چشم‌انداز مدیریت صنعتی
شماره ۲۴ ـ زمستان ۱۳۹۵
ص‌ص ۱۵۶ – ۱۲۳

ارائه مدل ریاضی زنجیره تأمین سبز پروژه‌های ساخت‌وساز با درنظر 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 اتلاف 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 نظرگرفتن 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 بیشینه‌سازی سود و هدف دوم کمینه‌سازی میزان انتشار گاز کربن دی‌اکسید است؛ به‌طوری‌که راهکاری نیز برای جلوگیری از اتلاف منابع در سایت پروژه ارائه شده است. با فرض مشخص‌بودن 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 دوهدفه و غیرخطی‌بودن این مدل، ابتدا مدل، خطی و سپس با استفاده از روش محدودیت اپسیلون و کدنویسی در نرم‌افزار GAMS حل شد و درنهایت نتایج آن با استفاده از دو مثال عددی موردتحلیل 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.

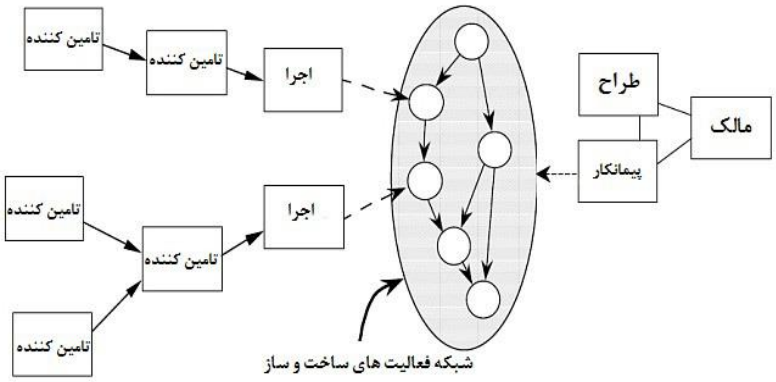
*** استادیار، دانشگاه علم و صنعت (نویسنده مسئول).

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؛ ازاین‌رو 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[1] 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.

درنظرگرفتن 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

طی‌شدن عمر مفید آن است. با توجه به اینکه در اغلب پروژه‌های ساخت‌وساز منابع قابل‌توجهی اتلاف می‌شود و زنجیره تأمین آن‌ها نیز آلایندگی 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 حداکثرشدن سود بخشی از زنجیره تأمین به‌صورت محلی است که در این حالت ممکن است به یک جواب بهینه محلی اکتفا شود و کل زنجیره تأمین به‌صورت بهینه رفتار نکند. به همین دلیل ارائه رویکرد جدیدتری برای مدیریت زنجیره تأمین ساخت، ضروری است تا کل سود زنجیره تأمین به‌صورت تجمیع‌شده مدیریت و بهینه شود؛ از طرف دیگر اغلب مدل‌های موجود در این حوزه به زنجیره تأمین ساخت به‌صورت یک زنجیره تأمین عادی تولید می‌نگرند؛ حال آنکه ویژگی‌های زنجیره تأمین ساخت‌وساز منطبق بر زنجیره تأمین پروژه است که نباید در آن پروژه به‌عنوان یک مشتری عادی در نظر گرفته شود؛ بلکه باید زمان‌بندی 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 درنظرگرفتن عوامل ثابت مرتبط با مباحث زیست‌محیطی سعی دارند تا به‌گونه‌ای 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 درنظرگرفتن میزان انتشار گازهای آلاینده، نوع و تعداد خودروهایی که آلایندگی کمتری دارند در زنجیره تأمین مشخص شود و همچنین کارخانه‌هایی که آلایندگی کمتری دارند مقدار بیشتری نسبت به کارخانه‌هایی که آلایندگی بیشتری دارند، تولید کنند. با توجه به این توضیحات لازم است تا با مبانی نظری و پیشینه پژوهش در این زمینه به شناسایی شکاف های تحقیقاتی پرداخته شود.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مبانی نظر 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 عدم‌توسعه بهره‌وری و افزایش اهمیت زنجیره تأمین سبب ورود این مبحث به پروژه‌های ساخت‌وساز است [۲۷]. اُبرین (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[1] در این نوع از پروژه‌ها است. خلفان و مک‌درموت (۲۰۰۶)، درباره‌ی اقدامات مختلف، ازجمله 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]. ژیائولانگ 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 ژیآن‌های (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[2] 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

یاری کند [۱۲]. منگ و همکاران (۲۰۱۰)، به توسعه مدل بلوغ[1] به‌منظور 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 به‌صورت 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[2] در زنجیره تأمین پروژه‌های ساخت می‌پردازد. هدف این مدل به‌کارگیری 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[3] 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 تحت‌مدیریت فروشنده[4] 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 به‌عنوان یک هزینه وارد تابع هدف کردند که همزمان با حداقل‌شدن هزینه‌های کلی زنجیره تأمین، هزینه‌های زیست‌محیطی نیز به‌تبع 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 CO_2 توسط وسایل نقلیه را در نظر می‌گیرد و هدف این مسئله حداقل‌کردن میزان انتشار گاز CO_2 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[5] بودند. آن‌ها با به‌کارگیری معیارهای ارزیابی ارائه‌شده، به بررسی چهار مدل پرداختند [۱۰]. در دنیای واقعی در بیشتر مواقع منابع مورداستفاده 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[6] 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 می‌کنید. 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 نیز 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 آلایندگی 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					
	کمی	کیفی	ریسک	هماهنگی	تجمیع و یکپارچگی	ارزیابی عملکرد	کاهش و کنترل	حمل‌ونقل	انبارش	موجودی کسب‌وکار الکترونیک	گردش کالا	زنجیره تأمین سبز
[۲۴]		✓		✓	✓		✓	✓				
[۸]		✓	✓	✓	✓				✓		✓	
[۲۵]		✓	✓	✓		✓		✓				✓
[۷]		✓				✓			✓	✓		
[۱۲]	✓		✓					✓	✓	✓		
[۱۵]	✓					✓		✓			✓	
[۲۹]	✓		✓		✓			✓	✓	✓		
[۱۰]	✓		✓			✓			✓	✓		
پژوهش حاضر	✓		✓		✓		✓	✓		✓	✓	✓

با توجه به درنظرگرفتن 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 لجیستیک سبز را منتشر کرد. مطالعه نخست، به‌صورت واقعی یکی از نخستین مطالعه‌هایی است که لجستیک سبز را به‌صورت کامل آزمون کرده و موضوعی را از جنبه کاهش ضایعات معرفی کرد [۲۱]. بر مبنای مصاحبه‌ها با صنعت امریکا 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 می‌آمد. بعد از معرفی رشته و نشان‌دادن 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[1] در لجستیک سبز مبتنی بر تقاضای مشتریان برای احیای محصولات احیاشده می‌پردازد [۶]. کریکه و همکاران(۲۰۰۱)، یک شبکه لجستیک سبز دوره‌ای 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 موردتوجه 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 قابل‌توجه در پژوهش آن‌ها، توانایی مدل برای تعیین قیمت خرید محصولات مصرف‌شده از دارندگان آن با هدف حداکثرکردن سود حاصله است. آن‌ها برای حل مدل از یک روش ابتکاری بر مبنای جست‌وجوی ممنوع[2] 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.

