نشریه علمی «مدیریت زنجیره تامین»
سال بیست و سوم، شماره ۷۲، پاییز ۱۴۰۰؛ ص ۲۲- ۹

علمی – پژوهشی

توسعه یک مدل برای مدیریت اختلالات زنجیره تأمین در پروژه‌های عمرانی

ابوالفضل کوره[۱]، محمود شهرخی*[۲]

۱- کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، ۲- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۸)

چکیده

اجرای پروژه‌های عمرانی مستلزم به‌کارگیری حجم قابل توجهی از نیروی انسانی، منابع مالی، فنی و سازمانی بوده و اختلال در زنجیره تأمین آنها به طور مستقیم حیات و منابع مالی پروژه‌های عمرانی را تهدید کرده و حتی می‌تواند موجب توقف پروژه شود. به همین سبب این اختلالات باید شناسائی، پیامدها و ریسک آنها ارزیابی و راه‌کارهای مواجهه با آنها تدوین گردند. در این پژوهش مدل ریاضی بهینه‌سازی دوهدفه برای انتخاب همزمان تأمین‌کنندگان و راه‌کارهای رویایی با این اختلالات ارائه شده است. هدف مدل اول کمینه کردن مجموع چهار نوع هزینه خرید مصالح، جریمه تأخیر اتمام پروژه، هزینه انجام فعالیت‌های پروژه و هزینه‌های حمل و نقل مصالح می‌باشد. هدف دوم کمینه کردن زمان اتمام پروژه و در نتیجه تأخیر احتمالی در زمان تحویل پروژه است. این تأخیر علاوه برهزینه مستقیم جریمه، ضربه بزرگی به اعتبار پیمانکار وارد نموده و ممکن است موجب عدم عقد قراردادهای بعدی گردد. همچنین این پژوهش نشان می‌دهد که چگونه تحلیل و مقایسه نتایج حل مسئله چندهدفه می‌تواند به ایجاد یک دیدگاه بهتر از مسئله بیانجامد. به منظور نمایش کاربرد و چگونگی استفاده از این مدل‌ها، یک مثال عددی با نرم‌افزار GAMS حل شده و حساسیت نتایج نسبت به تغییرات فاکتورهای اصلی آن، تحلیل شده است.

واژه‌های کلیدی: زنجیره‌تأمین، پروژه‌های عمرانی، اختلالات زنجیره‌تأمین، ریسک زنجیره‌تأمین، اختلالات اقتصادی

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، با افزایش جمعیت و تقاضای مردم به مسکن، مراکز خرید، ورزشگاه‌ها و بیمارستان، مترو و قطارهای زیرزمینی، جاده‌ها و پل‌ها، صنایع عمرانی نیز رشد و اهمیت قابل توجهی یافته‌اند. هم اکنون، پروژه‌های عمرانی و به طورکلی صنایع عمرانی از دسته صنایع مادر و دارای زنجیره تأمین بسیار گسترده‌ای هستند. این گستردگی آنها را آسیب پذیر ساخته و اعمال کنترل مناسب بر آن را مشکل و پیچیده کرده است. از جمله مشکلات زنجیره تأمین پروژه‌های عمرانی[۲] (SCCP) بروز انواع اختلالاتی[۳] است که موجب کمبود و اتلاف منابع، عدم اطمینان، بی نظمی و ناهماهنگی در تبادل اطلاعات و در نهایت عدم هماهنگی بین اعضای زنجیره تأمین و بروز مشکلات و بحرآنهای جدی در زمینه اجرای پروژه‌های عمرانی می‌شوند. یک اختلال عبارت است از هرگونه عامل خارج از کنترل و پیش‌بینی نشده که می‌تواند بر اهداف زنجیره تأمین تأثیر نامطلوب گذاشته و یا دستیابی به آنها را با مشکل مواجه سازد. اختلالات زنجیره تأمین از عوامل مهم ایجاد برخی از ریسک‌ها در پروژه‌های عمرانی هستند. در این پژوهش عنوان اختلال زنجیره تأمین برای عوامل دارای ویژگی‌های زیر به‌کار می‌رود:

۱. هر اختلال زنجیره‌تأمین یک عامل شناخته شده است که پیامدهای نامطلوب مشخصی بر زنجیرهتأمین می‌گذارد.

۲. اختلالات به صورت تصادفی رخ داده و احتمال رخداد آنها مستقل از رفتار اعضای زنجیره‌تأمین است.

۳. مهار اختلالات در اختیار هیچیک از اعضای منفرد زنجیره تأمین نیست.

نمونه‌هایی از این اختلالات عبارتند از تغییر پارامترهای کلان اقتصادی، حوادث طبیعی، قوانین محدودیت‌کننده دولتی، بیماری‌های واگیردار، کمبود سوخت و منازعات منطقه‌ای.

اختلالات زنجیره تأمین عامل هزینه‌های هنگفت و تأخیر در اتمام پروژه‌های عمرانی، عدم پیشبرد کار، کاهش فضای محل کار

* رایانامه نویسنده مسئول: shahrokhi292@yahoo.com

1Supply chain in construction projects
2 Disruptions

انبار مصالح، دوباره‌کاری، مشکلات تخلیه و بارگیری مصالح و غیره است که مهندسان و پیمانکاران عمرانی را وادار به مدیریت هرچه بهتر این اختلالات کرده است [۱]. در برنامه ریزی SCCP محدودیت‌های عملیاتی ویژه‌ای باید در نظر گرفته شوند. این امر به‌ویژه برای پروژه‌های درون شهری اهمیت می‌یابد. به‌طور مثال، محدودیت‌های ترافیکی و خرابی مصالح ناشی از اختلالات می تواند عامل مشکلات زیادی در بخش حمل و نقل و انبار مصالح شود [۲]. این پژوهش به‌نحوهٔ مدل‌سازی اختلالات در پروژه های عمرانی، با هدف حداقل‌سازی ریسک پیامدهای آنها پرداخته و پس از ارائه یک مدل ریاضی، با ذکر یک مثال عددی نحوه کاربرد و تحلیل نتایج آن را نشان می دهد. در ادامه مقاله، نخست پیشینه و ادبیات پژوهش مطرح شده است. سپس مدل پیشنهادی ارائه شده و برای یک مثال فرضی حل شده است. در پایان نتایج مثال بررسی شده و پیشنهادهایی برای پژوهش‌های آتی ارائه شده است.

۲- مرور ادبیات

بخش بزرگی از مطالعات زنجیره تأمین پروژه‌ها در زمینه انتخاب تأمین‌کننده و تکنیک‌های حل مسائل آن است. اولین بار در سال ۱۹۴۵ میلادی لوییس[1] اذعان کرد که در بین تمام فعالیت‌های مرتبط با فرآیند خرید، هیچ مسئله‌ای مهم‌تر از یافتن منابع تأمین مناسب نیست [۳]. وی همچنین آن را به‌صورت یک مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره معرفی کرد که در برگیرنده هر دو نوع معیارهای کمی و کیفی است. پژوهش‌های شیپلی[2] نشان داد که اولویت هر یک از معیارهای انتخاب تأمین‌کننده نه تنها از لحاظ روش تولید، بلکه در فرهنگ‌ها و کشورهای گوناگون، متفاوت است [۴]. وبر و همکاران[3] پژوهش‌های منتشر شده در طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۶ در زمینه شناسایی معیارهای گزینش تأمین‌کننده در محیط تولید و فروش را مد نظر قرار داده و آنها را برحسب معیارهای دیکسون دسته‌بندی کردند [۵].

مدل طبقه‌بندی تیمرمن[4] از نخستین مدل‌هایی است که در آن معیارهایی بر پایه سوابق گذشته تأمین‌کنندگان مشخص شده و سپس با جمع جبری ساده امتیازات مثبت و منفی، رتبه نهایی هر تأمین‌کننده مشخص شده است [۶]. بعدها پژوهشگران با استفاده از روش‌های وزنی- خطی، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی[5] (FAHP)، فرآیند تحلیل شبکه‌ای[6] (ANP) با وزن‌دهی به معیارها، نحوه تصمیم‌گیری را بهبود دادند. این مدل‌ها، شامل روش‌های غیر رتبه‌ای بوئر و همکاران[7] نیز هستند که در سال ۱۹۹۸ میلادی ارائه شدند [۷]. بنا به‌نظر چان وکومار[8]، به‌طور کلی، فرآیند AHP و فرآیند تحلیل شبکه‌ای مهمترین روش‌های تعیین اهمیت نسبی معیارهای مختلف در طراحی زنجیرهتأمین هستند [۸]. برای نمونه، در سال ۲۰۰۴ میلادی، چان و چان[9] با استفاده از AHP و اصول سیستم مدیریت کیفیت، مدلی را برای انتخاب تأمین‌کننده ارائه کرده و کاربرد آن در صنایع تکنولوژی پیشرفته را نشان دادند [۹]. در پژوهش زعیم و همکاران[10] نیز روش FAHP برای انتخاب تأمین‌کنندگان قطعات ساخت تلویزیون در ترکیه به‌کار گرفته شد. آنها نتایج روش تحلیل سلسله مراتبی فازی[11] را با روش غیرفازی قیاسی استفاده کردند [۱۰]. وینود و همکاران[12] نیز FAHP را برای طراحی زنجیره تأمین در یک شرکت تولید سوئیچ الکترونیکی در هند به‌کار گرفتند [۱۱]. همچنین، جونیور و همکاران[13] روش‌های FAHP و تاپسیس فازی را برای انتخاب تأمین‌کننده به‌کار گرفته و نتایج این دو روش را بر اساس عواملی نظیر چابکی در فرآیند تصمیم‌گیری و پیچیدگی محاسباتی تحت عدم‌قطعیت در طراحی زنجیره‌تولید یک شرکت تولید خودرو مقایسه کردند [۱۲]. اوستون و دمیرتاس[14] دو روش فرآیند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و برنامه‌ریزی مختلط خطی چند هدفه، با در نظر گرفتن اهداف کمی و کیفی را برای تخصیص سفارش به‌کار گرفتند [۱۳].

