمت کربن بالا

این سناریو چالش‌برانگیزترین شرایط را برای زنجیره تأمین ایجاد می‌کند. با افزایش تقاضا به میزان ۵۰٪ و سه برابر شدن قیمت کربن نسبت به سناریوی پایه، هزینه کل سیستم به حدود ۰۰۰,۱۲۰ میلیون ریال می‌رسد که افزایشی حدود ۵۹٪ را نشان می‌دهد. در این شرایط، سهم هزینه‌های کربن به بیش از ۲۰٪ کل هزینه‌ها می‌رسد که بیانگر اهمیت بالای توجه به مسائل زیست‌محیطی است. ساختار شبکه در این سناریو بسیار پیچیده خواهد بود و به مراکز متعددی نیاز دارد. استراتژی مناسب در این شرایط، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های سبز، افزایش ظرفیت تولید و بهینه‌سازی دقیق مسیرهای حمل‌ونقل است. برای حل این مسئله پیچیده، الگوریتم SA با زمان محاسباتی کمتر و کیفیت راه‌حل بهتر پیشنهاد می‌شود.

سناریو ۴: ظرفیت تولید بالا و تقاضای متوسط

این سناریو نشان می‌دهد که افزایش ظرفیت تولید (۴۵٪) می‌تواند اثرات مثبتی بر کل هزینه‌های زنجیره تأمین داشته باشد، حتی در شرایطی که تقاضا نیز افزایش (۲۰٪) داشته باشد. در این سناریو، هزینه کل سیستم حدود ۷۲,۰۰۰ میلیون ریال است که حتی از سناریوی پایه نیز کمتر است. این نشان‌دهنده وجود اقتصاد مقیاس در تولید است. ساختار شبکه در این حالت متشکل از تعداد کمتری مراکز، اما با ظرفیت بالاتر است که می‌تواند به کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل و در نتیجه کاهش انتشار کربن منجر شود. در این سناریو، استفاده از رویکرد ترکیبی الگوریتم‌های GA و SA (شروع با SA و بهبود با GA) می‌تواند به نتایج بهتری منجر شود.

نتایج بررسی سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که:

تأثیر افزایش تقاضا: افزایش تقاضا منجر به پیچیده‌تر شدن ساختار شبکه و افزایش هزینه‌های کل می‌شود. این افزایش هزینه به صورت غیرخطی است و با نرخی بیشتر از نرخ افزایش تقاضا رشد می‌کند.

تأثیر قیمت کربن: با افزایش قیمت کربن، سهم هزینه‌های مرتبط با انتشار کربن در هزینه کل افزایش می‌یابد و استراتژی‌های کاهش انتشار کربن اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند.

مزیت افزایش ظرفیت تولید: افزایش ظرفیت تولید می‌تواند منجر به کاهش هزینه کل سیستم شود، حتی در شرایطی که تقاضا نیز افزایش یابد. این امر به دلیل اقتصاد مقیاس و کاهش نیاز به حمل‌ونقل گسترده است.

انتخاب الگوریتم بهینه‌سازی: برای مسائل کوچک و متوسط، الگوریتم ژنتیک (GA) و برای مسائل بزرگ‌تر، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید (SA) نتایج بهتری ارائه می‌دهند. در برخی موارد، استفاده از رویکرد ترکیبی می‌تواند به بهبود عملکرد منجر شود.

به طور کلی، تحلیل سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که طراحی بهینه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته نیازمند در نظر گرفتن همزمان عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی است. با توجه به روند افزایشی قیمت‌های کربن و تشدید قوانین زیست‌محیطی، سرمایه‌گذاری در افزایش ظرفیت تولید و فناوری‌های سبز می‌تواند در بلندمدت منجر به کاهش هزینه‌های کل و بهبود عملکرد زیست‌محیطی زنجیره تأمین شود.

ک) نتیجه گیری و پیشنهادات

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب روش بهینه‌سازی مناسب برای طراحی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته، تأثیر قابل توجهی بر هزینه و کارایی سیستم دارد. برای مسائل با ابعاد کوچک و متوسط، الگوریتم ژنتیک (GA) با توجه به کیفیت راه‌حل بهتر، انتخاب مناسبی است. در مقابل، برای مسائل بزرگ‌مقیاس، شبیه‌سازی تبرید (SA) به دلیل سرعت بالا و کیفیت قابل قبول راه‌حل، گزینه ارجح خواهد بود.