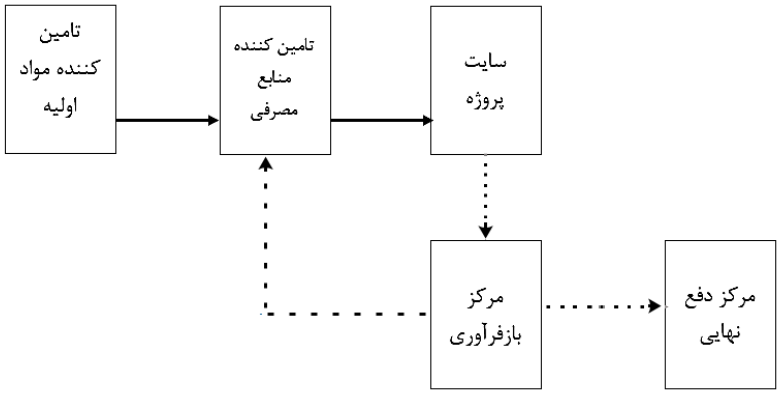
۳. روش‌شناسی پژوهش

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 به‌تفصیل در بخش مرور مبانی 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، موجودی، حمل‌ونقل وبازیافت 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 بارگذاری‌شده در آن است؛ قسمت دوم تابع هدف میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید توسط کارخانه‌های تولیدی است که وابسته به میزان تولید است؛ بنابراین مدل پیشنهادی با درنظرگرفتن همزمان ویژگی‌های تقاضا،

1. Pull
2. Tabu search.

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

بیان مسئله. زنجیره تأمین موردبحث در این پژوهش زنجیره تأمینی سه‌سطحی است که در سطح نخست مواد اولیه موردنیاز 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 موردبررسی در این پژوهش

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

این معضل به‌دلیل نبود هماهنگی بین پروژه و زنجیره تأمین پشتیبان پروژه است. برای رفع این مشکل لازم است که زمان‌بندی پروژه به‌نحوی صورت گیرد که منابع موردنیاز پروژه در هر دوره زمانی با توجه به زمان‌بندی و میزان تقاضای پروژه تعیین گردد تا به زنجیره تأمین سفارش صادر شود.

در حوزه مسائل زیست‌محیطی نیز اغلب پروژه‌ها دارای اتلاف منابع و آلایندگی بسیاری هستند که این مشکل را می‌توان با درنظرگرفتن یک مرکز بازیافت برای منابع اتلاف‌شده در سایت پروژه مرتفع کرد. وجود این مرکز به‌صورت غیرمستقیم باعث کاهش هزینه‌های تولید و موجودی در زنجیره تأمین و درنهایت کاهش هزینه‌های پروژه می‌شود؛ از طرفی می‌توان الزامات زیست‌محیطی را برای تولیدکنندگان در سطوح مختلف زنجیره تأمین با توجه به شرایط آلایندگی کارخانه و سطح تولید آن در نظر گرفت. در زمینه حمل‌ونقل مدل سعی دارد وسیله‌ای را که هزینه آلایندگی و حمل‌ونقل کمتری دارد، انتخاب کند تا درنهایت هزینه‌های موجود در زمینه حمل‌ونقل نیز حداقل شود. نکته دیگری که در زمینه مسائل زیست‌محیطی اهمیت بسزایی دارد، مبحث انتشار گازهای گلخانه‌ای است. در این مسئله سعی شده است که میزان انتشار گاز CO_2 با توجه به مقدار تولید هر یک از کارخانه‌های تولیدی و همچنین مقدار وزن وسیله نقلیه و بار حمل‌شده توسط آن، حداقل شود.

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

ـ زمان‌بندی پروژه برای تعیین سطح سفارش پروژه در هر دوره زمانی با توجه به تقاضای روزانه پروژه؛

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

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

ـ تعیین نوع و تعداد بهینه‌ی وسایل حمل‌ونقل بین اعضای زنجیره تأمین با درنظرگرفتن هزینه‌های زیست‌محیطی و حمل هر وسیله؛

ـ کاهش میزان انتشار گاز CO_2 توسط وسایل نقلیه و کارخانه‌های تولیدکننده منابع؛

ـ تعیین مقدار بهینه بار حمل‌شده توسط هر وسیله نقلیه در یک مسیر مشخص؛

ـ کاهش اتلاف منابع در سایت پروژه؛

ـ کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی هر یک از تولیدکنندگان زنجیره تأمین.

مفروضات. برای مدل‌سازی و حل مسئله همواره نمی‌توان تمامی موارد موردنیاز و قابل‌بحث را

در کنار هم قرار داد. این امر به علت پیچیده‌شدن مدل و کاربردی‌نبودن آن یا ناتوانی در حل مدل با امکانات موجود است؛ ازاین‌رو برخی مسائل به‌صورت پیش‌فرض در نظر گرفته می‌شود تا بتوان در عین جامع‌بودن مدل از کاربردی‌بودن آن نیز اطمینان حاصل کرد. مفروضات درنظرگرفته‌شده 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 پیش‌نیازی از نوع FS[1] است؛

۴. دریافت منابع بدون هیچ تأخیر و یا تعجیلی صورت می‌گیرد؛

۵. دریافت سفارش در ابتدای هر دوره صورت می‌گیرد؛

۶. در هر دوره به اندازه تقاضای فعالیت‌های در حال اجرای همان دوره برای سایت پروژه سفارش صادر می‌شود؛ 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 نمی‌شود؛

۱۲. فعالیت‌های پروژه بدون انقطاع انجام می‌شود؛

۱۳. زنجیره تأمین موجود توانایی تولید چند نوع منبع مصرفی موردنیاز پروژه را دارد.