رویکرد مهم دیگر استفاده از مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی است. تا هنگام انتشار نتایج پژوهش وبر و همکاران در سال ۱۹۹۶، تنها ده پژوهش با استفاده از تکنیک‌های برنامه‌ریزی ریاضی منتشر شده بود، ولی پس از آن پژوهش‌های بسیاری در این زمینه انجام گرفت. ان جی[15] با استفاده از برنامه‌ریزی خطی وزنی مسئله انتخاب تأمین‌کننده را با هدف بیشینه‌سازی امتیاز تأمین‌کننده مدل‌سازی کرد [۱۴]. گابالا[16] برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط[17] را برای بهره‌برداری از حداکثر تخفیف ارائه شده توسط فروشندگان

1 Lewis
2 Shipley
3 Weber, Current & Benton
4 Timmerman
5 Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)

6 Analytical Network Process (ANP)
7 Boer, Labro & Morlacchi
8 Chan & Kumar
9 Chan & Chan
10 Zaim, Sevkil & Tarim
11 Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)
12 Vinod, S., Ramiya, R. A., & Gautham
13 Junior, Osiro & Carpinetti
14 Demirtas & Ustun
15 Ng
16 Gaballa
17 Mix integer linear programming

به‌کار گرفت [۱۵]. پژوهش مندوزا و ونتورا[1] نشان داد که مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط برای تصمیم‌گیری در فرآیند انتخاب مجموعه‌ای از تأمین‌کنندگان و برنامه‌ریزی سفارشات که کل هزینه سالانه استفاده از سیستم را کمینه کند، کاربرد بسیاری دارد [۱۶]. مسئله انتخاب چند تأمین‌کننده توسط چند خریدار نیز توسط وادهوا و راویندرن[2] به‌صورت یک مسئله چندهدفه با سه تابع هدف، کاهش قیمت، زمان تحویل و برگشتی در حالت چندمحصولی مدل‌سازی شد. همچنین آنها مسئله را با روش‌های برنامه‌ریزی آرمانی، اهداف وزن‌دار و برنامه‌ریزی‌سازشی حل نموده و پاسخ‌های حاصل را مقایسه کردند [۱۷]. در مدل برنامه‌ریزی چندهدفه ارائه شده توسط لیائو و ریتشر[3] با مفروضات تقاضاهای احتمالی و محدودیت ظرفیت تأمین‌کنندگان، اهداف چندگانه کمینه‌سازی همزمان هزینه کل، نرخ بازگشت قطعات، نرخ تحویل با تأخیر و بیشینه‌سازی انعطاف‌پذیری در نظر گرفته شدند [۱۸]. وو[4] و همکاران از مدل برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه فازی برای مدیریت ریسک در زنجیره تأمین، با استفاده از داده‌های کمی و کیفی استفاده کردند [۱۹]. امین و ژنگ[5] یک مدل کلی چندهدفه در زنجیره تأمین حلقه بسته با مدیریت تولیدکننده دو مرحله‌ای ارائه کردند [۲۰]. اریکان[6] یک مدل برنامه‌ریزی خطی چندهدفه با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌ها و بیشینه‌سازی کیفیت و تحویل به موقع را برای مسئله منبع‌یابی چندگانه ارائه داد [۲۱]. شیرکوهی[7] و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی خطی فازی و چندهدفه دو مرحله‌ای برای تخصیص سفارش با اهداف کمینه‌سازی هزینه‌های خرید و سفارش، تعداد تحویل‌های با تأخیر و تعداد واحدهای معیوب ارائه کردند [۲۲]. جدیدی[8] و همکاران یک مدل برنامه‌ریزی آرمانی[9] را برای تخصیص سفارش ایجاد کردند که اهداف زمان انتظار دریافت سفارش، قیمت و برگشت محصولات را به‌صورت قطعی و فازی ارائه کردند [۲۳].

از سوی دیگر، مدل‌های ترکیبی تصمیم‌گیری چندمعیاره و برنامه‌ریزی ریاضی نیز جایگاه مناسبی در پژوهش‌های انتخاب تأمین‌کننده دارد. ناراسیمهان و همکاران[10] برای طراحی زنجیره تأمین و تعیین مقدار بهینه سفارش یک مدل چندهدفه را توسعه دادند. آنها، با استفاده از روش AHP، وزن نسبی پنج معیار ارزیابی عملکرد تأمین‌کنندگان را محاسبه کرده و سپس مدل ریاضی را تهیه و حل کردند [۲۴]. شاو[11] و همکاران برنامه‌ریزی خطی چندهدفه و FAHP را برای طراحی زنجیره تأمین بدون کربن با معیارهای درصد بازگشت، حجم تولید گازهای گلخانه‌ای، هزینه، نسبت تحویل‌های با دیرکرد، به‌کار گرفتند [۲۵]. مقدم[12] یک مدل فازی چندهدفه برای طراحی زنجیره تأمین حلقه بسته، با اهداف کمینه‌سازی ریسک تأمین‌کنندگان، قطعات معیوب و تحویل‌های با تأخیر، بیشینه‌سازی سود و با درنظر گرفتن عدم‌قطعیت محصولات برگشتی، ظرفیت تأمین‌کنندگان و تقاضاهای مشتریان ارائه کرد [۲۶]. کنان[13] و همکاران نتایج رویکرد AHP فازی را در مدل چندهدفه برنامه‌ریزی خطی، با قیودی همچون کیفیت و محدودیت ظرفیت و با اهداف کمینه‌سازی هزینه کل و بیشینه‌سازی ارزش کل محصول خریداری شده، به‌کار گرفتند [۲۷]. دنگ[14] و همکاران مسائل طراحی خط تولید و انتخاب تأمین‌کنندگان را با یک مدل چندهدفه برای بیشینه کردن عملکرد خط تولید، کیفیت و سود و کمینه کردن هزینه ترکیب کردند [۲۸].

در دو دهه اخیر، همزمان با توسعه مفهوم SCCP، موضوع مواجهه با اختلالات و مدیریت آنها نیز برجسته شده و روش‌های گوناگونی برای آن ارائه شده است. به‌طور نمونه، دوهادوی[15] و همکاران چارچوبی را برای درک بهتر استراتژی‌های مؤثر در مدیریت ریسک با در نظر گرفتن اختلالات عمدی و سهوی، درون‌زا و برون‌زا در زنجیره تأمین ایجاد کردند [۲۹]. گوپتا و ایوانو[16] از نظریه بازی برای بررسی تأثیر ریسک‌پذیری، بی‌ثبات بودن تقاضا و اختلال در تأمین بر روی سیاست‌های سودآوری و قیمت‌گذاری زنجیره تأمین استفاده کردند [۳۰]. قریشی[17] و همکاران از طریق پرسشنامه توزیع شده در صنعت ساختمان مالزی، ریسک‌های جانبی عملیاتی را از طریق مدل‌سازی معادلات ساختاری تجزیه و تحلیل کردند. آنها ریسک‌های عرضه، فرآیند و تقاضا را تعیین کرده و نتیجه گرفتند که ریسک‌های طرف عرضه و طرف تقاضا اثرات منفی قابل توجهی بر عملکرد زنجیره تأمین دارند، در حالی که اثر ریسک‌های فرآیند معنی‌دار نیستند [۳۱]. وو[18] و همکاران یک روش مدل‌سازی مبتنی‌بر شبکه را برای تعیین چگونگی انتشار اختلالات در زنجیره‌های تأمین و تأثیر آن بر سیستم زنجیره‌تأمین ارائه کردند که تأثیر اختلالات را بر حالت‌های اولیه مشخص در یک شبکه زنجیره تأمین محاسبه

1 Mendoza & Ventura
2 Wadhwa & Ravindran
3 Liao & Rittscher
4 Wu
5 Amin & Zhang
6 Arikan
7 Nazari-Shirkouhi
8 Jadidi
9 Goal Programming
10 Narasimhan, Talluri & Mahapatra
11 Shaw
12 Moghaddam
13 Kannan
14 Deng
15 DuHadway
16Gupta and Ivano
17 Qureshi
18 Wu

می‌کرد [۳۲]. تاملین[1] و همکاران یک شرکت تک محصولی را با دو تأمین‌کننده با ظرفیت محدود مطالعه کردند. یکی از تأمین کنندگان غیرقابل اعتماد و دیگری قابل اعتماد اما گرانتر و دارای انعطاف‌پذیری در حجم بود. آنها نشان دادند ماهیت اختلالات (مکرر اما کوتاه در مقابل نادر اما طولانی) تعیین‌کننده یک استراتژی کلیدی بهینه است. در ادامه استراتژی‌های خرید گوناگون را با توجه به ماهیت اختلالات و انعطاف‌پذیری تأمین‌کنندگان ارائه کردند [۳۳].