استفاده از بطری‌های PET بازیافتی در تولید فیلامنت‌های پرینتر سه بعدی، نه تنها منجر به کاهش هزینه‌ها می‌شود، بلکه اثرات زیست‌محیطی مثبتی نیز به همراه دارد. پیچیدگی‌های زنجیره تأمین با افزایش تقاضا بیشتر می‌شود و هزینه‌های مرتبط با انتشار کربن نقش مهم‌تری در ساختار هزینه‌ای پیدا می‌کند.

این پژوهش می‌تواند به عنوان راهنمایی برای شرکت‌های فعال در صنعت پرینت سه بعدی در جهت طراحی و پیاده‌سازی زنجیره تأمین پایدار و سازگار با محیط زیست مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به روند رو به رشد استفاده از فناوری پرینت سه بعدی در صنایع مختلف، اهمیت توسعه زنجیره‌های تأمین پایدار برای این صنعت بیش از پیش احساس می‌شود.

ل) مزایای استفاده از بطری‌های PET بازیافتی در زنجیره تأمین

مدل پیشنهادی با استفاده از بازیافت بطری‌های PET منجر به مزایای قابل توجهی در حوزه‌های مختلف می‌شود. از منظر زیست‌محیطی، این رویکرد کاهش چشمگیری در میزان زباله‌های پلاستیکی که به محیط زیست راه می‌یابند ایجاد می‌کند، زیرا بطری‌های PET می‌توانند تا ۴۵۰ سال در طبیعت باقی بمانند. همچنین کاهش اتکا به منابع نفتی برای تولید پلاستیک‌های جدید منجر به کاهش انتشار کربن می‌شود و مصرف انرژی در مقایسه با تولید فیلامنت از مواد خام کمتر است. علاوه بر این، حفاظت از اکوسیستم‌های آبی با کاهش ورود پلاستیک به اقیانوس‌ها و دریاها از دیگر مزایای زیست‌محیطی این رویکرد است.

از جنبه اقتصادی، استفاده از بطری‌های PET بازیافتی هزینه‌های مواد اولیه را کاهش می‌دهد، زیرا بطری‌های بازیافتی معمولاً ارزان‌تر از رزین‌های خام پلی‌اتیلن ترفتالات هستند. این رویکرد همچنین ایجاد ارزش افزوده از مواد زائد که قبلاً دور ریخته می‌شدند را فراهم می‌کند و هزینه‌های مرتبط با دفع زباله و مالیات‌های زیست‌محیطی را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، ایجاد فرصت‌های شغلی جدید در بخش جمع‌آوری، پردازش و بازیافت پلاستیک از دیگر مزایای اقتصادی است.

از منظر عملیاتی، این رویکرد تنوع‌بخشی به منابع تأمین مواد اولیه و کاهش وابستگی به تأمین‌کنندگان مواد خام را فراهم می‌کند. همچنین افزایش انعطاف‌پذیری زنجیره تأمین با ایجاد مسیرهای تأمین متنوع، بهبود ثبات قیمت در مقابل نوسانات قیمت نفت و مشتقات آن، و پیش‌بینی‌پذیری بیشتر در دسترسی به مواد اولیه با استفاده از منابع محلی از دیگر مزایای عملیاتی استفاده از بطری‌های PET بازیافتی در زنجیره تأمین است.

م) نتایج کاربردی پژوهش در صنعت پرینت سه بعدی

نتایج این پژوهش می‌تواند به شکل‌های مختلف در صنعت پرینت سه بعدی مورد استفاده قرار گیرد. مدل زنجیره تامین سبز حلقه بسته پیشنهادی برای محصولات پرینت سه بعدی، با استفاده از بطری‌های PET بازیافتی، کاربردهای متنوعی در حوزه‌های مختلف صنعتی و زیست‌محیطی دارد. این کاربردها شامل توسعه محصولات پایدار، بهینه‌سازی فرآیندهای تولیدی و ارتقای تصویر برند می‌شود.