مدل‌سازی مسئله. در این قسمت ابتدا اندیس‌ها و پارامترها تعریف می‌شوند؛ سپس متغیرهای تصمیم مشخص می‌شود. در انتها مدل با تابع هدف و محدودیت‌ها ارائه می‌گردد.

اندیس‌ها

t و l: روز اجرای پروژه

T: دوره‌های زمانی

ce: سایت پروژه[2]

Rep: مرکز بازیافت مواد اتلاف شده[3]

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

Fin: مرکز دفع نهایی مواد اتلاف شده[1]

مجموعه‌ها

PA: مجموعه‌ی فعالیت‌های پروژه

H_j: مجموعه فعالیت‌های پیش‌نیازی فعالیت j

E: تأمین‌کننده مواد اولیه[2]

F: تأمین‌کننده منابع مصرفی پروژه[3]

R: مجموعه منابع مصرفی موردنیاز پروژه

K: مجموعه وسایل نقلیه

پارامترها

$R_{e,f,r}$: درآمد تأمین‌کننده از تأمین مواد اولیه موردنیاز منبع نوع r از تأمین‌کننده مواد اولیه به تأمین‌کننده منابع مصرفی (تن/دلار).

$R_{f,r}^{ce}$: درآمد تأمین‌کننده از تأمین منبع نوع r، از تأمین‌کننده منابع مصرفی به سایت پروژه (تن/دلار).

$R_{f,r}^{rep}$: درآمد حاصل از فروش واحد منبع بازیافت‌شده نوع r 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 r (تن/دلار).

$h_{e,r}^{raw}$: هزینه نگهداری موجودی مواد اولیه منبع نوع r در نزد تأمین‌کننده مواد اولیه (تن/دلار).

$h_{f,r}^{raw}$: هزینه نگهداری مواد اولیه منبع نوع r در نزد تأمین‌کننده منابع مصرفی (تن/دلار).

$h_{f,r}$: هزینه نگهداری منبع نوع r در نزد تأمین‌کننده منابع مصرفی (تن/دلار).

h_r^{unrep}: هزینه نگهداری مقادیر اتلاف‌شده از منبع نوع r در نزد مرکز بازیافت (تن/دلار).

$h_r^{rep,e}$: هزینه نگهداری مقادیر بازیافت‌شده از منبع نوع r در مرکز بازیافت که آماده ارسال به تأمین‌کننده منابع مصرفی است (تن/دلار).

$h_r^{rep,fin}$: هزینه نگهداری مقادیر بازیافت‌شده از منبع نوع r 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

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

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

$C^{pr,rep}_{f,r}$: هزینه تدارکات مقادیر جریان فیزیکی بازیافت‌شده منبع نوع r و آماده ارسال به تأمین‌کننده منابع مصرفی (تن/دلار).

$C^{pro}_{f,r}$: هزینه تولید منبع نوع r برای تأمین‌کننده منابع مصرفی (تن/دلار).

$C^{pro}_{e,r}$: هزینه تولید مواد اولیه موردنیاز منبع نوع r برای تأمین‌کننده مواد اولیه (تن/دلار).

C^{rep}_{r}: هزینه بازیافت مقادیر اتلاف‌شده از منبع نوع r در مرکز بازیافت (تن/دلار).

C^{fin}_{r}: هزینه دفع نهایی مقادیر اتلاف‌شده از منبع نوع r در مرکز دفع نهایی (تن/دلار).

$C^{tra}_{e,f,k}$: هزینه واحد حمل‌ونقل از تأمین‌کننده مواد اولیه به تأمین‌کننده منابع مصرفی توسط وسیله نقلیه نوع kام (تن/دلار).

$C^{tra,ce}_{f,k}$: هزینه واحد حمل‌ونقل از تأمین‌کننده منابع مصرفی به سایت پروژه توسط وسیله نقلیه kام (تن/دلار).

$C^{tra,rep}_{f,k}$: هزینه واحد حمل‌ونقل از مرکز بازیافت به تأمین‌کننده منابع مصرفی توسط وسیله‌ی نقلیه kام (تن/دلار).

$C^{tra,ce,rep}_{k}$: هزینه‌ی واحد حمل‌ونقل از سایت پروژه به مرکز بازیافت توسط وسیله نقلیه‌ی kام (تن/دلار).

$C^{tra,rep,fin}_{k}$: هزینه‌ی واحد حمل‌ونقل از مرکز بازیافت به محل دفع نهایی توسط وسیله نقلیه‌ی نوع kام (تن/دلار).

C'_{k}: عوارض دریافتی توسط دولت برای میزان آلایندگی وسیله نقلیه نوع kام (دلار).

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

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

g_k : مقدار گاز CO_2 منتشرشده توسط وسیله نقلیه kام با توجه به مقدار بار حمل‌شده و وزن وسیله نقلیه (تن/میلی‌گرم).

g'_r : مقدار گاز CO_2 منتشرشده در حین تولید منبع نوع r توسط کارخانه تولیدی (تن/میلی‌گرم).

u_r: ظرفیت نگهداری موجودی از نوع منبع r برای هر تسهیل (تن).

V_k: ظرفیت حمل‌ونقل با وسیله نقلیه نوع kام در یک مسیر مشخص (تن).

w_k: وزن وسیله نقلیه نوع kام بدون بار (تن).

f_k: حداکثر تعداد وسیله نقلیه نوع kام.

r_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 kام 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).

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

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

$Q^{ce,rep}_{T,r}$: 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 kام در هر مسیر.

S_i: زمان شروع فعالیت iام.

$Y_{i,t}$: برابر ۱ است اگر فعالیت i در روز t اجرا شود؛ در غیر این صورت برابر است با صفر.

$X_{i,t}$: برابر ۱ است اگر فعالیت i در روز t شروع شود؛ در غیر این صورت برابر است با صفر.