پژوهش‌های محدودی در زمینه زنجیره تأمین پروژه‌های عمرانی انجام گرفته است. در این زمینه، شهوند و همکاران ضمن بررسی مراحل و زمان اجرای فرایند مهندسی ارزش در شرکت‌های عمرانی، مفاهیم مشترک مهندسی ارزش و مدیریت زنجیره تأمین و فرایند عملیاتی شدن فرهنگ مهندسی ارزش در مدیریت زنجیره تأمین شرکت‌های عمرانی را بیان کردند [۳۴]. مالک کاوکانی کاهش اثرات مخرب زیست محیطی و هزینه از طریق مدیریت زنجیره تأمین و انتخاب بهینه مصالح در توسعه پایدار را مد نظر قرارداد. وی الگوریتم تصمیم‌گیری چند معیاره‌ای را بسط داده و با استفاده از روش شبیه‌سازی فازی مونت کارلو بهبود داد. همچنین از یک روش ترکیبی از اعداد فازی و روش اپراتور میانگین وزنی برای بهینه‌سازی مسئله استفاده کرد [۳۵] . نجفی فراشاه و رجائی سیستم‌های انتخاب سبد پروژه و مدیریت چرخه تأمین مصالح و تدارکات را در سبد پروژه، با درنظر گرفتن منابع موجود و نحوه تأثیرگذاری ان با آینده معرفی و مدلی برای نزدیک نمودن فعالیت‌های تأمین و تدارکات به فرایندهای استراتژیک شرکت ارائه کردند [۳۶].

ثبات زنجیره تأمین پروژه‌های عمرانی به دلیل حجیم بودن و سرمایه زیاد مورد نیاز برای خرید مواد و مصالح و محدودیت فضای نگهداری در کارگاه، محدود بودن دفعات سفارش در هر پروژه و لزوم رعایت پنجره زمانی سخت برای دریافت آنها بسیار مهم است و لازم است مدل‌های ویژه‌ای برای مدیریت اختلال آن توسعه یابد. با این وجود، تاکنون مدل ریاضی جامعی برای درنظرگیری پیامدهای اختلالات زنجیره تأمین پروژه‌های عمرانی و ارائه راه‌کاری برای آنها ارائه نشده است. این پژوهش یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی برای انتخاب بهینه رویکرد مواجهه با اختلالات پروژه‌های عمرانی ارائه نموده و نتایج آن را تحلیل می‌کند.

۳- روش تحقیق

در این پژوهش دو هدف کمینه کردن هزینه ها و کمینه کردن تأخیر در زمان تحویل پروژه مد نظر قرار می‌گیرند. تأخیر در زمان تحویل پروژه نه تنها به‌صورت جریمه تأخیر انعکاس می‌یابد بلکه با درجه اهمیت بیشتر می تواند به کاهش اعتبار پیمانکار و در نتیجه از دست دادن قرارداد های آتی نیز خود را نشان دهد. با توجه به موارد ذکر شده، در ادامه، یک مدل برنامه‌ریزی زنجیره تأمین با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های پروژه‌ها با درنظر گرفتن اثر اختلالات ارائه می‌شود.

۴- مفروضات مسئله

مفروضات مسئله عبارتند از:

۱- پروژه عمرانی شامل تعداد مشخصی فعالیت با روابط پیشنیازی است.

۲- زمان هر فعالیت در پروژه مشخص است.

۳- منابع مصرفی هر فعالیت مشخص است.

۴- هر میزان مورد نیاز از هر یک از مصالح از یک تأمین کننده خریداری می‌شود.

۵- هزینه جابه‌جایی مصالح وابسته به تأمین‌کننده است.

۶- هر فعالیت پس از آغاز بدون توقف تا پایان ادامه می‌یابد.

۷- تأمین کنندگان براساس معیارهای هزینه خرید و نگهداری و زمان تحویل انتخاب می‌شوند.

۸- تأمین‌کنندگان دارای ظرفیت نامحدود هستند.

۹- هزینه حمل و نقل مصالح برای حامل های مختلف بر حسب میزان مصالح یکسان و ثابت است.

۱۰- محدودیت فضای انبار وجود ندارند.

۱۱- محل مراکز توزیع تأمین‌کنندگان ثابت و شناخته شده است.

۱۲- رخداد اختلالات به صورت تصادفی بوده و احتمال رخداد آنها قابل تخمین است.

۱۳- هر نوع اختلال می‌توانند رخ دهند و یا رخ ندهند ولی شدت این اختلالات، در صورت رخداد، ثابت و قابل پیش‌بینی است.

۱۴- اختلالات بر روی قیمت و زمان تحویل مصالح مورد نیاز برای فعالیت‌های پروژه اثر می‌گذارند.

۱۵- هزینه پیش‌فرض حمل ونقل هر نوع مصالح از هر تأمین‌کننده ثابت و مشخص است ولی اختلالات می‌توانند آن را افزایش دهد.

۱۶- هزینه پیش فرض انجام فعالیت‌های پروژه تابعی از کیفیت

1 Tomlin

مصالح (تأمین‌کنندگان) است.

۱۷- اثر کیفیت مصالح بر هزینه فعالیت‌ها حاصل مجموع اثر کیفیت تک‌تک مصالح است.

۱۸- هزینه انجام پروژه شامل هزینه پیش فرض و افزایش ناشی از اختلالات بر روی آن است.

۱۹- امکان رخداد چندین نوع اختلال به‌صورت همزمان وجود دارد و در آن صورت اثرات آنها به‌صورت مستقل بوده و با یکدیگر جمع می‌شود.

۲۰- با پیاده‌سازی راه‌کارهای مواجهه با اختلال احتمال اثرگذاری و/یا شدت پیامدهای اختلال بر هزینه و زمان پروژه از بین می‌رود.

۵- مدل ریاضی

اندیس‌ها و نمادهای به‌کار گرفته شده در مدل به‌شرح زیر هستند:

۵-۱- اندیس‌های مدل

$d \in D$	اندیس اختلالات
$j \in J$	اندیس مصالح و منابع
$k \in K$	اندیس فعالیت‌های پروژه
$s \in S$	اندیس تأمین‌کنندگان
$r \in R$	اندیس راه‌کارهای مدیریت اختلال

۵-۲- پارامترهای مدل

f_{djs}^{a}	اثر اختلال dام بر افزایش قیمت مصالح jام توسط تأمین‌کننده sام (بر حسب تومان بر واحد مصالح)
f_{djs}^{b}	اثر اختلال dام بر افزایش زمان تحویل مصالح jام توسط تأمین‌کننده sام (بر حسب روز)
f_{dk}^{c}	اثر اختلال dام بر افزایش زمان فعالیت kام (بر حسب روز)
f_{dk}^{d}	اثر اختلال dام بر افزایش هزینه فعالیت kام (بر حسب تومان)
f_{djs}^{e}	اثر اختلال dام بر افزایش هزینه حمل مصالح jام توسط تأمین‌کننده sام (بر حسب تومان)
C_{kj}^{a}	میزان مصرف از مصالح jام برای فعالیت kام
C_{j}^{b}	میزان مصرف از مصالح jام برای همه‌ی فعالیت‌های پروژه
C^{T}	کل هزینه خرید مصالح، بدون درنظر گرفتن اثر اختلالات
C_{js}^{c}	قیمت پیش‌فرض واحد مصالح jام اگر از تأمین‌کننده sام تهیه شود (بر حسب تومان)
C^{d}	کل اثر انتظاری اختلالات بر هزینه خرید مصالح
C^{e}	هزینه هر روز تأخیر در پایان پروژه (تومان بر روز)
C_{js}^{f}	قیمت کل پیش فرض مصالح نوع jام اگر از تأمین‌کننده sام تهیه شود (بر حسب تومان)
C_{js}^{g}	هزینه پیش فرض حمل مصالح نوع jام اگر از تأمین‌کننده sام تهیه شود
C^{h}	هزینه پیش فرض حمل کل مصالح، بدون در نظر گرفتن اثر اختلالات
C^{i}	کل اثر انتظاری اختلالات بر هزینه حمل مصالح
C_{r}^{R}	هزینه اجرای راه‌کار rام
T_{k}^{n}	زمان پیش فرض انجام فعالیت kام
C_{k}^{l}	هزینه پیش فرض انجام فعالیت kام
T_{js}^{m}	زمان پیش فرض تأمین مصالح نوع jام توسط تأمین‌کننده sام
T_{j}^{x}	زمان مورد انتظار برای تأمین مصالح نوع jام با توجه به اختلالات
T_{js}^{x}	زمان مورد انتظار برای تأمین مصالح نوع jام از تأمین‌کننده sام با توجه به رخداد اختلالات
J^{k}	مجموعه مصالح مورد نیاز برای انجام فعالیت kام
T	زمان پیش فرض پایان پروژه
T^{f}	زمان انجام اخرین فعالیت پروژه
T_{k}^{s}	زودترین زمان آغاز فعالیت kام
T_{k}^{E}	زمان پایان فعالیت kام
P_{d}	احتمال رخداد اختلال dام
$y_{k_1k_2}^{p}$	برابر ۱ اگر فعالیت k_1 پیش نیاز فعالیت k_2 باشد $(k_1k_2 \in K)$ و صفر در غیر این‌صورت
y_rd^a	برابر ۱ اگر راه‌کار rام اثر اختلال dام را بر قیمت خرید مصالح را از بین می‌برد

y_{rd}^{b} برابر ۱ اگر راه‌کار rام اثر اختلال dام را بر زمان تحویل مصالح را از بین ببرد و صفر در غیر این‌صورت

y_{rd}^{c} برابر ۱ اگر راه‌کار rام اثر اختلال dام را بر هزینه حمل مصالح را از بین ببرد و صفر در غیر این‌صورت

y_{rdk}^{d} برابر ۱ اگر راه‌کار rام اثر اختلال dام را بر هزینه فعالیت kام را از بین ببرد و صفر در غیر این‌صورت

y_{rd}^{f} برابر ۱ اگر راه‌کار rام اثر اختلال dام را بر زمان فعالیت‌ها را از بین ببرد و صفر در غیر این‌صورت

۵-۳- متغیرهای مسئله

Z کل هزینه پروژه

Z_1 هزینه انتظاری خرید مصالح

Z_2 هزینه انتظاری جریمه تأخیر اتمام پروژه

Z_3 هزینه انتظاری انجام کل فعالیت‌های پروژه

Z_4 هزینه کل انتظاری حمل و نقل مصالح

Z_5 هزینه کل پیاده‌سازی راه‌کارهای مدیریت اختلال

۵-۴- متغیرهای تصمیم

y_{js} برابر ۱ اگر مصالح نوع jام از تأمین‌کننده sام خریداری شود و صفر در غیر این‌صورت

Q_r برابر ۱ اگر راه‌کار rام پیاده شود و صفر در غیراین‌صورت

مدل ارائه شده با توجه به هزینه و اثرات هر راه‌کار برای استفاده یا عدم استفاده از آن تصمیم می‌گیرد و این تصمیم با متغیر Q_r بیان می‌شود.

