فصلنامه پژوهشنامه بازرگانی، شماره ۹۴، بهار ۱۳۹۹، ۱۷۶-۱۳۹

ارائه مدل ریاضی دوهدفه جهت برنامه‌ریزی منابع در زنجیره تأمین پروژه با در نظر گرفتن کیفیت مواد اولیه و تخفیفات

معصومه ملکی* سعید یعقوبی**

دریافت: ۹۷/۴/۲ پذیرش: ۹۷/۱۲/۲۵

زنجیره تأمین پروژه / برنامه‌ریزی موجودی / مدل ریاضی دو هدفه / روش محدودیت اپسیلون

چکیده

امروزه با توجه به رشد پروژه‌های بزرگ عمرانی و صنعتی و اهمیت تأمین به‌موقع مواد و ایجاد هماهنگی با تأمین‌کنندگان، موضوع زنجیره تأمین و لجستیک پروژه مورد توجه قرار گرفته است. یکی از راه‌های ایجاد این هماهنگی، برنامه‌ریزی موجودی یکپارچه است که به‌همین منظور در این مقاله مدلی دو هدفه با در نظر گرفتن ویژگی‌های پروژه ارائه شد که هدف آن حداقل کردن هزینه‌های پروژه می‌باشد. این مدل ترکیبی از مساله برنامه‌ریزی با منابع محدود[1] و برنامه‌ریزی موجودی است. از این‌رو، در این تحقیق تلاش شده ضمن معرفی مدل برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه، به بررسی کیفیت اقتصادی پروژه با توجه به استانداردهای نظام مهندسی نیز پرداخته شود و همچنین تأثیر تخفیف (افزایشی) بر روی هزینه‌های پروژه و نزدیک نمودن مدل به شرایط دنیای واقعی بررسی شود. برای حل مدل پیشنهادی، از روش

*. کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ m.maleki17@yahoo.com

**. دانشیار دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران؛ yaghoubi@iust.ac.ir

■ سعید یعقوبی، نویسنده مسئول.

1. Resource Constraint Project Scheduling

محدودیت اپسیلون[1] استفاده شده و نتایج عددی به‌دست آمده از اجرای مدل به کمک این روش گزارش شده است.

طبقه‌بندی JEL: L74,L79,O22,L30-G31-C60

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

1. ε-constraint method

مقدمه

مدیریت زنجیره تأمین پروژه از مفاهیم جدیدی است که همچون مدیریت زنجیره تأمین شامل جریان‌های مواد، اطلاعات و جریان‌های مالی می‌باشد و یکی از مهمترین اهداف آن برنامه‌ریزی و یکپارچه‌سازی جریان‌های فوق در یک پروژه می‌باشد. از آنجاکه زنجیره‌های تأمین پروژه دارای ویژگی‌های خاصی از جهت زمان‌بندی، مصرف منابع (مواد، تجهیزات، نیروی انسانی) و شرایط اجرا (سایت پروژه) می‌باشد، لذا برنامه‌ریزی برای جریان‌های زنجیره تأمین پروژه اهمیت مضاعفی دارد چراکه نتایج یکپارچه‌سازی این جریان‌ها منجر به کاهش هزینه‌ها و موفقیت پروژه‌ها گردیده و عدم یکپارچگی آنها ضررهای جبران‌ناپذیری را به سازمان‌ها وارد می‌سازد. از طرفی امروزه از آنجاکه بخش عمده‌ای از هزینه‌های پروژه مربوط به هزینه‌های مواد و موجودی می‌باشد، لذا باعث یکپارچه‌سازی جریان مواد در زنجیره تأمین پروژه و کاهش هزینه‌های متولیان و مجریان خواهد شد. برای ایجاد این برنامه‌ریزی، ابتدا باید هزینه‌های موجودی بررسی شوند. به‌طور کلی هزینه‌های موجودی برای هر بنگاهی شامل هزینه‌های سفارش، هزینه نگهداری موجودی و هزینه‌های کمبود می‌شود[۱]. در زنجیره‌های تأمین غیرپروژه‌ای، کل هزینه‌های موجودی با توجه به محدودیت هر یک از عناصر و ارتباطی که بین این عناصر وجود دارد، حداقل می‌شود[۲].

در نگاه اول به‌نظر می‌رسد که همین روند را می‌توان در مورد زنجیره تأمین پروژه نیز به‌کار برد، اما با مطالعاتی که از سال ۱۹۸۰ در زمینه یکپارچه‌سازی برنامه‌ریزی موجودی و زمان‌بندی پروژه انجام شد[۳]، به‌نظر می‌رسد که در مدل برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه، باید بحث زمان‌بندی نیز مد نظر قرار گیرد. از این‌رو در مدل ارائه شده در این مقاله، بحث زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه و برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین یکپارچه شده‌اند.

امروزه پذیرش سازمان‌های پروژه محور در صنعت بسیار عادی می‌باشد زیرا سازمان‌ها برای اینکه بتوانند در بازار بسیار رقابتی که با آن مواجه‌اند باقی بمانند باید بر روی کسب و کار اصلی خود متمرکز شده و در آن متخصص شوند، بنابراین تعداد تأمین‌کنندگان و پیمانکاران فرعی افزایش یافته و برون‌سپاری و واگذاری بخشی از کارها و وظایف استراتژیک به‌صورت پروژه به پیمانکاران فرعی متخصص، امری رایج می‌باشد. مدیریت پروژه نیز با افزایش تعداد

---

۱. ربانی، مسعود و همکاران، (۱۳۸۳).

2. Cachon, (2000). Graves, (2000). Sacky, (2005).

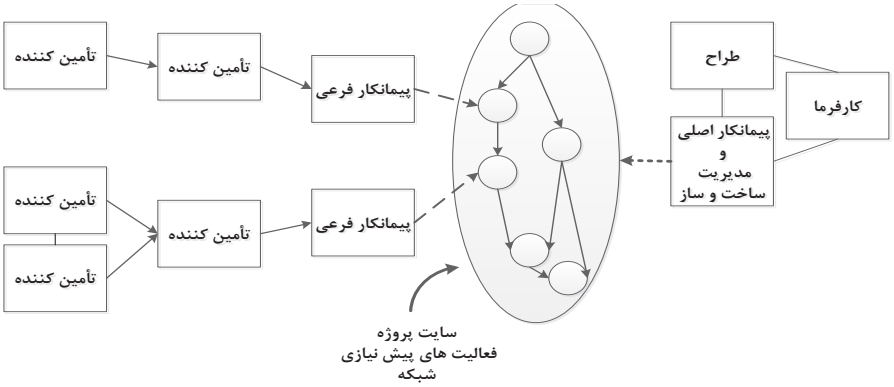
3. Aquilano, (1980). Smith, (1984). Smith, (1987).

محدودیت‌های بالادستی و پایین‌دستی مواجه شده است که با مساله یکپارچگی در زنجیره تأمین مشابهت دارد. در واقع هدف اصلی تیم پروژه، اجرای پروژه بر اساس برنامه پیش‌بینی شده برای عوامل هزینه و زمان و کیفیت می‌باشد، مدیریت پروژه به‌عنوان «هنر و علم تبدیل دید به واقعیت» می‌باشد. بسیاری معتقدند که مدیریت پروژه تبدیل به یک مهارت کسب و کار مهم است و نه فقط مجموعه‌ای از ابزارها و تکنیک‌های مورد استفاده توسط مهندسین[1].

موانع موجود در راه تیم پروژه؛ عدم تأمین منابع در زمان مناسب در نظرنگرفتن شرایط پروژه در برنامه‌ریزی‌های زنجیره تأمین (زمان و میزان سفارش منابع در دوره‌های مختلف)، وجود نداشتن روشی مناسب برای تعیین زمان اجرای فعالیت‌های زنجیره تأمین می‌باشد همچنین خواست مشتری بر کیفیت بالا و خدمت‌رسانی سریع موجب افزایش فشارهایی شده است که قبلا وجود نداشته است، در نتیجه شرکت‌ها بیش از این نمی‌توانند به‌تنهایی از عهده تمامی کارها برآیند به‌همین منظور مبحث زنجیره تأمین و لجستیک پروژه مطرح شد که تا کنون نقش به‌سزایی در برداشتن این موانع داشته است[2].

در این مقاله تلاش شده است با ارائه یک مدل ریاضی دو هدفه جهت کاهش هزینه زنجیره تأمین پروژه با در نظر گرفتن هزینه‌هایی نظیر؛ جریمه تأخیر، پاداش زودهنگام، تخصیص منابع، نگهداری موجودی پروژه، سفارش مواد، خرید مواد اولیه با تخفیف مورد نظر، نگهداری موجودی و دیرکرد تأمین‌کننده و میزان مبلغ بهینه‌ای که قرار است از منبع دوم تأمین شود و همچنین به‌دنبال افزایش همزمان کیفیت مواد اولیه در تابع هدف دوم می‌باشیم. در نمودار (۱) می‌توان نمایی شماتیک از زنجیره تأمین ساخت و ساز را مشاهده کرد[3].

1. Kerzner, (2017).
2. Xue, (2007).
3. Obrien, (2009).



نمودار۱- نمایی از زنجیره تأمین پروژه

۱. مرور ادبیات

از آنجایی‌که مقاله‌های ارائه شده در بحث زنجیره تأمین و لجستیک سنتی، کیفی بوده و یا رویکردی تولیدی داشته‌اند و به ندرت ویژگی‌ها و محدودیت‌های یک پروژه مانند محدودیت‌های زمان و منابع را در نظر گرفته‌اند بنابراین، این موضوع زمینه مناسبی برای فعالیت‌های تحقیقاتی را فراهم می‌آورد. در ذیل به برخی از کارهایی که تا کنون در این زمینه صورت گرفته اشاره می‌کنیم.

وریج هوف و کاسکلا در سال ۲۰۰۰ مقاله خود اشاره می‌کنند که بحث زنجیره تأمین پروژه، از اواخر دهه ۱۹۸۰ آغاز شد. دو دلیل عدم توسعه بهره‌وری و افزایش اهمیت زنجیره تأمین، سبب ورود بحث زنجیره تأمین به پروژه شد. در دهه ۹۰ میلادی، به‌همراه بهبود در فرایندهای تولید و به‌کارگیری الگوهای مهندسی مجدد، مدیران بسیاری از صنایع دریافتند که برای ادامه حضور در بازار تنها بهبود فرایندهای داخلی و انعطاف‌پذیری در توانایی‌های شرکت کافی نیست بلکه تأمین‌کنندگان قطعات و مواد نیز باید موادی با بهترین کیفیت و کمترین هزینه تولید کنند و توزیع‌کنندگان محصولات نیز باید ارتباط نزدیکی با سیاست‌های توسعه بازار تولیدکننده داشته باشند؛ با چنین نگرشی، رویکردهای زنجیره تأمین و مدیریت آن پا به عرصه وجود نهاد. از طرف دیگر با توسعه سریع فناوری اطلاعات در سال‌های اخیر و کاربرد وسیع آن در مدیریت زنجیره

تأمین، بسیاری از فعالیت‌های اساسی مدیریت زنجیره با روش‌های جدید درحال انجام است[۱]. سعد و همکارانش در مقاله خود، در سال ۲۰۰۲، اشاره می‌کنند که اجرای مدیریت زنجیره تأمین در بهبود وضعیت پروژه‌های ساخت و ساز، بسیار اثرگذار می‌دانند. از آنجایی‌که اعضای درگیر در پروژه دانش کمی نسبت به اهمیت زنجیره تأمین ساخت دارند لذا لازم است درک درستی از این مفاهیم به عمل آید. والش و همکاران در سال ۲۰۰۴ به بررسی مدیریت موجودی زنجیره تأمین پروژه‌های سرمایه‌گذاری یک کارخانه غذایی بزرگ می‌پردازد. والش در این مقاله به‌دنبال کاهش زمان تحویل مواد می‌باشد. او بر همین اساس، چند نقطه را برای نگهداری مواد مورد بررسی قرار داده و بر اساس شبیه‌سازی تعیین می‌کند که در هر محل، چه میزان نگهداری شود[۲]. تسرنگ به‌همراه همکارانش در سال ۲۰۰۶ در مقاله‌ای به بررسی زنجیره تأمینی پرداختند که از یک تولیدکننده میلگرد و تعدادی خریدار تشکیل شده است[۳]. به‌همین دلیل، با هدف کاهش هزینه‌های نگهداری میلگردها در کارخانه و پروژه و تعیین میزان سفارش بهینه، با استفاده از اطلاعات در مورد تقاضای مشتریان، مدل ریاضی ارائه می‌نماید[۴]. در مقاله‌ای که در سال ۲۰۰۷ وانگ و هم‌کارانش، روش ترکیبی بر اساس ارزیابی عملکرد و ارزیابی دارایی برای انتخاب شریک ارائه کردند در مقاله ارائه شده روشی که با استفاده از آن در مزایده، مجری پروژه تعیین می‌شود[۵]. ژیان هوا و وان در سال ۲۰۱۰ در مقاله خود اشاره می‌کند که به‌دلیل تغییر وضعیت زنجیره تأمین از حالت سنتی به حالت یکپارچه در صنعت ساخت و ساز انگلستان، افرادی برای اندازه‌گیری و بهبود روابط زنجیره تأمین، مدل‌هایی را ارائه کرده‌اند. در این مدل ۱۰ فاکتور اصلی همچون اعتماد، تخصیص ریسک، تدارکات و ... برای بررسی وضعیت روابط داخل زنجیره تأمین ارائه می‌کند[۶]. چن و وانگ در سال ۲۰۱۱ به بررسی اثر مساله تبادل هزینه-زمان در بهبود درآمد پیمانکار پرداخته‌اند. در واقع هدف پیمانکار کاهش هزینه نیست بلکه افزایش درآمد است. برای آنکه مشتری با پیمانکار به توافق برسند، از برنامه‌ریزی bi-level استفاده می‌شود. این مدل از دو مدل ریاضی تشکیل شده است که مدل اول، مربوط به مشتری و مدل دوم مربوط

---

۱. ربانی و همکاران، (۱۳۸۳).