تابع هدف. تابع هدف (۱) 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، موجودی، حمل‌ونقل و بازیافت است.

$$
\begin{aligned}
\text{Max} \quad Z_1 = & \sum_T \sum_e \sum_f \sum_r R_{e,f,r}\ O_{T,e,f,r} \\
& + \sum_T \sum_f \sum_r R^{ce}_{f,r}\, O^{ce}_{T,f,r} + \sum_T \sum_r S^{rep}_r\, Q^{ce,rep}_{T,r} \\
& + \sum_T \sum_f \sum_r R^{rep}_{f,r}\, Q^{rep}_{T,f,r} \\
& - \sum_T \sum_e \sum_f \sum_r C^{pr}_{e,f,r}\, O_{T,e,f,r} \\
& - \sum_T \sum_f \sum_r C^{pr,rep}_{f,r}\, Q^{rep}_{T,f,r} - \sum_T \sum_f \sum_r C^{pr,ce}_{f,r}\, Q^{ce}_{T,f,r} \\
& - \sum_T \sum_e \sum_r C^{pro}_{e,r}\, M_{T,e,r} - \sum_T \sum_f \sum_r C^{pro}_{f,r}\, M_{T,f,r} \\
& - \sum_T \sum_e \sum_f \sum_r \sum_k C^{tra}_{e,f,k}\, B_{T,e,f,r,k} N_{e,f,k}
\end{aligned}
\qquad (۱)
$$

$$-\sum_{T}\sum_{f}\sum_{r}\sum_{k} C_{f,k}^{tra}\, B_{T,f,r,k}^{ce} N_{f,k}^{ce}$$

$$-\sum_{T}\sum_{e}\sum_{r} h_{e,r}^{raw}\, I_{T,e,r}^{raw} - \sum_{T}\sum_{f}\sum_{r} h_{f,r}^{raw}\, I_{T,f,r}^{raw}$$

$$-\sum_{T}\sum_{f}\sum_{r} h_{f,r}\, I_{T,f,r} - \sum_{T}\sum_{r} C_{r}^{rep}\, Q_{T,r}^{rep}$$

$$-\sum_{T}\sum_{f}\sum_{r}\sum_{k} C_{f,k}^{tra}\, B_{T,f,r,k}^{rep} N_{f,k}^{rep}$$

$$-\sum_{T}\sum_{r}\sum_{k} C_{k}^{tra,ce,rep}\, B_{T,r,k}^{ce,rep} N_{k}^{ce,rep}$$

$$-\sum_{T}\sum_{r}\sum_{k} C_{k}^{tra,rep,fin}\, B_{T,r,k}^{rep,fin} N_{k}^{rep,fin}$$

$$-\sum_{T}\sum_{r} C_{r}^{fin}\, Q_{T,r}^{rep,fin} - \sum_{T}\sum_{r}\{(h_{r}^{unrep}\, I_{T,r}^{unrep})$$

$$+\left(h_{r}^{rep,e} I_{T,r}^{rep,e}\right) + (h_{r}^{rep,fin} I_{T,r}^{rep,fin})\}$$

$$-\sum_{T}\sum_{e}\sum_{r} C'_{e,r}\, M_{T,e,r} - \sum_{T}\sum_{f}\sum_{r} C'_{f,r}\, M_{T,f,r}$$

$$-\sum_{e}\sum_{f}\sum_{k} C'_{k}\, N_{e,f,k} - \sum_{f}\sum_{k} C'_{k}\, N_{f,k}^{ce}$$

$$-\sum_{k} C'_{k}\, N_{k}^{ce,rep} - \sum_{f}\sum_{k} C'_{k}\, N_{f,k}^{rep} - \sum_{k} C'_{k}\, N_{k}^{rep,fin}$$

تابع هدف (۲) 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 بارگذاری‌شده در آن است. قسمت دوم تابع هدف میزان انتشار کربن‌دی‌اکسید توسط کارخانه‌های تولیدی است که به میزان تولید وابسته است.

$$\text{Min} \quad Z_2 = \sum_{T}\sum_{e}\sum_{f}\sum_{r}\sum_{k} g_k N_{e,f,k}(B_{T,e,f,r,k} + w_k) \qquad (۲)$$

$$+\sum_{T}\sum_{f}\sum_{r}\sum_{k} g_k N_{f,k}^{ce}(B_{T,f,r,k}^{ce} + w_k)$$

$$+\sum_{T}\sum_{f}\sum_{r}\sum_{k} g_k N_{f,k}^{rep}(B_{T,f,r,k}^{rep} + w_k)$$

$$+\sum_{T}\sum_{r}\sum_{k} g_k N_{k}^{ce,rep}(B_{T,r,k}^{ce,rep} + w_k)$$

$$+\sum_{T}\sum_{r}\sum_{k} g_k N_{k}^{rep,fin}\left(B_{T,r,k}^{rep,fin} + w_k\right)$$

$$+\sum_{T}\sum_{e}\sum_{r} g'_{e,r} M_{T,e,r} + \sum_{T}\sum_{f}\sum_{r} g'_{f,r} M_{T,f,r}$$

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.

$$I_{T,e,r}^{raw} = I_{T-1,e,r}^{raw} + M_{T,e,r} - \sum_{f} O_{T,e,f,r} \le u_{e,r} \qquad \forall T, e, r \qquad (۳)$$

$$I_{T,f,r}^{raw} = I_{T-1,f,r}^{raw} + Q_{T,f,r}^{rep} + \sum_{e} O_{T,e,f,r} - \tau_{f,r}^{r/m} M_{T,f,r} \le u_{f,r} \qquad \forall T, f, r \qquad (۴)$$

$$I_{T,f,r} = I_{T-1.f.r} + M_{T,f,r} - O_{T,f,r}^{ce} \le u_{f,r} \qquad \forall T, f, r \qquad (۵)$$

$$I_{T,r}^{unrep} = I_{T-1,r}^{unrep} + Q_{T,r}^{ce,rep} - Q_{T,r}^{rep} \qquad \forall T, r \qquad (۶)$$

$$I_{T,r}^{rep,fin} = I_{T-1,r}^{rep,fin} + \tau_{r}^{fin} Q_{T,r}^{rep} - Q_{T,r}^{rep,fin} \le u_{r}^{rep,fin} \qquad \forall T, r \qquad (۷)$$

محدودیت ۸، نمایانگر روابط پیش‌نیازی فعالیت‌های پروژه است.

$$S_j \ge S_i + P_i \qquad \forall i, j \in PA\,, i \in H_j \qquad (۸)$$

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

$$S_i = \sum_{t=ES_i}^{LS_i} tX_{i,t} \qquad \forall i \in PA \qquad (۹)$$

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

$$\sum_{t=ES_i}^{LS_i} X_{i,t} = 1 \qquad \forall i \in PA \qquad (۱۰)$$

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

$$\sum_{l=t}^{t+p_i-1} Y_{i,l} \geq P_i X_{i,t} \qquad \forall i \in PA\,, t \qquad (۱۱)$$

$$Y_{i,t} \leq \sum_{l=0}^{t} X_{i,l} \qquad \forall i \in PA\,, t \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{t=ES_i}^{Ls_i+P_i-1} Y_{i,t} \leq P_i \qquad \forall i \in PA \qquad (۱۳)$$