تابع هدف مسئله کمینه کردن مجموع هزینه‌های انتظاری خریدمصالح، جریمه انتظاری تأخیر اتمام پروژه، افزایش هزینه انجام فعالیت های پروژه بر اثر اختلات، هزینه انتظاری حمل مصالح و هزینه پیاده‌سازی راه‌کارهای مدیریت اختلالات و به فرم زیر است:

$$\min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 \quad (۱)$$

همچنین، محدودیت‌های مسئله به‌صورت زیر هستند:

$$Z_1 = C^T + C^d \quad (۲)$$

$$Z_2 = \max(0, T^f - T)\, C^e \quad (۳)$$

$$Z_3 = \sum_K \left(C_k^l + \sum_D \left(1 - \left(min\left(\sum_R Q_r y_{rdk}^d , 1 \right) \right) \right) f_{dk}^d P_d \right) \quad (۴)$$

$$Z_4 = C^h + C^i \quad (۵)$$

$$C_j^b = \sum_K C_{kj}^a \quad \forall j \quad (۶)$$

$$T_{k_2}^s = \max\left(\max_{k_1 \neq k_2,\, k_1 \in K} \left(T_{k_1}^E y_{k_1 k_2}^p \right), \max_{j \in J^{k_2}} \left(T_j^x \right) \right) \quad (۷)$$

$$\forall k_2 \in K$$

$$T_j^x = \sum_S y_{js} \left(T_{js}^m + \sum_D \left(1 - \left(min\left(\sum_R Q_r y_{rd}^b , 1 \right) \right) \right) P_d f_{djs}^b \right) \quad \forall j \quad (۸)$$

$$T_k^E = T_k^s + \left(T_k^0 + \sum_D \left(1 - \left(min\left(\sum_R Q_r y_{rd}^f , 1 \right) \right) \right) P_d f_{dk}^c \right) \quad \forall k \quad (۹)$$

$$C^T = \sum_J C_j^b \sum_S y_{js} C_{js}^f \quad (۱۰)$$

$$C^d = \sum_J C_j^b \left(\sum_D \left(1 - \left(min\left(\sum_R Q_r y_{rd}^a , 1 \right) \right) \right) P_d \left(\sum_S y_{js} f_{djs}^a \right) \right) \quad (۱۱)$$

$$C^h = \sum_J \sum_S y_{js} C_{js}^g \quad (۱۲)$$

$$C^i = \sum_J \sum_D \sum_S \left(1 - \left(min\left(\sum_R Q_r y_{rd}^c , 1 \right) \right) \right) P_d f_{djs}^e y_{js} \quad (۱۳)$$

$$T^f = \max_k \left(T_k^E \right) \quad (۱۴)$$

$$Z_5 = \sum_R Q_r C_r^R \quad (۱۵)$$

$$\sum_S y_{js} = 1 \qquad \forall j \quad (۱۶)$$

$$Q_r, y_{js} \in \{0,1\} \quad \forall s, j, r \quad (۱۷)$$

$$1 - \left(min\left(\sum_R y_{js} y_{rdk}^d , 1 \right) \right) \quad (۱۸)$$

رابطه (۲) مجموع هزینه خرید مصالح، شامل هزینه پیش فرض و هزینه افزوده شده به‌دلیل اختلالات را محاسبه می کند. رابطه (۳) هزینه تأخیر را با محاسبه تفاوت زمان اتمام واقعی پروژه با زمان پیش بینی شده و ضرب آن در جریمه ثابت بابت هر روز تأخیر، به‌دست می آورد. رابطه (۴) مجموع انتظاری اثر اختلالات را بر هزینه انجام فعالیت‌های پروژه مشخص می‌کند. در صورتی که حداقل یک راه‌کار به‌کارگرفته شده باشد که مانع اثر

اخـتلالات در هزینـه انجـام فعالیـت klام شـود، عبـارت زیـر اثر اختلالات را حذف می‌نماید. رابطه (۵) کل هزینه حمل و نقل مصـالح را از جمـع زدن هزینـه حمـل ونقـل در حالـت عـادی و اثر افزایش هزینه انتظاری حمل و نقل براثـر اخـتلالات محاسـبه مـی‌کنـد. رابطـه (۶) کـل هزینـه انتظـاری خریـد مصـالح را از طریـق جمـع زدن هزینـه خریـد آنهـا در حالـت عـادی و اثـر اخـتلالات بـر آنهـا محاسـبه مـی‌کنـد. رابطـه (۷) زمـان شـروع فعالیـت k را بـا توجـه بـه زمـان پایـان فعالیـت‌هـای پـیش‌نیـاز آن و زمان دریافت مصـالح مـورد نیـاز بـرای شـروع آن مشـخص می‌کند. رابطـه (۸) زمـان دریافـت هریـک از مصـالح مـورد نیـاز برای هر یک از فعالیت‌هـا را مشـخص مـی‌کنـد. در ایـن رابطـه مقدار $T_{js}^{m}+\sum_D\left(1-\left(min\left(\sum_R Q_r y_{rd}^{b},1\right)\right)\right)P_d f_{djs}^{b}$ عبـارت اسـت از زمـان مـورد انتظـار بـرای تـأمین مصـالح نـوع zام از تأمین‌کننده sام با توجه به رخداد اختلالات (T_{js}^{x}).

رابطه (۹) زمان مورد انتظار پایان هر یک از فعالیـت هـا را بـا توجه به زمان شروع آن، زمان پیش فرض انجام آن و اثر انتظاری اختلالات بر روی آن به‌دست می‌آورد. رابطـه (۱۰) هزینـه خریـد مصالح را در حالـت عـادی و بـدون درنظرگـرفتن اثـر اخـتلالات محاسبه می‌کند. رابطه (۱۱) اثر انتظاری رخـداد اخـتلالات را بـر روی هزینه خرید مصالح محاسبه می‌کند. رابطه‌های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب مجموع هزینه هـای حمـل و نقـل مصـالح را در حالـت عادی و بـدون درنظرگـرفتن اثـرات اخـتلالات و اثـرات انتظـاری اختلالات بر روی این هزینه‌ها را محاسـبه مـی‌کنـد. رابطـه (۱۴) زمان مورد انتظار پایان پروژه را از طریق محاسبه بیشترین زمـان پایان انتظاری فعالیت‌های آن به‌دست می‌آورد. رابطه (۱۵) جمـع کل هزینه پیاده‌سازی راه‌کارها را محاسبه مـی‌کنـد. رابطـه (۱۶) مشخص می‌کند که هر نوع مصالح تنها به یکی از تأمین‌کننـدگان قابل تخصیص است. رابطه (۱۷) نوع متغیر های تصمیم مسـئله را به‌صورت یک متغیر باینری مشخص کرده است.

۶- برنامه‌ریزی مسئله به‌صورت چندهدفه

از آنجا که هزینه تأخیر پروژه علاوه‌بر جریمه، پیامدهای نامطلوب کیفی بسیار مهم دیگری را نیز بـه پـروژه تحمیـل مـی‌کنـد کـه مهمترین آن از بین رفتن اعتبار پیمانکار و امکان مواجه شدن بـا اخـتلالات پـیش‌بینـی نشـده دیگـر هسـتند، در ادامـه، مسـئله مجددا به‌صورت یک مسـئله چنـدهدفـه بـازتعریف شـده اسـت. همچنین تحلیل و مقایسه نتایج حل مسئله در دوحالت تک هدفه و چندهدفه می‌تواند به ایجاد یک دیدگاه بهتر از مسئله بیانجامد. در این راستا کمینه کردن زمان پایان پروژه به‌صورت یـک هـدف ثانویه و به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$\min \dot{Z} = T^{f} \qquad (۱۹)$$

این هدف ممکن است با اهداف دیگر همچون حداقل کـردن هزینه خرید مصالح در تعارض قرار گیرد زیرا در بسیاری از مـوارد کاهش زمان دریافت تأخیر دریافت سفارش ممکن است منجر بـه خرید مصالح با هزینه بیشتر گردد. برای حـل مسـئله دوهدفـه از روش محدودیت اپسیلون استفاده شده است.