2. Walsh, (2004).
3. Teserng. (2005).
4. Teserng, (2005).
5. Wang, (2007).
6. jian-hua, (2010).

به پیمانکار است. در انتها جواب به دست آمده توسط این مدل، هر دو سمت را راضی می‌کند[1]. یاسر ابراهیمی و همکارانش در سال ۲۰۱۱ در مقاله خود، به‌دنبال شبیه‌سازی زنجیره تأمین پروژه‌های ساخت و ساز تونل و آنالیز حساسیت آن می‌باشند. برای بحث شبیه‌سازی، از شبیه‌ساز زنجیره تأمین سیمفون[2] (SSCS) استفاده کردند. هدف از این شبیه‌سازی، تعیین میزان ظرفیت مورد نیاز برای انبار منابع می‌باشد که در آن عواملی همچون مدت زمان تحویل، تقاضای روزانه تأثیرگذار است[3]. الیمام و دودین در سال ۲۰۱۳ مدل ریاضی برنامه‌ریزی مختلط[4] (MIP) را برای زنجیره تأمین سه سطحی ارائه نمودند. این مدل با هدف کاهش هزینه‌های فعالیت‌های تعریف شده در هر یک از مراحل، به‌دنبال تعیین زمان طی شده برای هر فعالیت و زمان پایان آن فعالیت در هر مرحله است. در انتها برای حل مدل MIP، روشی را ارائه نموده است[5]. در سال ۲۰۱۳ توسط ایرزاری و هم‌کارانش به چاپ رسید، به‌دنبال استفاده از مدل‌سازی اطلاعات ساخت[6] (BIM) و سیستم اطلاعاتی جغرافیایی[7] (GIS) مقاله‌ای را به‌چاپ رساندند. زنجیره تأمین مورد بررسی در این مقاله دو سطحی بوده و دو بحث تدارکات و حمل و نقل را در نظر می‌گیرد. مدل ارائه شده برای بهبود برنامه‌ریزی هزینه پروژه می‌باشد، زیرا هزینه حمل و نقل و هزینه نگهداری در پروژه تأثیرگذار هستند[8]. لیانگ و وی در پژوهش خود به موضوع تخصیص منابع و عدم قطعیت در برنامه‌ریزی در زیر ساخت حمل و نقل پروژه و مطالعه برنامه توسعه یک بزرگراه در تایوان پرداخته‌اند. آنها یک مدل بهینه‌سازی استوار را با ترکیب تکنیک‌های شبیه‌سازی مونت کارلو و فرآیند تحلیل شبکه، ارائه می‌دهند. هدف این مدل، بیشینه کردن پروژه‌های اولویت‌بندی شده و تعداد پروژه‌های تکمیل شده با توجه به منابع موجود برای یک سال خاص و همچنین کمینه کردن تعداد مدیران مورد نیاز برای تکمیل هر پروژه و میانگین انحراف مطلق اصلاح شده هزینه ایجاد شده و هزینه مورد انتظار پروژه‌ها، می‌باشد[9]. یئو و نینگ در سال ۲۰۰۶ از تکنیک مدیریت

1. Chen, (2011).
2. Simphony Supply Chain Simulator
3. Ebrahimi, (2011).
4. Mixed Integer Programming
5. Elimam, (2013).
6. Building Information Modeling
7. Geographic Information system
8. Irizarry, (2013).
9. Liang, (2013).

زنجیره تأمین بحرانی[1] (CSCM) برای مدیریت عدم قطعیت در تدارکات تجهیزات بزرگ در پروژه‌ها استفاده کردند. در این مقاله به‌منظور حذف اتلاف زمان در فرآیند تأمین تجهیزات اصلی که به‌دلیل استفاده از بافرهای زمانی می‌باشد پیشنهاد می‌شود[2]. هورمن و همکارانش در سال ۲۰۰۵ در مقاله خود، به بررسی تأثیر موجودی با محدودیت بر روی عملکرد نیروی انسانی در صنعت ساخت و ساز پرداختند[3]. به‌منظور بررسی روند برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه، جانسون و مونتگومری، سیستم‌های چند مرحله‌ای را با برنامه‌ریزی خطی مدل‌سازی نموده‌اند. آنان مدل خود را برای یک دوره و در نتیجه با حذف ملاحظات مربوط به پیش زمان تشکیل داده‌اند. زنگویل، سیستم چند مرحله‌ای را زمانی‌که افق برنامه‌ریزی محدود بوده و در هر دوره زمانی از افق برنامه‌ریزی تقاضای مشخصی داشته و ساختار هزینه‌های خرید و نگهداری خطی باشد برای حالت تک محصولی بصورت شبکه حمل و نقل درآورد. سوبوتکا و زارنیگوسکا در سال ۲۰۱۵ به تجزیه و تحلیل مدل‌های سیستم تأمین برای برنامه‌ریزی پروژه ساخت و ساز پرداخته‌اند و رویکردی را ارائه کرده‌اند که مشکلات لجستیک پروژه‌های ساخت و ساز را با تمرکز بر سیستم‌های تأمین بررسی می‌کند و موجب کاهش هزینه‌های منابع بیرونی و افزایش اثربخشی پروژه‌ها با ایجاد راهنماهای لجستیکی در مراحل اولیه برنامه‌ریزی پروژه‌ها و طراحی خدمات لجستیکی یکپارچه می‌شود. وکیلی و نوری با توسعه مقاله الیمام و دودین، به مواردی همچون زمان‌بندی پروژه برای تعیین تقاضای روزانه، در نظر گرفتن هزینه نگهداری در سایت پروژه و تعیین میزان سفارش در دوره‌های مختلف را با هدف پاسخگویی تقاضای دوره‌ها وکاهش هزینه نگهداری پرداخته‌اند و بر خلاف این‌که مدل پایه، برای بررسی یک دوره سفارش می‌باشد، مدل این پژوهش، برای بررسی چندین دوره سفارش ارائه شده است[4]. تبریزی و قادری در سال ۲۰۱۶، یک مدل ریاضی جهت برنامه‌ریزی همزمان زمان‌بندی و تهیه مواد پروژه ارائه دادند هدف این تحقیق، کمینه کردن هزینه‌های پروژه همزمان با بیشینه کردن استواری زمان‌بندی پروژه با در نظر گرفتن موارد دارای عدم قطعیت، هم برای زمان فعالیت‌ها و هم برای هزینه‌های اجرایی، می‌باشد[5]. آرتیگس و همکارانش در سال ۲۰۱۱ به‌دنبال بررسی تعدادی از مدل‌ها ارائه شده در

1. Critical Supply Chain Management
2. Yeo, (2006).
3. Horman, (2005).
۴. وکیلی و همکاران، (۱۳۹۵)
5. Tabrizi, (2016).

زمینه زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع (RCPSP)[1] بودند. یکی از این مدل‌ها مربوط به فرمول با زمان گسسته می‌باشد. در این مدل با هدف کاهش زمان کل پروژه و محدودیت منابع و محدودیت پیش‌نیازی، به‌دنبال تعیین زمان شروع فعالیت‌های پروژه می‌باشد. مدل بعدی که به فرمول زمان‌بندی گسسته تفکیکی معروف است، نسبت به مدل قبلی در محدودیت پیش‌نیازی متفاوت است. مدل دیگر به فرمول زمان‌بندی جریان پیوسته (FBCT)[2] شناخته می‌شود که در آن زمان به‌صورت پیوسته می‌باشد. در مدل دیگر بر پایه شروع و پایان اتفاق، فرمول‌بندی شده است. در مدل آخری بر پایه وقوع یا عدم وقوع اتفاق و با هدف کاهش زمان پروژه مورد بررسی قرار گرفته است. دو مدل انتهایی توسط نویسندگان ارائه شده است. سپس بر اساس روش‌های مختلف، مدل‌های ارائه شده مقایسه می‌شوند[3]. نیبرو کولیش در سال ۲۰۱۴ مدلی برای زمان‌بندی پروژه با محدودیت منابع انعطاف‌پذیر (FRCPSP)[4] ارائه کردند. در این مدل با هدف کاهش زمان پروژه و محدویت‌های پیش‌نیازی و محدودیت‌های دسترسی به منابع به‌دنبال تعیین زمان شروع، زمان پایان، مدت زمان فعالیت و نحوه استفاده منابع توسط فعالیت است[5]. روحانی‌نژاد و توکلی مقدم در مقاله خود به موضوع تخصیص بهینه منابع مازاد و افزایش قابلیت اطمینان در زمان‌بندی پروژه، با تصادفی در نظر گرفتن زمان فعالیت‌های پروژه و با توجه به محدود بودن منابع، پرداخته‌اند. هدف این مدل، کمینه کردن احتمال تأخیر پروژه با تصادفی در نظر گرفتن زمان فعالیت‌های پروژه می‌باشد[6]. محمدی‌پور و سجادی، با ارائه یک مدل ریاضی با هدف کمینه کردن هزینه‌ها، کمینه کردن ریسک و کمینه کردن کاهش کیفیت انجام فعالیت‌ها، که ناشی از کاهش زمان فعالیت‌ها می‌باشد، به مساله ایجاد تعادل بین هزینه‌ها، کیفیت و ریسک پروژه‌ها با در نظر گرفتن محدودیت‌های منابع و زمان، پرداختند[7]. شادان قلی‌زاده طیار و همکاران در سال ۲۰۱۶ در مقاله خود با عنوان «مدل‌سازی مساله زمان‌بندی چند پروژه‌ای تحت شرایط محدودیت منابع در زنجیره تأمین رفت و برگشتی» به ارائه مدل زنجیره تأمین پروژه پرداختند. این پژوهش بر دسترسی منابع تمرکز می‌کند. برای ارضای منابع تجدیدناپذیر در طول دوره‌های زمانی،

1. Resource-Constraine Project Scheduling Problem
2. Flow-based Continuous Time
3. Kone, (2011).
4. Resource-Constrained Project Scheduling Flexible Problem
5. Naber, (2014).
6. Rohaninejad, (2015).
7. Mohammadipour, (2016).

این منابع مورد نیاز هستند و همچنین برای تعیین یک طرح تولید حمل و نقل برای حمل منابع تجدیدناپذیر از مدل برنامه‌ریزی در ترکیب با مساله زمان‌بندی چند پروژه‌ای تحت شرایط محدودیت منابع در این مقاله استفاده کرده‌اند. و همچنین برای ارائه یک طرح جهت تخصیص منابع تجدیدپذیر فرض شده که می‌توان از منابع تجدیدپذیر با اجاره‌بهای بالا استفاده کرد. این فرض به ایجاد یک مدل که هزینه منابع با اجاره‌بهای بالا و هزینه جریمه دیرکرد فعالیت‌ها را بهینه می‌کند، می‌انجامد[1].

زمان، هزینه و کیفیت از مهمترین جنبه‌های یک پروژه هستند. که در همه پروژه‌ها باید مورد توجه قرار گیرند. تاکنون مدل‌های زیادی در زمینه برنامه‌ریزی ریاضی جهت موازنه بهینه بر روی سه فاکتور پروژه انجام شده است که پایه این فعالیت‌ها مقاله آقای بابو و سورش در زمینه موازنه‌ی هر سه عامل با هم بوده است؛ آنها در مقاله‌شان با طرح فرضیه فشردگی (Crashing) فعالیت فرض نمودند که وقتی زمان یک فعالیت کاهش یابد هزینه با یک شیب خطی افزایش و کیفیت با یک شیب خطی کاهش می‌یابد. آنها برای مسأله خود سه تابع هدف خطی در نظر گرفتند که تحلیل نتایج به تصمیم‌گیری در موازنه عوامل فوق منجر می‌شود. دو نویسنده در انتهای مقاله اشاره می‌کنند که نحوه محاسبه کیفیت کل پروژه چه بصورت میانگین وزنی یا هندسی یا محاسبه کیفیت به‌صورت حاصل‌ضرب هر یک از فعالیت‌ها تأثیری در رویه نتایج کاری آنها نداشته است[2]. دوبا خنگ و مای اینت در مقاله‌ای به ارائه یک مطالعه موردی در زمینه پیاده‌سازی فرضیه کرش در یک کارخانه سیمان می‌پردازند و نشان می‌دهند که استفاده از مدل بابو و سورش می‌تواند تأثیر شگرفی در کاهش هزینه‌ها داشته باشد. آنها با طرح ۶۴ فعالیت در یک کارخانه سیمان و حل مسأله با نرم‌افزار لینگو به نتایج مدونی دست یافتند نتایج آنها به این‌صورت بود که با دسته‌بندی سطوح کیفیتی در چهار سطح به دسته‌بندی به نقاط همتراز از منظر زمان و کیفیت دست یافتند. ثمره این کار توانایی تصمیم‌گیری راحت‌تر در هریک از سطوح کیفی مدنظر است[3]. تاوراس در ۲۰۰۰ نیز به ارائه یک مقاله مروری در زمینه کاربرد تحقیق در عملیات در مورد موازنه بهینه سه فاکتور کیفیت-زمان-هزینه، پروژه می‌پردازد و در نمودارهایی که در ادامه می‌آید به تفکیک هر یک از سه حوزه و تعین سه قسمت کلیدی (معیارها، منابع و فعالیت‌ها) در حوزه

1. Gholizadeh, (2016).
2. Babu, (1996).
3. Khang, (1999).

مدیریت پروژه می‌پردازد. یک پروژه از سه دیدگاه اصلی مورد توجه است؛ معیار (شامل طول پروژه، میزان استفاده از منابع، تسطیح منابع، ارزش فعلی با در نظر گرفتن سایر سرمایه‌گذاری‌ها) که می‌تواند به‌عنوان قطعی یا نامعین بررسی شود. مورد دوم فعالیت است که از جنبه‌های طول، پیش‌دستی، پیش‌نیاز و حالت بررسی می‌شود. مورد سوم منابع است که به‌صورت جریان مالی، ظرفیت و میزان مصرف بررسی می‌شوند[1].