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

$$Q^{ce}_{T,f,r} \geq \sum_{t=n(T-1)+1}^{nT} D_{i,r} Y_{i,t} \qquad \forall T, f, r, i \in PA \qquad (۱۴)$$

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

نشان می‌دهد.

$$Q_{T,r}^{ce,rep} = r_r \sum_f O_{T,f,r}^{ce} \qquad \forall T, r \qquad (۱۵)$$

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.

$$\sum_r O_{T,e,f,r} \le \sum_k N_{e,f,k} V_k \qquad \forall T, e, f \qquad (۱۶)$$

$$\sum_r O_{T,f,r}^{ce} \le \sum_k N_{f,k}^{ce} V_k \qquad \forall T, f \qquad (۱۷)$$

$$\sum_r O_{T,r}^{ce,rep} \le \sum_k N_k^{ce,rep} V_k \qquad \forall T \qquad (۱۸)$$

$$\sum_r O_{T,f,r}^{rep} \le \sum_k N_{f,k}^{rep} V_k \qquad \forall T, f \qquad (۱۹)$$

$$\sum_r O_{T,r}^{rep,fin} \le \sum_k N_k^{rep,fin} V_k \qquad \forall T \qquad (۲۰)$$

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.

$$\sum_{r}\sum_{k} N_{e,f,k} B_{T,e,f,r,k} \geq \sum_{r} O_{T,,e,f,r} \qquad \forall T, e, f \qquad (۲۱)$$

$$\sum_{r}\sum_{k} N^{ce}_{f,k} B^{ce}_{T,f,r,k} \geq \sum_{r} O^{ce}_{T,f,r} \qquad \forall T, f \qquad (۲۲)$$

$$\sum_{r}\sum_{k} N^{ce,rep}_{k} B^{ce,rep}_{T,r,k} \geq \sum_{r} Q^{ce,rep}_{T,r} \qquad \forall T \qquad (۲۳)$$

$$\sum_{r}\sum_{k} N^{rep}_{f,k} B^{rep}_{T,f,r,k} \geq \sum_{r} Q^{rep}_{T,f,r} \qquad \forall T, f \qquad (۲۴)$$

$$\sum_{r}\sum_{k} N^{rep,fin}_{k} B^{rep,fin}_{T,r,k} \geq \sum_{r} Q^{rep,fin}_{T,r} \qquad \forall T \qquad (۲۵)$$

٤. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

روش حل. مدل ذکرشده در قسمت قبل به کمک نرم‌افزار GAMS[1] حل شد. برای حل در نرم‌افزار GAMS از روش برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط (MIP)[2] استفاده شد. در انتخاب روش حل مدل نیز به علت اینکه متغیرهای تصمیم باینری (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 عبارت‌های 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 kام است.

برای خطی‌سازی عبارات غیرخطی موجود در مدل:

1. General Algebraic Modeling System
2. Mix Integer Programming

فرض شود $w = x \times y$ حاصل‌ضرب دو متغیر گسسته و پیوسته باشد؛ به‌طوری‌که:

$$\begin{aligned} &x \in R_+ \ , y \in Z_+, w = x \times y \\ &x \le a \, , y \le b \, , w \ge 0 \end{aligned} \qquad (۲۶)$$

با توجه به کران‌داربودن دو متغیر x و y می‌توان از سه قید زیر برای خطی‌سازی حاصل‌ضرب این دو متغیر بهره برد [۲۰]:

$$w \le ay \qquad (۲۷)$$

$$w \le bx \qquad (۲۸)$$

$$w \ge bx + ay - ab \qquad (۲۹)$$

با تعریف متغیر جدید A به‌جای حاصل‌ضرب N و B در تابع هدف دوم و محدودیت‌ها و همچنین با توجه به مطالب ارائه‌شده در مورد خطی‌سازی، تابع هدف دوم پس از جای‌گذاری متغیر جدید به‌صورت رابطه ۳۰، تغییر پیدا می‌کند و کاملاً خطی می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad Z_2 = &\sum_T \sum_e \sum_f \sum_r \sum_k g_k (A_{T,e,f,r,k} + N_{e,f,k} w_k) \\ &+ \sum_T \sum_f \sum_r \sum_k g_k \left(A^{ce}_{T,f,r,k} + N^{ce}_{f,k} w_k\right) \\ &+ \sum_T \sum_f \sum_r \sum_k g_k \left(A^{rep}_{T,f,r,k} + N^{rep}_{f,k} w_k\right) \\ &+ \sum_T \sum_r \sum_k g_k \left(A^{ce,rep}_{T,r,k} + N^{ce,rep}_{k} w_k\right) \\ &+ \sum_T \sum_r \sum_k g_k \left(A^{rep,fin}_{T,r,k} + N^{rep,fin}_{k} w_k\right) \\ &+ \sum_T \sum_e \sum_r g'_{e,r} M_{T,e,r} + \sum_T \sum_f \sum_r g'_{f,r} M_{T,f,r} \end{aligned} \qquad (۳۰)$$

محدودیت‌های ۲۱ تا ۲۵ پس از اعمال خطی‌سازی به روابط ۳۱ تا ۳۵ تبدیل می‌شوند:

$$\sum_{r}\sum_{k} A_{T,e,f,r,k} \geq \sum_{r} O_{T,e,f,r} \qquad \forall T, e, f \qquad (۳۱)$$

$$\sum_{r}\sum_{k} A^{ce}_{T,f,r,k} \geq \sum_{r} O^{ce}_{T,f,r} \qquad \forall T, f \qquad (۳۲)$$

$$\sum_{r}\sum_{k} A^{ce,rep}_{T,r,k} \geq \sum_{r} Q^{ce,rep}_{T,r} \qquad \forall T \qquad (۳۳)$$

$$\sum_{r}\sum_{k} A^{rep}_{T,f,r,k} \geq \sum_{r} Q^{rep}_{T,f,r} \qquad \forall T, f \qquad (۳۴)$$

$$\sum_{r}\sum_{k} A^{rep,fin}_{T,r,k} \geq \sum_{r} Q^{rep,fin}_{T,r} \qquad \forall T \qquad (۳۵)$$