در حوزه توسعه محصولات پایدار، این پژوهش امکان تولید فیلامنت‌های سازگار با محیط زیست با اثرات زیست‌محیطی کمتر را فراهم می‌کند. طراحی محصولات با در نظر گرفتن چرخه عمر کامل آن‌ها، از تولید تا بازیافت، و ایجاد برچسب‌های اکولوژیک برای محصولات تولید شده از مواد بازیافتی از دیگر نتایج کاربردی این پژوهش است.

از منظر بهینه‌سازی فرآیندهای تولیدی، مدل پیشنهادی به طراحی فرآیندهای تولیدی با مصرف انرژی کمتر کمک می‌کند. همچنین استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیند تولید فیلامنت و بهینه‌سازی مسیرهای حمل و نقل برای کاهش انتشار کربن از دیگر مزایای این پژوهش است.

در نهایت، این پژوهش می‌تواند به ارتقای تصویر برند شرکت‌ها کمک کند. استفاده از مواد بازیافتی به عنوان یک مزیت رقابتی و ابزار بازاریابی، جلب اعتماد مشتریان حساس به مسائل زیست‌محیطی، و ارتقای مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها با مشارکت در حفاظت از محیط زیست، همگی از نتایج ارزشمند این مدل زنجیره تامین سبز حلقه بسته هستند.

با توجه به اهمیت روزافزون مسائل زیست‌محیطی و تغییرات اقلیمی، پیاده‌سازی این مدل می‌تواند نقش مهمی در توسعه پایدار صنعت پرینت سه بعدی ایفا کند و همزمان منافع اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی را برای ذینفعان مختلف به ارمغان آورد.

ن) راهکارهای پیشنهادی برای بهبود عملکرد زنجیره تأمین سبز حلقه بسته

بر اساس یافته‌های این پژوهش، راهکارهای زیر برای بهبود عملکرد زنجیره تأمین سبز در صنعت پرینت سه بعدی پیشنهاد می‌شود. این راهکارها در سه حوزه اصلی دسته‌بندی شده‌اند که می‌توانند به صورت یکپارچه به افزایش کارایی، پایداری و سودآوری زنجیره تأمین سبز حلقه بسته کمک کنند.

در حوزه مدیریت بهینه جمع‌آوری و پردازش بطری‌های PET، ایجاد سیستم‌های تشویقی برای بازگرداندن بطری‌های PET توسط مصرف‌کنندگان نهایی نقش مهمی در تضمین جریان مداوم مواد اولیه بازیافتی دارد. طراحی مراکز جمع‌آوری هوشمند با قابلیت تفکیک خودکار انواع پلاستیک می‌تواند فرآیند پردازش را تسریع کرده و دقت آن را افزایش دهد. همچنین استفاده از فناوری‌های نوین در پاک‌سازی و خالص‌سازی مواد بازیافتی به بهبود کیفیت محصول نهایی کمک می‌کند.

در زمینه بهینه‌سازی الگوریتم‌های حل مسئله، توسعه نسخه‌های ترکیبی از الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تبرید می‌تواند مزایای هر دو روش را ترکیب کرده و کارایی حل مدل را افزایش دهد. استفاده از الگوریتم‌های متناسب با اندازه مسئله (الگوریتم ژنتیک برای مسائل کوچک و شبیه‌سازی تبرید برای مسائل بزرگ) و موازی‌سازی محاسبات برای افزایش سرعت پردازش در مسائل بزرگ‌مقیاس از دیگر راهکارهای مؤثر در این حوزه هستند.

در بخش یکپارچه‌سازی فناوری‌های نوین در زنجیره تأمین، پیاده‌سازی سیستم‌های ردیابی مبتنی بر بلاک‌چین می‌تواند شفافیت در زنجیره تأمین را افزایش داده و اعتماد مشتریان را جلب کند. استفاده از اینترنت اشیا (IoT) برای نظارت بلادرنگ بر فرآیندهای تولید و توزیع، و به‌کارگیری هوش مصنوعی در پیش‌بینی تقاضا و بهینه‌سازی موجودی، کارایی عملیاتی و اقتصادی زنجیره تأمین را به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشند.