ونفا هو و ژینوا هی در مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۴ منتشر کردند به ارائه مدل موازنه هزینه، کیفیت و زمان در پروژه‌های ساختمانی با رویکرد تخصیص منابع پرداختند، نکته حائز اهمیت در مقاله آن ارائه تعریف مناسب‌تری از کیفیت در پروژه‌های ساختمانی بود. آنها عملیات اجرایی یک پروژه عمرانی را از لحاظ اجرایی با توجه به هزینه، کیفیت و زمان فعالیت از چهار منظر مواد اولیه، تجهیزات، نیروی کار و مدیریت اجرا مورد بررسی قرار دادند. کیفیت کل پروژه در مدل این دو پژوهشگر به‌صورت میانگین وزن‌دار کیفیت هر فعالیت محاسبه می‌شود. یکی دیگر از ویژگی‌های کلیدی پژوهش هو و هی این مسأله است که آنها بر خلاف مقاله بابو و سورش که از فرضیه فشردگی استفاده می‌کند، از فرض تخصیص منابع به کارگران و برآورد حجم کار استفاده می‌نمایند[2]. طارقیان و طاهری نیز در دو مقاله در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ به بررسی این مسأله با در نظر گرفتن مسأله به‌صورت سیستم و با استفاده از نظریه شبکه‌ها و حل مسأله به‌صورت فراابتکاری با استفاده از الگوریتم جستجوی الکترومغناطیس موازنه سه فاکتور هزینه، کیفیت و زمان به‌صورت سه هدفه می‌پردازند. محدودیت زمانی در مدل طارقیان و طاهری به‌صورت یک زمان موعود برای انتهای پروژه مطرح می‌شوند و مدل در این حالت به‌دنبال کمینه کردن هزینه با بیشینه نمودن کیفیت است. مدل ارائه شده در مقاله آنها کیفیت نهایی پروژه را به‌صورت میانگین هندسی کیفیت هر یک از فعالیت محاسبه می‌کند[3]. الرایص و قندیل در سال ۲۰۰۵ در مقاله‌ای به بررسی موازنه سه فاکتور هزینه، زمان و کیفیت در پروژه‌ی راه‌سازی است که با استفاده از الگوریتم ژنتیک و استفاده از یک دسته جواب شدنی به‌دنبال حل مدل سه هدفه خود با رویکرد کاهش هزینه و زمان پروژه و افزایش کیفیت هستند. آنها برای این‌منظور از دو منابع کارکنان و مواد استفاده می‌کنند ترکیب هر یک از دو منبع و شرایط زمانی می‌توانند منجر به

1. Tavares, (2002).
2. Hu, (2014).
3. Tareghian, (2006).

زمان، هزینه و کیفیتی متفاوت خواهد شد[1]. عبدالسلام و گاد در سال ۲۰۰۸ به ارائه طرحی برای برآورد هزینه-کیفیت (COQ)[2] در پروژه‌های عمرانی دبی می‌پردازند. آنها برای مقاله خود از مدل پیشگیری شکست ارزیابی (PAF)[3] بهره می‌برند تا بتوانند هزینه کیفیت را محاسبه نمایند. آنها به‌دنبال یافتن هزینه کیفیت بهینه هستند آنها هزینه کیفیت در پروژه‌های عمرانی دبی را برابر ۱٫۳ درصد از هزینه‌ها برآورد می‌کنند و همچنین برای یافتن سطح هزینه بهینه از پارامترهای عددی استفاده می‌کنند[4]. شار ویساوا، سینق و دوبی در سال ۲۰۱۲ در مقاله‌ای به موازنه کیفیت، هزینه و زمان پروژه با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان می‌پردازند[5].

از آنجاکه هزینه مواد اولیه یکی از هزینه‌های مهم در هر پروژه ساخت و ساز است و حتی ممکن است ۵۰ درصد یا بیشتر از کل هزینه باشد، دپاک کاروریا و پاندی در سال ۲۰۱۸ در مقاله خود تکنیک‌های مدیریت مواد ساختمانی را بررسی کرده‌اند. هدف از مدیریت مواد، اطمینان از این است که مواد در زمان استفاده از آنها به‌موقع در دسترس قرار گیرد همچنین تدارک مؤثر مواد نقش کلیدی در تکمیل موفقیت‌آمیز پروژه ساخت و ساز و سایت پروژه را ایفا می‌کند که این تحقیق روی تفاوت بین هزینه‌های برنامه‌ریزی شده و واقعی مواد، تمرکز دارد[6]. همچنین تاثیرات مدیریت مواد بر عملکرد پروژه در سال ۲۰۱۷ توسط جوسا و کاسیم مورد بررسی قرار گرفته شده است[7].

شریعتمداری و نهاوندی در سال ۲۰۱۷ در تحقیق خود به بررسی یک روش مدیریت یکپارچه منابع (IRM)[8] جهت برنامه‌ریزی و انتخاب همزمان پروژه پرداختند. مدیریت بهینه منابع تجدیدپذیر و غیرقابل تجدید، انتخاب منابع و برنامه‌ریزی بهینه آنها جهت افزایش سود پروژه هدف این تحقیق می‌باشد که یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی نیز برای این رویکرد پیشنهاد شده است. برای حل مدل ابتدا یک الگوریتم اکتشافی جهت تولید راه‌حل‌های اولیه و پس یک روش برای بهبود راه‌حل‌های حاصل شده براساس الگوریتم جستجو گرانشی ارائه شده

1. EL. Rayes, (2005).
2. Cost of quality
3. Prevention Failure Assessment
4. Abdelsalam, (2009).
5. Shrivastava, (2012).
6. Karoriya, (2018).
7. Jasoh, (2017).
8. Integrated Resource Management

است (GSA[1]). در نهایت، روش پیشنهاد شده با Lingo در مجموعه‌ای از ۲۷۰ آزمون مقایسه می‌شود. مقایسه نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در بیشتر موارد Lingo را بهبود می‌بخشد و پیچیدگی زمان کمتری دارد. همچنین نشان داده شده است که استفاده از رویکرد IRM در مسائل آزمون، میانگین سودآوری را تا ۱۳٫۲ درصد بهبود می‌بخشد[2].

زورقی، شهسوار، عباسی در سال ۲۰۱۷ مدل ریاضی برای زمان‌بندی پروژه با منابع محدود چندحالته با سفارش مواد (MRCPSMO)[3] تحت سیاست‌های پاداش-مجازات ارائه کردند. تابع هدف مدل شامل چهار عنصر هزینه نگهداری مواد، هزینه سفارش مواد، پاداش پرداخت شده توسط مشتری و هزینه تأخیر در تکمیل پروژه می‌باشد. این مطالعه تاکید می‌کند که برنامه‌ریزی پروژه و سفارش مواد (زمان و مقدار سفارش) باید به‌طور همزمان در نظر گرفته شود تا هزینه کل را کاهش دهد همچنین در این مدل فعالیت‌ها می‌توانند در حالت‌های مختلف اجرا شوند، که هر کدام احتمالاً تاثیر متفاوتی بر مدت مصرف منابع دارند. آنها سه رویکرد متاهیوریستیک PSO-GA-GA، GA-GA و SA-GA را برای به‌دست آوردن راه‌حل‌های نزدیک به بهینه پیشنهاد داده‌اند که برای تنظیم پارامترهای الگوریتم از روش طراحی آزمایش و Taguchi استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ترکیبی PSO-GA از هر دو الگوریتم GA-GA و SA-GA بهتر است و می‌تواند راه‌حل‌های مناسب را در یک زمان معقول فراهم کند[4].

با توجه به مقالاتی که در این زمینه به‌صورت کمی ارائه شده‌اند، می‌توان دریافت که هیچ‌کدام از مدل‌های ارائه شده در مبحث زنجیره تأمین و لجستیک پروژه، زمان‌بندی، تخصیص و موجودی پروژه را با قیمت خرید مواد اولیه با کیفیت متناسب به‌همراه تخفیفات خرید که به‌صورت افزایشی می‌باشد؛ در نظر نمی‌گیرند بنابراین در این مقاله مدلی یکپارچه و دو هدفه ارائه می‌گردد که علاوه بر کمینه کردن هزینه زنجیره تأمین و لجستیک پروژه، همزمان میزان کیفیت مواد اولیه را بیشینه می‌سازد. این مدل محدودیت‌های زمانی پروژه را در نظر می‌گیرد، بنابراین در این مدل زمان‌بندی فعالیت‌ها، زمان و حجم سفارش پروژه و زمان و میزان تولید تأمین‌کننده به‌نحوی تنظیم می‌شوند که با رعایت انواع محدودیت‌های موجود، هزینه کل زنجیره حداقل شود.

1. Gravitational Search Algorithm
2. Shariatmadari, (2017).
3. multi-mode resource-constrained project scheduling with material ordering
4. Zoraghi, (2017).

همچنین با بررسی‌های صورت گرفته در خصوص بررسی عملکرد شبکه‌های زنجیره تأمین و لجستیک پروژه در حالتی‌که کیفیت مواد مصرفی به‌عنوان یک تصمیم استراتژیک پیشنهاد گردد در مقایسه با حالتی که هزینه تخصیص و بکارگیری منابع و اجرای فعالیت‌های مربوطه در طول عمر پروژه؛ نشان می‌دهد این موضوع از این جهت حائز اهمیت است که تحقیقات این چنینی بر روی المان هزینه اتمام پروژه تمرکز داشته‌اند از این‌رو تابع هدف دوم با هدف بیشینه کردن کیفیت مواد مصرفی پروژه در نظر گرفته شده است.

۳. ساختار مقاله

در این مقاله پس از بیان مقدمه و پیشینه تحقیق به معرفی و تعریف دقیق مساله و تشریح مفروضات آن و نهایتاً مدل‌سازی ریاضی می‌پردازیم. در قسمت بعد خطی‌سازی و روش محدودیت اپسیلون بررسی شده است. بعد از آن نمونه عددی و سپس تحلیل نتایج را نشان دادیم و در انتها به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهاداتی آتی جهت توسعه مدل پیشنهادی، پرداخته شده است.

۴. تعریف مساله

هدف اصلی این مقاله ارائه یک مدل ریاضی جهت بهبود زنجیره تأمین و لجستیک پروژه با درنظر گرفتن ویژگی‌های پروژه (نظیر محدودیت‌های زمانی و روابط پیش‌نیازی فعالیت‌های پروژه)، موازنه بین هزینه اجرای پروژه و کیفیت مواد اولیه، در نظر گرفتن تأثیر تخفیف (افزایشی) بر روی هزینه اجرای پروژه، تعیین زمان ارسال مواد به سایت پروژه و حجم مواد در هر زمان، تعیین زمان اتمام پروژه، تخصیص هم‌زمان منابع مصرفی (بودجه) و منابع غیرمصرفی (ماشین‌آلات و نیروی انسانی) می‌باشد. در این بخش بیان مساله، مفروضات، پارامترها، مجموعه‌ها، متغیرهای تصمیم و مدل برنامه‌ریزی مساله معرفی می‌گردد.

۴-۱- بیان مساله

به‌منظور ارائه مدل برنامه‌ریزی منابع در زنجیره تأمین پروژه، از راهکار ارائه شده توسط الیمام و دودین در سال ۲۰۰۱ استفاده می‌شود. بر همین اساس با در نظر گرفتن ویژگی‌های پروژه و عواملی

نظیر تأثیر کیفیت مواد اولیه و تخفیفات خرید بر روی هزینه اجرای پروژه به توسعه مدل وی پرداخته شد و مدل برنامه‌ریزی منابع در زنجیره‌تأمین پروژه را ارائه گردید.