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:

$$A_{T,e,f,r,k} = B_{T,e,f,r,k} N_{e,f,k}$$
$$A_{T,e,f,r,k} \geq 0 \qquad (۳۶)$$

$$B_{T,e,f,r,k} \leq V_k \qquad \forall T, e, f, r, k \qquad (۳۷)$$

$$N_{e,f,k} \leq f_k \qquad \forall T, e, f, r, k \qquad (۳۸)$$

$$A_{T,e,f,r,k} \leq V_k N_{e,f,k} \qquad \forall T, e, f, r, k \qquad (۳۹)$$

$$A_{T,e,f,r,k} \leq f_k B_{T,e,f,r,k} \qquad \forall T, e, f, r, k \qquad (۴۰)$$

$$A_{T,e,f,r,k} \geq V_k N_{e,f,k} + f_k B_{T,e,f,r,k} - ab \qquad \forall T, e, f, r, k \qquad (۴۱)$$

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].

$$\begin{aligned} & \max f_1(x) \\ & \min f_2(x) \\ \text{St:} \quad & x \in S \end{aligned} \qquad (۴۲)$$

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

$$\begin{aligned} & \max f_1(x) \\ \text{St:} \quad & f_2(x) \le \varepsilon \\ & x \in S, \varepsilon \ge 0 \end{aligned} \qquad (۴۳)$$

برای حل مسئله با دو تابع هدف از روش اپسیلون استفاده شده است؛ به‌گونه‌ای که مدل ابتدا تنها با تابع هدف بیشینه‌سازی (رابطه ۱) حل شد؛ سپس جواب بهینه به‌دست‌آمده برای Z_2 به‌عنوان حد بالای تابع هدف کمینه‌سازی در نظر گرفته شد. پس از آن بار دیگر مدل تنها با درنظرگرفتن تابع هدف دوم و افزودن قید $Z1= Z1^*$ به‌منظور حفظ‌شدنی‌بودن مسئله، حل شده و مقدار به‌دست‌آمده به‌عنوان حد پایین تابع هدف (۲) در نظر گرفته شد. پس از افزودن تابع هدف ۲ به‌عنوان 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 نشان‌دادن 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 به‌تبع آن برای زنجیره تأمین ۶ دوره در نظر گرفته شده است. در این پروژه ۵ نوع منبع متفاوت مصرفی موردنیاز 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 آلایندگی‌های 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

$R^{rep}_{f,r}$

f \ r	۱	۲	۳	۴	۵
۱	۵۰	۰	۴۵	۶۰	۸۵
۲	۵۰	۹۵	۴۵	۶۰	۸۵
۳	۰	۹۵	۴۵	۰	۸۵
۴	۵۰	۹۵	۰	۰	۰
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 / j	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
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

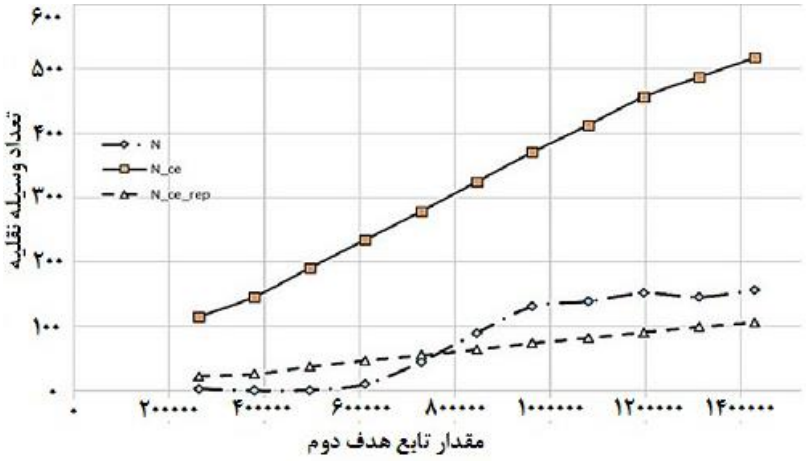
پس از حل مثال با نرم‌افزار گمز و با استفاده از روش محدودیت اپسیلون می‌توان جدول بازده[1] را که شامل مجموعه جواب‌های پارتویی است، همانند جدول ۳، ارائه کرد. با توجه به

1. Payoff Table

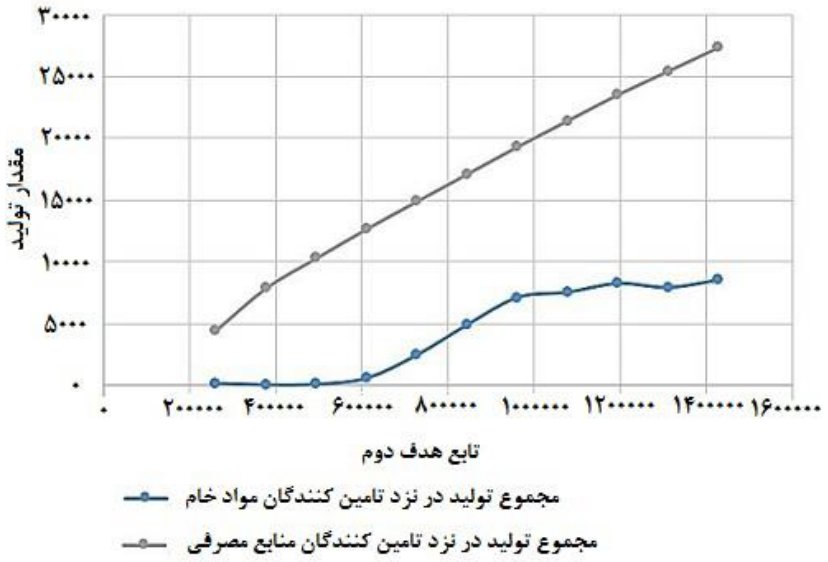
جدول ۳، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار اپسیلون (میزان انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید)، مقدار سود (تابع هدف اول) نیز روند افزایشی دارد. حال برای تصمیم‌گیری در مورد سطح موردنظر سود و همچنین میزان انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید باید نتایج مدل به خبرگان و همچنین مدیران ارشد زنجیره تأمین ارائه شود تا آن‌ها بتوانند در مورد سطح تعادلی سود و عوامل زیست‌محیطی تصمیم‌گیری کنند. با توجه به جدول ۳ با افزایش مقدار اپسیلون میزان انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید نیز افزایش می‌یابد. انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید در این مسئله وابسته به تعداد وسایل نقلیه به‌کارگرفته‌شده در مسیرهای مختلف زنجیره تأمین است. با توجه به نمودار شکل ۳، می‌توان نتیجه گرفت که به‌طورکلی افزایش میزان انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید تقریباً در هر سه مسیر درنظرگرفته‌شده به‌صورت تقریباً مستقیم به تعداد وسایل نقلیه به‌کار گرفته‌شده 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 به‌تبع آن افزایش میزان انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید 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	۲۵۴۴۵۸۴۳	۶۸۲۰۰۷۱	۹۸۲۵۶۵۵	۱۲۳۹۸۶۵۰	۱۴۹۹۴۹۷۵	۱۷۳۷۰۳۰۲	۱۹۷۳۴۳۳۴	۲۲۱۰۱۷۶۳	۲۴۴۴۹۷۲۷	۲۶۶۴۵۸۶۲	۲۸۷۸۶۸۶۷
مقدار تابع هدف دوم به‌صورت محدودیت	۲۶۲۰۱۲	۳۷۸۷۸۹	۴۹۵۵۶۶	۷۳۹۱۲۲	۸۲۹۱۲۱	۸۴۵۸۹۸	۹۶۲۶۷۵	۱۰۷۹۴۵۳	۱۱۹۶۲۳۰	۱۳۱۳۰۰۷	۱۴۲۹۷۸۵



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



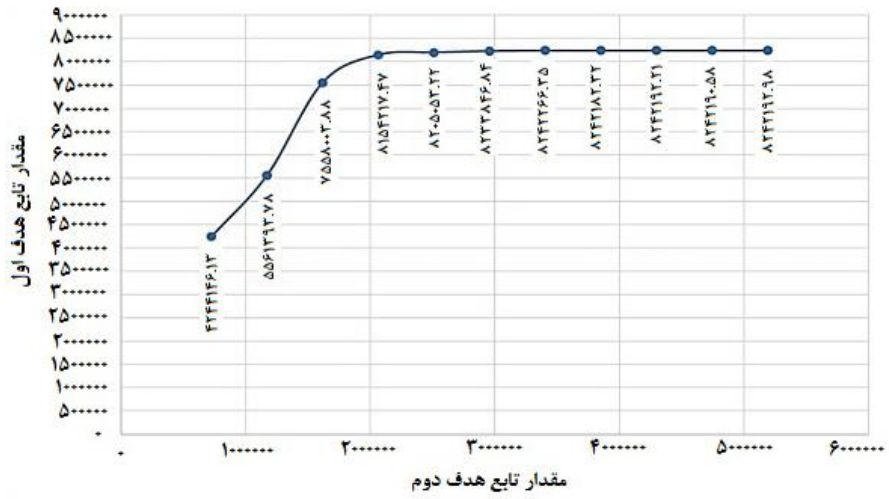
شکل ۵. نمودار مقادیر تولید به ازای مقادیر مختلف اپسیلون

مثال دوم. مثال دیگری نیز در ابعاد بزرگ‌تر انجام شد. در این مثال پروژه ساخت‌وسازی را در نظر بگیرید که دارای ۵۰ فعالیت است. مدت‌زمان 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 تأمینی با دو سطح از تولیدکنندگان تأمین می‌کند. در سطح نخست که مواد خام موردنیاز منابع مصرفی پروژه تولید می‌شود، ۱۰ کارخانه فعالیت می‌کنند و در سطح بعدی نیز

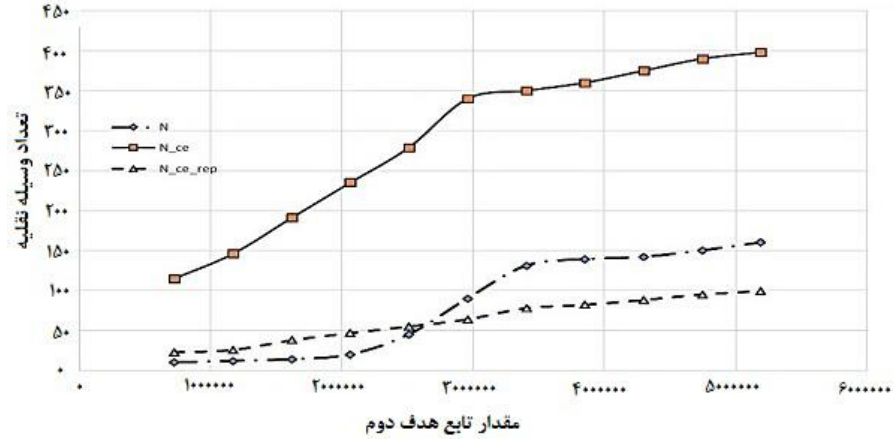
که منابع مصرفی تولید می‌شود، ۱۰ کارخانه در حال تولید ۸ نوع منبع موردنیاز پروژه هستند. حمل‌ونقل در این زنجیره تأمین توسط ۱۰ نوع وسیله نقلیه مختلف صورت می‌گیرد. از آوردن داده‌ها به علت حجم بسیار بالای آن‌ها خودداری شده است. پس از حل مثال توسط نرم‌افزار گمس نتایج آن در جدول ۴، ارائه شده است. با توجه به 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 آلایندگی 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 به‌تبع 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 آلایندگی 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 آلایندگی به مقدار سود موردنظر دست یافت. در شکل ۷، نیز مشاهده می‌شود که افزایش مقادیر اپسیلون و به‌تبع 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 خنثی‌شده 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 می باشد.