۷- مثال عددی

با ارائه یک مثال عددی، نخست مسـئله تـک هدفـه حـل شـده و مقدار بهینه تابع هدف مشـخص شـده، آنگـاه مسـئله بـه‌صـورت دو هدفه و با روش اپسیلون محدودیت به‌صورت دقیق حـل شـده است. حل مسئله در هر دو مورد با اسـتفاده از نـرم‌افـزار GAMS انجام شده است. بـا توجـه بـه NP-Hard بـودن مسـائل انتخـاب تأمین‌کننده، طبیعی است که با افزایش ابعاد مسئله پیچیدگی آن نیز به‌شدت افزایش یافته و ناگزیر از استفاده از روش‌های ابتکاری و فرا ابتکاری خواهیم بود. در این مثال، سه نوع اختلال اقتصادی نظیر تغییر قیمت حامل های انرژی، تغییـر میـزان مالیـات ارزش افزوده و یا تغییر نرخ تـورم در نظـر گرفتـه شـده اسـت. مقـادیر پیش بینی شده برای احتمال رخداد هر یـک از ایـن اخـتلالات و اطلاعات کلی در این مثال، به‌صورت تصادفی با توزیع یکنواخت از بین اعداد صفر تا ۰/۵ تولید شده‌اند. اطلاعـات اصـلی مسـئله بـه شرح زیر است:

جدول (۲): اطلاعات کلی مثال عددی

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	تعداد اختلالات	$\|D\| = 3$
۲	تعداد مصالح	$\|J\| = 4$
۳	تعداد فعالیت‌های پروژه	$\|K\| = 4$
۴	تعداد تأمین کنندگان	$\|S\| = 3$
۵	تعداد راه‌کارهای مدیریت اختلال	$\|R\| = 1$
۶	احتمال رخداد اختلال ۱	$P_1 = 0.03$
۷	احتمال رخداد اختلال ۲	$P_2 = 0.24$
۸	احتمال رخداد اختلال ۳	$P_3 = 0.12$

با فرض اینکه در هر دوره تنها یکی از اختلالات می توانـد رخ دهد، احتمال عدم وجود اختلال برابر مقدار زیر خواهد بود:

$$P = 1 - (P_1 + P_2 + P_3) = ۰/۶۱ \qquad (۲۰)$$

اگر احتمال رخداد اختلالات به‌صورت توام نیز وجود داشته باشد، احتمال عدم رخداد اختلالات باید با در نظر گرفتن احتمال توام رخداد اختلالات محاسبه شود.

در جدول (۲) اعداد تصادفی تولید شده برای سایر پارامترهای مسئله به دو صورت پیش‌فرض و پس از رخداد اختلال نشان داده شده‌اند. همهٔ مقادیر فوق در فاصلهٔ حد پائین و بالای تعیین شده برای این پارامتر قراردارند که به‌صورت تابع توزیع یکنواخت توسط نرم‌افزار EXCEL تولید شده‌اند.

در این مثال سه فعالیت در پروژه در نظر گرفته شده است که مقادیر زمان آنها نیز به‌صورت تصادفی تولید و در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

جدول (۳): قیمت مصالح و میزان افزایش آنها در اثر رخداد اختلالات، در مثال عددی

تأمین‌کننده	پارامتر	حد پائین	حد بالا	پیش فرض	مقدار افزایش در اثر اختلال		
					اختلال ۱	اختلال ۲	اختلال ۳
تأمین‌کننده ۱	قیمت مصالح ۱	۵	۱۰	۸	۱	۱	۱
	قیمت مصالح ۲	۷	۱۳	۱۱	۱	۲	۲
	قیمت مصالح ۳	۹	۱۶	۱۵	۰	۱	۰
	قیمت مصالح ۴	۱۱	۱۹	۱۸	۰	۰	۱
تأمین‌کننده ۲	قیمت مصالح ۱	۵	۱۰	۸	۱	۱	۱
	قیمت مصالح ۲	۷	۱۳	۱۲	۰	۱	۱
	قیمت مصالح ۳	۹	۱۶	۱۰	۴	۲	۱
	قیمت مصالح ۴	۱۱	۱۹	۱۳	۵	۳	۵
تأمین‌کننده ۳	قیمت مصالح ۱	۵	۱۰	۷	۱	۱	۱
	قیمت مصالح ۲	۷	۱۳	۹	۲	۱	۲
	قیمت مصالح ۳	۹	۱۶	۱۵	۱	۰	۰
	قیمت مصالح ۴	۱۱	۱۹	۱۷	۱	۰	۱

جدول (۴): زمان فعالیت‌ها در مثال عددی و میزان افزایش آنها در اثر رخداد اختلالات

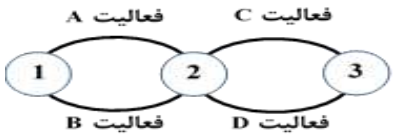
پارامتر	حد بالا	حد پائین	پیش فرض	مقدار افزایش در اثر اختلال		
				اختلال ۱	اختلال ۲	اختلال ۳
زمان فعالیت A	۱۵	۲۲	۲۰	۱	۰	۱
زمان فعالیت B	۱۲	۲۵	۱۳	۹	۱	۸
زمان فعالیت C	۱۸	۳۰	۱۹	۵	۲	۴
زمان فعالیت D	۱۴	۱۹	۱۵	۱	۳	۱

زمان پیش‌فرض خاتمه پروژه T=۳۰ روز و هزینه هر روز تأخیر C^e۵ = واحد پولی درنظر گرفته شده است. میزان هر یک از مصرف مصالح در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول (۵):میزان مصالح مورد نیاز برای انجام فعالیت‌ها در مثال عددی

فعالیت	میزان مصالح مورد نیاز			
	مصالح ۱	مصالح ۲	مصالح ۳	مصالح ۴
فعالیت A	۳	۱	۶	۸
فعالیت B	۱۲	۴	۱۴	۷
فعالیت C	۱۳	۱۲	۳	۱۲
فعالیت D	۱۴	۰	۵	۶
جمع	۴۲	۱۷	۲۸	۳۳

شبکه روابط پیشنیازی توالی فعالیت‌ها به‌صورت شکل زیر است:



شکل (۱): نمودار توالی فعالیت‌ها در مثال عددی

هزینه انجام فعالیت ها به‌صورت تصادفی تولید شده و در جدول (۵) نشان داده شده‌اند.

در این مثال، سه تأمین‌کننده برای مصالح در نظر گرفته شده است و مقادیر زمان تحویل آنها برای هر نوع مصالح نیز به صورت تصادفی تولید و در جدول (۶) نشان داده شده‌اند. هزینه حمل هر

نوع مصالح نیز به صورت تصادفی تولید و در جدول (۷) نشان داده شده‌اند. راه‌کار استفاده از مصالح ویژه (همچون استفاده از سیمان با بسته‌بندی پلاستیکی)، ضمن افزایش هزینه خرید این نوع مصالح (مصالح نوع ۲) به میزان $C_1^R = 5$ واحد پولی، هزینه اثر اختلال دوم را بر فعالیت چهارم که از این نوع مصالح استفاده می‌کند را حذف می‌کند. به این ترتیب خواهیم داشت:

$y_{1,2,3}^d = 1$ استفاده از سیمان با بسته‌بندی پلاستیکی (راه‌کار اول) اثر اختلال دوم را بر هزینه فعالیت سوم از بین می‌برد

$y_{1,2,4}^d = 1$ استفاده از راه‌کار اول اثر اختلال دوم را بر هزینه فعالیت چهارم از بین می‌برد

حال چنانچه پس از حل مسئله مقدار متغیر تصمیم Q_r برابر یک انتخاب شود، بدین معنا است که در ازای پرداخت هزینه ۵ واحد برای این راه‌کار، در صورت بروز، اختلال دوم دیگر اثری بر هزینه فعالیت چهارم نخواهد داشت.

جدول (۶): هزینه انجام فعالیت‌ها در مثال عددی

پارامتر	حد پائین	حد بالا	پیش فرض	مقدار افزایش در اثر اختلال		
				اختلال ۱	اختلال ۲	اختلال ۳
هزینه فعالیت ۱	۱۲۰	۲۲۰	۱۸۶	۲۴	۱۱	۹
هزینه فعالیت ۲	۱۱۰	۲۴۰	۱۸۳	۱۷	۳۰	۳۰
هزینه فعالیت ۳	۱۷۰	۲۰۰	۱۸۷	۵	۲	۵
هزینه فعالیت ۴	۱۵۰	۲۵۰	۱۶۷	۳۵	۱	۶۲

جدول (۷): زمان تحویل مصالح در مثال عددی

تأمین کننده	پارامتر	حد پائین	حد بالا	پیش فرض	مقدار افزایش در اثر اختلال		
					اختلال ۱	اختلال ۲	اختلال ۳
تأمین کننده ۱	زمان تحویل مصالح ۱	۸	۱۹	۱۱	۱	۷	۱
	زمان تحویل مصالح ۲	۸	۱۲	۸	۲	۴	۳
	زمان تحویل مصالح ۳	۹	۲۰	۱۲	۴	۸	۸
	زمان تحویل مصالح ۴	۱۱	۲۰	۱۲	۱	۷	۸
تأمین کننده ۲	زمان تحویل مصالح ۱	۷	۱۸	۸	۱	۷	۷
	زمان تحویل مصالح ۲	۷	۱۵	۹	۵	۶	۵
	زمان تحویل مصالح ۳	۸	۱۵	۹	۶	۶	۴
	زمان تحویل مصالح ۴	۱۱	۲۵	۱۲	۷	۱۲	۹
تأمین کننده ۳	زمان تحویل مصالح ۱	۱۰	۲۰	۱۲	۸	۸	۴
	زمان تحویل مصالح ۲	۷	۱۵	۱۰	۱	۵	۵
	زمان تحویل مصالح ۳	۸	۱۸	۱۰	۷	۷	۵
	زمان تحویل مصالح ۴	۹	۱۳	۹	۰	۴	۲

برای اعتبارسنجی، مدل ریاضی پژوهش مذکور نخست تنها با در نظر گرفتن تابع هدف اول یعنی کمینه کردن مجموع هزینه‌های انتظاری در نرم‌افزار GAMS کد شده و سپس با حل‌کننده Baron حل گردید. پس از حل مثال و مقایسه آن با حل دستی، جواب به‌دست آمده از نرم‌افزار در مقایسه با جواب محاسبه شده دستی، گویای معتبر بودن مدل بود. برای حل مسئله، نخست مسئله را بدون درنظرگرفتن اثر اختلالات در نظر می‌گیریم، یعنی در حالتی که احتمال رخداد همه‌ی اختلالات برابر صفر باشند. پس از حل مسئله با استفاده از نرم‌افزار GAMS، پاسخ در جدول (۸) به‌دست می‌آید.