لازمه موفقیت هر پروژه دستیابی توأم به هر سه عامل هزینه، زمان و کیفیت است و خارج شدن هر یک از سه عامل مذکور از حدود تعیین شده، می‌تواند به انجام پروژه‌ای ناموفق و غیراقتصادی منجر شود. در بررسی برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه، اثرپذیری زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه و سفارش مواد می‌بایست مورد توجه قرار گرفته شود. از میان محدودیت‌های مختلفی که در انجام یک پروژه وجود دارد، محدودیت مالی باعث این اثرپذیری می‌شود، بنابراین با استفاده از این محدودیت، این اثرپذیری در مدل در نظر گرفت i می‌شود. همچنین قراردادی که بین پیمانکار و کارفرما بسته می‌شود از نوع «قرارداد با قیمت ثابت» است، به این ترتیب که یک قیمت کلی با توجه به مشخصات و نوع کار برآورد می‌شود و کار به‌صورت کلی و یکجا با قیمت تعیین شده به پیمانکار واگذار می‌شود که در صورت کاهش هزینه‌ها، پیمانکار سود بیشتری کسب خواهد کرد.

یکی از اهداف پروژه‌ها، به اتمام رساندن آنها در زمان مورد توافق بین کارفرما و مشتری است و هرگونه تأخیر در زمان اتمام پروژه منجر به تحمل هزینه بیشتر از سوی کارفرما و همچنین نارضایتی مشتری می‌باشد بنابراین تأمین به‌موقع مواد و منابع مورد نیاز پروژه‌ها و تعیین میزان سفارش و خرید آنها، مطابق با برنامه زمان‌بندی پروژه‌هاست، به‌طوری‌که در تعامل با هدف کاهش هزینه‌های ناشی از تأخیر تحویل مواد و منابع مورد نیاز پروژه‌ها و نیز هزینه‌های نگهداری آنها باشد، بنابراین باید برنامه‌ریزی موجودی پروژه و تأمین‌کننده نیز با هم یکپارچه شوند بدین منظور سفارش از طرف پیمانکار با دو عامل زمان و حجم برای تأمین‌کننده در نظر گرفته شده که به‌صورت متغیر تصمیم فرض شده است و این متغیرها به‌نحوی محاسبه می‌شوند که با توجه به اثرپذیری‌شان از زمان‌بندی فعالیت‌ها، هم هزینه‌های انجام فعالیت‌ها و موجودی پروژه و هم هزینه‌های تأمین‌کننده حداقل شود. همچنین با توجه به محدودیت ظرفیت تولید تأمین‌کننده، میزان حجم تولیدات روزانه تأمین‌کننده به‌نحوی تنظیم می‌شود که هزینه‌های نگهداری موجودی و دیرکردش حداقل شود. بنابراین در این مدل زمان‌بندی فعالیت‌ها، زمان و حجم سفارش پروژه و زمان و میزان تولید تأمین‌کننده به‌نحوی تنظیم می‌شوند که با رعایت انواع محدودیت‌های موجود، هزینه کل زنجیره حداقل شود.

داشتن هزینه حداقلی و کیفیت بالای مواد اولیه در پروژه‌ها از الزامات یک پروژه می‌باشد، محدودیت بودجه مورد نظر و اقتصادی بودن اجرای پروژه همچنین به‌صرفه بودن و منتفع شدن پیمانکار از پروژه مورد نظر باعث می‌شود تا پیمانکار هزینه‌ها را کنترل کند بنابراین غالباً کنترل هزینه‌ها باعث سفارش و خرید مواد با کیفیت نه چندان بالا می‌شود بنابراین هدف دیگر پروژه‌ها، تحویل پروژه‌ای است که از نظر کیفیت مواد اولیه بکار رفته در آن مورد تأیید مشتری باشند و حداقل کیفیت مورد تأیید نظام مهندسی را نیز دارا باشد. بنابراین یکی از اهداف این پژوهش اجرای پروژه با کیفیت مطلوب است به‌طوری‌که در تعامل با کمینه کردن هزینه‌های پروژه باشد.

۴-۲. مفروضات

برای مدل‌سازی و حل مساله همواره نمی‌توان تمامی موارد مورد نیاز و قابل بحث را در کنار هم قرار داد. این امر به پیچیده شدن مدل و عدم کاربردی بودن آن یا عدم توانایی در حل مدل با امکانات موجود می‌باشد. از این‌رو برخی مسائل را به‌صورت پیش‌فرض در نظر می‌گیریم تا بتوان در عین جامع بودن مدل از کاربردی بودن آن نیز اطمینان حاصل کرد. مفروضات مساله شامل موارد ذیل می‌باشد:

۱. تمامی فعالیت‌های مربوط به زنجیره تأمین و لجستیک پروژه، به‌صورت متمرکز و یکپارچه مدیریت می‌شود.
۲. برنامه زمان‌بندی پروژه، یعنی روابط بین فعالیت‌ها و زمان فعالیت‌ها مشخص است.
۳. روابط پیش‌نیازی در پروژه از نوع FS است.
۴. فعالیت‌های پروژه بدون انقطاع انجام می‌شود.
۵. زمان اتمام پروژه قطعی و مشخص است.
۶. قرارداد مالی بین کارفرما و پیمانکار از نوع قرارداد با قیمت ثابت می‌باشد.
۷. امکان تأمین مواد مورد نیاز پروژه از بیش از یک تأمین‌کننده وجود دارد.
۸. نوع و میزان مواد مورد نیاز هر یک از فعالیت‌های پروژه با توجه به برنامه زمان‌بندی آن تعیین شده است.
۹. به‌دلیل فضای انبارش محدود و مشخص در سایت پروژه، سفارش و خرید مواد مورد نیاز بیشتر از ظرفیت انبار مستلزم هزینه می‌باشد، بنابراین سفارش مواد دوره‌ای می‌باشد.

۱۰. اثر کیفی مواد اولیه خریداری شده بر روی هزینه‌ها در نظر گرفته شده است.
۱۱. به‌جز بودجه اولیه پروژه که کارفرما در اختیار پیمانکار قرار می‌دهد برای پر کردن خلا مالی ناشی از فقدان سرمایه، منبع دومی در نظر گرفته می‌شود که دارای مقداری محدود است و باید در انتهای پروژه همراه کارمزدش برگردانده شود.
۱۲. برنامه‌ریزی موجودی فقط با تأمین‌کننده مواد اولیه و با هدف حداقل کردن هزینه‌های موجودی شامل هزینه‌های دیرکرد و نگهداری موجودی انجام می‌گیرد.

۴-۳. مدل‌سازی مساله

در این قسمت ابتدا اندیس‌ها، مجموعه‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم را معرفی می‌کنیم و پس از آن به ارائه مدل ریاضی و محدودیت‌ها می‌پردازیم.

۴-۳-۱. اندیس‌ها

j: شماره فعالیت J ، $j=1,...,J$ شماره آخرین فعالیت و نشان‌دهنده تعداد فعالیت‌ها است.
i: اندیس فعالیت‌های پیش‌نیاز فعالیت j
t: متغیر زمان $t=1,...,H$
k: شماره منبع $k=1,...,K$
m: شماره مواد $m=1,...,M$
n: اندیس سطح محدوده حجمی مورد نظر ماده $n=1,2,...,N_m$
n': اندیس سطوح محدوده حجمی nو ماقبل آن، $n'=N_m,...,2n$
q: کیفیت ماده $q_m q_h, q_{vh}$ (مورد تأیید نظام مهندسی)
s: اندیس تأمین‌کنندگان $s=1,2,...,S$

۴-۳-۲. مجموعه‌ها

B_j: مجموعه فعالیت‌های قبل از فعالیت j (پیش‌نیازهای فعالیت j)
B_o: مجموعه فعالیت‌های بدون تقدم (فعالیت‌های بدون پیش‌نیاز)

B_n: مجموعه سطوح محدوده حجمی n و سطوح قبل از آن

F: مجموعه زمان‌هایی که در آن‌ها طبق قرارداد، کارفرما بر اساس صورت وضعیت‌ها پول پرداخت می‌کند. فرض می‌شود که صورت وضعیت‌ها در فواصل زمانی برابر با واحد زمان، به کارفرما تحویل داده می‌شود.

۴-۳-۳- پارامترها

ef_j: زودترین زمان اتمام فعالیت j با فرض شروع در زمان صفر

ef_j: زودترین زمان اتمام آخرین فعالیت

Lf_j: دیرترین زمان اتمام فعالیت j با فرض اینکه H آخرین زمان تکمیل پروژه است.

es_j: زودترین زمان شروع فعالیت

d_j: طول فعالیت

d: تاریخ مقرر تحویل پروژه

H: حداکثر طول افق برنامه‌ریزی

P: جریمه دیرکرد به ازای هر واحد زمان تأخیر پس از زمان d

r: پاداش تکمیل پروژه به ازای هر واحد زمان زودتر از زمان d

r_{jk} : میزان نیاز روزانه فعالیت j به منبع k

A_k : میزان در دسترس بودن منبع k در هر روز

C_K : هزینه استفاده از هر منبع k

G_{ms} : هزینه سفارش ماده m از تأمین‌کننده s

h_m : هزینه نگهداری ماده m

L_{ms} : زمان تدارک ماده m از تأمین‌کننده s

R_{jm}: مقدار ماده m مورد نیاز برای پردازش فعالیت Rjm (j مستقل از طول فعالیت است)

Ψ_{mqsn}: محدوده مقداری ماده m با کیفیت q در محدوده حجمی مورد نظر n که از تأمین‌کننده s خریداری شده است. (Ψ_{mqsn1}: حد پایین محدوده حجمی ماده m با کیفیت q: Ψ_{mqsn2}، حد بالای محدوده حجمی ماده m با کیفیت q)

δ_{mqsn}: هزینه ماده m با کیفیت q در nامین محدوده حجمی از تأمین‌کننده s

Q_{mq}: اثر ماده m با کیفیت q خریداری شده بر روی هزینه پروژه

M: عدد خیلی بزرگ

H_s : افق برنامه‌ریزی تأمین‌کننده s

C_S : حداکثر ظرفیت تولید تأمین‌کننده s در واحد زمان

P_s : جریمه دیرکرد به ازای هر واحد زمان تأخیر توسط تأمین‌کننده s

hs_s: هزینه نگهداری موجودی تأمین‌کننده s در واحد زمان

O_f: میزان بودجه‌ای که از کارفرما در زمان f دریافت می‌شود.

W: حداکثر مبلغی که می‌توان از منبع دوم تأمین کرد.

α: درصد کارمزد\

۴-۳-۴. متغیرهای تصمیم

متغیرهای تصمیم این مدل شامل دو دسته متغیر هستند:

متغیرهای صفر و یک

Xjt =1 اگر فعالیت j در زمان t تمام شود و Xjt =0 در غیر این صورت

λ_{mqnst}=1 اگر ماده m با کیفیت q در محدوده حجمی n، از تأمین‌کننده s، در زمان t سفارش داده شود و λ_{mqnst}=0 در غیر این صورت

y_{ktj} =1 اگر منبع kام در زمان t به فعالیت j تخصیص داده شود و y_{ktj}=0 در غیر این صورت

C_{kj} = 1 اگر منبع k به فعالیت j تخصیص داده شود و C_{kj}=0 در غیر این صورت

V_{kt}=1 اگر مقدار هزینه C_k در زمان t به منبع k تخصیص داده شود و V_{kt}=0 در غیر این صورت

λ_{mqnst}=1 اگر ماده m با کیفیت q در محدوده حجمی n ، که در روز b مورد نیاز است توسط تأمین‌کننده s تولید شود و λ_{mqnst}=0 غیر این صورت

متغیرهای پیوسته غیرمنفی

I_{mt} : سطح موجودی ماده m در انتهای زمان t

TC_{mqnst}: مجموع هزینه خرید مواد اولیه با کیفیت q، در محدوده حجمی n، از تأمین‌کننده s در زمان t

U_f: میزان مبلغ مورد نیاز در زمان f که باید از منبع دوم تأمین شود.

