

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

شماره ۲۴ - زمستان ۱۳۹۵

ص ص ۱۵۶ - ۱۲۳

ارائه مدل ریاضی زنجیره تأمین سبز پروژه‌های ساخت‌وساز با در نظر گرفتن زمان‌بندی پروژه

امیر بیانی مجد*، سیامک نوری**، سعید یعقوبی***، احمد محمدی****

چکیده

زنجیره تأمین ساخت‌وساز با چالش‌های بسیاری مواجه است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به ائتلاف بیش‌ازحد منابع در سایت پروژه و همچنین میزان بالای انتشار آلاینده‌ها در این نوع از زنجیره‌های تأمین اشاره کرد؛ از سوی دیگر، اغلب مدیران این نوع از زنجیره‌ها ملزم به یکپارچه در نظر گرفتن زنجیره تأمین از قبیل ویژگی‌های زمانی و منابع پروژه، تعیین سطح تولید و موجودی و تعیین تعداد و نوع وسایل نقلیه در آن هستند تا هزینه‌های آن به‌صورت بهینه تعیین شود؛ به همین منظور، در این مقاله مدلی یکپارچه ارائه شده که هدف نخست پیشینه‌سازی سود و هدف دوم کمینه‌سازی میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید است؛ به طوری که راهکاری نیز برای جلوگیری از ائتلاف منابع در سایت پروژه ارائه شده است. با فرض مشخص بودن شبکه پروژه و همچنین مدت‌زمان و تقاضای روزانه هر یک از فعالیت‌ها، این مدل، برنامه‌ریزی زنجیره را در دوره‌های زمانی مختلف انجام می‌دهد. با توجه به دودسته و غیرخطی بودن این مدل، ابتدا مدل، خطی و سپس با استفاده از روش محدودیت اپسیلون و کدنویسی در نرم‌افزار GAMS حل شد و در نهایت نتایج آن با استفاده از دو مثال عددی مورد تحلیل قرار گرفت.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین ساخت‌وساز؛ زنجیره تأمین سبز؛ زمان‌بندی پروژه.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۹/۲۴، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۴.

* کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت.

** دانشیار، دانشگاه علم و صنعت.

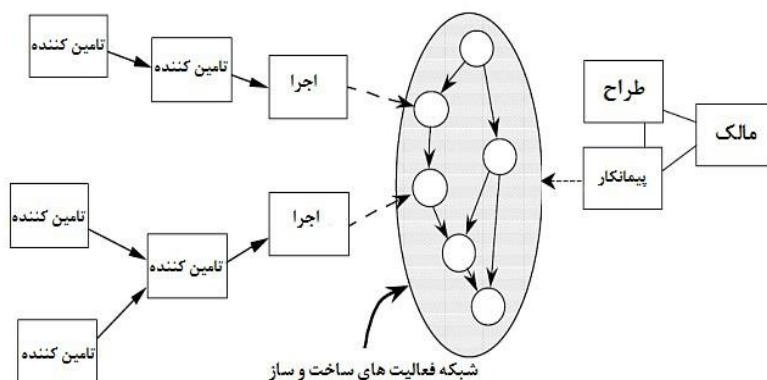
*** استادیار، دانشگاه علم و صنعت (نویسنده مسئول).

E-mail: yaghoubi@iust.ac.ir

**** دانشجوی دکتری، دانشگاه علم و صنعت.

۱. مقدمه

امروزه بیشتر سازمان‌های پروژه‌محور به این نتیجه رسیده‌اند که تمامی فعالیت‌های ساخت‌وساز را نمی‌توانند در سایت پروژه انجام دهند؛ از این رو نیاز به طراحی زنجیره‌های تأمینی به وجود آمد که تأمین‌کنندگان بخشی از فعالیت‌های ساخت‌وساز را به عهده می‌گیرند و پس از تولید محصول نهایی و ارسال آن به سایت پروژه، پیمانکار فعال در پروژه تنها وظیفه مونتاژ محصولات تولیدشده توسط تأمین‌کنندگان را بر عهده خواهد داشت. از امتیازاتی که این نوع از زنجیره‌های تأمین برای پروژه دارد، می‌توان به تسریع در امور اجرایی پروژه، کاهش ریسک ناشی از اجرای نامناسب برخی از عملیات‌های ساخت‌وساز در سایت پروژه که می‌توان آن‌ها را به تأمین‌کنندگان برون‌سپاری نمود و غیره اشاره کرد. زنجیره تأمین ساخت‌وساز شامل تمامی فرآیندهای تجاری پروژه‌های ساخت‌وساز همچون تقاضای مشتری، تقاضای طراح، تقاضای سایت پروژه، نگهداری و تعمیرات و جایگزینی است که تمامی موارد ذکرشده در پروژه درگیر هستند [۱۶، ۲۸]. نمایی شماتیک از زنجیره تأمین ساخت‌وساز را می‌توان در شکل ۱، مشاهده کرد.



شکل ۱. زنجیره تأمین ساخت‌وساز [۲۸]

مدیریت زنجیره تأمین ساخت‌وساز^۱ شامل تجمیع فرآیندهای کلیدی پروژه‌های ساخت از قبیل تقاضای مشتریان، طراحی و ساخت و همچنین تجمیع اعضای کلیدی پروژه مانند مالک پروژه، طراح، پیمانکار، پیمانکار فرعی و تأمین‌کننده است. در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی در مدیریت زنجیره تأمین ساخت‌وساز شامل طراحی و برنامه‌ریزی، انتخاب و منبع‌یابی مواد، فرآیند اجرای پروژه، تحویل پروژه به مشتری و همچنین

1. Construction Supply Chain Management

طی شدن عمر مفید آن است. با توجه به اینکه در اغلب پروژه‌های ساخت‌وساز منابع قابل توجهی اتلاف می‌شود و زنجیره تأمین آن‌ها نیز آلاینده‌گی زیست‌محیطی بسیاری دارند؛ بنابراین اعمال رویکرد مدیریت سبز زنجیره تأمین امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد [۲۴].

در اغلب مقاله‌های ارائه‌شده در حوزه زنجیره تأمین ساخت‌وساز، مدل‌هایی که برای مدیریت این نوع از زنجیره‌های تأمین ارائه شده‌اند از رویکرد سنتی مدیریتی برای مدیریت زنجیره تأمین بهره می‌برند؛ یعنی در رویکرد سنتی اغلب توجه به حداکثر شدن سود بخشی از زنجیره تأمین به صورت محلی است که در این حالت ممکن است به یک جواب بهینه محلی اکتفا شود و کل زنجیره تأمین به صورت بهینه رفتار نکند. به همین دلیل ارائه رویکرد جدیدتری برای مدیریت زنجیره تأمین ساخت، ضروری است تا کل سود زنجیره تأمین به صورت تجمیع‌شده مدیریت و بهینه شود؛ از طرف دیگر اغلب مدل‌های موجود در این حوزه به زنجیره تأمین ساخت به صورت یک زنجیره تأمین عادی تولید می‌نگرند؛ حال آنکه ویژگی‌های زنجیره تأمین ساخت‌وساز منطبق بر زنجیره تأمین پروژه است که نباید در آن پروژه به عنوان یک مشتری عادی در نظر گرفته شود؛ بلکه باید زمان بندی پروژه در برنامه‌ریزی کل زنجیره تأمین تأثیر داشته باشد تا مقدار تولید، موجودی و حمل‌ونقل با توجه به نیاز پروژه تعیین شود. علاوه بر مباحث مرتبط با زنجیره تأمین و پروژه، در زمینه مسائل زیست‌محیطی اغلب مقاله‌های ارائه‌شده تنها با در نظر گرفتن عوامل ثابت مرتبط با مباحث زیست‌محیطی سعی دارند تا به گونه‌ای الزامات مدیریت سبز زنجیره تأمین ساخت‌وساز را در مدل‌های خود بیاورند؛ حال آنکه بیشتر رویکردهای ارائه‌شده با واقعیت فاصله دارند و نیاز است که با رویکردی واقع‌گرایانه، علاوه بر در نظر گرفتن میزان انتشار گازهای آلاینده، نوع و تعداد خودروهایی که آلاینده‌گی کمتری دارند در زنجیره تأمین مشخص شود و همچنین کارخانه‌هایی که آلاینده‌گی کمتری دارند مقدار بیشتری نسبت به کارخانه‌هایی که آلاینده‌گی بیشتری دارند، تولید کنند. با توجه به این توضیحات لازم است تا با مبانی نظری و پیشینه پژوهش در این زمینه به شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی پرداخته شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مبانی نظری موجود در زمینه مدیریت زنجیره تأمین ساخت‌وساز نشان می‌دهد که بیشتر پژوهشگران در این زمینه به رویکردهای کیفی و مدیریتی در پژوهش‌های خود پرداخته‌اند. خلاصه‌ای از پژوهش‌های کیفی در ادامه ارائه می‌شود. وریج‌هوف و همکاران (۲۰۰۰)، اواخر دهه ۱۹۹۰ میلادی را زمان ورود مبحث زنجیره تأمین در زمینه پروژه‌های ساخت‌وساز می‌دانند. دو دلیل عدم توسعه بهره‌وری و افزایش اهمیت زنجیره تأمین سبب ورود این مبحث به پروژه‌های ساخت‌وساز است [۲۷]. ابرین (۱۹۹۹)، ابتدایی‌ترین پژوهش را در زمینه مدیریت زنجیره تأمین ساخت‌وساز ارائه کرده است. او در پژوهش خود به هماهنگی زنجیره تأمین و پروژه، هزینه‌یابی و

کنترل در پروژه‌های ساخت پرداخت [۱۹]. گرین و همکاران (۲۰۰۵)، به چگونگی به‌کارگیری تکنیک‌های مختلف زنجیره تأمین در پروژه‌های مختلف و به‌طور همزمان، پرداختند [۸]. یکی از دلایل اصلی برای تطبیق زنجیره تأمین و پروژه‌های ساخت‌وساز نیاز به یکپارچگی^۱ در این نوع از پروژه‌ها است. خلفان و مک‌درموت (۲۰۰۶)، درباره‌ی اقدامات مختلف، از جمله یکپارچگی در صنعت ساخت‌وساز بحث کرده و سعی کردند تا با ارائه راهکارهایی به سطح بهینه‌ای از یکپارچگی در زنجیره تأمین ساخت‌وساز دست یابند [۴]. ژیاؤلانگ و همکاران (۲۰۰۷)، مدلی کیفی ارائه کردند که در آن مدیریت زنجیره تأمین، پروژه‌های ساخت را به‌عنوان هماهنگی درون‌سازمانی در زنجیره تأمین ساخت‌وساز در نظر می‌گیرد؛ همچنین آن‌ها فرآیند یکپارچه‌سازی را در زنجیره تأمین از فرآیندهای کلیدی کسب‌وکار و سازمان می‌دانند [۲۸]. مدیریت زنجیره تأمین سبز راهی مؤثر برای کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، ذخیره انرژی و کاهش اتلاف در منابع است که می‌تواند باعث افزایش رقابت‌پذیری در صنعت ساخت‌وساز و پروژه‌های ساخت شود و اهمیت بسزایی در توسعه پایدار دارد. در همین راستا بر اساس پژوهش فرانچسکو و فابیو (۲۰۱۰)، اثر اجرای مدیریت زنجیره تأمین سبز در پروژه‌های ساخت‌وساز بررسی شده است. این پژوهش در ۷ کشور مختلف و در پروژه‌های ساخت با شرایط مختلف زیست‌محیطی انجام شد. بر اساس نتایج این پژوهش به‌کارگیری ملاحظات سبز در پروژه‌های ساخت‌وساز ارتقای چشمگیری در عملکرد زیست‌محیطی زنجیره تأمین دارد؛ از طرفی با بهبود شرایط زیست‌محیطی هزینه‌های کلی زنجیره تأمین کاهش می‌یابد [۴]. در پژوهشی دیگر ژیان‌های (۲۰۱۰)، پس از بررسی مشکلات زیست‌محیطی مشترک بین اغلب پروژه‌های ساخت‌وساز، چارچوبی مدیریتی را برای ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی پروژه‌های ساخت‌وساز ارائه کرد [۱۵]. مارتا و همکاران (۲۰۰۹)، رویکردی سیستماتیک ارائه کردند که بر اساس این رویکرد پروژه‌های ساخت‌وساز در مرحله پیش‌ساختمان^۲ باید اثرات بالقوه نامطلوب خود بر محیط‌زیست را شناسایی کنند و با رویکردی که در این پژوهش ارائه شده است و معیارهای موجود در آن، اثرات مخرب احتمالی بر محیط‌زیست را کاهش دهند [۷].