جدول ۴. مجموعه جواب‌های پارتویی حاصل از روش محدودیت اپسیلون

مقدار تابع هدف اول	مقدار تابع هدف دوم به‌صورت محدودیت
۴۲۴۴۱۴	۷۲۲۵۷۶
۵۵۶۱۳۹۳	۱۱۶۹۶۲۳
۷۵۵۸۰۰۳	۱۶۱۶۶۶۹
۸۱۵۴۲۱۷	۲۰۶۳۷۱۵
۸۲۰۵۰۵۳	۲۵۱۰۷۶۲
۸۲۳۳۸۴۶	۲۹۵۸۷۶۰
۸۲۴۲۲۲۶	۳۴۰۸۷۵۴
۸۲۴۲۱۸۲	۳۸۵۹۱۰۰
۸۲۴۲۱۹۲	۴۲۹۴۹۸۲
۸۲۴۲۱۹۲	۴۷۴۴۹۵۷
۸۲۴۲۱۹۲	۵۱۹۳۰۴۵



شکل ۶. نمودار مقادیر سود به ازای مقادیر مختلف اپسیلون



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

تحلیل نتایج. به‌طورکلی 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 (N و M) 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 حداقل‌کردن انتشار گازهای آلاینده، حداکثرشدن سود کلی زنجیره تأمین و به‌تبع آن سود تک‌تک اعضای زنجیره مدنظر قرار گیرد؛

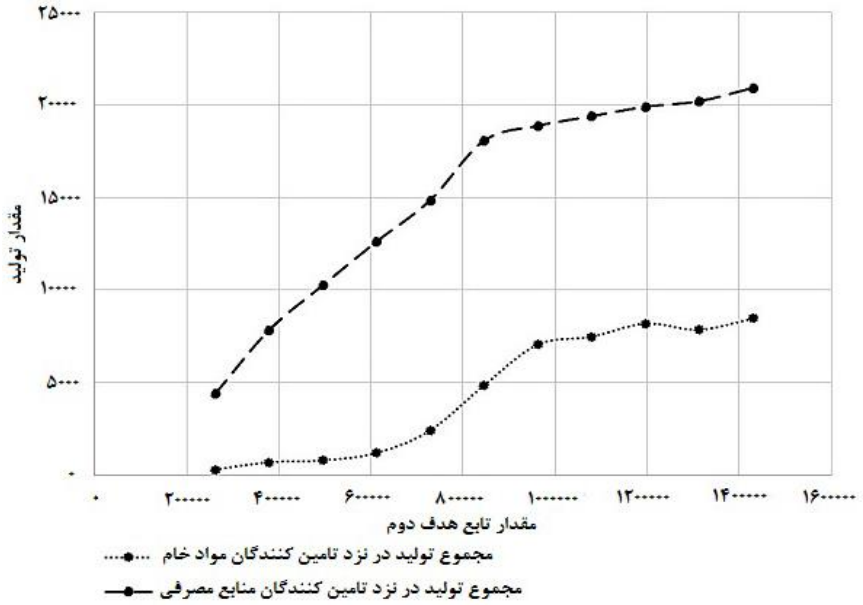
۴. با توجه به نتایج مثال اول مشاهده می‌شود که با افزایش سطح آلایندگی، میزان سود زنجیره تأمین نیز افزایش پیدا می‌کند؛ اما در مثال دوم از مقدار ε_2 به بالا مقدار سود افزایش نمی‌یابد؛ بلکه مقدار آلایندگی زیاد می‌شود و به‌تبع آن هزینه‌های زیست‌محیطی تحمیل‌شده به زنجیره تأمین نیز افزایش قابل‌ملاحظه‌ای می‌یابد 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 نزدیک‌شدن مدل به دنیای واقعی، پارامتر سرعت نیز به‌صورت ضریبی در تابع هدف دوم در مدل درنظر 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 کربن‌دی‌اکسید می‌شود و این مطلب به آن دلیل است که با کاهش سرعت، وسیله نقلیه باید با دنده‌های سنگین‌تر و درنتیجه دور موتور بالاتر حرکت کند که در این صورت باعث افزایش انتشار گازهای آلاینده، مصرف سوخت و همچنین کاهش مسافت طی‌شده می‌شود؛

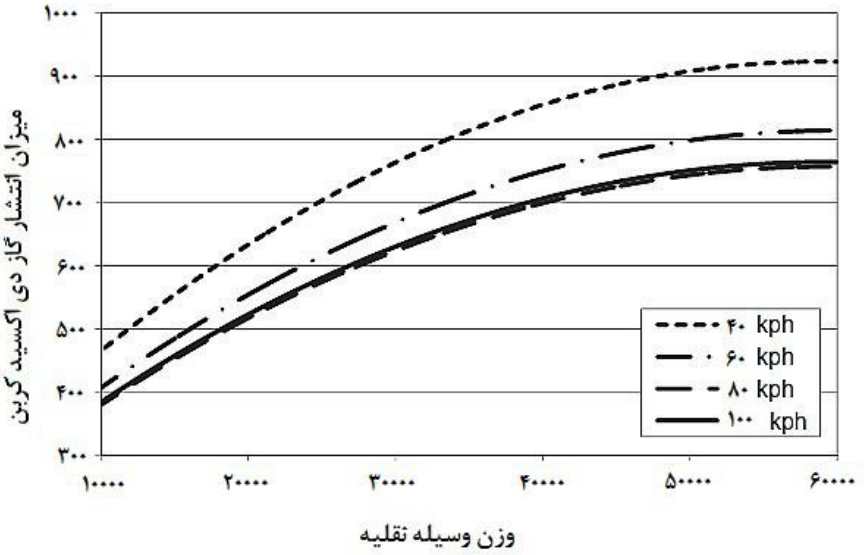
۶. توابع هدف ۱ و ۲ با توجه به جدول‌های ۳ و ۴، تضاد دارند؛ به این صورت که برای افزایش سود بیشتر مدل به سمت تولید بیشتر حرکت می‌کند؛ اما از طرفی تولید بیشتر به انتشار گاز گلخانه‌ای بیشتر منجر می‌شود؛ بنابراین با افزایش تابع هدف ۱، تابع هدف ۲، نیز افزایش می‌یابد که با توجه به اینکه حداقل‌سازی هست؛ بنابراین 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 به‌صرفه نیست و حتی ممکن است جـوابی کـه دریافت می‌شود با جواب بهینه کلی فاصله بسیار زیادی داشته باشد.



شکل ۸. نمودار مقادیر تولید به ازای مقادیر مختلف اپسیلون



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 مبانی 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 درنظرگرفتن اثر واقعی زیست‌محیطی وسایل نقلیه و همچنین کارخانه‌های تولیدی، تنها به درنظرگرفتن 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 درنظرگرفتن 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[1]؛

۲. درنظرگرفتن حالت غیرقطعی مانند احتمالی یا فازی برای میزان تقاضای فعالیت‌های پروژه؛

۳. درنظرگرفتن حالت غیرقطعی برای مدت‌زمان اجرای هر فعالیت؛

۴. درنظرگرفتن 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؛

1. Makespan

۷. استفاده از روش‌های زمان‌بندی غیرقطعی همانند شبکه پرت و شبکه گرت با توجه به غیرقطعی درنظرگرفتن 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. Gangolells, 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 Roteb: 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.