C'_{msqbt} : مقدار تولید اختصاص یافته تأمین‌کننده s در دوره t به سفارشی با کیفیت q که در روز b مورد نیاز است (λ_{mqnst})

ρ_{mqnt}: مقدار ماده m مورد نیاز با کیفیت q در محدوده حجمی n، برای دوره زمانی t

۴-۳-۵. توابع هدف

در این تحقیق، یک مدل دو هدفه توسعه و حل شده است که دارای ۱۳ محدودیت و به‌دنبال آن بهینه کردن دو تابع هدف می‌باشد.

$$minZ_1 = \quad (۱)$$
$$\sum_{t=d}^{H} p(t-d)x_{Jt} - \sum_{t=ef_J}^{d} r(d-t)x_{Jt} + \sum_{m=1}^{M}\sum_{s=1}^{S} G_{ms} \sum_{q=q_m}^{q_{vh}} \sum_{n=1}^{N_m} \sum_{t=1}^{H-L_{ms}-d_j+1} \lambda_{mqnst}$$
$$+ \sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{H-1} h_m I_{mt} + \sum_{m=1}^{M}\sum_{q=q_m}^{q_{vh}}\sum_{s=1}^{S}\sum_{n=1}^{N_m}\sum_{b=2}^{H_s-L_{ms}} \lambda_{mqnsb} \sum_{t=1}^{b-1} C'_{msqbt}.hs_s \text{ .(b-t)}$$
$$+ \sum_{m=1}^{M}\sum_{q=q_m}^{q_{vh}}\sum_{s=1}^{S}\sum_{n=1}^{N_m}\sum_{b=1}^{H_s-L_{ms}} \lambda_{mqnsb} \sum_{t=b+1}^{H_s-L_{ms}} C'_{msqbt}.p_s \text{.(t-b)}$$
$$+\{\sum_{m=1}^{M}\sum_{q=q_m}^{q_{vh}}\sum_{s=1}^{S}\sum_{n=1}^{N_m}\sum_{t=1}^{H-L_{ms}-d_j+1}[(\rho_{mqnt} - \Psi_{mqn1}).\delta_{mqsn}$$
$$+\sum_{n'\in B_n}\left(\Psi_{mqsn'1} - \Psi_{mqs(n'-1)1}\right).\delta_{mqs(n'-1)}\ ]\}+\sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J} C_k.r_{jk} + (b.\alpha+1)\sum_{f\in F} U_f$$

$$maxZ_2= \quad (۲)$$
$$\sum_{m=1}^{M}\sum_{q=q_m}^{q_{vh}}\sum_{n=1}^{N_m}\sum_{s=1}^{S}\sum_{t=1}^{H} Q_{mq}.\rho_{mqnt}.\lambda_{mqnst}$$

تابع هدف اول به‌منظور کمینه کردن هزینه زنجیره تأمین و لجستیک پروژه و تابع هدف دوم بیشینه‌سازی کیفیت مواد مورد نیاز پروژه را نشان می‌دهد. هزینه‌های مربوط به تابع هدف اول:

هزینه تأخیر در تحویل به‌هنگام - هزینه پاداش زودهنگام + هزینه سفارش مواد + هزینه نگهداری موجودی + هزینه نگهداری موجودی توسط تأمین‌کننده + هزینه دیرکرد تأمین‌کننده + هزینه خرید مواد اولیه مورد نیاز پروژه + هزینه منابع تجدیدپذیر پروژه + میزان مبلغ بهینه قابل تأمین از منبع دوم.

همچنین با توجه به این‌که کیفیت هر ماده، اثر مستقیم روی هزینه اجرای پروژه و در نهایت کیفیت پروژه دارد بنابراین تابع هدف دوم نشان‌دهنده بیشینه کردن کیفیت مواد مورد نیاز پروژه در هر دوره سفارش می‌باشد.

۴-۳-۶. محدودیت‌ها

$$\sum_{t=ef_i}^{lf_i} t\ x_{it} + d_j - \sum_{t=ef_j}^{lf_j} t\ x_{jt} \le 0;\ \forall\, i \in B_j \quad (۳)$$

$$d_j - \sum_{t=ef_j}^{lf_j} t.\, x_{jt} \le 0;\ \forall\, j \in B_O \quad (۴)$$

$$\sum_{t=ef_j}^{lf_j} x_{jt} = 1;\ \forall\, j=1,2,\ldots,J \quad (۵)$$

$$\sum_{j=1}^{J} r_{jk} \sum_{b=1}^{t-1+d_j} x_{jb} \le A_k;\ \forall k = 1,2,\ldots,K, \forall\, t = 1,2,\ldots,H \quad (۶)$$

$$I_{mt} = I_{m(t-1)} + \sum_{q=q_m}^{q_{hv}} \rho_{mqn(t-L_{ms})} - \sum_{j=1}^{J} R_{jm}\, x_{jt} \quad (۷)$$
$$;\forall t=1,2,\ldots,H, \forall m=1,2,\ldots,M, \forall s=1,2,\ldots,S, \forall n = 1,2,\ldots,N_m$$

$$\sum_{q=q_m}^{q_{vh}} \lambda_{mqnst} \le 1; \forall m=1,\ldots,M, \forall t=1,\ \ldots,H, \forall s = 1,\ldots,S, \forall n=1,\ldots,N_m \quad (۸)$$

$$\Psi_{mqsn1}.\lambda_{mqnst} \le \rho_{mqnt} \le \Psi_{mqsn2}.\lambda_{mqnst} \quad (۹)$$
$$\forall m=1,2,\ldots,M, \forall q=q_m,q_h,q_{vh}, \forall s = 1,2,\ldots,S, \forall t=1,2,\ldots,H,\ \forall n=1,2,\ldots,N_m$$

$$TC_{mqsnt} = (\rho_{mqnt} - \Psi_{mqsn1}).\delta_{mqsn} + \sum_{n' \in B_n} \left(\Psi_{mqsn'1} - \Psi_{mqs(n'-1)1}\right).\delta_{mqs(n'-1)} \quad (۱۰)$$
$$\forall m=1,2,\ldots,M, \forall q=q_m,q_h,q_{vh}, \forall s = 1,2,\ldots,S, \forall t = 1,2,\ldots,H, \forall n=1,2,\ldots,N_m$$

$$\sum_{t=es_j}^{lf_j} C_{kj}\ .\, y_{ktj}.x_{jt} \le C_{kj} + M\ (1 - \sum_{t=es_j}^{lf_j} V_{kt}) \quad (۱۱)$$
$$\sum_{t=es_j}^{lf_j} C_{kj}\ .\, y_{ktj}.x_{jt} \ge C_{kj} - M\ (1 - \sum_{t=es_j}^{lf_j} V_{kt})$$
$$\forall\, k=1,2,\ldots,K\ ,\ \forall\, j=1,2,\ldots,J$$

$$\sum_{b=1}^{H_s} C'_{msqbt} = \rho_{mqnt} \quad (۱۲)$$
$$\forall m=1,2,\ldots,M, \forall s=1,2,\ldots,S, \forall q=qm,qh,qvh, \forall n = 1,2,\ldots,N_m, \forall t=1,2,\ldots,H$$

$$\sum_{b=1}^{H_s} C'_{msqbt} \le C_s \quad (۱۳)$$
$$\forall m=1,\ldots,M, \forall s=1,2,\ldots,S, \forall q=qm,qh,qvh, \forall t=1,..,H$$

$$\sum_{f \in F} U_f \le W \quad (۱۴)$$

$$\sum_{j=1}^{J} \sum_{k=1}^{K} \sum_{t=f-P'+1}^{f} C_k\ .\, r_{jk}\ .\, x_{jt} \quad (۱۵)$$
$$+\Big(\sum_{m=1}^{M} \sum_{q=q_m}^{q_{vh}} \sum_{s=1}^{S} \sum_{n=1}^{N_m} \sum_{t=f-p'+1}^{f} [\left(\rho_{mqnt} - \Psi_{mqsn1}\right).\delta_{mqsn}$$
$$+\sum_{n' \in B_n} \left(\Psi_{mqsn1} - \Psi_{mqs(n-1)1}\right).\delta_{mqs(n-1)}]) + \sum_{m=1}^{M} \sum_{s=1}^{S} G_{ms} \sum_{q=q_m}^{q_{vh}} \sum_{n=1}^{N_m} \sum_{t=f-p'+1}^{f} \lambda_{mqnst}$$
$$+\sum_{h=1}^{M} \sum_{t=f-p'+1}^{f} h_m.\, I_{mt} \le O_f + U_f;\ \forall f \in F\ ; P' = 1,\ldots,H - L_{ms} - d_j + 1$$

چهار محدودیت اول، محدودیت‌های انجام پروژه می‌باشد. رابطه ۳ و ۴ رابطه تقدمی بین فعالیت‌ها را نشان می‌دهد. محدودیت ۵ بیان می‌کند که باید همه محدودیت‌های پروژه انجام شود. محدودیت ۶ هم محدودیت تعداد منابع غیرمصرفی را نشان می‌دهد. دو محدودیت بعدی مربوط به برنامه‌ریزی مواد پروژه است، محدودیت ۷ برای نظارت بر سطح موجودی در طول افق برنامه‌ریزی در نظر گرفته شده است و محدودیت ۸ نشان می‌دهد مواد مورد نیاز هر دوره را حداکثر یکبار می‌توان سفارش داد. دو محدویت بعدی مربوط به تخفیف مواد می‌باشد. محدودیت ۹ نشان می‌دهد که مقدار تخفیف به میزان سفارش آن ماده بستگی دارد و محدودیت ۱۰ یکی از عواملی که بر روی هزینه‌های پروژه تأثیرگذار می‌باشد، تخفیف مواد است. تخفیف موجب می‌شود که هزینه خرید با افزایش حجم خرید کاهش یابد. افزایش حجم مواد خریداری شده به‌نوبه خود موجب افزایش حجم سفارشات و کاهش دفعات سفارش‌دهی و در نتیجه کاهش هزینه‌های سفارش‌دهی در طول پروژه‌ها می‌گردد. از طرف دیگر با افزایش حجم خرید، میزان موجودی و هزینه نگهدار آن افزایش می‌یابد. بنابراین به‌منظور بررسی تأثیر تخفیف افزایشی (نموی) بر روی هزینه‌های پروژه و نزدیک نمودن مدل به شرایط دنیای واقعی، محدودیت تخفیف و تغییرات ناشی از آن به مدل اضافه شد. محدودیت ۱۱ اختصاص همزمان بودجه (منبع مصرفی) به منابع (غیرمصرفی) در دوره زمانی مورد نظر را بیان می‌کند. محدودیت ۱۲ نشان می‌دهند که میزان تولید اختصاص یافته تأمین‌کننده در روزهای مختلف به یک سفارش باید برابر با میزان آن سفارش باشد. محدودیت ۱۳ نشان می‌دهد که مجموع تولید در هر روز باید حداکثر برابر با ظرفیت تولید تأمین‌کننده باشد. و دو محدودیت ۱۴ و ۱۵ محدودیت‌های مالی هستند که محدودیت ۱۴ حداکثر مبلغی است که از منبع مالی دوم تأمین می‌شود و محدودیت ۱۵ محدودیت شرایط مالی را نشان می‌دهد و در واقع میزان بودجه‌ای است که در هر دوره باید هزینه‌های آن دوره را پوشش دهد.

۵. روش حل

مدل ذکر شده در قسمت قبل به کمک نرم‌افزار GAMS[1] کد شده و حل گردید. برای حل در نرم‌افزار GAMS از روش برنامه‌نویسی عددصحیح مختلط (MIP) استفاده شد. در انتخاب

1. General Algebraic Modeling System

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 عددصحیح مختلط امکان‌پذیر است، از این روش برنامه‌نویسی استفاده شد. همچنین در این بخش مفاهیم اصلی روش‌های بهینه‌سازی مدل با روش محدودیت اپسیلون که مربوط به حل مدل پیشنهادی است بیان می‌شود.

۵-۱. خطی‌سازی

مدل ارائه شده غیرخطی بوده به‌دلیل آنکه مدل‌های غیرخطی دشوارتر از مدل‌های خطی حل می‌شوند، در این قسمت تلاش شده است تا با خطی‌سازی عبارت‌های غیرخطی موجود در مدل، مدل ارائه شده خطی گردد. برای خطی‌سازی عبارات غیرخطی موجود در تابع هدف اول داریم:

فرض کنیم متغیر x متغیری پیوسته و متغیر y باینری باشند و متغیر Z از حاصلضرب آنها تشکیل شده است، به عبارتی $Z=xy$ بنابراین Z متغیری از نوع پیوسته خواهد شد.