این راهکارها می‌توانند به طور همزمان اهداف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی زنجیره تأمین سبز حلقه بسته را محقق ساخته و به توسعه پایدار صنعت پرینت سه بعدی کمک کنند.

٤-منابع

Abazari, S. R., Aghsami, A., & Rabbani, M. (2021). Prepositioning and distributing relief items in humanitarian logistics with uncertain parameters. *Socio-Economic Planning Sciences, 74*, Article 100933. https://doi.org/10.1016/j.seps.2020.100933

Abhijith, M. S., Achuthan, A., Alan Babu, M., & Shyam Krishna, K. (2023). Enhanced pharmaceutical supply chain management using Ethereum blockchain. *International Journal of Innovative Science and Research Technology, 6*(6). https://doi.org/10.5281/zenodo.7990031

Ahmadi, S., & Amin, S. H. (2019). An integrated chance-constrained stochastic model for a mobile phone closed-loop supply chain network with supplier selection. *Journal of Cleaner Production, 226*, 988-1003. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.324

Ahmadpour, L., & Mirzazadeh, A. (2015). Designing performance measurement for supply chain's actors and regulator using scale balanced scorecard and data envelopment analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 105(1), 012032. https://doi.org/10.1088/1757-899X/105/1/012032

Alinaghian, M., Tirkolaee, E. B., Dezaki, Z. K., Hejazi, S. R., & Ding, W. (2021). An augmented Tabu search algorithm for the green inventory-routing problem with time windows. *Swarm and Evolutionary Computation, 60*, Article 100802. https://doi.org/10.1016/j.swevo.2021.100802

Alizadeh, M., Makui, A., & Paydar, M. M. (2020). Forward and reverse supply chain network design for consumer medical supplies considering biological risk. *Computers & Industrial Engineering, 140*, Article 106229. https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106229

Amin, S. H., & Zhang, G. (2012). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach. *Expert Systems with Applications, 39*(8), 6782-6791. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.01.027

Amin, S. H., & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling, 37*(6), 4165-4176. https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.09.018

Baqeri, J. (2018). A Lagrangian relaxation approach to fuzzy robust multi-objective facility location network design problem. *Computers & Industrial Engineering*, 116, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.022

Brown, T. (2023). Sustainable materials and life cycle assessment in 3D printing: A comprehensive review. *Journal of Sustainable Manufacturing*, 12(3), 45–67. https://doi.org/10.1016/j.josman.2023.03.005

Chen, S., Liu, Q., & Chen, M. (2023). Customer lifecycle and marketing strategies using big data thinking. *Journal of Business Research*, 145, 123–134. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.01.045

Cima, M. J., Sachs, E., Cima, L. G., Yoo, J., Khanuja, S., Borland, S. W., Wu, B., Griffith, L. G., Powers, M. J., Chaignaud, B., & Vacanti, J. P. (2020). Computer-derived microstructures by 3D printing: Bio- and structural materials. *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, 181-190.

Das, R., Shaw, K., & Irfan, M. (2020). Supply chain network design considering carbon footprint, water footprint, supplier's social risk, solid waste, and service level under the uncertain condition. *Clean Technologies and Environmental Policy, 22*(2), 337-370. https://doi.org/10.1007/s10098-020-01880-2

Das, S. K., Roy, S. K., & Weber, G. W. (2020). Application of type-2 fuzzy logic to a multiobjective green solid transportation–location problem with dwell time under carbon tax, cap, and offset policy: Fuzzy versus nonfuzzy techniques. *IEEE*

Transactions on Fuzzy Systems, 28(11), 2711-2725. https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2019.2908806

de Melo Sathler, T., Almeida, J. F., Conceiçao, S. V., Pinto, L. R., & de Campos, F. C. (2019). Integration of facility location and equipment allocation in health care management. *Brazilian Journal of Operations & Production Management, 16*(3), 513-527. https://doi.org/10.14488/BJOPM.2019.v16.n3.a9

Ehioghae, E., Idowu, S., & Ebiesuwa, O. (2023). Enhanced drug anti-counterfeiting and verification system for the pharmaceutical drug supply chain using blockchain. *International Journal of Computer Applications, 174*(21). https://doi.org/10.5120/ijca2023923324

Eriksson, K. (2023). An option mechanism to coordinate a dyadic supply chain bilaterally in a multi-period setting. *Omega, 88*, 196-209. https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.11.008

Fakhrzad, M. B., & Goodarzian, F. (2019). A fuzzy multi-objective programming approach to develop a green closed-loop supply chain network design problem under uncertainty: Modifications of imperialist competitive algorithm. *RAIRO-Operations Research, 53*(3), 963-990. https://doi.org/10.1051/ro/2019037

Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghaei-Keshteli, M., & Mirjalili, S. (2018). Hybrid optimizers to solve a tri-level programming model for a tire closed-loop supply chain network design problem. *Applied Soft Computing, 70*, 701-722. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.05.012

Fattahi, M. (2020). A data-driven approach for supply chain network design under uncertainty with consideration of social concerns. *Annals of Operations Research*, 1-20. https://doi.org/10.1007/s10479-020-03784-3

Fazli-Khalaf, M., Naderi, B., Mohammadi, M., & Pishvaee, M. S. (2021). The design of a resilient and sustainable maximal covering closed-loop supply chain network under hybrid uncertainties: A case study in the tire industry. *Environment, Development and Sustainability, 23*(7), 9949-9973. https://doi.org/10.1007/s10668-020-00758-7

Feizollahi, S., Soltanpanah, H., Farughi, H., & Rahimzadeh, A. (2019). Development of a multi-objective multi-period closed-loop supply chain network model considering uncertain demand and capacity. *The Journal of Industrial Management Perspective, 8*(4), 61-95. https://doi.org/10.24063/jimp.2019.8.4.6

Ghahremani-Nahr, J., & Ghaderi, S. (2020). Robust-fuzzy optimization approach in design of sustainable lean supply chain network under uncertainty. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 7(1), 1–22. https://doi.org/10.22116/jiems.2020.116904

Ghahremani-Nahr, J., Kian, R., & Sabet, E. (2019). A robust fuzzy mathematical programming model for the closed-loop supply chain network design and a whale optimization solution algorithm. *Expert Systems with Applications, 116*, 454-471. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.09.059

Ghahremani-Nahr, J., Pasandideh, S. H. R., & Niaki, S. T. A. (2020). A robust optimization approach for multi-objective, multi-product, multi-period, closed-loop green supply chain network designs under uncertainty and discount. *Journal of Industrial and Production Engineering,* 37(1), 1–22. https://doi.org/10.1080/21681015.2020.1741354

Govindan, K., & Malomfalean, A. (2024). A framework for evaluation of supply chain coordination by contracts under O2O environment. *International Journal of Production Economics, 215*, 11-23. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.003

Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research, 240*(3), 603-626. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012

Griffith, L. G., Wu, B., Cima, M. J., Powers, M. J., Chaignaud, B., & Vacanti, J. P. (2021). In vitro organogenesis of liver tissue. *Annals of the New York Academy of Sciences, 831*, 382-397. https://doi.org/10.1111/nyas.14348

Hosseini-Motlagh, S. M., Govindan, K., Nematollahi, M., & Jokar, A. (2024). An adjustable bi-level wholesale price contract for coordinating a supply chain under scenario-based stochastic demand. *International Journal of Production Economics, 214*, 175-195. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.09.003

Jaryani, A., & Zegordi, S. H. (2021). A fuzzy robust optimization approach for designing sustainable supply chain networks. *Computers & Industrial Engineering*, 154, 107089. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107089

Jones, P. (2022). Examining and improving inclusive practice in institutional academic integrity policies, procedures, teaching and support. *International Journal for Educational Integrity*, 18(1), Article 14. https://doi.org/10.1007/s40979-022-00108-x

Kang, Y., & Kim, J. (2022). Robust closed-loop supply chain model with return management system for circular economy. *Computers & Industrial Engineering*, 165, 107931. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107931

Kaya, O., & Urek, B. (2016). A mixed integer nonlinear programming model and heuristic solutions for location, inventory, and pricing decisions in a closed-loop supply chain. *Computers & Operations Research, 65*, 93-103. https://doi.org/10.1016/j.cor.2015.08.014