جدول (۸): هزینه حمل مصالح، در مثال عددی

تأمین کننده	پارامتر	حد پائین	حد بالا	پیش فرض	مقدار افزایش در اثر اختلال		
					اختلال ۱	اختلال ۲	اختلال ۳
تأمین کننده ۱	هزینه حمل مصالح ۱	۹	۱۴	۱۳	۰	۰	۱
	هزینه حمل مصالح ۲	۹	۱۳	۱۲	۰	۰	۱
	هزینه حمل مصالح ۳	۱۰	۱۴	۱۰	۲	۰	۲
	هزینه حمل مصالح ۴	۱۲	۱۷	۱۶	۱	۰	۰
تأمین کننده ۲	هزینه حمل مصالح ۱	۸	۹	۸	۱	۰	۰
	هزینه حمل مصالح ۲	۹	۱۰	۹	۰	۱	۰
	هزینه حمل مصالح ۳	۸	۱۳	۱۰	۱	۱	۰
	هزینه حمل مصالح ۴	۱۱	۱۳	۱۲	۱	۰	۰

تأمین کننده ۳	هزینه حمل مصالح ۱	۱۱	۱۴	۱۳	۰	۱	۰
	هزینه حمل مصالح ۲	۷	۱۲	۹	۲	۱	۱
	هزینه حمل مصالح ۳	۸	۱۱	۱۱	۱	۱	۱
	هزینه حمل مصالح ۴	۱۱	۱۳	۱۱	۰	۰	۱

همچنین زمان اتمام پروژه ۵۱ می‌باشد که براین پایه باید جریمه ۱۰۵ واحد پولی به‌علت تأخیر ۲۱ روزه در زمان اتمام پروژه پرداخت شود. این مقادیر نشان می‌دهد که هزینه کل برابر ۲۰۳۴ واحد خواهد بود که بیشترین سهم آن مربوط به هزینه خرید مصالح است. با قراردادن اطلاعات مربوط به اختلالات در مدل و پس از حل مسئله، پاسخ در جدول (۹) به‌دست می‌آید.

جدول (۹): نتایج بهینه مثال عددی بدون درنظر گرفتن اثر اختلالات، با استفاده از نرم‌افزار GAMS

$y_{1,1}=0$	$y_{1,2}=0$	$y_{1,3}=1$	$y_{2,1}=0$	$y_{2,2}=0$	$y_{2,3}=1$
$y_{3,1}=0$	$y_{3,2}=1$	$y_{3,3}=0$	$y_{4,1}=0$	$y_{4,2}=1$	$y_{4,3}=0$
$z_1=1162$	$z_2=105$	$z_3=723$	$z_4=44$	$z_5=0$	$z=2034$

همچنین مقدار $Q_1=0$ در پاسخ محاسبه شده نشان می‌دهد که با وجود اینکه استفاده از راه‌کار مواجهه با اختلال هزینه‌هایی را در پی دارد ولی به‌دلیل آنکه می‌تواند برخی از هزینه‌های ناشی از اختلالات را کاهش دهد، استفاده از این راه‌کار اقتصادی می‌باشد. زمان مورد انتظار پایان پروژه در پاسخ بهینه برابر۵۶/۴۳ روز است که نتیجه آن تحمیل ۱۳۲واحد پولی به‌عنوان جریمه مورد انتظار تأخیر در اتمام پروژه است. همچنین با تغییر هزینه راه‌کار، در همهٔ پاسخ‌ها تأمین‌کنندگان انتخابی تغییر نمی‌کنند. جدول (۱۰) نشان می‌دهد که در این مثال، اختلالات بیشترین اثر خود را با افزایش هزینه انتظاری خرید مصالح نشان می‌دهد. همچنین اطلاعات فوق در شکل (۲) نیز نشان داده شده‌اند.

شکل (۲): نمودار نتایج بهینه حل مثال عددی در دوحالت با درنظر گرفتن اثر اختلالات و بدون آن

جدول (۱۰): نتایج بهینه مثال عددی با استفاده از نرم‌افزار GAMS

$y_{1,1}=0$	$y_{1,2}=0$	$y_{1,3}=1$	$y_{2,1}=0$	$y_{2,2}=0$	$y_{2,3}=1$
$y_{3,1}=0$	$y_{3,2}=1$	$y_{3,3}=0$	$y_{4,1}=0$	$y_{4,2}=1$	$y_{4,3}=0$
$z_1=1256$	$z_2=132$	$z_3=738$	$z_4=44$	$z_5=5$	$z=2176$

۸- تحلیل حساسیت مدل

در این قسمت نتیجه تغییر پارامترهای مدل در تغییر پاسخ بهینه مدل بررسی می‌گردد.

الف) اثر تغییر هزینه قیمت خرید مصالح (با درنظر گرفتن اختلالات)

تغییر در قیمت مصالح تنها در هزینه خرید تأثیر گذاشته و بر هیچیک از سایر هزینه‌ها تأثیر ندارد. با این وجود، با توجه به ارزش بالای مصالح مصرفی، اثر تغییر آنها بر هزینه پروژه به نسبت زیاد است.

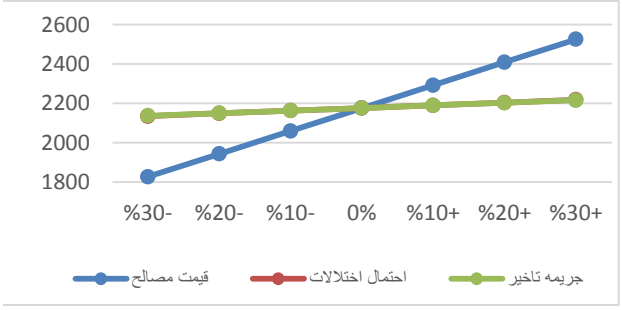
ب) اثر تغییر احتمال اختلالات در پاسخ بهینه

تغییر در احتمال اختلالات در هزینه‌های هزینه حمل مصالح و هزینه راه‌کارها تأثیر نگذاشته ولی بر همهٔ سایر هزینه‌ها تأثیر دارد، با این وجود تغییر احتمال اختلالات، در این مثال اثر کمی بر هزینه کل پروژه می‌گذارد.

ج) اثر تغییر جریمه تأخیر در اتمام پروژه در پاسخ بهینه

تغییر در جریمه تأخیرتنها بر هزینه تأخیر پروژه تأثیر گذاشته و بر همهٔ سایر هزینه‌ها تأثیر ندارد، با این وجود تغییر این جریمه، اثر کمی بر هزینه کل پروژه می‌گذارد.

خلاصه نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای مسئله در جدول (۱۱) آورده شده است. همین نتایج، به‌صورت نمودار عنکبوتی در قالب شکل (۳) نمایش داده شده‌اند. همچنان که نمودار (۳) نشان می‌دهد، در این مثال تغییر هر دو پارامتر احتمال اختلالات و جریمه تأخیر اثر مستقیم و تقریبا یکسانی بر روی مقدار بهینه تابع هدف دارند. همچنین با توجه به قیمت مصالح، که در این مثال، همچون دنیای واقعی، سهم بالایی از هزینه پروژه را تشکیل می‌دهد، نقش تغییر این پارامتر نیز بر روی هزینه بهینه پروژه تأثیر مستقیم می‌گذارد.



شکل (۳): نمودار عنکبوتی پاسخ بهینه مسئله نسبت به پارامترهای مسئله

جدول (۱۱): مقایسه نتایج حل مسئله در حالات بدون و با درنظرگرفتن اثر اختلالات

متغیر	هزینه کل	هزینه مدیریت اختلال	هزینه حمل مصالح	هزینه انجام فعالیت‌ها	جریمه تأخیر	هزینه خرید
بدون درنظرگرفتن اثر اختلالات	۲۰۳۴	۰	۴۴	۷۲۳	۱۰۵	۱۱۶۲
با درنظرگرفتن اثر اختلالات	۲۱۷۶	۵	۴۵	۷۳۸	۱۳۲	۱۲۵۶
تفاوت (تأثیر اختلالات)	۱۴۲	۵	۱	۱۵	۲۷	۹۴

جدول (۱۲): خلاصه تحلیل حساسیت پاسخ بهینه مسئله نسبت به پارامترهای مسئله

درصد تغییر	مقدار بهینه تابع هدف (با درنظر گرفتن اختلالات)					
	قیمت مصالح		احتمال اختلالات		جریمه تأخیر	
-۳۰٪	۱۸۲۸	٪-۱۶/۰	۲۱۳۵	٪-۱/۹	۲۱۳۷	٪-۱/۸
-۲۰٪	۱۹۴۴	٪-۱۰/۷	۲۱۴۹	٪-۱/۲	۲۱۵۰	٪-۱/۲
-۱۰٪	۲۰۶۰	٪-۵/۳	۲۱۶۳	٪-۰/۶	۲۱۶۳	٪-۰/۶
۰٪	۲۱۷۶	۰٪/۰	۲۱۷۶	۰٪/۰	۲۱۷۶	۰٪/۰
+۱۰٪	۲۲۹۲	۵٪/۳	۲۱۹۰	۰٪/۶	۲۱۹۰	۰٪/۶
+۲۰٪	۲۴۰۹	۱۰٪/۷	۲۲۰۴	۱٪/۳	۲۲۰۳	۱٪/۲
+۳۰٪	۲۵۲۵	۱۶٪/۰	۲۲۱۸	۱٪/۹	۲۲۱۶	۱٪/۸

۹- حل مسئله به صورت دوهدفه

در ادامه، حداقل کردن تأثیرات تأخیر در پروژه (به‌جز جریمهٔ ناشی از آن)، به‌صورت یک هدف جداگانه و در قالب یک تابع هدف دوم در نظر گرفته شده است. از آنجا که تابع هدف دوم (Z'') برابر زمان انتظاری پایان پروژه است، حداقل نمودن آن معادل افزایش قابلیت اطمینان انجام پروژه در مهلت مقرر است. محدودیت‌های مدل بدون تغییر، عینا مشابه محدودیت‌های مدل تک‌هدفه باقی‌می‌مانند.

رویکرد حل و همچنین ارزیابی عملکرد بهینه‌سازی در الگوریتم‌های چندهدفه اساساً با الگوریتم‌های بهینه‌سازی تک‌هدفه متفاوت می‌باشد؛ در بهینه‌سازی تک‌هدفه یک جواب بهینه وجود دارد که مقایسه آن با جواب دقیق ساده و به راحتی انجام می‌شود، اما در بهینه‌سازی چندهدفه، نتیجه چندین جواب بهینه خواهد بود که برتری نسبت به یکدیگر نخواهند داشت و اصطلاحاً جبهه یا مرز پارتویی نامیده می‌شوند. از این‌رو روش‌های ارزیابی بهینه‌سازی چندهدفه با بهینه‌سازی تک‌هدفه متفاوت خواهد بود. در ادامه به حل و تحلیل حساسیت مسئله به‌صورت مدل چندهدفه با روش اپسیلون محدودیت می‌پردازیم. در روش اپسیلون محدودیت دو نکته زیر حائز اهمیت هستند:

- بازه تغییر توابع هدف بر روی جواب‌های مؤثر
- تضمین مؤثر بودن جواب‌های به دست‌آمده.

به‌منظور به‌کارگیری مناسب روش اپسیلون محدودیت، نخست باید دامنه تغییرات توابع هدفی که در محدودیت‌ها استفاده خواهند شد، مشخص باشد. محاسبه این مقادیر کار ساده‌ای نیست؛ زیرا برخلاف بهترین مقادیر توابع هدف که به راحتی و با بهینه‌سازی تک‌هدفه محاسبه می‌شوند، بدترین مقادیر آنها در مجموعه مؤثر به راحتی به‌دست نمی‌آیند. رایج‌ترین روش به این‌صورت است که این مقادیر از جدول موازنه به‌دست می‌آید. در صورت وجود جواب بهینه چندگانه تضمینی برای این که تمامی جواب‌های تولید شده از مجموعه مؤثر باشند، وجود ندارد. با هدف غلبه بر این ابهام، ماوروتاس[1] پیشنهاد داد تا برای تولید جدول موازنه از بهینه‌سازی سلسله مراتبی برای هر تابع هدف استفاده شود. چاره‌ای که ایشان برای گذر از این مشکل در تخمین بدترین مقادیر توابع هدف اندیشید، این بود که برای توابع هدف مقادیر ذخیره[2] تعریف گردد که به‌صورت یک حد پایین (یا حد بالا برای کمینه کردن توابع هدف) عمل می‌کنند [۳۷].

1 Mavrotas
2 Reservation Values

$$\max\left(f_1(x)+\delta\left(s_2/r_2+s_3/r_3+\ldots+s_p/r_p\right)\right)$$
$$s.t:$$
$$f_2(x)-s_2=e_2$$
$$f_3(x)-s_3=e_3 \qquad (۲۱)$$
$$\ldots$$
$$f_p(x)-s_p=e_p$$
$$x\in S \quad and \quad s_i\in R^+$$

معادله (۲۱) یک معادله عمومی است که باید با توجه به نوع تابع هدف به‌کار رود. به‌طور مثال، باید از ضریب منفی برای تبدیل توابع هدف مینیمم‌سازی به ماکزیمم‌سازی استفاده نمود.

اگر جواب بهینه چندگانه‌ای برای حداقل یکی از توابع هدف وجود داشته باشد، جواب به‌دست آمده از اپسیلون محدودیت معمولی در واقع جواب مؤثر نمی‌باشد، اما یک جواب مؤثر ضعیف نامیده می‌شود. تابع هدف دوم در مثال عددی فوق، به‌عنوان حداقل کردن زمان مورد انتظار اتمام پروژه در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب توابع هدف مسئله به‌صورت یک مسئله چندهدفه و به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$\text{Min } Z' = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 \qquad (۲۲)$$

$$\text{Min } Z'' = T^f \qquad (۲۳)$$

در ادامه تابع هدف دوم در قالب یک محدودیت جدید و به فرم زیر به محدودیت‌های مسئله افزوده می‌شود، و مسئله مجددا به فرم تک‌هدفه حل می‌شود:

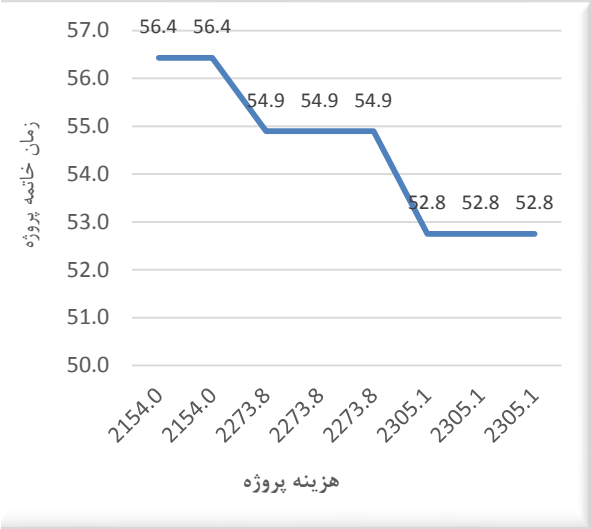
$$T^f \le \acute{T} \qquad (۲۴)$$

مقدار $\acute{T}$ در رابطه بالا باید مرتبا در محدوده مشخص شده با تغییر داده شده و مسئله مجددا حل گردد. این مقدار برای مثال فوق مقادیر ۵۷ تا ۵۲/۵ با فاصله‌های یکسان ۰/۵ واحدی درنظر گرفته شده‌اند که نتایج زیر را به‌دست داده است:

جدول (۱۳): نتایج حاصل از حل مثال عددی به روش اپسیلون محدودیت

$\acute{T}$	T^f	Z
۵۷	۵۶/۴۳	۲۱۵۴/۰۲
۵۶/۵	۵۶/۴۳	۲۱۵۴/۰۲
۵۶	۵۴/۹	۲۲۷۳/۷۷
۵۵/۵	۵۴/۹	۲۲۷۳/۷۷
۵۵	۵۴/۹	۲۲۷۳/۷۷
۵۴	۵۲/۷۵	۲۳۰۵/۱۴
۵۳/۵	۵۲/۷۵	۲۳۰۵/۱۴
۵۳	۵۲/۷۵	۲۳۰۵/۱۴
۵۲/۵	فاقد جواب	فاقد جواب

همچنین این اطلاعات در نمودار (۴) نیز نشان داده شده‌اند. پاسخ فوق نشان می‌دهد که کاهش زمان مورد انتظار پروژه، به صورت پلکانی منجر به افزایش هزینه آن می‌شود. در این حالت تصمیم‌گیرنده می‌تواند با انتخاب پاسخ مورد نظر خود، بهترین تعادل را بین این دو متغیر ایجاد نماید.



شکل (۴): نمودار پاسخ‌های پارتویی در مثال عددی

۱۰- نتیجه‌گیری

یکی از فعالیت‌های مهم برای موفقیت زنجیره‌تأمین پروژه‌های عمرانی، خرید مؤثر و کارآمد مصالح است. عمل خرید به سبب فاکتورهایی مثل جهانی شدن، ارزش افزوده افزایش یافته در عرضه و تغییرات فن‌آوری سریع، در مدیریت زنجیرهٔ تأمین، توجه بسیار زیادی را به خود معطوف کرده است. مهم‌ترین فعالیت عمل خرید، برنامه‌ریزی صحیح سفارشات است، به سبب این که این امر نقش به سزائی در هزینه، کیفیت و زمان اتمام پروژه داشته و به این ترتیب صرفه جویی‌های معناداری به همراه داشته و یک مزیت رقابتی را در امر اجرای پروژه است. برای حل برنامه‌ریزی سفارشات، مدل‌ها و رویکردهای زیادی تدوین و ارائه شده است، که در این پژوهش این مسئله، به‌طور ویژه به از نگاه نقش این فرآیند در اجرای پروژه‌های عمرانی بررسی شده است. یکی از محدودیت‌های پژوهش عدم دسترسی پژوهشگر به داده‌های واقعی بوده است. این محدودیت مانع انجام پژوهش به‌صورت مطالعه موردی شده است. به‌همین دلیل داده‌های مثال عددی مستند نبوده و نتایج و تحلیل مسئله نیز در حالت عمومی قابل استناد نیستند.