$x\geq 0,\ y\in\{0,1\},\ z\geq 0,\ M$: *big number*

$$Z = xy \qquad (۱۶)$$

با استفاده از محدودیت‌های کمکی در روابط (۱۷)، (۱۸)، (۱۹) میتوان متغیر Z را خطی کرد:

$$z \leq My \qquad (۱۷)$$

$$z \geq x - M(1-y) \qquad (۱۸)$$

$$z \leq x \qquad (۱۹)$$

بنابراین جهت خطی‌سازی جمله پنجم و ششم تابع هدف مسأله، به این‌گونه عمل می‌کنیم که ابتدا متغیر ξ_{mqnsb} را طبق رابطه (۲۰) برابر با حاصلضرب دو متغیر λ_{mqnsb} و C_{msqbt} تعریف می‌کنیم:

$$\xi_{mqbtns} = \lambda_{mqnsb} \times c'_{msqbt} \qquad (۲۰)$$

$$\forall m = 1,2,\dots,M, \forall q = q_m, q_h, q_{vh}, \forall s = 1,2,\dots,S, \forall n = 1,2,\dots,N_m, \forall t = 1,2,\dots,Hs, \forall b = 1,2,\dots,H_s - L_{ms}$$

سپس با استفاده از محدودیت‌های کمکی در روابط (۲۱-۲۳) متغیر ξ_{mqnsb} را خطی می‌کنیم:

$$\xi_{mqbtns} \le M\,(\lambda_{mqnsb}) \quad (۲۱)$$
$$;\forall m = 1,2,\dots,M, \forall q = q_m, q_h, q_{vh}, \forall s = 1,2,\dots,S, \forall n = 1,\dots,N_m, \forall t = 1,2,\dots,H_s, \forall b = 1,\dots,H_s - L_{ms}$$

$$\xi_{mqbtns} \le c'_{msqbt} \quad (۲۲)$$
$$;\forall m = 1,2,\dots,M, \forall q = q_m, q_h, q_{vh}, \forall s = 1,2,\dots,S, \forall n = 1,\dots,N_m, \forall t = 1,2,\dots,H_s, \forall b = 1,\dots,H_s - L_{ms}$$

$$\xi_{mqbtns} \ge c'_{msqbt} - M(1-\lambda_{mqnsb}) \quad (۲۳)$$
$$;\forall m = 1,2,\dots,M, \forall q = q_m, q_h, q_{vh}, \forall s = 1,2,\dots,S, \forall n = 1,\dots,N_m, \forall t = 1,2,\dots,H_s, \forall b = 1,\dots,H_s - L_{ms}$$

همچنین برای خطی‌سازی عبارت غیرخطی موجود در محدودیت ۱۱، فرض می‌کنیم که متغیرهای x و y و c باینری هستند و متغیر Z و W به‌ترتیب از حاصلضرب دو و سه متغیر باینری تشکیل شده است، به‌عبارتی Z=x و W=x، متغیر Z تنها زمانی که هر دو متغیر x و yمقدار ۱ بگیرند، مقدار ۱ می‌گیرد، در غیر این‌صورت مقدار صفر می‌گیرد، همچنین برای متغیر W به این‌صورت خواهد بود.

$$x,y,c,z,w \epsilon \{0,1\}$$

$$Z=x.y \quad (۲۴)$$

$$W=x.y.z \quad (۲۵)$$

سپس با استفاده از محدودیت‌های کمکی در روابط (۲۶-۲۹) می‌توان متغیر Z وW را خطی کرد:

$$z-x-y+1.5\ge 0 \quad (۲۶)$$

$$1.5z-x-y \le 0 \quad (۲۷)$$

$$w-z-c+1.5\ge 0 \quad (۲۸)$$

$$1.5w-z-c \le 0 \quad (۲۹)$$

بنابراین جهت خطی‌سازی محدودیت ۱۱ به این‌گونه عمل می‌کنیم، حاصلضرب سه متغیر x و yو c را چنین تعریف می‌کنیم، ابتدا متغیر Z_{ktj} را طبق رابطه (۳۰) برابر با حاصلضرب دو متغیر x و y تعریف می‌کنیم:

$$Z_{ktj}=x_{jt} \times y_{ktj}; \forall k = 1,2,\dots,K, \forall t = 1,2,\dots,H, \forall j = 1,2,\dots,J \quad (۳۰)$$

سپس با استفاده از محدودیت‌های کمکی در روابط (۳۱) و (۳۲) متغیر Z_{ktj} راخطی می‌کنیم:

$$Z_{ktj}-x_{jt}-y_{ktj}+1.5\geq 0;\ \forall k=1,2,\dots,K,\forall t=1,2,\dots,H,\forall j=1,2,\dots,J \quad (۳۱)$$

$$1.5(Z_{ktj})-x_{jt}-y_{ktj}\leq 0;\ \forall k=1,2,\dots,K,\forall t=1,2,\dots,H,\forall j=1,2,\dots,J \quad (۳۲)$$

آنگاه متغیر Wktj را که از حاصلضرب سه متغیر x و y و c می‌باشد چنین تعریف می‌کنیم:

$$W_{ktj}=x_{jt}\times y_{ktj}\times C_{kj};\forall k=1,2,\dots,K,\forall t=1,2,\dots,H,\forall j=1,2,\dots,J \quad (۳۳)$$

با استفاده از محدودیت‌های کمکی در رابطه (۳۴) و (۳۵) متغیر W_{ktj} را خطی می‌کنیم:

$$W_{ktj}-Z_{ktj}-C_{kj}+1.5\geq 0;\ \forall k=1,2,\dots,K,\forall t=1,2,\dots,H,\forall j=1,2,\dots,J \quad (۳۴)$$

$$1.5(W_{ktj})-Z_{ktj}-C_{kj}\leq 0 \quad (۳۵)$$

۵-۲. روش محدودیت اپسیلون

روش محدودیت اپسیلون (CM[1]) یکی از رویکردهای شناخته شده برای مواجهه با مسائل چند هدفه که با انتقال تمامی توابع هدف به‌جز یکی از آنها در هر مرحله به محدودیت به حل این نوع مسائل می‌پردازد. مرز پارتو (PF[2]) می‌تواند با روش قید ε ایجاد شود.

$$\text{Min } f_1 \quad (۳۶)$$

$$x\in X$$

S.t:

$$f_2(x)\leq \varepsilon_2 \quad (۳۷)$$

...

$$f_n(x)\leq \varepsilon_n \quad (۳۸)$$

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

گام‌های روش ε constraint به‌صورت زیر است:

۱. یکی از توابع هدف را به‌عنوان تابع هدف اصلی انتخاب کنید.

۲. هر بار با توجه به یکی از توابع هدف، مسأله را حل کنید و مقادیر بهینه هر تابع هدف را به‌دست آورید.

1. Constraint Method
2. Pareto Front

۳. بازه بین دو مقدار بهینه توابع هدف فرعی را به تعداد از قبل مشخص تقسیم‌بندی کنید و یک جدول مقادیر برای $\varepsilon_n ,...,\varepsilon_2$ به‌دست آورید.
۴. هر بار مسأله را با تابع هدف اصلی با هر یک از مقادیر $\varepsilon_n ,...,\varepsilon_2$ حل کنید.
۵. جواب‌های پارتوی یافته شده را گزارش کنید.

در سال‌های گذشته به‌منظور حل مسائل چند هدفه، الگوریتم‌های بهینه‌سازی توابع چند هدفه (MOA[1]) توسعه داده شدند که بر اساس رابطه ریاضی (۳۶) نشان داده شده است.

$$\text{Min } F(x) = (f_1(x),f_2(x),...,f_m(x)) \quad (۳۹)$$
s.t:

$$C(x)\leq 0 \quad (۴۰)$$

در رابطه (۴۰) اگر n تعداد توابع هدف تعیین شود، اگر $n>1$ باشد آنگاه $x=(x_1,x_2,...,x_n)$ تعداد متغیرهای تصمیم در نظر گرفته می‌شود و $F(x)=(f_1(x),f_2(x),\ldots,f_m(x))$ بیان‌گر فضاهای جواب‌های موجه است. همچنین $C(x)$ بیان‌گر قیود مساله است. لازم به‌ذکر است که جواب‌های پارتو در مسأله چندهدفه به مجموعه‌ای از نقاط غیرمغلوب گفته می‌شود که تمامی جواب‌های دیگر را مغلوب می‌کنند. همچنین جواب‌های به‌دست آمده در صورتی همدیگر را مغلوب می‌کنند که طبق روابط (۴۱) و (۴۲) بیان شود[2].

$$f_i(y) \leq f_i(z) \quad \forall i \in \{1,2,...,n\} \quad (۴۱)$$
$$f_i(y) < f_i(z) \quad \exists i \in \{1,2,...,n\} \quad (۴۲)$$

علت انتخاب روش اپسیلون نیز رسیدن به جواب بهتر و منطقی‌تر در عین سادگی روش می‌باشد.

۶. نمونه عددی و تحلیل حساسیت

در حل مسائل چندهدفه دستیابی به یک جواب بهینه اغلب امکان‌پذیر نبوده و می‌توان به مجموعهٔ جواب‌های بهینه یا همان مرز پارتو رسید[3]. بنابراین برای نشان دادن بهتر موضوع و آنچه در قسمت‌های قبل شرح داده شد، در این مقاله دو نمونه عددی آورده شده است. این نمونه‌ها

1. Multi-objective Optimization algorithm
2. Seshadri, (2007).
3. Shrivastava, (2012).

دارای تاریخ مقرر تحویل پروژه می‌باشند و برای هر دوره برنامه‌ریزی شده ۲۴ روز کاری در نظر گرفته شده است. همچنین در جدول (۱) مسائل را از نظر زمان حل در نرم‌افزار گمز بررسی کرده‌ایم.

نمونه عددی اول

در مثال اول مدل ریاضی با ۸ فعالیت و ۱۲ نوع مواد مصرفی و ۱۰ تأمین‌کننده و با دوره زمانی و تاریخ مقرر تحویل پروژه ۲۸ ماه با حداکثر افق برنامه‌ریزی ۳۲ ماه، دارای سه سطح کیفی پایین، متوسط و بالا به ترتیب ۱۰ ٪، ۲۵٪ و ۴۰٪ که مورد تأیید نظام مهندسی است در نظر گرفته شده است. همچنین سه سطح تخفیف برای هریک از مواد مورد نظر توسط تأمین‌کننده آن ماده منظور شده است. ماشین‌آلات و نیروی انسانی به‌عنوان دو دسته منابع مدنظر قرارگرفته‌اند که در این میان، نحوه تخصیص ماشین‌آلات و نیروی انسانی به فعالیت‌ها، از برنامه‌های اصلی در پروژه می‌باشد ضمن اینکه به ازاء هر روز دیرکرد ۰/۰۰۲ واحد پولی و به ازاء هر روز زودکرد ۰/۰۰۳ واحد پولی پاداش و برای تأمین بودجه از منبع دوم وام با کارمزد ۰/۰۲ در نظر گرفته شده است. مدت زمان اجرای هر فعالیت و روابط پیش‌نیازی آن در جدول (۱) نشان داده شده است. جدول‌های دیگر مربوط به پروژه و زنجیره‌تأمین به‌دلیل حجم زیاد، در مقاله درج نشده است.

جدول ۱. مدت زمان اجرای فعالیت‌ها و روابط پیش‌نیازی آنها

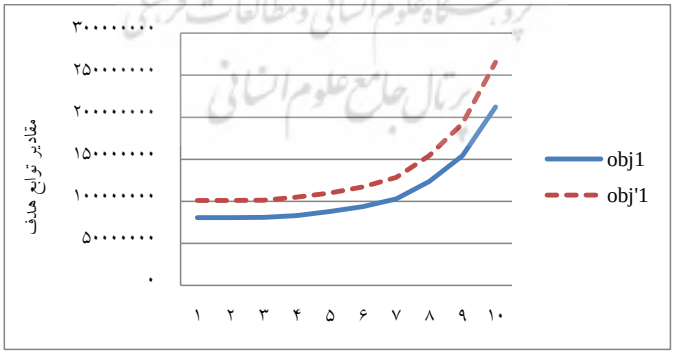
شماره فعالیت	پیش‌نیازها	dj	STj	ESj	EFj	LFj
۱	–	۸	۰	۰	۸	۸
۲	–	۸	۰	۰	۸	۸
۳	۱-۲	۳	۸	۸	۱۱	۱۱
۴	۱-۲-۳	۷	۱۱	۱۱	۱۸	۱۸
۵	۱-۲-۳	۵	۱۱	۱۱	۱۶	۱۶
۶	۱-۲-۳-۴-۵	۶	۱۸	۱۸	۲۴	۲۴
۷	۱-۲-۳-۴-۵-۶	۴	۲۴	۲۴	۲۸	۲۸
۸	۱-۲-۳-۴-۵-۶	۴	۲۴	۲۴	۲۸	۲۸

به‌منظور بررسی چگونگی تغییرپذیری مقادیر توابع هدف بایستی نسبت به برخی از پارامترها تحلیل حساسیت انجام داد. با توجه به دوهدفه بودن مدل دو نوع تحلیل انجام می‌دهیم. نوع اول بدین صورت می‌باشد که تغییر مقادیر پارتو نسبت به تغییر یک پارامتر بررسی می‌شود. این

نوع تحلیل نسبت به تغییر پارامتر هزینه خرید هر واحد انجام می‌شود. در این نوع تحلیل به هزینه خرید هر واحد ماده در محدوده تخفیف مشخص، ۲۵ درصد اضافه شده است. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول (۲) به‌صورت مجموعه جواب‌های پارتویی حاصل از روش محدودیت اپسیلون بیان شده است. همچنین نمودار آن در نمودار (۲) نمایش داده شده است، چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش مقدار اپسیلون میزان تابع اول افزایش می‌یابد.