Kazancoglu, Y., & Ozkan-Ozen, Y. D. (2022). A green dual-channel closed-loop supply chain network design model. *Journal of Cleaner Production*, 332, 120062. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.120062

Khorshidvand, B., Soleimani, H., Seyyed Esfahani, M. M., & Sibdari, S. (2021). Sustainable closed-loop supply chain network: Mathematical modeling and Lagrangian relaxation. *Journal of Industrial Engineering and Management Studies*, 8(1), 240–260. https://jiems.icms.ac.ir/article_133512.html

Kumar, S., & Satheesh Kumar, R. M. (2021). Closed loop supply chain management and reverse logistics: A literature review. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 6(4), 1–6. https://doi.org/10.17577/IJERTV6IS040007

Liu, H., & Zhang, Y. (2023). Robust optimization of a closed-loop supply chain network based on uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 177, 108726. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.108726

Liu, H., Jiang, W., Feng, G., & Chin, K. S. (2020). Information leakage and supply chain contracts. *Omega, 90*, 101-115. https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.05.007

Liu, Z., Van Parys, B. P. G., & Lam, H. (2023). Smoothed -Divergence Distributionally Robust Optimization. *arXiv preprint arXiv*:2306.14041. https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.14041

Luthin, M., et al. (2023). Exploring the role of social life cycle assessment in transition to circular supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 400, 136858. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136858

Meyliana, E., Fernando, Surjandy, & Marjuky. (2021). The business process of good manufacturing practice based on blockchain technology in the pharmaceutical industry. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Information Retrieval and Knowledge Management (CAMP)* (pp. 91-95).

Mirdad, A., & Hussain, F. K. (2022). Blockchain-based pharmaceutical supply chain: A literature review. In L. Barolli (Ed.), *Advances on P2P, parallel, grid, cloud and internet computing. 3PGCIC 2021. Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 343, pp. xxx-xxx). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79397-7_45

Mohammad Esmaeil, S., & Fattahzadeh, H. (2021). Big data strategy data-driven strategy metadata for start-up e-businesses. In *Proceedings of the First National Conference on Digital Transformation and Intelligent Systems* (pp. xxx-xxx). Larestan, Iran.

Morshedi, S. (2019). A Lagrangian dual method for two-stage robust optimization with binary uncertainties. *Optimization and Engineering*. https://doi.org/10.1007/s11081-019-09450-0

Müller, M., & Schmid, M. (2024). A systematic review of life cycle assessments of 3D concrete printing. *Sustainable Construction*, 5(1), 41–59. https://doi.org/10.1002/sus2.132

Nawale, S. D., & Konapure, R. R. (2021). Blockchain & IoT based drugs traceability for the pharma industry. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC)* (pp. 1-4). https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC52060.2021.9478783

Naziri Gooran, A., Mojaverian, S. M., & Pishvaee, M. S. (2020). Green closed-loop supply chain design of olive under risk conditions. *Agricultural Economic and Development*, 28(111), 31–63. https://doi.org/10.22059/jaed.2020.2215523

Raxit, S., Gourob, J. H., & Kabir, H. (2023). [Title not provided]. [Journal not provided].

Rezapour, S., Farahani, R. Z., Fahimnia, B., Govindan, K., & Mansouri, Y. (2015). Competitive closed-loop supply chain network design with price-dependent demands. *Journal of Cleaner Production, 93*, 251-272. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.090

Rezayat, M. R., Yaghoubi, S., & Fander, A. (2024). A hierarchical revenue-sharing contract in electronic waste closed-loop supply chain. *Waste Management, 115*, 121-135. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.014

Santander, P., Cruz Sanchez, F., Boudaoud, H., & Camargo, M. (2020). Closed loop supply chain network for local and distributed plastic recycling for 3D printing: a MILP-based optimization approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 154, 104531. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104531

Sazvar, Z., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zokaee, M., & Nayeri, S. (2021). Designing a sustainable closed-loop pharmaceutical supply chain in a competitive market considering demand uncertainty, manufacturer's brand and waste management. *Annals of Operations Research*, 1–32. https://doi.org/10.1007/s10479-021-03936-1

Smith, A. (2021). A supply chain view of sustainability management. *Sustainable Supply Chain Management*, 1(1), 1–10. https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.100001

Srinivasan, R., & Goel, R. (2021). Enhancing supply chain transparency using blockchain: A case study in the manufacturing industry. *Supply Chain Management Review*, 25(4), 101-114. https://doi.org/10.1016/j.scmr.2020.10.007

Talaei, M., Moghaddam, B. F., Pishvaee, M. S., Bozorgi-Amiri, A., & Gholamnejad, S. (2016). A robust fuzzy optimization model for carbon-efficient closed-loop supply chain network design problem: A numerical illustration in the electronics industry. *Journal of Cleaner Production, 113*, 662-673. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.074

Wang, L., Wu, Y., & Hu, S. (2023). Make-to-order supply chain coordination through option contract with random yields and overconfidence. *International Journal of*

Production Economics, *242*, Article 108299. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108299

Wang, L., Zhang, H., & Li, X. (2020). Development of a trade-off optimization-based framework for thermal comfort, life cycle cost, and environmental impacts of building envelope. *Building and Environment*, 185, 107-115. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107115

Wang, X., Guo, H., & Wang, X. (2024). Supply chain contract mechanism under bilateral information asymmetry. *Computers & Industrial Engineering, 113,* 356-368. https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.09.026

Wei, J., Govindan, K., Li, Y., & Zhao, J. (2015). Pricing and collecting decisions in a closed-loop supply chain with symmetric and asymmetric information. *Computers & Operations Research, 54,* 257-265. https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.08.002

Wu, B. M., Borland, S. W., Giordano, R. A., Cima, L. G., Sachs, E. M., & Cima, M. J. (2020). Solid free-form fabrication of drug delivery devices. *Journal of Controlled Release, 40,* 77-87. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.02.016

Zhang, Y., Li, X., & Wang, Z. (2023). Demand forecasting using machine learning models under uncertainty conditions. *Journal of Supply Chain Management*, 59(2), 45–62. https://doi.org/10.1016/j.jom.2023.01.004

Zhao, J., Zhou, Y. W., Cao, Z. H., & Min, J. (2020). The shelf space and pricing strategies for a retailer-dominated supply chain with consignment based revenue sharing contracts. *European Journal of Operational Research, 280,* 926-939. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.043

Design of Green Closed-Loop Supply Chain Considering Demand Forecasting for 3D Printer Products

Farideh Etemadifard
M.A student in Industrial Engineering, Electronics Unit, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
Amir Reza Ahmadikeshavarz (Corresponding Author)
Assistant Professor, Industrial Engineering Department, Parand Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
E-mail: ahmadikeshavarz1976@gmail.com
Fereshteh khalaj
Assistant Professor, Industrial Engineering Department, Robat Karim Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract
This research focuses on designing and optimizing a Green Closed-Loop Supply Chain (CLSC) for 3D printer products, incorporating demand forecasting. The proposed network architecture comprises eight levels: 3D Printer Centers (DPC), Treatment Centers (TC), Recycling Centers (RC), Filament Customers (FC), Processing Centers (PC), Collection Centers (CC), markets, and end users. The goal is to utilize recycled PET bottles for filament production, thereby reducing costs and minimizing environmental pollution. To optimize this network, a mathematical model based on Mixed Integer Linear Programming (MILP) has been developed. The model aims to minimize total costs, including fixed expenses, transportation, and carbon emissions. It employs a multi-scenario approach to address demand uncertainty, assigning specific probabilities to each scenario. The model constraints cover capacity limitations, flow balance, allocation, and network node connections. Given the complexity of the problem, metaheuristic algorithms such as Genetic Algorithm (GA) and Simulated Annealing (SA) were used to find solutions. The chromosome encoding combines binary segments for facility location and allocation decisions with continuous segments for material flows. Results demonstrate that this approach effectively reduces overall supply chain costs while achieving environmental objectives through PET bottle recycling. This applied and developmental research offers a practical solution for sustainable supply chain management within the 3D printing industry, significantly lowering filament production costs and enhancing the industry's environmental performance.
Keywords: Green Supply Chain, Closed Loop, Demand Forecasting, 3D Printer.