در ادامه پژوهش‌هایی که به‌صورت کمی ارائه شده‌اند، بررسی می‌شود.

مدیریت ریسک جزئی ضروری در هر پروژه ساخت‌وساز است. کومار و ویسواناتان (۲۰۰۷)، مدل و چارچوبی کمی طراحی کردند که به‌وسیله آن می‌توان سیستمی برای پشتیبانی تصمیم در بحث مدیریت ریسک زنجیره تأمین ساخت‌وساز ایجاد کرد که این سیستم می‌تواند مدیران را در اتخاذ تصمیم‌های پیشگیرانه و همچنین مدیریت پیشگیرانه ریسک در زنجیره تأمین ساخت‌وساز

1. Integration
2. Pre-Construction

باری کند [۱۲]. منگ و همکاران (۲۰۱۰)، به توسعه مدل بلوغ^۱ به منظور اندازه‌گیری و بهبود روابط میان اعضای کلیدی زنجیره تأمین پروژه ساخت پرداختند. بر این اساس مدل ارائه‌شده، اصل قابلیت بلوغ زنجیره تأمین ساخت‌وساز را دنبال کرده و ۴ سطح بلوغ را برای زنجیره تأمین ساخت تعریف می‌کند. قالب کلی مدل ارائه‌شده به صورت یک ماتریس است که شرح جزئیات برای معیارهای ارزیابی بلوغ در ۸ گروه و هر گروه در ۴ سطح تعریف شده است [۱۵]. یان (۲۰۱۲)، مدلی کمی ارائه کرد که به بحث مدیریت ناب^۲ در زنجیره تأمین پروژه‌های ساخت می‌پردازد. هدف این مدل به کارگیری تفکر ناب در زنجیره تأمین ساخت‌وساز است و علاوه بر آن کارکرد و بازدهی زنجیره تأمین ساخت‌وساز را به میزان زیادی بهبود می‌بخشد [۱]. سرنگ و همکاران (۲۰۰۶)، مدلی با هدف بهینه‌کردن موجودی تجمیع‌شده^۳ در زنجیره تأمین از طریق کاهش موجودی مواد در سایت پروژه ارائه کردند. مفهوم اصلی این مدل بر اساس هزینه موجودی تجمیع‌شده و همچنین سیاست موجودی تحت مدیریت فروشند^۴ است [۲۶].

جاسکوفسکی و همکاران (۲۰۱۴) با ارائه مدلی ریاضی که در آن هدف کاهش هزینه‌های تحویل از تأمین‌کننده به انبار و حمل از انبار به سایت پروژه است به دنبال تعیین میزان منبعی که از یک تأمین‌کننده به مکان‌های تعبیه‌شده برای نگهداری منابع هستند [۱۳]. ژو و همکاران (۲۰۱۳)، مدلی ریاضی ارائه کردند که هدف اصلی این مدل بهینه‌کردن کل هزینه‌های زنجیره تأمین است؛ از طرفی با اعمال یک ثابت زیست‌محیطی، عملکرد زیست‌محیطی پروژه را نیز به عنوان یک هزینه وارد تابع هدف کردند که همزمان با حداقل شدن هزینه‌های کلی زنجیره تأمین، هزینه‌های زیست‌محیطی نیز به تبع آن کاهش می‌یابد. در این مدل زمان‌بندی پروژه اعمال نشده است [۲۹]. الهدلی و مریک (۲۰۱۲)، مدلی ریاضی برای شبکه زنجیره تأمین طراحی کردند که اثرات انتشار گاز CO₂ توسط وسایل نقلیه را در نظر می‌گیرد و هدف این مسئله حداقل کردن میزان انتشار گاز CO₂ توسط وسایل نقلیه فعال در زنجیره تأمین است. در این مدل محدودیت‌های زمانی پروژه لحاظ نشده است [۵]. آرتیگس و همکاران (۲۰۱۱) به دنبال بررسی تعدادی از مدل‌ها ارائه‌شده در زمینه زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع^۵ بودند. آن‌ها با به کارگیری معیارهای ارزیابی ارائه‌شده، به بررسی چهار مدل پرداختند [۱۰]. در دنیای واقعی در بیشتر مواقع منابع مورد استفاده فعالیت ثابت نیستند؛ ولی می‌توان از دوره‌ای به دوره دیگر منتقل شوند. نیبر و کولیش (۲۰۱۴)، پژوهشی در ارتباط با ارائه مدلی برای زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع انعطاف‌پذیر^۶ انجام دادند. این مدل با هدف کاهش Make Span و

1. Maturity
2. Lean Management
3. Integrated Inventory
4. Vendor Managed Inventory (VMI)
5. Resource-Constrained Project Scheduling Problem
6. Flexible Resource-Constrained Project Scheduling Problem

محدودیت‌های پیش‌نیازی و محدودیت‌ها دسترسی به منابع به دنبال تعیین زمان شروع، زمان پایان، مدت‌زمان فعالیت و نحوه استفاده منابع توسط فعالیت است [۱۸].

با توجه به پژوهش‌هایی که در این زمینه به‌صورت کمی ارائه شده‌اند، می‌توان دریافت که هیچ یک از مدل‌های ارائه‌شده مباحث زنجیره تأمین، زمان‌بندی پروژه و مسائل زیست‌محیطی را به‌صورت هم‌زمان در نظر نمی‌گیرند. در این مقاله مدلی یکپارچه و دو هدفه ارائه می‌شود که علاوه بر حداکثرسازی سود، هم‌زمان میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید را نیز حداقل می‌کند. در این مدل محدودیت‌های زمانی پروژه لحاظ شده است و با توجه به میزان تقاضای روزانه فعالیت‌های پروژه، زمان‌بندی پروژه و همچنین برنامه‌ریزی زنجیره تأمین پشتیبان پروژه نیزه انجام می‌شود. از دیگر ویژگی‌های این مدل تعیین میزان تولید، سطح موجودی و همچنین مقدار حمل‌ونقل است؛ از طرفی تعداد وسایل نقلیه با توجه به میزان هزینه حمل و همچنین مقدار آلاینده‌گی آن‌ها تعیین می‌شود. این مدل رویکرد جدیدی را در زمینه زنجیره تأمین سبز ساخت‌وساز ارائه می‌کند که بر اساس آن، پارامترهای زیست‌محیطی برخلاف مدل‌های موجود ثابت نیست و به نوع وسایل نقلیه و همچنین میزان تولید کارخانه‌ها وابسته است. در این مدل تقاضای روزانه فعالیت‌ها مشخص است و زنجیره تأمین توانایی تأمین چند نوع منبع موردنیاز پروژه را دارد. مدل ارائه‌شده غیرخطی است و با استفاده از روش‌های خطی‌سازی به یک مدل کاملاً خطی تبدیل شده است. این مدل با بهره‌گیری از روش محدودیت اپسیلون و کدنویسی در نرم‌افزار گمس حل شده و با ارائه دو مثال عددی مرتبط نتایج آن تحلیل و بررسی شده است.

در جدول ۱ به تقسیم‌بندی مهم‌ترین پژوهش‌های انجام‌شده و تفاوت آن‌ها با این پژوهش پرداخته شده است.

جدول ۱. مرور مبانی نظری این حوزه

مرور مبانی نظری	نوع مسئله		مدل‌های تجمیع و تصمیم					جریان مواد و اطلاعات					زنجیره تأمین سبز	
	کمی	کیفی	ریسک	هم‌هنگی	تجمیع و یکپارچگی	ارزیابی عملکرد	کاهش و کنترل	حمل و نقل	انبارش	موجودی	کسب و کار	الکترونیک		گردش کالا
[۲۴]	✓			✓	✓		✓	✓						
[۸]		✓	✓	✓	✓				✓				✓	
[۲۵]		✓	✓	✓		✓		✓						✓
[۷]		✓				✓			✓	✓				
[۱۲]	✓		✓					✓	✓	✓				
[۱۵]	✓					✓		✓						✓
[۲۹]	✓		✓		✓			✓	✓		✓			
[۱۰]	✓		✓			✓		✓	✓		✓			
پژوهش حاضر	✓		✓		✓		✓	✓	✓		✓		✓	✓

با توجه به در نظر گرفتن مفاهیم لجستیک سبز نیاز است تا به مرور مبانی نظری در حوزه برنامه‌ریزی زنجیره تأمین با اهداف زیست‌محیطی پرداخته شود.

در دهه ۱۹۹۰، هیئت مدیریت لجستیک سه مطالعه مرتبط با لجستیک سبز را منتشر کرد. مطالعه نخست، به صورت واقعی یکی از نخستین مطالعه‌هایی است که لجستیک سبز را به صورت کامل آزمون کرده و موضوعی را از جنبه کاهش ضایعات معرفی کرد [۲۱]. بر مبنای مصاحبه‌ها با صنعت آمریکا و سازمان‌های دولتی، پژوهشگر نتیجه‌گیری کرده است که لجستیک معکوس هنوز در مرحله بسیار ابتدایی قرار دارد؛ بنابراین شرکت‌ها به نسبت در ارتباط با این موضوع واکنش نشان دادند. پس از زمان کوتاهی از این پژوهش، هیئت مدیریت لجستیک پژوهش دوم را با تأکید بر استفاده مجدد و بازیافت در لجستیک سبز منتشر کرد. پژوهشگران نتیجه گرفتند که لجستیک سبز بسیار سریع همراه با شرکت‌های زیادی که دارای برنامه‌های پیشگام در رابطه با کاهش ضایعات هستند، پدید می‌آید. بعد از معرفی رشته و نشان دادن فرصت‌ها، هیئت مدیریت لجستیک، مطالعه سومی را پیشنهاد داد که به اجرا و توسعه لجستیک سبز اختصاص یافت [۱۱]. این مطالعه موجب شکل‌گیری موضوع‌های مرتبط از قبیل مدیریت و کنترل، سنجش و مالیه، به‌منظور برنامه‌های لجستیک سبز شد.

در ادامه به مدل‌های ارائه‌شده در طراحی شبکه‌ی لجستیک سبز پرداخته شده است.

جایارامان و همکاران (۲۰۰۰)، یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته برای طراحی شبکه‌ی لجستیک سبز با هدف حداقل‌سازی هزینه ارائه کردند. در پژوهش آن‌ها تنها به فعالیت‌های احیای محصولات برگشتی پرداخته شده است. این مطالعه جزو معدود پژوهش‌هایی

است که به طراحی یک سیستم کششی^۱ در لجستیک سبز مبتنی بر تقاضای مشتریان برای احیای محصولات احیاشده می‌پردازد [۶]. کریکه و همکاران (۲۰۰۱)، یک شبکه لجستیک سبز دوده‌ای برای یک تولیدکننده دستگاه‌های کپی با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح آمیخته طراحی کردند. در این مدل هزینه‌های پردازش محصولات برگشتی و موجودی نیز در تابع هدف مورد توجه قرار گرفته است [۳]. آراس و همکاران (۲۰۰۸)، به ارائه یک مدل غیرخطی برای تعیین محل مراکز جمع‌آوری محصولات مصرف‌شده در یک شبکه ساده لجستیک معکوس پرداختند. نکته قابل توجه در پژوهش آن‌ها، توانایی مدل برای تعیین قیمت خرید محصولات مصرف‌شده از دارندگان آن با هدف حداکثر کردن سود حاصله است. آن‌ها برای حل مدل از یک روش ابتکاری بر مبنای جست‌وجوی ممنوع^۲ استفاده کردند [۲۲].

دکر و همکاران (۲۰۱۳) در مطالعه‌ای که در مورد لجستیک معکوس انجام دادند، مدل‌های کمی استفاده‌شده در زمینه لجستیک معکوس را ارائه کردند [۲].

در ادامه مقاله، در بخش ۳، به روش‌شناسی پژوهش پرداخته می‌شود؛ سپس در بخش ۴ تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش آورده شده است. در بخش ۵ به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادهای آتی پرداخته شده است.

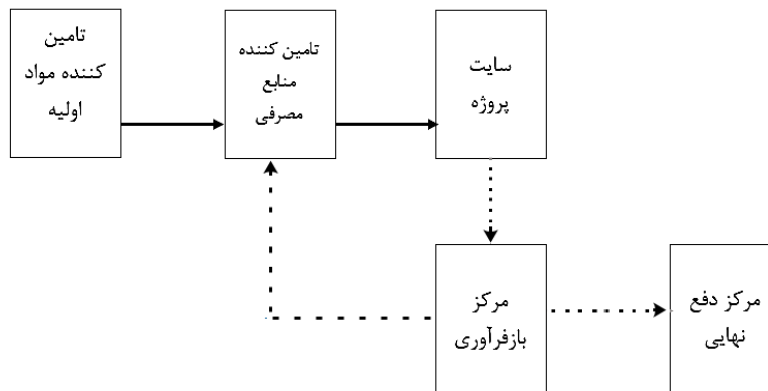
۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از نظر موضوع جزو پژوهش‌های لجستیک تجاری با تمرکز بر موضوع سود و زیست‌محیطی محسوب می‌شود. ابزار گردآوری داده‌ها، مطالعات کتابخانه‌ای است. با مطالعه پژوهش‌های مختلف که به تفصیل در بخش مرور مبنای نظری به آن‌ها اشاره شد، شکاف پژوهش شناسایی شد که بر این اساس در پژوهش حاضر یک مدل ریاضی چندهدفه پیشنهاد شده است که تلاش می‌کند سود تجاری و محیط‌زیست را در نظر بگیرد؛ به این صورت که تابع هدف اول مربوط به بیشینه‌سازی سود کل زنجیره تأمین است که خود به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش نخست، درآمدهای زنجیره تأمین که شامل درآمد حاصل از فروش و همچنین یارانه دریافتی از دولت است. بخش دوم هزینه‌های مختلف زنجیره تأمین را دربرمی‌گیرد که شامل هزینه‌های تولید، حمل‌ونقل و بازیافت است. تابع هدف دوم حداقل‌سازی میزان انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید است که شامل دو قسمت است، قسمت نخست آن میزان انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید توسط وسایل نقلیه است که وابسته به وزن وسیله و محموله بارگذاری شده در آن است؛ قسمت دوم تابع هدف میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید توسط کارخانه‌های تولیدی است که وابسته به میزان تولید است؛ بنابراین مدل پیشنهادی با در نظر گرفتن همزمان ویژگی‌های تقاضا،

1. Pull
2. Tabu search.

زمان، هزینه و فعالیت‌های زیست‌محیطی گامی در جهت بهبود شرایط ساخت‌وساز برمی‌دارد. به دلیل غیرخطی بودن، مدل پیشنهادی با روش‌های ابتکاری خطی‌سازی شده و برای حل چندهدفه مدل از روش محدودیت افسیلون استفاده شده است؛ سپس برای نمایش کارایی مدل، دو مثال عددی ارائه شده است و در نهایت مدل در نرم‌افزار گم‌س حل و به تحلیل حساسیت پرداخته شده است.

بیان مسئله. زنجیره تأمین مورد بحث در این پژوهش زنجیره تأمین سه‌سطحی است که در سطح نخست مواد اولیه مورد نیاز منابع مصرفی پروژه و در سطح دوم منابع مصرفی پروژه تولید می‌شود. در سطح سوم نیز پروژه قرار دارد که به‌عنوان مشتری و یا مصرف‌کننده زنجیره تأمین در نظر گرفته می‌شود. در ادامه عضو دیگری نیز در زنجیره تأمین وجود دارد که وظیفه بازیافت منابع اتلاف‌شده در سایت پروژه را بر عهده دارد؛ به این صورت که در سایت پروژه با توجه به ماهیت منابع مصرفی ممکن است بخشی از این منابع اتلاف شود. مرکز بازیافت مقادیر اتلاف‌شده را دریافت می‌کند و پس از انجام عملیات بازیافت بخشی از مقادیر اتلاف‌شده را که قابلیت بازیافت دارند، به‌صورت مواد اولیه فرآوری کرده و به سطح دوم ارسال می‌کند و قسمتی که دیگر قابلیت بازیافت ندارد را به مرکز دیگری برای دفع ارسال می‌کند. در این مسئله دو نوع جریان لجستیک روبه‌جلو و معکوس وجود دارد. نمایی از زنجیره تأمین مسئله در شکل ۲، ارائه شده است. جریان لجستیک روبه‌جلو با پیکان‌های سیاه و جریان لجستیک معکوس با پیکان‌های خط‌چین نشان داده شده است.



شکل ۲. زنجیره تأمین سبز ساخت‌وساز مورد بررسی در این پژوهش

از مشکلات اغلب پروژه‌ها می‌توان به کمبود منابع و یا مازاد آن در سایت پروژه اشاره کرد.

این معضل به دلیل نبود هماهنگی بین پروژه و زنجیره تأمین پشتیبان پروژه است. برای رفع این مشکل لازم است که زمان بندی پروژه به نحوی صورت گیرد که منابع مورد نیاز پروژه در هر دوره زمانی با توجه به زمان بندی و میزان تقاضای پروژه تعیین گردد تا به زنجیره تأمین سفارش صادر شود.

در حوزه مسائل زیست محیطی نیز اغلب پروژه‌ها دارای اتلاف منابع و آلاینده‌گی بسیاری هستند که این مشکل را می‌توان با در نظر گرفتن یک مرکز بازیافت برای منابع اتلاف شده در سایت پروژه مرتفع کرد. وجود این مرکز به صورت غیرمستقیم باعث کاهش هزینه‌های تولید و موجودی در زنجیره تأمین و در نهایت کاهش هزینه‌های پروژه می‌شود؛ از طرفی می‌توان الزامات زیست محیطی را برای تولیدکنندگان در سطوح مختلف زنجیره تأمین با توجه به شرایط آلاینده‌گی کارخانه و سطح تولید آن در نظر گرفت. در زمینه حمل و نقل مدل سعی دارد وسیله‌ای را که هزینه آلاینده‌گی و حمل و نقل کمتری دارد، انتخاب کند تا در نهایت هزینه‌های موجود در زمینه حمل و نقل نیز حداقل شود. نکته دیگری که در زمینه مسائل زیست محیطی اهمیت بسزایی دارد، مبحث انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در این مسئله سعی شده است که میزان انتشار گاز CO₂ با توجه به مقدار تولید هر یک از کارخانه‌های تولیدی و همچنین مقدار وزن و وسیله نقلیه و بار حمل شده توسط آن، حداقل شود.

با توجه به نکات ذکر شده می‌توان مدلی ریاضی را با ویژگی‌های زیر برای این مسئله تعریف کرد:

- زمان بندی پروژه برای تعیین سطح سفارش پروژه در هر دوره زمانی با توجه به تقاضای روزانه پروژه؛

- تعیین سطح بهینه موجودی در نزد اعضای زنجیره تأمین با توجه به نیاز پروژه در هر دوره زمانی؛

- تعیین سطح بهینه تولید در نزد اعضای زنجیره تأمین با توجه به نیاز پروژه در هر دوره زمانی؛
- تعیین نوع و تعداد بهینه‌ی وسایل حمل و نقل بین اعضای زنجیره تأمین با در نظر گرفتن هزینه‌های زیست محیطی و حمل هر وسیله؛

- کاهش میزان انتشار گاز CO₂ توسط وسایل نقلیه و کارخانه‌های تولیدکننده منابع؛

- تعیین مقدار بهینه بار حمل شده توسط هر وسیله نقلیه در یک مسیر مشخص؛

- کاهش اتلاف منابع در سایت پروژه؛

- کاهش هزینه‌های زیست محیطی هر یک از تولیدکنندگان زنجیره تأمین.

مفروضات. برای مدل سازی و حل مسئله همواره نمی‌توان تمامی موارد مورد نیاز و قابل بحث را

در کنار هم قرار داد. این امر به علت پیچیده شدن مدل و کاربردی نبودن آن یا ناتوانی در حل مدل با امکانات موجود است؛ از این رو برخی مسائل به صورت پیش فرض در نظر گرفته می شود تا بتوان در عین جامع بودن مدل از کاربردی بودن آن نیز اطمینان حاصل کرد. مفروضات در نظر گرفته شده در این مقاله شامل موارد زیر است:

۱. شبکه پروژه و زمان فعالیتها مشخص است؛
۲. زمان آغاز هر فعالیت در محدوده شناوری کل آن فعالیت قرار دارد؛
۳. روابط پیش نیازی از نوع FS است؛
۴. دریافت منابع بدون هیچ تأخیر و یا تعجیلی صورت می گیرد؛
۵. دریافت سفارش در ابتدای هر دوره صورت می گیرد؛
۶. در هر دوره به اندازه تقاضای فعالیت‌های در حال اجرای همان دوره برای سایت پروژه سفارش صادر می شود؛ بنابراین در سایت پروژه نگهداری موجودی در نظر گرفته نمی شود؛
۷. تقاضای روزانه فعالیتها مشخص و معلوم است؛
۸. نرخ اتلاف منابع مصرفی در سایت پروژه مشخص و معلوم است؛
۹. ظرفیت نگهداری موجودی هر یک از تسهیلات مشخص و معلوم است؛
۱۰. زمان تدارک هر یک از اعضای زنجیره تأمین مشخص و ثابت است؛
۱۱. وسایل نقلیه موجود در هر مسیر تنها مختص به همان مسیر است و در مسیر دیگری از آنها استفاده نمی شود؛
۱۲. فعالیت‌های پروژه بدون انقطاع انجام می شود؛
۱۳. زنجیره تأمین موجود توانایی تولید چند نوع منبع مصرفی مورد نیاز پروژه را دارد.

مدل سازی مسئله. در این قسمت ابتدا اندیس‌ها و پارامترها تعریف می شوند؛ سپس متغیرهای تصمیم مشخص می شود. در انتها مدل با تابع هدف و محدودیت‌ها ارائه می گردد.

اندیس‌ها

t و l: روز اجرای پروژه

T: دوره‌های زمانی

ce: سایت پروژه^۲

Rep: مرکز بازیافت مواد اتلاف شده^۳

1. Finish to Start
1. Construction Enterprise
2. Reprocess Center

Fin: مرکز دفع نهایی مواد اتلاف شده^۱

مجموعه‌ها

- PA: مجموعه‌ی فعالیت‌های پروژه
- H_i: مجموعه فعالیت‌های پیش‌نیازی فعالیت z
- E: تأمین‌کننده مواد اولیه^۲
- F: تأمین‌کننده منابع مصرفی پروژه^۳
- R: مجموعه منابع مصرفی موردنیاز پروژه
- K: مجموعه وسایل نقلیه

پارامترها

- $R_{e,f,r}$: درآمد تأمین‌کننده از تأمین مواد اولیه موردنیاز منبع نوع Γ از تأمین‌کننده مواد اولیه به تأمین‌کننده منابع مصرفی (تن/دلار).
- $R_{f,r}^{ce}$: درآمد تأمین‌کننده از تأمین منبع نوع Γ از تأمین‌کننده منابع مصرفی به سایت پروژه (تن/دلار).
- $R_{f,r}^{rep}$: درآمد حاصل از فروش واحد منبع بازیافت‌شده نوع Γ به تأمین‌کننده منابع مصرفی در مرکز بازیافت (تن/دلار).
- S_r^{rep} : مقدار یارانه پرداخت‌شده توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست به مرکز بازیافت برای هر واحد بازیافت مقادیر اتلافی منبع نوع Γ (تن/دلار).
- $h_{e,r}^{raw}$: هزینه نگهداری موجودی مواد اولیه منبع نوع Γ در نزد تأمین‌کننده مواد اولیه (تن/دلار).
- $h_{f,r}^{raw}$: هزینه نگهداری مواد اولیه منبع نوع Γ در نزد تأمین‌کننده منابع مصرفی (تن/دلار).
- $h_{f,r}$: هزینه نگهداری منبع نوع Γ در نزد تأمین‌کننده منابع مصرفی (تن/دلار).
- h_r^{unrep} : هزینه نگهداری مقادیر اتلاف‌شده از منبع نوع Γ در نزد مرکز بازیافت (تن/دلار).
- $h_r^{rep,e}$: هزینه نگهداری مقادیر بازیافت‌شده از منبع نوع Γ در مرکز بازیافت که آماده ارسال به تأمین‌کننده منابع مصرفی است (تن/دلار).
- $h_r^{rep,fin}$: هزینه نگهداری مقادیر بازیافت‌شده از منبع نوع Γ در مرکز بازیافت که آماده ارسال به مرکز دفع نهایی است (تن/دلار).

3. Final Disposal
 4. Supplier of Construction Raw Material
 5. Supplier of Construction Material

$C_{e,f,r}^{pr}$: هزینه تدارکات مقادیر جریان فیزیکی منبع نوع r از تأمین کننده مواد اولیه به تأمین کننده منابع مصرفی (تن/دلار).

$C_{f,r}^{pr,ce}$: هزینه تدارکات مقادیر جریان فیزیکی منبع نوع r از تأمین کننده منابع مصرفی به سایت پروژه (تن/دلار).

$C_{f,r}^{pr,rep}$: هزینه تدارکات مقادیر جریان فیزیکی بازیافت شده منبع نوع r و آماده ارسال به تأمین کننده منابع مصرفی (تن/دلار).

$C_{f,r}^{pro}$: هزینه تولید منبع نوع r برای تأمین کننده منابع مصرفی (تن/دلار).

$C_{e,r}^{pro}$: هزینه تولید مواد اولیه مورد نیاز منبع نوع r برای تأمین کننده مواد اولیه (تن/دلار).

C_r^{rep} : هزینه بازیافت مقادیر اتلاف شده از منبع نوع r در مرکز بازیافت (تن/دلار).

C_r^{fin} : هزینه دفع نهایی مقادیر اتلاف شده از منبع نوع r در مرکز دفع نهایی (تن/دلار).

$C_{e,f,k}^{tra}$: هزینه واحد حمل و نقل از تأمین کننده مواد اولیه به تأمین کننده منابع مصرفی توسط وسیله نقلیه نوع k ام (تن/دلار).

$C_{f,k}^{tra,ce}$: هزینه واحد حمل و نقل از تأمین کننده منابع مصرفی به سایت پروژه توسط وسیله نقلیه k ام (تن/دلار).

$C_{f,k}^{tra,rep}$: هزینه واحد حمل و نقل از مرکز بازیافت به تأمین کننده منابع مصرفی توسط وسیله نقلیه k ام (تن/دلار).

$C_k^{tra,ce,rep}$: هزینه ی واحد حمل و نقل از سایت پروژه به مرکز بازیافت توسط وسیله نقلیه ی k ام (تن/دلار).

$C_k^{tra,rep,fin}$: هزینه ی واحد حمل و نقل از مرکز بازیافت به محل دفع نهایی توسط وسیله نقلیه ی نوع k ام (تن/دلار).

C'_k : عوارض دریافتی توسط دولت برای میزان آلاینده‌گی وسیله نقلیه نوع k ام (دلار).

$C'_{e,r}$: عوارض دریافتی توسط دولت برای میزان آلاینده‌گی کارخانه تولید کننده مواد اولیه به ازای نرخ تولید مواد اولیه مورد نیاز منبع r و با توجه به شرایط آلاینده‌گی کارخانه (تن/دلار).

$C'_{f,r}$: عوارض دریافتی توسط دولت برای میزان آلاینده‌گی کارخانه تولید کننده منابع مصرفی به ازای نرخ تولید منبع r و با توجه به شرایط آلاینده‌گی کارخانه (تن/دلار).

g_k : مقدار گاز CO_2 منتشر شده توسط وسیله نقلیه k ام با توجه به مقدار بار حمل شده و وزن وسیله نقلیه (تن/میلی گرم).

g'_r : مقدار گاز CO_2 منتشر شده در حین تولید منبع نوع r توسط کارخانه تولیدی (تن/میلی گرم).

U_r : ظرفیت نگهداری موجودی از نوع منبع r برای هر تسهیل (تن).
 V_k : ظرفیت حمل‌ونقل با وسیله نقلیه نوع k ام در یک مسیر مشخص (تن).
 W_k : وزن وسیله نقلیه نوع k ام بدون بار (تن).
 f_k : حداکثر تعداد وسیله نقلیه نوع k ام.
 T_r : نرخ اتلاف منبع نوع r در سایت پروژه.
 τ_r^e : نرخ تبدیل مقادیر اتلاف‌شده از منبع نوع r به مواد اولیه موردنیاز تولید منبع نوع r در مرکز بازیافت.
 τ_r^{fin} : نرخ تبدیل مقادیر اتلاف‌شده از منبع نوع r به ماده دورریختنی در مرکز بازیافت.
 $\tau_{f,r}^{r/m}$: نسبت تبدیل مقدار مواد اولیه به هر واحد منبع نوع r در هر کارخانه تأمین‌کننده منابع مصرفی.
 ES_i, LS_i : زودترین و دیرترین زمان شروع فعالیت i .
 $D_{i,r}$: تقاضای روزانه فعالیت i برای منبع r .
 P_i : مدت‌زمان اجرای فعالیت i در پروژه.

متغیرهای تصمیم

$O_{T,e,f,r}$: میزان سفارش مواد اولیه موردنیاز تولید منبع r از تأمین‌کننده منابع مصرفی به تأمین‌کننده مواد اولیه در دوره T (تن).
 $O_{T,f,r}^{ce}$: میزان سفارش منبع نوع r از سایت پروژه به تأمین‌کننده منابع مصرفی در دوره T (تن).
 $M_{T,e,r}$: مقدار تولید مواد اولیه موردنیاز منبع نوع r در نزد تأمین‌کننده مواد اولیه در دوره T (تن).
 $M_{T,f,r}$: مقدار تولید منبع نوع r در نزد تأمین‌کننده منابع مصرفی در دوره T (تن).
 $B_{T,r,k}$: مقدار حمل‌شده از منبع نوع r در یک مسیر مشخص توسط هر وسیله نقلیه نوع k ام در دوره T (تن).
 $I_{T,e,r}^{raw}$: سطح موجودی مواد اولیه موردنیاز تولید منبع r در نزد تأمین‌کننده مواد اولیه در دوره T (تن).
 $I_{T,f,r}^{raw}$: سطح موجودی مواد اولیه موردنیاز تولید منبع r در نزد تأمین‌کننده منابع مصرفی پروژه در دوره T (تن).
 $I_{T,f,r}$: سطح موجودی منبع نوع r در نزد تأمین‌کننده منابع مصرفی پروژه (تن).
 $I_{T,r}^{unrep}$: سطح موجودی مقادیر اتلاف‌شده از منبع نوع r در نزد مرکز بازیافت که تحت عملیات

بازیافت قرار نگرفته‌اند در دوره T (تن).

$I_{T,f,r}^{rep}$: سطح موجودی مقادیر بازیافت‌شده از منبع نوع r.

$Q_{T,r}^{rep,fin}$: مقادیر اتلاف‌شده از منبع r که در دوره T پس از بازیافت در مرکز بازیافت به محل دفع نهایی منتقل می‌شود (تن).

$Q_{T,r}^{ce,rep}$: مقادیر اتلاف‌شده از منبع نوع r در سایت پروژه در دوره T که برای بازیافت به مرکز بازیافت منتقل می‌شود (تن).

N_k : تعداد وسایل نقلیه از نوع k در هر مسیر.

δ_i : زمان شروع فعالیت i.

$Y_{i,t}$: برابر 1 است اگر فعالیت i در روز t اجرا شود؛ در غیر این صورت برابر است با صفر.

$X_{i,t}$: برابر 1 است اگر فعالیت i در روز t شروع شود؛ در غیر این صورت برابر است با صفر.

تابع هدف. تابع هدف (1) بیشینه‌سازی سود کل زنجیره تأمین است که خود به دو بخش تقسیم می‌شود. بخش نخست، درآمدهای زنجیره تأمین که شامل درآمد حاصل از فروش و همچنین یارانه دریافتی از دولت است. بخش دوم هزینه‌های مختلف زنجیره تأمین را دربرمی‌گیرد که شامل هزینه‌های تولید، حمل‌ونقل و بازیافت است.

$$\begin{aligned}
 \text{Max } Z_1 = & \sum_T \sum_e \sum_f \sum_r R_{e,f,r} O_{T,e,f,r} \\
 & + \sum_T \sum_f \sum_r R_{f,r}^{ce} O_{T,f,r}^{ce} + \sum_T \sum_r S_r^{rep} Q_{T,r}^{ce,rep} \\
 & + \sum_T \sum_f \sum_r R_{f,r}^{rep} Q_{T,f,r}^{rep} \\
 & - \sum_T \sum_e \sum_f \sum_r C_{e,f,r}^{pr} O_{T,e,f,r} \\
 & - \sum_T \sum_f \sum_r C_{f,r}^{pr,rep} Q_{T,f,r}^{rep} - \sum_T \sum_f \sum_r C_{f,r}^{pr,ce} Q_{T,f,r}^{ce} \\
 & - \sum_T \sum_e \sum_r C_{e,r}^{pro} M_{T,e,r} - \sum_T \sum_f \sum_r C_{f,r}^{pro} M_{T,f,r} \\
 & - \sum_T \sum_e \sum_f \sum_r \sum_k C_{e,f,k}^{tra} B_{T,e,f,r,k} N_{e,f,k}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
& - \sum_T \sum_f \sum_r \sum_k C_{f,k}^{tra} B_{T,f,r,k}^{ce} N_{f,k}^{ce} \\
& - \sum_T \sum_e \sum_r h_{e,r}^{raw} I_{T,e,r}^{raw} - \sum_T \sum_f \sum_r h_{f,r}^{raw} I_{T,f,r}^{raw} \\
& - \sum_T \sum_f \sum_r h_{f,r} I_{T,f,r} - \sum_T \sum_r C_r^{rep} Q_{T,r}^{rep} \\
& - \sum_T \sum_f \sum_r \sum_k C_{f,k}^{tra} B_{T,f,r,k}^{rep} N_{f,k}^{rep} \\
& - \sum_T \sum_r \sum_k C_k^{tra,ce,rep} B_{T,r,k}^{ce,rep} N_k^{ce,rep} \\
& - \sum_T \sum_r \sum_k C_k^{tra,rep,fin} B_{T,r,k}^{rep,fin} N_k^{rep,fin} \\
& - \sum_T \sum_r C_r^{fin} Q_{T,r}^{rep,fin} - \sum_T \sum_r \{ (h_r^{unrep} I_{T,r}^{unrep}) \\
& + (h_r^{rep,e} I_{T,r}^{rep,e}) + (h_r^{rep,fin} I_{T,r}^{rep,fin}) \} \\
& - \sum_T \sum_e \sum_r C'_{e,r} M_{T,e,r} - \sum_T \sum_f \sum_r C'_{f,r} M_{T,f,r} \\
& - \sum_e \sum_f \sum_k C'_k N_{e,f,k} - \sum_f \sum_k C'_k N_{f,k}^{ce} \\
& - \sum_k C'_k N_k^{ce,rep} - \sum_f \sum_k C'_k N_{f,k}^{rep} - \sum_k C'_k N_k^{rep,fin}
\end{aligned}$$

تابع هدف (۲) حداقل سازی میزان انتشار گاز کربن دی اکسید است که شامل دو قسمت است. قسمت نخست آن میزان انتشار گاز کربن دی اکسید توسط وسایل نقلیه است که وابسته به وزن وسیله و محموله بارگذاری شده در آن است. قسمت دوم تابع هدف میزان انتشار کربن دی اکسید توسط کارخانه های تولیدی است که به میزان تولید وابسته است.

$$\text{Min } Z_2 = \sum_T \sum_e \sum_f \sum_r \sum_k g_k N_{e,f,k} (B_{T,e,f,r,k} + w_k) \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_T \sum_f \sum_r \sum_k g_k N_{f,k}^{ce} (B_{T,f,r,k}^{ce} + w_k) \\
 & + \sum_T \sum_f \sum_r \sum_k g_k N_{f,k}^{rep} (B_{T,f,r,k}^{rep} + w_k) \\
 & + \sum_T \sum_r \sum_k g_k N_k^{ce,rep} (B_{T,r,k}^{ce,rep} + w_k) \\
 & + \sum_T \sum_r \sum_k g_k N_k^{rep,fin} (B_{T,r,k}^{rep,fin} + w_k) \\
 & + \sum_T \sum_e \sum_r g'_{e,r} M_{T,e,r} + \sum_T \sum_f \sum_r g'_{f,r} M_{T,f,r}
 \end{aligned}$$

محدودیت‌ها. محدودیت ۳، نشان‌دهنده ظرفیت موجودی مواد اولیه در تأمین‌کننده مواد اولیه و محدودیت ۴، نشان‌دهنده ظرفیت موجودی مواد اولیه در تأمین‌کننده منابع مصرفی است. محدودیت ۵، ظرفیت موجودی هر منبع در نزد تأمین‌کننده منابع مصرفی پروژه را نشان می‌دهد. محدودیت ۶، نشان‌دهنده ظرفیت موجودی مقادیر اتلاف‌شده از منبع نوع r در نزد مرکز بازیافت است که تحت عملیات بازیافت قرار نگرفته‌اند.

محدودیت ۷، ظرفیت موجودی مقادیر بازیافت‌شده از منبع نوع r در تسهیل را نشان می‌دهد.

$$I_{T,e,r}^{raw} = I_{T-1,e,r}^{raw} + M_{T,e,r} - \sum_f O_{T,e,f,r} \leq u_{e,r} \quad \forall T, e, r \quad (3)$$

$$I_{T,f,r}^{raw} = I_{T-1,f,r}^{raw} + Q_{T,f,r}^{rep} + \sum_e O_{T,e,f,r} - \tau_{f,r}^{r/m} M_{T,f,r} \leq u_{f,r} \quad \forall T, f, r \quad (4)$$

$$I_{T,f,r} = I_{T-1,f,r} + M_{T,f,r} - O_{T,f,r}^{ce} \leq u_{f,r} \quad \forall T, f, r \quad (5)$$

$$I_{T,r}^{unrep} = I_{T-1,r}^{unrep} + Q_{T,r}^{ce,rep} - Q_{T,r}^{rep} \quad \forall T, r \quad (6)$$

$$I_{T,r}^{rep,fin} = I_{T-1,r}^{rep,fin} + \tau_r^{fin} Q_{T,r}^{rep} - Q_{T,r}^{rep,fin} \leq u_r^{rep,fin} \quad \forall T, r \quad (7)$$

محدودیت ۸، نمایانگر روابط پیش‌نیازی فعالیت‌های پروژه است.

$$S_j \geq S_i + P_i \quad \forall i, j \in PA, i \in H_j \quad (8)$$

محدودیت ۹، نشان می‌دهد که زمان شروع هر فعالیت باید در فاصله شناوری کل خود باشد.

$$S_i = \sum_{t=ES_i}^{LS_i} tX_{i,t} \quad \forall i \in PA \quad (9)$$

محدودیت ۱۰، نشان می‌دهد که هر فعالیت می‌تواند یک‌بار آن هم در فاصله شناوری خود شروع شود و نباید منقطع شود.

$$\sum_{t=ES_i}^{LS_i} X_{i,t} = 1 \quad \forall i \in PA \quad (10)$$

محدودیت‌های ۱۱ تا ۱۳ نشان می‌دهند که در صورت شروع فعالیت i در روز l ، فعالیت برای مدت P_i روز اجرا می‌شود و در صورتی که در روز l شروع نشود در این روز هم اجرا نخواهد شد؛ ولی ممکن است در روزهای بعدی اجرا شود.

$$\sum_{l=t}^{t+P_i-1} Y_{i,l} \geq P_i X_{i,t} \quad \forall i \in PA, t \quad (11)$$

$$Y_{i,t} \leq \sum_{l=0}^t X_{i,l} \quad \forall i \in PA, t \quad (12)$$

$$\sum_{t=ES_i}^{LS_i+P_i-1} Y_{i,t} \leq P_i \quad \forall i \in PA \quad (13)$$

محدودیت ۱۴، مقدار سفارش صادرشده از پروژه به زنجیره تأمین را نشان می‌دهد که بر اساس میزان تقاضای روزانه فعالیت‌های پروژه صورت می‌گیرد.

$$Q_{T,f,r}^{ce} \geq \sum_{t=n(T-1)+1}^{nT} D_{i,r} Y_{i,t} \quad \forall T, f, r, i \in PA \quad (14)$$

محدودیت ۱۵، مقدار منابع اتلاف‌شده در سایت پروژه را که به مرکز بازیافت منتقل می‌شود،

نشان می‌دهد.

$$Q_{T,r}^{ce,rep} = r_r \sum_f O_{T,f,r}^{ce} \quad \forall T, r \quad (15)$$

محدودیت ۱۶، نشان‌دهنده حداکثر ظرفیت حمل‌ونقل در مسیر بین تأمین‌کننده مواد اولیه و تأمین‌کننده منابع مصرفی است.

محدودیت ۱۷، حداکثر ظرفیت حمل‌ونقل در مسیر بین تأمین‌کننده منابع مصرفی و سایت پروژه را نشان می‌دهد.

محدودیت ۱۸، نمایانگر حداکثر ظرفیت حمل‌ونقل در مسیر بین سایت پروژه و مرکز بازیافت است.

محدودیت ۱۹، حداکثر ظرفیت حمل‌ونقل در مسیر بین مرکز بازیافت و تأمین‌کننده منابع مصرفی را نشان می‌دهد.

محدودیت ۲۰، نشان‌دهنده حداکثر ظرفیت حمل‌ونقل در مسیر بین مرکز بازیافت و مرکز دفن نهایی است.

$$\sum_r O_{T,e,f,r} \leq \sum_k N_{e,f,k} V_k \quad \forall T, e, f \quad (16)$$

$$\sum_r O_{T,f,r}^{ce} \leq \sum_k N_{f,k}^{ce} V_k \quad \forall T, f \quad (17)$$

$$\sum_r O_{T,r}^{ce,rep} \leq \sum_k N_k^{ce,rep} V_k \quad \forall T \quad (18)$$

$$\sum_r O_{T,f,r}^{rep} \leq \sum_k N_{f,k}^{rep} V_k \quad \forall T, f \quad (19)$$

$$\sum_r O_{T,r}^{rep,fin} \leq \sum_k N_k^{rep,fin} V_k \quad \forall T \quad (20)$$

محدودیت ۲۱، محدودیت تعادلی جریان بین تأمین‌کننده مواد اولیه و تأمین‌کننده منابع مصرفی است؛ همچنین محدودیت ۲۲، محدودیت تعادلی جریان بین تأمین‌کننده منابع مصرفی و سایت پروژه را نشان می‌دهد.

محدودیت ۲۳، نشان‌دهنده محدودیت تعادلی جریان بین سایت پروژه و مرکز بازیافت است.

محدودیت ۲۴، محدودیت تعادلی جریان بین مرکز بازیافت و تأمین‌کننده منابع مصرفی را

نشان می‌دهد.

محدودیت ۲۰، نمایانگر محدودیت تعادلی جریان بین مرکز بازیافت و مرکز دفن نهایی است.

$$\sum_r \sum_k N_{e,f,k} B_{T,e,f,r,k} \geq \sum_r O_{T,e,f,r} \quad \forall T, e, f \quad (21)$$

$$\sum_r \sum_k N_{f,k}^{ce} B_{T,f,r,k}^{ce} \geq \sum_r O_{T,f,r}^{ce} \quad \forall T, f \quad (22)$$

$$\sum_r \sum_k N_k^{ce,rep} B_{T,r,k}^{ce,rep} \geq \sum_r Q_{T,r}^{ce,rep} \quad \forall T \quad (23)$$

$$\sum_r \sum_k N_{f,k}^{rep} B_{T,f,r,k}^{rep} \geq \sum_r Q_{T,f,r}^{rep} \quad \forall T, f \quad (24)$$

$$\sum_r \sum_k N_k^{rep,fin} B_{T,r,k}^{rep,fin} \geq \sum_r Q_{T,r}^{rep,fin} \quad \forall T \quad (25)$$

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

روش حل. مدل ذکرشده در قسمت قبل به کمک نرم‌افزار GAMS^۱ حل شد. برای حل در نرم‌افزار GAMS از روش برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط (MIP)^۲ استفاده شد. در انتخاب روش حل مدل نیز به علت اینکه متغیرهای تصمیم‌باینری (صفر و یک) هستند و حل مدلی با متغیرهای صفر و یک در نرم‌افزار GAMS با برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط امکان‌پذیر است از این روش برنامه‌نویسی استفاده شد.

خطی‌سازی تابع هدف دوم و محدودیت‌ها. مدل ارائه‌شده غیرخطی است و به دلیل آنکه مدل‌های غیرخطی دشوارتر از مدل‌های خطی حل می‌شوند، در این قسمت تلاش شده است تا با خطی‌سازی عبارات غیرخطی موجود در مدل، مدل ارائه‌شده خطی شود. به‌طورکلی در این مسئله یک نوع عبارت غیرخطی وجود دارد که در آن یک متغیر گسسته در یک متغیر پیوسته ضرب می‌شود (تابع هدف ۲ و محدودیت‌های ۲۱ تا ۲۵ شامل این عبارات غیرخطی هستند) رابطه غیرخطی موجود در روابط ذکرشده مربوط به مقدار کل حمل‌شده توسط وسیله نقلیه نوع k است.

برای خطی‌سازی عبارات غیرخطی موجود در مدل:

1. General Algebraic Modeling System
2. Mix Integer Programming

فرض شود $w = x \times y$ حاصل ضرب دو متغیر گسسته و پیوسته باشد؛ به طوری که:

$$x \in R_+, y \in Z_+, w = x \times y \quad (26)$$

$$x \leq a, y \leq b, w \geq 0$$

با توجه به کران دار بودن دو متغیر X و Y می‌توان از سه قید زیر برای خطی‌سازی حاصل ضرب این دو متغیر بهره برد [20]:

$$w \leq ay \quad (27)$$

$$w \leq bx \quad (28)$$

$$w \geq bx + ay - ab \quad (29)$$

با تعریف متغیر جدید A به جای حاصل ضرب N و B در تابع هدف دوم و محدودیت‌ها و همچنین با توجه به مطالب ارائه شده در مورد خطی‌سازی، تابع هدف دوم پس از جای‌گذاری متغیر جدید به صورت رابطه 30، تغییر پیدا می‌کند و کاملاً خطی می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_2 = & \sum_T \sum_e \sum_f \sum_r \sum_k g_k (A_{T,e,f,r,k} + N_{e,f,k} w_k) \\ & + \sum_T \sum_f \sum_r \sum_k g_k (A_{T,f,r,k}^{ce} + N_{f,k}^{ce} w_k) \\ & + \sum_T \sum_f \sum_r \sum_k g_k (A_{T,f,r,k}^{\text{rep}} + N_{f,k}^{\text{rep}} w_k) \\ & + \sum_T \sum_r \sum_k g_k (A_{T,r,k}^{\text{ce,rep}} + N_k^{\text{ce,rep}} w_k) \\ & + \sum_T \sum_r \sum_k g_k (A_{T,r,k}^{\text{rep,fin}} + N_k^{\text{rep,fin}} w_k) \\ & + \sum_T \sum_e \sum_r g'_{e,r} M_{T,e,r} + \sum_T \sum_f \sum_r g'_{f,r} M_{T,f,r} \end{aligned} \quad (30)$$

محدودیت‌های 21 تا 25 پس از اعمال خطی‌سازی به روابط 31 تا 35 تبدیل می‌شوند:

$$\sum_r \sum_k A_{T,e,f,r,k} \geq \sum_r O_{T,e,f,r} \quad \forall T, e, f \quad (31)$$

$$\sum_r \sum_k A_{T,f,r,k}^{ce} \geq \sum_r O_{T,f,r}^{ce} \quad \forall T, f \quad (32)$$

$$\sum_r \sum_k A_{T,r,k}^{ce,rep} \geq \sum_r Q_{T,r}^{ce,rep} \quad \forall T \quad (33)$$

$$\sum_r \sum_k A_{T,f,r,k}^{rep} \geq \sum_r Q_{T,f,r}^{rep} \quad \forall T, f \quad (34)$$

$$\sum_r \sum_k A_{T,r,k}^{rep,fin} \geq \sum_r Q_{T,r}^{rep,fin} \quad \forall T \quad (35)$$

با توجه به تعدد روابط افزوده‌شده به مدل پس از خطی‌سازی، به‌عنوان نمونه تنها برای یکی از متغیرهای غیرخطی موجود در مدل، روابط خطی‌سازی در زیر آورده می‌شود و سایر متغیرهای غیرخطی موجود نیز به طریق مشابه با روابط ۳۶ تا ۴۱، جایگزین می‌شود:

$$A_{T,e,f,r,k} = B_{T,e,f,r,k} N_{e,f,k} \quad (36)$$

$$A_{T,e,f,r,k} \geq 0$$

$$B_{T,e,f,r,k} \leq V_k \quad \forall T, e, f, r, k \quad (37)$$

$$N_{e,f,k} \leq f_k \quad \forall T, e, f, r, k \quad (38)$$

$$A_{T,e,f,r,k} \leq V_k N_{e,f,k} \quad \forall T, e, f, r, k \quad (39)$$

$$A_{T,e,f,r,k} \leq f_k B_{T,e,f,r,k} \quad \forall T, e, f, r, k \quad (40)$$

$$A_{T,e,f,r,k} \geq V_k N_{e,f,k} + f_k B_{T,e,f,r,k} - ab \quad \forall T, e, f, r, k \quad (41)$$

حل مدل با دو تابع هدف. یکی از روش‌های حل مدل با دو تابع هدف، استفاده از روش اپسیلون است. به این صورت که اگر مدل دو هدفه به‌صورت رابطه ۴۲، فرض شود، حل این مدل با مشکل روبه‌رو خواهد شد. برای این کار از روش محدودیت اپسیلون استفاده می‌شود [۲۳].

$$\begin{aligned} & \max f_1(x) \\ & \min f_2(x) \\ \text{St:} & \\ & x \in S \end{aligned} \quad (42)$$

اگر X متغیر تصمیم و $f_1(x)$ تابع هدف باشند. در روش اپسیلون، یک تابع هدف با استفاده از تابع هدف دیگر به صورت محدودیت، بهینه می‌شود. مدل به صورت رابطه ۴۳، بازنویسی می‌گردد:

$$\begin{aligned} & \max f_1(x) \\ \text{St:} & \\ & f_2(x) \leq \varepsilon \\ & x \in S, \varepsilon \geq 0 \end{aligned} \quad (43)$$

برای حل مسئله با دو تابع هدف از روش اپسیلون استفاده شده است؛ به گونه‌ای که مدل ابتدا تنها با تابع هدف بیشینه‌سازی (رابطه ۱) حل شد؛ سپس جواب بهینه به دست آمده برای Z_2 به عنوان حد بالای تابع هدف کمینه‌سازی در نظر گرفته شد. پس از آن بار دیگر مدل تنها با در نظر گرفتن تابع هدف دوم و افزودن قید $Z_1 = Z_1^*$ به منظور حفظ شدنی بودن مسئله، حل شده و مقدار به دست آمده به عنوان حد پایین تابع هدف (۲) در نظر گرفته شد. پس از افزودن تابع هدف ۲ به عنوان محدودیت کوچک‌تر مساوی، به ازای مقادیر مختلف ε مدل بالا حل شد و مجموعه جواب‌های پارتویی را ارائه کرد. تصمیم‌گیری برای زنجیره تأمین به خبرگان و مدیران ارشد واگذار شد [۱۴].

علت انتخاب روش اپسیلون، رسیدن به جواب منطقی‌تر و بهتر در عین سادگی روش است [۱۷].

نتایج عددی. برای نشان دادن بهتر موضوع و آنچه در قسمت‌های قبل شرح داده شد، چند مثال ارائه و حل می‌شود. این دو مثال، مدل را در دو حالت بررسی می‌کنند. مثال نخست، مسئله کوچکی با تعداد فعالیت‌های کم برای پروژه و همچنین زنجیره تأمین محدود است؛ اما در مثال دوم، تعداد فعالیت‌ها ۵ برابر و اندازه زنجیره تأمین نیز ۲ برابر شده است تا بتوان توانایی مدل را در دو حالت متفاوت تحلیل و بررسی کرد.

مثال نخست. پروژه‌ای شامل ۱۰ فعالیت را در نظر بگیرد. مدت‌زمان اجرای هر فعالیت و روابط پیش‌نیازی آن‌ها مشخص است. طول دوره پروژه ۱۵۰ روز و هر دوره برنامه‌ریزی شامل ۳۰ روز کاری است. تعداد دوره‌های برنامه‌ریزی برای این پروژه و به تبع آن برای زنجیره تأمین ۶ دوره در نظر گرفته شده است. در این پروژه ۵ نوع منبع متفاوت مصرفی مورد نیاز است که این پنج نوع منبع توسط زنجیره تأمینی که دارای دو سطح تولیدی است، آماده و به سایت پروژه ارسال

می‌شود. در هر سطح ۵ کارخانه تولیدی وجود دارد که هر یک از این کارخانه‌ها توانایی تولید تعداد مشخصی از این منابع را دارند. جریان لجستیک در این زنجیره تأمین توسط ۵ نوع وسیله نقلیه با ظرفیت‌ها و آلاینده‌گی‌های متفاوت صورت می‌گیرد؛ همچنین در این زنجیره تأمین یک مرکز بازیافت و یک مرکز دفع نهایی وجود دارد. مقادیر پارامتر درآمد حاصل از فروش مواد بازیافت‌شده به تأمین‌کننده منابع در جدول ۱ و روابط پیش‌نیازی فعالیت‌های پروژه در جدول ۲، مشاهده می‌شود.

جدول ۱. درآمد حاصل از فروش مواد بازیافت‌شده به تأمین‌کننده منابع

		$R_{f,r}^{rep}$					
		r	۱	۲	۳	۴	۵
f	r						
۱	۱	۵۰	۰	۴۵	۶۰	۸۵	
۲	۲	۵۰	۹۵	۴۵	۶۰	۸۵	
۳	۳	۰	۹۵	۴۵	۰	۸۵	
۴	۴	۵۰	۹۵	۰	۰	۰	
۵	۵	۵۰	۰	۴۵	۶۰	۰	

جدول ۲. روابط پیش‌نیازی فعالیت‌های پروژه (عدد ۱ نشان‌دهنده رابطه پیش‌نیازی و عدد صفر نبود رابطه را نشان می‌دهد)

i	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
j										
۱	۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۰	۰
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰	۰
۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۱	۰
۸	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۹	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱
۱۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

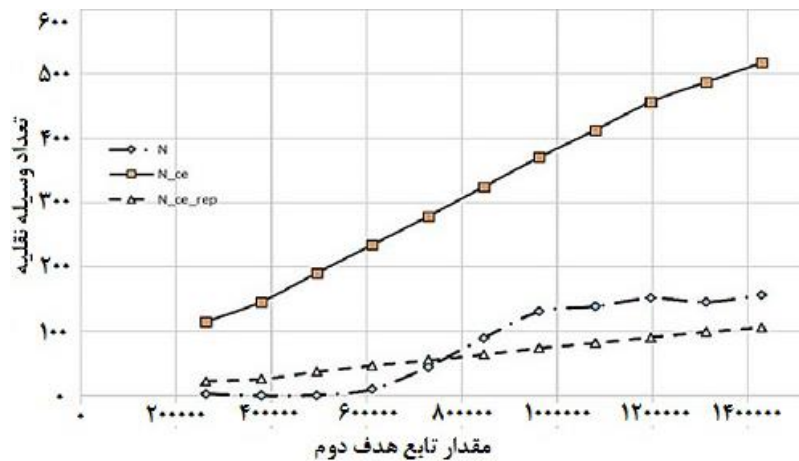
پس از حل مثال با نرم‌افزار گمز و با استفاده از روش محدودیت اِپسیلون می‌توان جدول بازده^۱ را که شامل مجموعه جواب‌های پارتویی است، همانند جدول ۳، ارائه کرد. با توجه به

1. Payoff Table

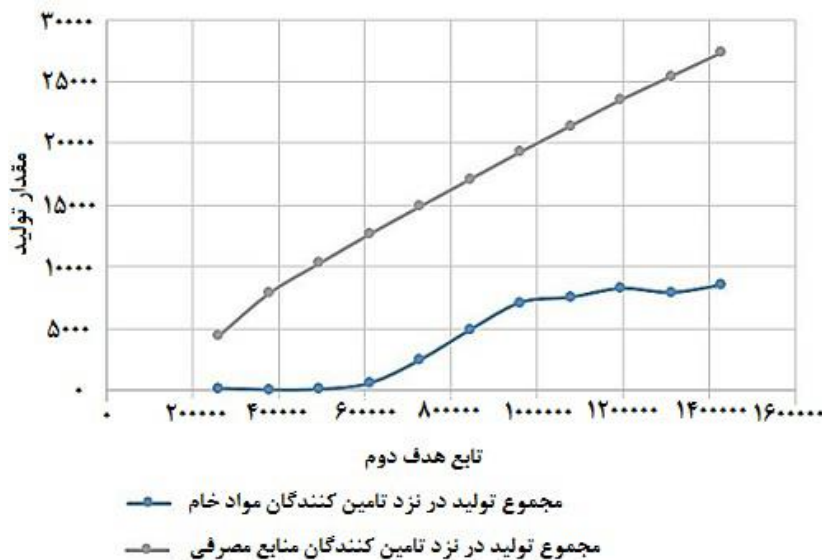
جدول ۳، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار اپسیلون (میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید)، مقدار سود (تابع هدف اول) نیز روند افزایشی دارد. حال برای تصمیم‌گیری در مورد سطح موردنظر سود و همچنین میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید باید نتایج مدل به خبرگان و همچنین مدیران ارشد زنجیره تأمین ارائه شود تا آن‌ها بتوانند در مورد سطح تعادلی سود و عوامل زیست‌محیطی تصمیم‌گیری کنند. با توجه به جدول ۳ با افزایش مقدار اپسیلون میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید نیز افزایش می‌یابد. انتشار گاز کربن دی‌اکسید در این مسئله وابسته به تعداد وسایل نقلیه به کار گرفته شده در مسیرهای مختلف زنجیره تأمین است. با توجه به نمودار شکل ۳، می‌توان نتیجه گرفت که به‌طور کلی افزایش میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید تقریباً در هر سه مسیر در نظر گرفته شده به صورت تقریباً مستقیم به تعداد وسایل نقلیه به کار گرفته شده وابسته است؛ البته میزان شدت این تأثیرگذاری در مسیرهای مختلف متفاوت است. شکل ۴، مقادیر تولید را در دو سطح اول زنجیره تأمین برحسب مقادیر مختلف اپسیلون نشان می‌دهد. در شکل ۴، نیز مشاهده می‌شود که افزایش مقادیر اپسیلون و به تبع آن افزایش میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید موجب افزایش تولید در دو سطح اول زنجیره تأمین می‌شود. با توجه به شیب دو نمودار و به‌ویژه نمودار مقادیر تولید در نزد تأمین‌کنندگان منابع مصرفی و مقایسه آن با نمودار مقادیر تابع هدف، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش سود در زنجیره تأمین، وابستگی نسبتاً خطی به مقادیر تولید در سطوح مختلف زنجیره تأمین دارد.

جدول ۳. مجموعه جواب‌های پارتویی حاصل از روش محدودیت اپسیلون

مقدار تابع هدف اول	۲۵۴۴۵۴۳	۶۸۲۰۰۷۱	۹۱۲۵۶۵۵	۱۲۴۹۸۵۰	۱۴۹۹۴۹۷۵	۱۷۳۷۰۳۰۲	۱۹۷۳۴۳۳۴	۲۲۱۰۱۷۶۳	۲۴۴۴۹۱۲۷	۲۶۶۴۵۸۶۲	۲۸۷۸۷۸۹۷
مقدار تابع هدف دوم به‌صورت محدودیت	۲۶۲۰۱۲	۳۷۸۷۸۹	۴۹۵۵۶۶	۷۳۹۱۳۲	۸۳۹۱۳۱	۸۴۵۸۹۱	۹۶۲۶۷۵	۱۰۷۹۴۵۳	۱۱۹۶۲۳۰	۱۳۱۳۰۰۷	۱۴۳۹۷۷۵



شکل ۴. نمودار تعداد کل وسایل نقلیه در سه مسیر متفاوت به ازای مقادیر مختلف اپسیلون



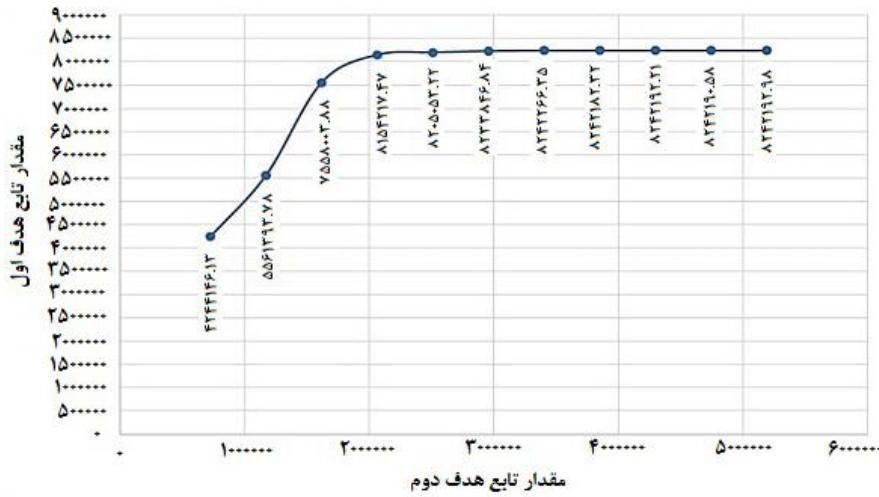
شکل ۵. نمودار مقادیر تولید به ازای مقادیر مختلف اپسیلون

مثال دوم. مثال دیگری نیز در ابعاد بزرگ‌تر انجام شد. در این مثال پروژه ساخت و سازی را در نظر بگیرید که دارای ۵۰ فعالیت است. مدت زمان اجرای پروژه ۱۰۸ روز و شامل ۵ دوره برنامه‌ریزی زمانی است. هر دوره متشکل از ۳۰ روز کاری است. نیازهای این پروژه به منابع مصرفی را زنجیره تأمین با دو سطح از تولیدکنندگان تأمین می‌کند. در سطح نخست که مواد خام مورد نیاز منابع مصرفی پروژه تولید می‌شود، ۱۰ کارخانه فعالیت می‌کنند و در سطح بعدی نیز

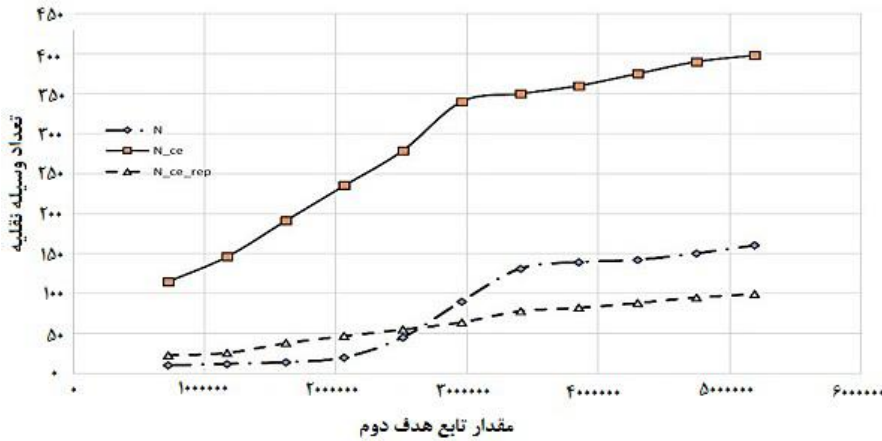
که منابع مصرفی تولید می‌شود، ۱۰ کارخانه در حال تولید ۸ نوع منبع مورد نیاز پروژه هستند. حمل‌ونقل در این زنجیره تأمین توسط ۱۰ نوع وسیله نقلیه مختلف صورت می‌گیرد. از آوردن داده‌ها به علت حجم بسیار بالای آن‌ها خودداری شده است. پس از حل مثال توسط نرم‌افزار گمس نتایج آن در جدول ۴، ارائه شده است. با توجه به جدول ۴ و شکل ۵، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار تابع هدف اول (سود) به ازای مقادیر بزرگ‌تر از ϵ_4 غیرحساس است و با افزایش میزان آلاینده‌گی و انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید، برخلاف مثال قبل، میزان سود افزایش زیادی ندارد و در بازه ۸۰۰۰۰۰۰ تا ۸۵۰۰۰۰۰ در نوسان است. این رفتار تابع هدف اول را می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که با افزایش میزان انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید و به تبع آن افزایش میزان تولید و همچنین افزایش میزان حمل‌ونقل در زنجیره تأمین که در مثال نخست موجب افزایش سود می‌شد در اینجا موجب افزایش هزینه‌های زیست‌محیطی شده و باعث می‌شود که مقدار تابع هدف اول نسبت به تغییرات انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید بی‌تفاوت باشد. حال با توجه به اینکه میزان سود زنجیره تأمین با افزایش انتشار کربن‌دی‌اکسید تغییر محسوسی نمی‌کند، بهتر است که مدیران زنجیره تأمین با سطح پایین‌تری از مقدار تولید و همچنین مقدار انتشار گاز دی‌اکسید کربن به حاشیه سود موردنظر خود دست یابند؛ همچنین با توجه به شکل ۶، می‌توان دریافت که تعداد وسایل نقلیه فعال در زنجیره تأمین به ازای مقادیر بزرگ‌تر از ϵ_6 افزایش چندانی ندارند که این رفتار مشابه رفتار تابع هدف اول (سود) نسبت به افزایش مقادیر انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید است. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار آلاینده‌گی مدل نسبت به افزایش مقدار سود و سایر متغیرها از خود مقاومت نشان می‌دهد و این بدان معنا است که می‌توان در سطح پایین‌تری از آلاینده‌گی به مقدار سود موردنظر دست یافت. در شکل ۷، نیز مشاهده می‌شود که افزایش مقادیر اپسیلون و به تبع آن افزایش میزان انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید، موجب افزایش تولید در دو سطح اول زنجیره تأمین می‌شود. با توجه به شیب دو نمودار می‌توان به این نکته دست یافت که به ازای مقادیر بیشتر از ϵ_6 نمودار مقدار تولید در دو سطح اول و دوم زنجیره تأمین رفتاری مشابه نمودار سود دارد، به این مفهوم که با افزایش مقدار انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید مقدار تولید نیز افزایش نسبی پیدا می‌کند؛ ولی این افزایش در سطح تولید لزوماً به افزایش مقدار سود در تابع هدف منجر نمی‌شود؛ بلکه با افزایش مقدار هزینه‌های زیست‌محیطی پرداختی به دولت، اثر افزایش درآمد در تابع هدف تقریباً خنثی شده و مقدار سود به ازای مقادیر بیشتر از ϵ_6 تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین روند تغییرات مقدار تولید به ازای مقادیر مختلف اپسیلون در شکل ۸ و روند تغییرات انتشار گاز دی‌اکسید کربن به ازای وزن وسیله نقلیه در سرعت‌های مختلف در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۴. مجموعه جواب‌های پارتویی حاصل از روش محدودیت اِپسیلون

مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم به صورت محدودیت
۴۲۴۴۴۱۴	۷۲۲۵۷۶
۵۵۶۱۳۹۳	۱۱۶۹۶۲۳
۷۵۵۸۰۰۳	۱۶۱۶۶۶۹
۸۱۵۴۲۱۷	۲۰۶۳۷۱۵
۸۲۰۵۰۵۳	۲۵۱۰۷۶۲
۸۲۳۳۸۴۶	۲۹۵۸۷۶۰
۸۲۴۲۲۲۶	۳۴۰۸۷۵۴
۸۲۴۳۱۸۲	۳۸۵۹۱۰۰
۸۲۴۳۱۹۲	۴۲۹۴۹۸۲
۸۲۴۳۱۹۲	۴۷۴۴۹۵۷
۸۲۴۳۱۹۲	۵۱۹۳۰۴۵



شکل ۶. نمودار مقادیر سود به ازای مقادیر مختلف اِپسیلون

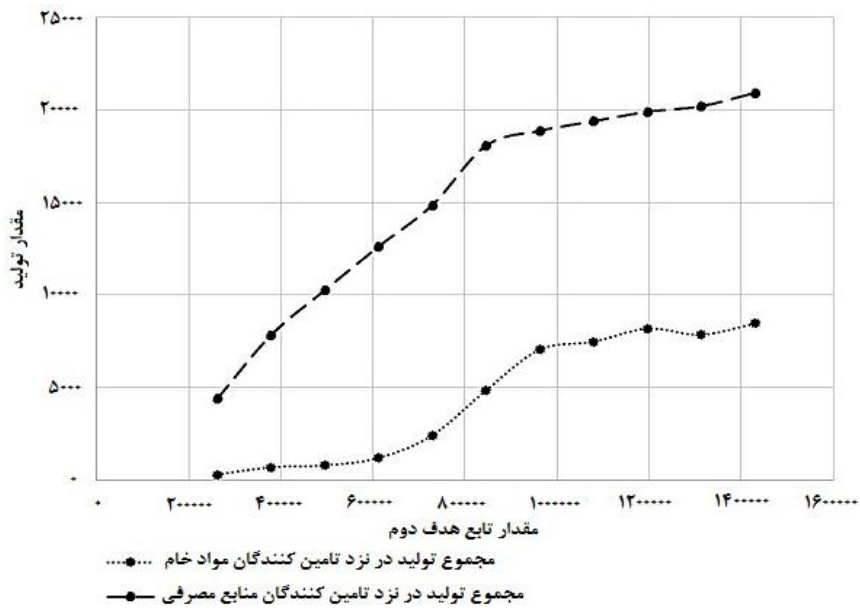


شکل ۷. نمودار تعداد وسایل نقلیه به ازای مقادیر مختلف اِپسیلون

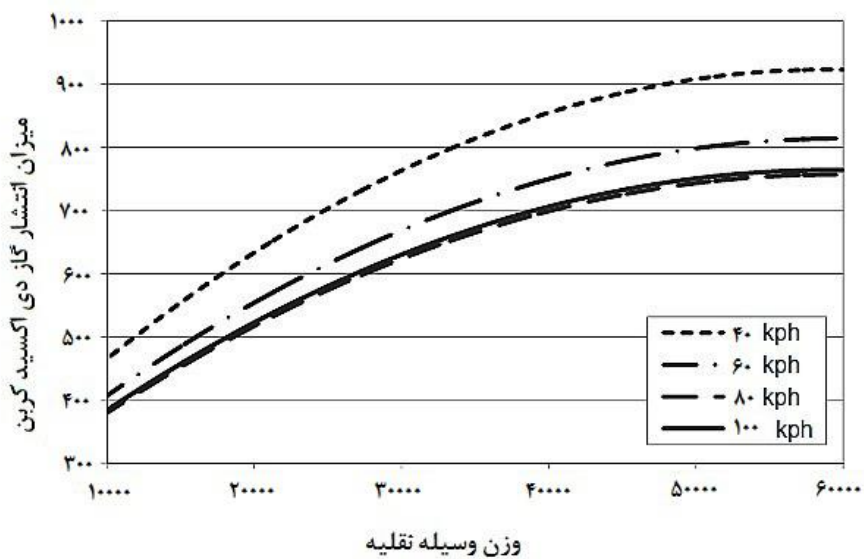
تحلیل نتایج. به‌طور کلی می‌توان نتایج را به چند بخش زیر تقسیم کرد:

۱. در قسمت تابع هدف در هر دو مثال مدل ارائه‌شده نسبت به مدل پایه بهبود یافته است و مقدار تابع هدف بهتر از مقدار تابع هدف مدل پایه است؛
۲. مقدار خروجی دو متغیر تأثیرگذار در مقدار سود (M و N) متناسب با رفتار نمودار تابع هدف اول (سود) است؛
۳. با توجه به مجموعه جواب‌های پارتویی ارائه‌شده برای هر مثال، به‌منظور تصمیم‌گیری برای زنجیره تأمین و پروژه باید با مشورت خبرگان، سیاستی اتخاذ شود که علاوه بر حداقل کردن انتشار گازهای آلاینده، حداکثر شدن سود کلی زنجیره تأمین و به تبع آن سود تک‌تک اعضای زنجیره مدنظر قرار گیرد؛
۴. با توجه به نتایج مثال اول مشاهده می‌شود که با افزایش سطح آلاینده‌گی، میزان سود زنجیره تأمین نیز افزایش پیدا می‌کند؛ اما در مثال دوم از مقدار E_6 به بالا مقدار سود افزایش نمی‌یابد؛ بلکه مقدار آلاینده‌گی زیاد می‌شود و به تبع آن هزینه‌های زیست‌محیطی تحمیل شده به زنجیره تأمین نیز افزایش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد که افزایش درآمد ناشی از افزایش مقدار تولید را خنثی می‌کند و سطح سود را تقریباً در سطح ثابتی نگه می‌دارد؛
۵. در هر دو مثال ارائه‌شده، سرعت به‌صورت ثابت و متوسط سرعت حرکت وسایل نقلیه در مسیرهای متفاوت برابر با ۶۰ کیلومتر بر ساعت در نظر گرفته شده است؛ اما برای نزدیک شدن مدل به دنیای واقعی، پارامتر سرعت نیز به‌صورت ضربی در تابع هدف دوم در مدل در نظر گرفته شد. شکل ۷، مقدار انتشار گاز کربن دی‌اکسید در هر کیلومتری را به ازای وزن وسیله نقلیه نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۷، کاهش سرعت باعث افزایش میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید می‌شود و این مطلب به آن دلیل است که با کاهش سرعت، وسیله نقلیه باید با دنده‌های سنگین‌تر و در نتیجه دور موتور بالاتر حرکت کند که در این صورت باعث افزایش انتشار گازهای آلاینده، مصرف سوخت و همچنین کاهش مسافت طی شده می‌شود؛
۶. توابع هدف ۱ و ۲ با توجه به جدول‌های ۳ و ۴، تضاد دارند؛ به این صورت که برای افزایش سود بیشتر مدل به سمت تولید بیشتر حرکت می‌کند؛ اما از طرفی تولید بیشتر به انتشار گاز گلخانه‌ای بیشتر منجر می‌شود؛ بنابراین با افزایش تابع هدف ۱، تابع هدف ۲، نیز افزایش می‌یابد که با توجه به اینکه حداقل‌سازی هست؛ بنابراین این دو تابع هدف دارای تضاد هستند؛
۷. با افزایش ابعاد مسئله، زمان حل مدل نیز به‌صورتی تصاعدی افزایش می‌یابد. در این مقاله دو مثال با ابعاد کوچک و بزرگ در نظر گرفته شد. حال اگر اجرای این مدل در مسائل واقعی همچون پروژه‌های سنگین نفتی و پتروشیمی و غیره مدنظر قرار گیرد، باید از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری برای حل مسئله استفاده شود. واضح است که در مسائل واقعی استفاده از روش‌های

حل مبتنی بر روش‌های دقیق به لحاظ زمان حل به صرفه نیست و حتی ممکن است جوابی که دریافت می‌شود با جواب بهینه کلی فاصله بسیار زیادی داشته باشد.



شکل ۸. نمودار مقادیر تولید به ازای مقادیر مختلف اسپیلون



شکل ۹. نمودار میزان انتشار گاز دی‌اکسید کربن به ازای وزن وسیله نقلیه در سرعت‌های مختلف

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

زنجیره تأمین سبز ساخت‌وساز از مباحثی است که به‌تازگی در مبنای نظری زنجیره تأمین و به‌خصوص زنجیره تأمین ساخت به آن پرداخته شده است. پژوهشگران به‌صورت نسبتاً جدی در بحث زنجیره تأمین ساخت از سال ۱۹۹۰ تاکنون به ارائه پژوهش‌ها و مقاله پرداخته‌اند و اغلب پژوهش‌های ارائه‌شده در این زمینه حاوی مدل‌های مدیریتی و کیفی است و خلأ جدی برای مدل‌های ریاضی کارا احساس می‌شود. با توجه به اینکه مبحث مدیریت زنجیره تأمین و به‌خصوص زنجیره تأمین ساخت‌وساز، حوزه‌ای مدیریتی است؛ بنابراین برای تصمیم‌گیری مؤثر و مفیدتر در این بخش نیاز مبرم به وجود مدل‌های ریاضی کارا و توانمند احساس می‌شود. مدلی که در این مقاله ارائه شده است از بسیاری جهات نوآوری دارد. با توجه به مرور مقاله‌های موجود در این حوزه و مطالعه مدل‌هایی که در زمینه زنجیره تأمین سبز ساخت‌وساز ارائه شده است، این مدل‌ها بدون در نظر گرفتن اثر واقعی زیست‌محیطی وسایل نقلیه و همچنین کارخانه‌های تولیدی، تنها به در نظر گرفتن عوامل ثابتی به‌عنوان عوامل زیست‌محیطی بسنده کرده‌اند؛ همچنین اغلب مدل‌های موجود در زنجیره تأمین ساخت از حالت سنتی مدیریت زنجیره تأمین که فقط به بهینه‌کردن سود تک‌تک اعضا توجه می‌کند، تبعیت می‌کنند؛ اما در این پژوهش از رویکرد جدیدتری استفاده شد تا زنجیره تأمین به‌صورت یکپارچه بررسی شود؛ از طرفی محدودیت‌های زمانی پروژه نیز در این مدل‌ها منظور نشده است. در مدل این مقاله علاوه بر در نظر گرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی تولید و وسایل نقلیه به کاهش میزان انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید توجه شده است؛ همچنین محدودیت‌های زمانی پروژه در نظر گرفته شد تا میزان تولید، موجودی، حمل‌ونقل و غیره بر اساس مقدار تقاضای پروژه در هر دوره تعیین شود.

با توجه به ویژگی‌های مدل ارائه‌شده می‌توان پیشنهاد‌های زیر را برای توسعه این مدل ارائه کرد:

۱. افزودن تابع هدف سوم به‌منظور کاهش زمان اجرای پروژه؛
۲. در نظر گرفتن حالت غیرقطعی مانند احتمالی یا فازی برای میزان تقاضای فعالیت‌های پروژه؛
۳. در نظر گرفتن حالت غیرقطعی برای مدت‌زمان اجرای هر فعالیت؛
۴. در نظر گرفتن موجودی در سایت پروژه؛
۵. استفاده از روش‌های تسطیح و تخصیص منابع به‌منظور جبران کمبود منابع با فرض محدود بودن منابع پروژه؛
۶. استفاده مشترک از وسایل نقلیه در مسیرهای مختلف و تعیین مسیر بهینه برای هر یک از وسایل نقلیه؛

۷. استفاده از روش‌های زمان‌بندی غیرقطعی همانند شبکه پرت و شبکه گرت با توجه به غیرقطعی در نظر گرفتن زمان اجرای فعالیت‌ها؛
۸. در موضوع زیست‌محیطی می‌توان چند نوع گاز آلاینده و میزان انتشار آن‌ها را به عوامل مختلفی چون بُعد مسافت، دور موتور خودروها، شیب جاده‌ها، روش تولید منابع و غیره وابسته در نظر گرفت.

منابع

1. Chen, Y. (2012). Study on the Application of Lean Construction Supply Chain Management in EPC Project. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 201, pp. 1207-1212). Trans Tech Publications.
2. Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K., & van Wassenhove, L. N. (Eds.). (2013). *Reverse logistics: quantitative models for closed-loop supply chains*. Springer Science & Business Media.
3. Dowlatshahi, S. (2000). *Developing a theory of reverse logistics*. *Interfaces*, 30 (3), 143-155.
4. Dulaimi, M. Khalfan, M. M., & McDermott, P. (2006). Innovating for supply chain integration within construction. *Construction Innovation*, 6(3), 143-157.
5. Elhedhli, S., & Merrick, R. (2012). Green supply chain network design to reduce carbon emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(5), 370-379.
6. Fleischmann, M., Beullens, P., BLOEMHOF-RUWAARD, J. M., & Wassenhove, L. N. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and operations management*, 10(2), 156-173.
7. Gangoellis, M., Casals, M., Gasso, S., Forcada, N., Roca, X., & Fuertes, A. (2009). A methodology for predicting the severity of environmental impacts related to the construction process of residential buildings. *Building and Environment*, 44(3), 558-571.
8. Green, S. D., Fernie, S., & Weller, S. (2005). Making sense of supply chain management: a comparative study of aerospace and construction. *Construction Management and Economics*, 23(6), 579-593.
9. Gupte, A., Ahmed, S., Cheon, M. S., & Dey, S. (2013). Solving mixed integer bilinear problems using MILP formulations. *SIAM Journal on Optimization*, 23(2), 721-744.
10. Koné, O., Artigues, C., Lopez, P., & Mongeau, M. (2011). Event-based MILP models for resource-constrained project scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 38(1), 3-13.
11. Krikke, H. R., Van Harten, A., & Schuur, P. C. (1999). Business case Rotob: recovery strategies for monitors. *Computers & Industrial Engineering*, 36(4), 739-757.
12. Kumar, V., & Viswanadham, N. (2007, September). A CBR-based decision support system framework for construction supply chain risk management. In *Automation Science and Engineering, 2007. CASE 2007. IEEE International Conference on* (pp. 980-985). IEEE.
13. Jaskowski, P., Sobotka, A., & Czarnigowska, A. (2014). Decision model for selecting supply sources of road construction aggregates. *Engineering Economics*, 25(1), 13-20.
14. Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*, 213(2), 455-465.
15. Meng, X. (2010). Assessment framework for construction supply chain relationships: Development and evaluation. *International Journal of Project Management*, 28(7), 695-707.
16. Morris, P., & Pinto, J. K. (Eds.). (2010). *The Wiley guide to project*

technology, supply chain, and procurement management (Vol. 7). John Wiley & Sons.

17. Mosleh Shirazi, A. Khalifeh, M. (2015). Measuring Efficiency of Iran Global Competitiveness Index Compared with Selected Countries using Two-Stage Data Envelopment Analysis Model. *Journal of Industrial Management Perspective*, 5(19), 95-110

18. Naber, A., & Kolisch, R. (2014). MIP models for resource-constrained project scheduling with flexible resource profiles. *European Journal of Operational Research*, 239(2), 335-348.

19. O'Brien, W. J. (1999, August). Construction Supply-Chain Management: a vision for advanced coordination, costing, and control. In *NSF Berkeley-Stanford Construction Research Workshop* (Vol. 6). California: Stanford Univ.

20. Rabieh, M. Fadaei, A. (2015). Fuzzy Robust Mathematical Model for Project Portfolio Selection and its Solving through Multi Objective Differential Evolutionary Algorithm, *Journal of Industrial Management Perspective*, 5(19), 65-90

21. Rogers, D. S., & Tibben-Lembke, R. (2001). An examination of reverse logistics practices. *Journal of business logistics*, 22(2), 129-148.

22. Rubio, S., Chamorro, A., & Miranda, F. J. (2008). Characteristics of the research on reverse logistics (1995-2005). *International journal of production research*, 46(4), 1099-1120.

23. Scholl, A. Amiri, B., Olfat, L., Khalili Damghani, K., (2012). Multi-period and multi-product supply chain network design using a combination of mathematical programming, multi-objective approach and DEA. *Journal of Industrial Management Perspective*, 4(14), 26-51

24. Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. *International journal of management reviews*, 9(1), 53-80.

25. Testa, F., & Iraldo, F. (2010). Shadows and lights of GSCM (Green Supply Chain Management): determinants and effects of these practices based on a multi-national study. *Journal of Cleaner Production*, 18(10), 953-962.

26. Tserng, H. P., Yin, S. Y., & Li, S. (2006). Developing a resource supply chain planning system for construction projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(4), 393-407.

27. Vrijhoef, R., & Koskela, L. (2000). The four roles of supply chain management in construction. *European journal of purchasing & supply management*, 6(3), 169-178.

28. Xue, X., Wang, Y., Shen, Q., & Yu, X. (2007). Coordination mechanisms for construction supply chain management in the Internet environment. *International Journal of project management*, 25(2), 150-157.

29. Zhou, P., Chen, D., & Wang, Q. (2013). Network design and operational modelling for construction green supply chain management. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 4(1), 13-28.