جدول ۲- تغییرات مجموعه نقاط پارتو با تغییر مقدار هزینه خرید

شماره جواب	GAMS			
	obj1	obj2	obj'1	obj'2
۱	۸۰۷۳۴۵۰۰	۱۵,۱	۱۰۰۹۵۳۰۰۰	۱۵,۱
۲	۸۰۷۳۴۵۵۶	۴۱۵,۱	۱۰۰۹۵۳۶۵۰	۴۱۵,۱
۳	۸۱۰۲۱۱۰۰	۶۱۳	۱۰۱۳۱۲۰۰۰	۶۱۳
۴	۸۳۹۱۸۷۰۰	۹۱۱,۹۵	۱۰۴۹۳۳۰۰۰	۹۱۱,۹۵
۵	۸۷۹۱۶۹۰۰	۱۲۱۰,۹۵	۱۰۹۹۳۱۰۰۰	۱۲۱۰,۹۵
۶	۹۳۶۹۲۱۰۰	۱۵۰۹,۸۵	۱۱۷۱۵۰۰۰۰	۱۵۰۹,۸۵
۷	۱۰۲۷۸۸۰۰۰	۱۸۰۸,۸	۱۲۸۵۲۰۰۰۰	۱۸۰۸,۸
۸	۱۲۳۵۲۱۰۰۰	۲۱۰۷,۷۵	۱۵۴۴۳۶۰۰۰	۲۱۰۷,۷۵
۹	۱۵۴۴۱۰۵۰۰	۲۴۰۶,۷	۱۹۲۶۶۷۰۰۰	۲۴۰۶,۷
۱۰	۲۱۲۳۲۲۰۰۰	۲۷۰۵,۶۵	۲۶۵۴۳۷۰۰۰	۲۷۰۵,۶۵



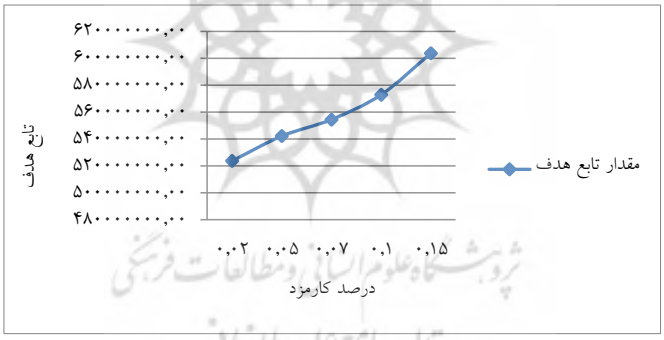
نمودار ۲- نمودار تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات مجموعه نقاط پارتو با تغییر مقدار هزینه خرید

نوع دیگر بدین صورت می‌باشد که به ازای یکی از نقاط پارتو این تحلیل انجام شود، برای تحلیل

حساسیت نسبت به پارامتر درصد کارمزد به ازای یکی از جواب‌های پارتو (پارتوی دوم در این مسأله) این کار انجام شده است. تغییرپذیری مقدار تابع هدف اول نسبت به میزان کارمزد در جدول (۳) و در نمودار (۳) نشان داده شده است. با توجه به نمودار (۳) با افزایش میزان کارمزد، مقدار تابع هدف اول با در نظر گرفتن تابع هدف دوم به‌صورت محدودیت، نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۳- تغییرات مقدار تابع هدف به ازای مقادیر مختلف کارمزد برای پارتوی دوم

ردیف	درصد کارمزد	مقدار تابع هدف اول
۱	۰٫۰۲	۵۲۳۶۷۹۰۸۹٫۸
۲	۰٫۰۵	۵۴۲۱۵۸۰۸۴٫۷۶
۳	۰٫۰۷	۵۵۴۴۸۷۰۳۲٫۸
۴	۰٫۱	۵۷۲۹۸۰۴۵۴٫۹
۵	۰٫۱۵	۶۰۳۸۰۲۸۲۵٫۰۷



نمودار ۳- نمودار تابع هدف نسبت به مقادیر مختلف کارمزد به ازای پارتوی دوم مساله

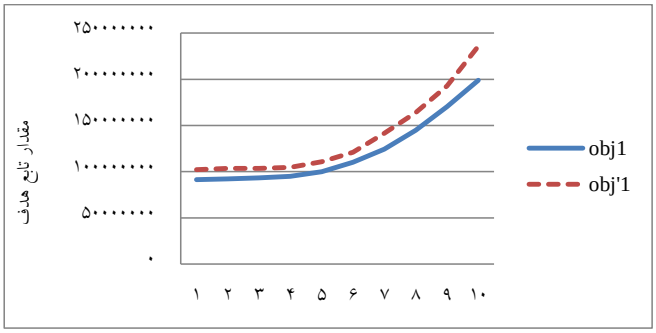
نمونه عددی دوم

در مثال دوم، پروژه‌ای با ۳۰ فعالیت و ۱۵ نوع مواد مصرفی و ۱۰ تأمین‌کننده و با دوره زمانی و تاریخ مقرر تحویل پروژه ۴۲ ماه با حداکثر افق برنامه‌ریزی ۴۵ ماه، دارای سه سطح کیفی پایین، متوسط و بالا به ترتیب ۱۰ ٪، ۱۵٪ و ۲۵٪ که مورد تأیید نظام مهندسی است در نظر گرفته شده است. همچنین دارای دو منبع می‌باشد ضمن اینکه به‌ازاء هر روز دیرکرد ۰/۰۰۷ واحد پولی و به ازاء هر روز زودکرد ۰/۰۱۵ واحد پولی پاداش در نظر گرفته شده است. همانطور که در نمونه اول مشاهده شد

برای بررسی چگونگی تغییرپذیری مقادیر توابع هدف بایستی نسبت به برخی از پارامترها تحلیل حساسیت انجام داد. از آنجایی‌که هزینه خرید مواد اولیه بیشترین سهم از هزینه‌های اجرای هر پروژه‌ای را شامل می‌شود بنابراین ما در این حالت با تغییر تأثیرگذاری سطح کیفیت مواد اولیه بر روی هزینه‌ها، تحلیلی دیگر نسبت به تغییر پارامتر هزینه خرید هر واحد انجام می‌دهیم. در این نوع تحلیل به هزینه خرید هر واحد ماده در محدوده تخفیف مشخص، ۱۵ درصد اضافه شده است. نتایج حاصل از این تحلیل در جدول (۴) به‌صورت مجموعه جواب‌های پارتویی حاصل از روش محدودیت اپسیلون بیان شده است و نمودار آن در نمودار (۴) آورده شده است، چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش مقدار اپسیلون میزان تابع اول افزایش می‌یابد.

جدول ۴- تغییرات مجموعه نقاط پارتو با تغییر مقدار هزینه خرید

شماره جواب	GAMS			
	obj1	obj2	obj′1	obj′2
۱	۹۱۴۴۲۱۳۵	۲۵,۳	۱۰۲۱۱۳۰۶۹	۲۵,۳
۲	۹۲۱۸۵۵۲۱	۶۱۳,۰۱	۱۰۳۵۲۳۶۹۱	۶۱۳,۰۱
۳	۹۳۳۱۸۴۳۶	۸۰۱,۲۲	۱۰۳۷۱۲۰۱۱	۸۰۱,۲۲
۴	۹۵۰۱۷۲۱۳	۱۰۳۴,۷	۱۰۴۶۱۳۳۰۰	۱۰۳۴,۷
۵	۱۰۰۱۱۸۰۱۲	۱۳۵۱,۰۴	۱۰۸۹۳۱۵۰۰	۱۳۵۱,۰۴
۶	۱۱۰۲۵۱۰۲۸	۱۶۹۴,۶	۱۱۱۵۵۴۶۰	۱۶۹۴,۶
۷	۱۲۴۵۱۰۲۱۱	۱۹۹۴,۵	۱۴۱۵۲۳۴۰۰	۱۹۹۴,۵
۸	۱۴۵۰۳۰۱۴۹	۲۳۵۷,۱۲	۱۶۴۱۳۵۶۰۰	۲۳۵۷,۱۲
۹	۱۷۰۴۲۲۶۵۳	۲۶۹۰,۱	۱۹۲۹۸۸۰۰۰	۲۶۹۰,۱
۱۰	۱۹۸۹۱۷۵۸۰	۲۹۵۵,۳	۲۳۵۷۳۲۰۵۰	۲۹۵۵,۳

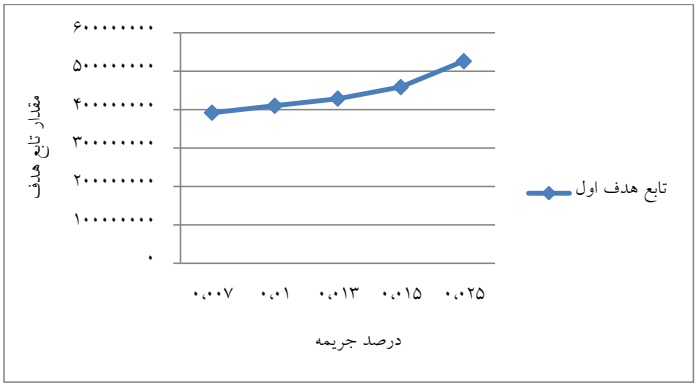


نمودار ۴- نمودار تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات مجموعه نقاط پارتو با تغییر مقدار هزینه خرید

همچنین در اینجا تحلیل حساسیت نسبت به پارامتر جریمه پیمانکار در صورت تأخیر در اجرای پروژه را بررسی می‌کنیم از آنجایی‌که تحویل پروژه بعد از اتمام آخرین فعالیت (J) در زمان d باید اتفاق بیفتد به ازای هر روز تأخیر در تحویل پروژه، هزینه‌ای برای پیمانکار در بردارد همانطورکه می‌دانیم اگر t=d باشد آنگاه هیچ‌گونه جریمه‌ای شامل پیمانکار نخواهد شد که این نشان‌دهنده این است که پیمانکار توانسته پروژه را به‌موقع و در زمان مقرر تحویل دهد و اگر t<d باشد آنگاه پیمانکار توانسته پروژه را زودتر از موعد تحویل دهد و پاداش (r) بگیرد و اما اگر t>d باشد آنگاه پیمانکار ناچار به پرداخت جرایمی خواهد شد؛ جدول (۵) تغییرات تابع هدف اول به ازای مقادیر مختلف جریمه پیمانکار نشان داده شده است. نمودار (۵) نمودار مورد نظر را نمایش می‌دهد.

جدول ۵- تغییرات تابع هدف اول به ازای مقادیر مختلف جریمه پیمانکار

ردیف	جریمه پیمانکار	مقدار تابع هدف اول
۱	۰٫۰۰۷	۳۹۱۸۳۰۰۰۰
۲	۰٫۰۱	۴۱۰۲۶۹۱۰۰
۳	۰٫۰۱۳	۴۲۸۶۴۲۰۰۰
۴	۰٫۰۱۵	۴۵۸۸۴۵۰۰۰
۵	۰٫۰۲۵	۵۲۶۵۳۱۰۰۰



نمودار ۵- نمودار تابع هدف اول نسبت به مقادیر مختلف جریمه پیمانکار

همچنین با حل مدل در ابعاد مختلف مشاهده می‌شود که با بزرگ‌تر شدن ابعاد مساله زمان حل نیز افزایش می‌یابد که در جدول (۶) این موضوع بررسی شده است. (pتعداد فعالیت‌ها، mتعداد مواد مصرفی و s تعداد تأمین‌کننده می‌باشد).

جدول ۶. زمان حل مدل با نرم‌افزار Gams در ابعاد مختلف

ابعاد مساله	شماره مساله	p	m	s	زمان حل (ثانیه)
کوچک	۱	۶	۸	۱۰	۴۲۲
متوسط	۲	۸	۱۲	۱۰	۱۵۲۵
	۳	۱۵	۲۰	۲۵	۲۴۸۰
بزرگ	۴	۳۰	۱۵	۱۰	۴۷۰۰
	۵	۳۰	۲۰	۱۵	۵۱۸۰

۶-۱- تحلیل نتایج

به‌طور کلی می‌توان نتایج را در چند بخش ذیل بیان کرد:

۱. تابع هدف اول مدل ارائه شده نسبت به مدل پایه دارای بهبود می‌باشد از این‌جهت که با در نظر گرفتن کیفیت مواد اولیه مورد نیاز پروژه و تخفیفاتی که به‌صورت دوره‌ای برای سفارش مواد انجام می‌شود تأثیر چشمگیری در کاهش هزینه‌های پروژه دارد.

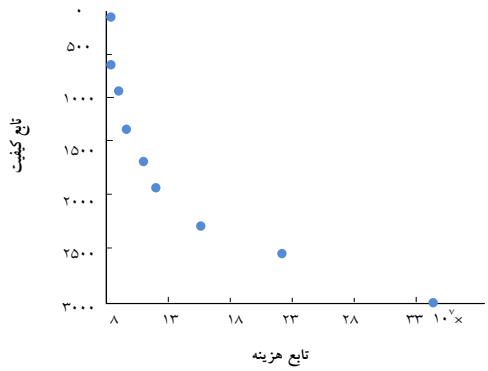
۲. در این پژوهش تلاش شد برای ایجاد یکپارچگی در زنجیره تأمین پروژه، مدل موجودی یکپارچه‌ای ارائه شود. در این مدل، زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه، زمان و حجم سفارش‌های پروژه و برنامه تولید تأمین‌کننده به‌طور همزمان، به‌نحوی تنظیم شد که هزینه‌های کل زنجیره حداقل شود.

۳. با توجه به توسعه پروژه‌های مختلف و متنوع به‌خصوص در پروژه‌های صنعتی و با توجه به بالا بودن هزینه‌های چنین پروژه‌هایی، توسعه روابط با تأمین‌کنندگان مختلف و پیمانکاران از یک طرف و تغییرات مکرر در قوانین و مقررات دولت از طرف دیگر، زمینه‌های بروز ریسک‌های مختلف را فراهم می‌کند که بعضاً با اثرگذاری آنها بر روی همدیگر شدت پیامدها و اثرات آن بر روی سازمان افزایش می‌یابد بنابراین عملکرد ضعیف زنجیره تأمین این‌گونه پروژه‌ها باعث تأخیر در اجرای پروژه شده و سرریز شدن هزینه‌ها را به‌دنبال خواهد. با توجه به نمودار (۵) با افزایش جریمه پیمانکار، میزان تابع هدف افزایش یافته که در نهایت غیراقتصادی بودن پروژه را نتیجه می‌دهد.