با توجه به بررسی‌های ارائه شده می‌توان موارد زیر را برای توجه بیشتر در حوزه انتخاب تأمین‌کننده ارائه نمود:

- بررسی و تحلیل اثر متقابل تغییرات شدت و احتمال رخداد اختلالات بر روی نتایج مسئله،
- درنظر گرفتن احتمال و/یا شدت پیش‌بینی شده برای رخداد اختلالات به‌صورت pفازی،
- استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو برای شبیه‌سازی اختلالات و اعتبارسنجی نتایج مدل‌های تحلیلی.

۱۱- مراجع

[1] P. J. Agrell, R. Lindroth, and A. Norrman, "Risk, information and incentives in telecom supply chains," International Journal of Production Economics, vol. 90, pp. 1-16, 2004.

[2] R. Handfield and E. Nichols, Introduction to. "Supply Chain Management," Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1999.

[3] S. H. Amin and J. Razmi, "An integrated fuzzy model for supplier management: A case study of ISP selection and evaluation," EXPERT SYST APPL, vol. 36, pp. 8639-8648, 2009.

[4] D.D. Shipley, "Resellers' supplier selection criteria for different consumer products," European Journal of Marketing, vol. 19, pp. 26-36, 1985.

[5] C. A. Weber, J. R. Current, and W. C. Benton, "Vendor selection criteria and methods," EUR J OPER RES, vol. 50, pp. 2-18, 1991.

[6] E. Timmerman, "An approach to vendor performance evaluation," IEEE Engineering Management Review, vol. 15, pp. 14-20, 1987.

[7] L. De Boer, E. Labro, and P. Morlacchi, "A review of methods supporting supplier selection," European journal of purchasing and supply management, vol. 7, pp. 75-89, 2001.

[8] F. T. Chan and N. Kumar, "Global supplier development considering risk factors using fuzzy extended AHP-based approach," Omega, vol. 35, pp. 417-431, 2007.

[9] F. T. Chan and H. K. Chan, "Development of the supplier selection model- a case study in the advanced technology industry," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 218, pp. 1807-1824, 2004.

[10] S. Zaim, M. Sevkli, and M. Tarim, "Fuzzy analytic hierarchy based approach for supplier selection," Journal of Euromarketing, vol. 12, pp. 147-176, 2003.

[11] S. Vinodh, R. A. Ramiya, and S. G. Gautham, "Application of fuzzy analytic network process for supplier selection in a manufacturing organisation" EXPERT SYST APPL, vol. 38, pp. 272-280, 2011.

[12] F. R. L. Junior, L. Osiro, and L.C.R. Carpinetti, "A comparison between Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methods to supplier selection," Applied Soft Computing, vol. 21, pp. 194-209, 2014.

[13] O. Ustun and E. A. Demı, "An integrated multi-objective decision-making process for multi-period lot-sizing with supplier selection," Omega, vol. 36, pp. 509-521, 2008.

[14] W. L. Ng, "An efficient and simple model for multiple criteria supplier selection problem," EUR J OPER RES, vol. 186, pp. 1059-1067, 2008.

[15] A. A. Gaballa, "Minimum cost allocation of tenders" Journal of the Operational Research Society, vol. 25, pp. 389-398, 1974.

[16] A. Mendoza and J. A. Ventura, "Analytical models for supplier selection and order quantity allocation," Applied Mathematical Modelling, vol. 36, pp. 3826-3835, 2012.

[17] V. Wadhwa and A. R. Ravindran, "Vendor selection in outsourcing," Computers & operations research, vol. 34, pp. 3725-3737, 2007.

[18] Z. Liao and J. Rittscher, "A multi-objective supplier selection model under stochastic demand conditions,"International Journal of Production Economics, vol. 105, pp. 150-159, 2007.

[19] D. D. Wu, Y. Zhang, D. Wu, and D. L. Olson, "Fuzzy multi-objective programming for supplier selection and risk modeling: A possibility approach," European journal of operational research, vol. 200, pp. 774-787, 2010.

[20] S. H. Amin and G. Zhang, "An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach," Expert Systems with Applications, vol. 39, pp. 6782-6791, 2012.

[21] F. Arikan, "A fuzzy solution approach for multi objective supplier selection," Expert Systems with Applications, vol. 40, pp. 947-952, 2013.

[22] S. Nazari-Shirkouhi, H. Shakouri, B. Javadi, and A. Keramati, "Supplier selection and order allocation problem using a two-phase fuzzy multi-objective linearprogramming," vol. 37, pp. 9308-9323, 2013.

[23] O. M. I. D. Jadidi, S. Zolfaghari, and S. Cavalieri, "A new normalized goal programming model for multi-objective problems: A case of supplier selection and order allocation," International Journal of Production Economics, vol. 148, pp. 158-165, 2014.

[24] R. Narasimhan, S. Talluri, and S.K. Mahapatra, "Multiproduct, multicriteria model for supplier selection with product life-cycle considerations," vol. 37, pp. 577-603, 2006.

[25] K. Shaw, R. Shankar, S. S. Yadav, and L. S. Thakur, "Supplier selection using fuzzy AHP and fuzzy multi-objective linear programming for developing low carbon supply chain," EXPERT SYST APPL, vol. 39, pp. 8182-8192, 2012.

[26] K. S. Moghaddam, "Fuzzy multi-objective model for supplier selection and order allocation in reverse logistics systems under supply and demand uncertainty," vol. 42, pp. 6237-6254, 2015.

[27] D. Kannan, R. Khodaverdi, L. Olfat, A. Jafarian, and A. Diabat, "Integrated fuzzy multi criteria decision making method and multi-objective programming approach for supplier selection and order allocation in a green supply chain," Journal of Cleaner production, vol. 47, pp. 355-367, 2013.

[28] S. Deng, R. Aydin, C.K. Kwong, and Y. Huang "Integrated product line design and supplier selection: A multi-objective optimization paradigm," Computers and Industrial Engineering, vol. 70, pp. 150-158, 2014.

[29] S. DuHadway, S. Carnovale, and B. Hazen, "Under standing risk management for intentional supply chain disruptions: Risk detection, risk mitigation, and risk recovery," Annals of Operations Research, vol. 283, pp. 179-198, 2019.

[30] V. Gupta and D. Ivanov, "Dual sourcing under supply disruption with risk-averse suppliers in the sharing economy," International Journal of Production Research, vol. 58, pp. 291-307, 2020.

[31] M. A. Qureshi, S. Sohu, and M. A. Keerio, "The impacts of operational risks in the supply chain of construction projects in Malaysia," Tehnički vjesnik, vol.27, pp. 1887-1893, 2020.

[32] T. Wu, J. Blackhurst, and P. O'grady, "Methodology for supply chain disruption analysis," vol. 45, pp.1665-1682, 2007.

[33] B. Tomlin, "On the value of mitigation and contingency strategies for managing supply chain disruption risks," Management science, vol. 52, pp. 639-657, 2006.

[34] E. Shahvand, M. H. Sebt, and M. T. Banki, "Supply Chain Management Improvement through Value Engineering Approach in the Construction Industry," Amirkabir Journal of Civil Engineering, vol.45, pp. 31-40, 2015. (In Persian)

[35] A. Malek Kavkani, "Supply Chain Management and Optimal Selection of Materials in Civil Engineering Projects for Achieving Sustainable Development," Fourth National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, Tehran, 2016. (In Persian)

[36] E. Najafi, and H. Rajaei, "Supply Management of Materials (Supply Chain) in the Portfolio of Civil Projects,"Second National Conference on Engineering and Construction Management, Bandar Abbas, 2012. (In Persian)

[37] G. Mavrotas, "Effective implementation of the ε-constraint method in multi-objective mathematical programming problems," Applied mathematics and computation, vol. 213, pp. 455-465, 2009.

Journal of Supply Chain Management

Vol. 23, No. 72, 2021

The Development of a Model for Supply Chain Disruptions Management in Construction Projects

A. Kureh , M. Shahrokhi*

*Engineering department, University of kurdistan, Iran

(Received: 28/01/2022; Accepted: 30 /06/2021)

Abstract

The accomplishment of construction projects requires the use of a significant amount of human, financial, technical, and organizational resources, and any disruption in their supply chain directly threatens the project life and financial resources, and may even cause the project to stop. Thus, identifying the potential disorders, their consequences and risks, and developing strategies to deal with them is of great importance. This research develops one-objective and two-objective mathematical optimization models for the simultaneous selection of suppliers and disorder preventive solutions. The purpose of the first model is to minimize the total of four types of material purchase costs, project completion fines, project activity costs, and material transportation costs. The second model aims to minimize the project completion time and, therefore, the possible delay in the project delivery time. In addition to the direct cost of the fine, this delay significantly reduces the contractor's credit and may lead to the non-conclusion of other contracts. This study also shows how analyzing and comparing the problem-solving results in both single-objective and multi-objective models can help to understand the problem better. We have solved a numerical example with GAMS software and analyzed the sensitivity analysis of the model results to demonstrate that the proposed models are applicable.

Keywords: Supply Chain, Construction Projects, Supply Chain Disruptions, Supply risk, Financial Resources

* Corresponding Author E-mail: shahrokhi292@yahoo.com