۴. در این تحقیق به‌صورت خاص، دو هدف هزینه و کیفیت تحویل پروژه در نظر گرفته شده که نتایج مقایسه نیز بر این دو هدف استوار است. بر اساس این دو هدف، نتایج حاصل از حل شبکه پروژه همراه با سطوح کیفی تأییدیه نظام مهندسی، درنظر گرفته شد. می‌توان مشاهده کرد که صرف مقداری هزینه بیشتر در کنار ارزیابی مناسب تأمین‌کنندگان و برنامه‌ریزی در اجرای پروژه، می‌تواند منجر به رسیدن به سطوح کیفی مورد تأیید نظام مهندسی گردد.

۵. تابع هدف (۱) و (۲) در راستای هم حرکت می‌کنند به این‌صورت‌که با افزایش کیفیت مواد اولیه، هزینه اجرای پروژه افزایش یافته و بالعکس.

۶. مدل ریاضی پیشنهادی با داده‌های عددی، در نرم‌افزار GAMS حل شده و از آنجایی‌که مدل ریاضی پیشنهادی برنامه‌ریزی عدد صحیح است، جواب حاصل از حل مدل در نرم‌افزار GAMS و Solver CPLEX که مبتنی بر روش محدودیت اپسیلون است، جواب بهینه جهانی خواهد بود. نتایج حاصل از حل مدل با نرم‌افزار در نمودار (۶) نشان داده شده است. برای این‌منظور از یک پردازشگر T۶۰۰ با ظرفیت ۲٫۰۰ GHz استفاده شده است. در این‌جا مرز پارتو حاصل از حل هریک از توابع هدف یعنی تابع هزینه در مقابل تابع کیفیت مواد اولیه پروژه نشان داده شده است.



نمودار ۶- مرز پارتو حاصل از مجموعه جواب‌های به‌دست آمده برای توابع هدف

نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

زنجیره تأمین پروژه از مباحثی است که به تازگی در ادبیات زنجیره تأمین و لجستیک پروژه مورد بررسی قرار گرفته است. محققان به‌صورت نسبتاً جدی در بحث زنجیره تأمین ساخت از سال ۱۹۹۰ تا کنون به ارائه پژوهش‌ها و مقالات در این زمینه پرداخته‌اند که اغلب مقاله‌های ارائه شده حاوی مدل‌های مدیریتی و کیفی می‌باشد و خلاء جدی برای مدل‌های ریاضی کارا احساس می‌گردد. بنابراین مدلی که در این مقاله ارائه گردیده از بسیاری جهات دارای نوآوری می‌باشد. با توجه به مرور مقالات موجود در این حوزه و مطالعه مدل‌هایی که در زنجیره تأمین پروژه ارائه شده؛ اغلب از حالت سنتی مدیریت زنجیره تأمین تبعیت کرده و در جهت بیشینه کردن سود پروژه می‌باشند اما در این مقاله رویکرد جدیدتری ارائه شده و به‌دنبال هماهنگی و برنامه‌ریزی یکپارچه در زنجیره تأمین و لجستیک پروژه می‌باشد همچنین در این مدل، زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه، زمان و حجم سفارش‌های پروژه و برنامه تولید تأمین‌کننده به‌طور همزمان، به‌نحوی تنظیم شد که هزینه‌های کل زنجیره حداقل شود، علاوه بر آن با در نظر گرفتن تأثیر کیفیت مواد اولیه بر روی هزینه زنجیره درصدد اجرای پروژه‌ای با کیفیت مطلوب هستیم به‌طوری‌که در تعامل با کمینه کردن هزینه‌های آن باشد.

پیشنهادات زیر می‌تواند به‌عنوان فرصت‌های پژوهشی جهت توسعه مدل پیشنهادی این مقاله در نظر گرفته شود:

۱. گاهی در پروژه‌ها به‌دلایلی همچون استفاده نادرست یا پیش‌بینی نادرست از منابع مورد نیاز، ممکن است کمبودهایی ایجاد شود، از آنجاکه مدل ارائه شده در این مقاله، میزان تقاضای روزانهٔ فعالیت‌ها از منابع قطعی و مشخص است، برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود تقاضای فعالیت‌های پروژه احتمالی یا فازی در نظر گرفته شود.
۲. اجرای مدل زمان‌بندی موجودی در نرم‌افزار گمز به زمان زیادی نیاز دارد که برای کاهش این زمان می‌توان از روش‌های ابتکاری همچون الگوریتم ژنتیک و فراابتکاری استفاده کرد.
۳. گاهی ممکن است در بخش انبار پروژه، فضا و ظرفیت کافی وجود نداشته باشد. در مدل موجودی زمان‌بندی ارائه شده، ظرفیت انبار پروژه نامحدود است که می‌توان در تحقیقات آتی برای انبار پروژه ظرفیت محدود در نظر گرفت و مدل را بهبود داد.
۴. یکی از مشکلات مهم در زمینه تأمین منابع، تأثیراتی است که مراحل مختلف تأمین منابع در محیط می‌گذارد. بنابراین می‌توان برای تحقیقات آتی مواردی همچون آلودگی‌های ایجاد شده توسط وسایل حمل و نقل و کارخانجات را به مدل اضافه کرد.
۵. می‌توان برای مدل ارائه شده مرکز بازیافت در نظر گرفت تا ضایعاتی که در سایت پروژه حاصل می‌شود به مراکز بازیافت برود.

منابع

ربانی، مسعود؛ رزمی، جعفر، معنوی‌زاده، ندا، (۱۳۸۳). یک ساختار پیشنهادی برای سنجش عملکرد مدیریت زنجیره تامین در صنایع ایران، اولین کنفرانس لجستیک و زنجیره تامین، تهران، انجمن لجستیک ایران.

وکیلی، محمدرضا، نوری، سیامک، یعقوبی، سعید. (۱۳۹۵). ارائه مدل موجودی .زمان‌بندی در زنجیرهٔ تأمین ساخت‌وساز. نشریه مدیریت صنعتی، ۸ (۱)، ۱۴۰-۱۱۳.

Abdelsalam, H. M., & Gad, M. M. (2009). Cost of quality in Dubai: An analytical case study of residential construction projects. International Journal of Project Management, 27(5), 501-511.

Aquilano, N.,J.and Smith,D.,E. (1980). "A Formal set of algorithms for project scheduling with critical path method- material requirement planning." Journal of Operation Management, 1 (2), 57-67.

Babu, A. J. G., & Suresh, N. (1996). Project management with time, cost, and quality considerations. European Journal of Operational Research, 88(2), 320-327.

Cachon, G.P. and Fisher,M. (2000).” Supply chain inventory management and the value of shared information.” Management Science, 2 (1), 68-83.

Chen, H. L. (2011). An empirical examination of project contractors’ supply-chain cash flow performance and owners’ payment patterns. International Journal of Project Management, 29(5), 604-614.

Chopra, S. and Meindl, P. (2007). Supply Chain Management: strategy, Planning and Operation, Third edition.

Dodin,B. and Elmam,A. (2001). ”Integrated project scheduling and material planning with variable activity duration and reward.” IIE Transaction, 33, 1005-1018.

Ebrahimy, Y., AbouRizk, S. M., Fernando, S., & Mohamed, Y. (2011). Simulation modeling and sensitivity analysis of a tunneling construction project’s supply chain. Engineering, Construction and Architectural Management, 18(5), 462-480.

Elimam, A. A., & Dodin, B. (2013). Project scheduling in optimizing integrated supply chain operations. European Journal of Operational Research, 224(3), 530-541.

El-Rayes, K., & Kandil, A. (2005). Time-cost-quality trade-off analysis for highway construction. Journal of Construction Engineering and Management, 131(4), 477-486.

Gholizadeh-Tayyar, S., Dupont, L., Lamothe, J., & Falcon, M. (2016). Modeling a generalized resource constrained multi project scheduling problem integrated with a forward-backward supply chain planning IFAC -PapersOnLine, 49(12), 1283-1288.

Graves, S.,C. and Willems, S.P. (2000).”Optimizing strategic saftey stock placement in supply chains.”, Manufacturing & Service Operations Management, 2 (1), 68-83.

Horman, M. J., & Thomas, H. R. (2005). Role of inventory buffers in construction labor performance. Journal of Construction Engineering and Management, 131(7), 834-843.

Hu, W., & He, X. (2014). An innovative time-cost-quality tradeoff modeling of building construction project based on resource allocation. The Scientific World Journal, 2014.

Irizarry, J., Karan, E. P., & Jalaei, F. (2013). Integrating BIM and GIS to improve the visual monitoring of construction supply chain management. Automation in Construction, 31, 241-254.

Jian-hua, C., & Wan, T. (2010, November). Time-cost trade-off problem in construction supply chain: A bi-level programming decision model. IEEE International Conference on Management Science and Engineering (ICMSE), 2010 (pp. 212-217).

Jusoh, Z. M., & Kasim, N. (2017). A Review on Implication of Material Management to Project Performance. In MATEC Web of Conferences (Vol. 87, p. 01012). EDP Sciences.

Karoriya, D., & Pandey, M. (2018). Efficient Techniques of Construction Material Management in Construction Projects: A Review. International Research Journal of Engineering and Technology, 5 (3), 1136-1138.

Kerzner, H., & Kerzner, H. R. (2017). Project management: a systems approach to planning, scheduling, and controlling. John Wiley & Sons.

Khang, D. B., & Myint, Y. M. (1999). Time, cost and quality trade-off in project management: a case study. International Journal of Project Management, 17(4), 249-256.

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.

Liang, S., & Wey, W. M. (2013). Resource allocation and uncertainty in transportation infrastructure planning: A study of highway improvement program in Taiwan. Habitat International, 39, 128-136.

Mohammadipour, F., & Sadjadi, S. J. (2016). Project cost-quality-risk tradeoff analysis in a time-constrained problem. Computers & Industrial Engineering, 95, 111-121.

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.

O'Brien, W. J., London, K., & Vrijhoef, R. (2004). Construction supply chain modeling: a research review and interdisciplinary research agenda. ICFAI journal of Operations Management, 3(3), 64-84.

Rohaninejad, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Vahedi-Nouri, B. (2015). Redundancy resource allocation for reliable project scheduling: A game-theoretical approach. Procedia Computer Science, 64, 265-273.

Saad, M., Jones, M., & James, P. (2002). A review of the progress towards the adoption of supply chain management (SCM) relationships in construction. Journal of Purchasing & Supply Management, 8(3), 173-183.

Seshadri, A. (2007). A fast elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, Mathlab Central, file exchange, mathworks.

Shariatmadari, M., Nahavandi, N., Zegordi, S. H., & Sobhiyah, M. H. (2017). Integrated resource management for simultaneous project selection and scheduling. Computers & Industrial Engineering, 109, 39-47.

Shrivastava, R., Singh, S., & Dubey, G. C. (2012). Multi- objective optimization of time cost quality quantity using multi colony ant algorithm. International Journal of Contemporary Mathematical Sciences, 7(16), 773-784.

Smith,D.,E. and Aquilano,N.,J. (1984).”Constrained resource project scheduling subject to material constraints.” Journal of Operation Management, 4(4), 369-388.

Smith-Daniels, D. E. and Smith-Daniels, V.,L. (1987). ”Optimal project scheduling with materials ordering.” IIE Transaction, 19 (2), 122-129.

Sobotka, A., & Czarnigowska, A. (2005). Analysis of supply system models for planning construction project logistics. Journal of Civil Engineering and Management, 11(1), 73-82.

Sucky, E. (2005). “Inventory management in Supply Chains: A bargaining problem.”

International Journal of Production Economics, 93-94, 253-262.

Tabrizi, B. H., & Ghaderi, S. F. (2016). A robust bi-objective model for concurrent planning of project scheduling and material procurement. Computers & Industrial Engineering, 98, 11-29.

Tareghian, H. R., & Taheri, S. H. (2006). On the discrete time, cost and quality trade-off problem. Applied Mathematics and Computation, 181(2), 1305-1312.

Tavares, L. V. (2002). A review of the contribution of operational research to project management. European Journal of Operational Research, 136(1), 1-18.

Tserng, H. P., Dzeng, R. J., Lin, Y. C., & Lin, S. T. (2005). Mobile construction supply chain management using PDA and bar codes. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 20(4), 242-264.

Walsh, K. D., Hershauer, J. C., Tommelein, I. D., & Walsh, T. A. (2004). Strategic positioning of inventory to match demand in a capital projects supply chain. Journal of Construction Engineering and Management, 130(6), 818-826

Wang, Y., Yu, X., & Xue, X. (2007). An application of the method of combined radix determination for selecting construction supply chain partners. International Journal of Project Management, 25(2), 128-133.

Xue, X., Sun, C., Wang, Y., & Shen, Q. (2007, September). A two-level programming method for collaborative scheduling in construction supply chain management. International Conference on Cooperative Design, Visualization and Engineering (pp. 290-297). Springer, Berlin, Heidelberg.

Yeo, K. T., & Ning, J. H. (2006). Managing uncertainty in major equipment procurement in engineering projects. European Journal of Operational Research, 171(1), 123-134.

Zoraghi, N., Shahsavar, A., Abbasi, B., & Van Peteghem, V. (2017). Multi-mode resource-constrained project scheduling problem with material ordering under bonus-penalty policies. Top, 25(1), 49-79.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی