

ارائه مدل برنامه‌ریزی تأمین کالا توأم با زمان‌بندی پروژه‌های با منابع محدود در شرایط اختلال در تأمین

ابراهیم تیموری^۱ | مسعود مصدق خواه^۲ | سعید مصدق خواه^۳

چکیده

در پروژه‌های ساخت و احداث، یکی از موضوعات کلیدی، آماده بودن تجهیزات، قطعات و اقلام مورد نیاز پروژه می‌باشد. اگر هر کدام از این موارد در زمان مورد نیاز، موجود نباشند، زمان‌بندی پروژه با اختلال مواجه شده و پروژه متحمل تأخیر در تحویل و هزینه می‌گردد. در این مقاله مدلی ارائه شده است که همزمان با زمان‌بندی پروژه، برنامه‌ریزی تأمین قطعات و اقلام مورد نیاز پروژه را نیز در شرایط وقوع اختلال انجام می‌دهد. در این برنامه‌ریزی، سناریوهای مختلف وقوع اختلال در هر یک از تأمین‌کنندگان با توجه به احتمال وقوع اختلال در هر تأمین‌کننده و همچنین احتمالات اختلال منطقه‌ای (نیمه‌فراگیر) و جهانی (فراگیر)، در نظر گرفته شده و زمان‌های صدور سفارش و تخصیص سفارش به تأمین‌کنندگان صورت می‌پذیرد. مدل‌سازی زمان‌بندی پروژه به صورت «زمان گسسته محور» و منابع از نوع «مصرفی» و به عبارت دیگر «تجدید ناپذیر» در نظر گرفته شده است و برنامه‌ریزی به منظور مواجهه با اختلال به صورت «سناریو محور» و «پیشگیرانه» و با ابزار «احتمال» صورت پذیرفته است. فرض بر این است که تصمیم‌گیرنده در شرایط «ریسک خنثی» قرار دارد. مدل طراحی شده یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط احتمالی می‌باشد و بر روی یک مطالعه موردی در یک پروژه واقعی با استفاده از ابزار CPLEX حل گردیده است. در انتها تحلیل حساسیت روی بعضی از پارامترهای مدل انجام شده است.

کلیدواژه‌ها: زمان‌بندی پروژه با منابع محدود، برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تأمین پروژه، زنجیره تأمین پروژه در شرایط اختلال، انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش

۱

سال اول

بهار و تابستان ۱۴۰۳

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۳/۰۵

صص: ۱۶۲-۱۳۱



۱. دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۳. دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران

مقدمه و بیان مسئله

در پروژه‌های ساخت و احداث^۱ خرید به موقع اقلام و تجهیزات مورد نیاز پروژه اهمیت زیادی دارد و در هزینه تمام شده و زمان انجام پروژه نقش ویژه‌ای ایفا می‌کند. همچنین تأخیرات به وجود آمده باعث از دست رفتن درآمدهای احتمالی شده و شاید آن پروژه حتی متحمل شکست گردد. لذا جدای از مباحث مهندسی و ساخت، مسئله خرید و در دسترس بودن به موقع اقلام پروژه بسیار حائز اهمیت می‌باشد. تأکید این مقاله بر برنامه‌ریزی تأمین قطعات و اقلام همزمان با زمان‌بندی فعالیت‌ها با در نظر گرفتن ریسک اختلال می‌باشد. اختلال پدیده‌ایست که صرف‌نظر از ماهیت آن باعث توقف و یا کند کردن روند اجرای فعالیت‌ها می‌شود. اختلال انواع متفاوتی دارد اما یکی از مهم‌ترین آن‌ها اتفاقی است که باعث بروز تأخیر یا نقصان در تأمین قطعات و اقلام مورد نیاز پروژه می‌گردد. به دلیل اینکه منابع مورد استفاده در پروژه - از جمله امکانات و تجهیزات، نیروی انسانی و منابع مالی - محدود است، زمان‌بندی پروژه باید با در نظر گرفتن این محدودیت‌ها صورت پذیرد ضمن اینکه ممکن است محدودیت منابع با ریسک بروز اختلال در خرید و آماده‌سازی اقلام مورد نیاز پروژه همراه گردد که در این صورت با مسئله‌ای جدید مواجه می‌شویم. در برخی موارد اگر اختلالی پدید آید علاوه بر اینکه باید برنامه زمان‌بندی پروژه اصلاح گردد، لازم است که برنامه تأمین کالا نیز بازنگری شود و بهترین برنامه جایگزین انتخاب گردد که به این نوع برنامه‌ریزی، برنامه‌ریزی واکنشی گویند.

در موارد دیگر که به آن برنامه‌ریزی پیشگیرانه گویند، در ابتدا با فرض اینکه اختلال رخ خواهد داد برنامه‌ریزی صورت می‌پذیرد که موضوع این تحقیق براساس نوع دوم می‌باشد و در آن تلاش خواهد شد که زمان‌بندی پروژه و برنامه‌ریزی تأمین اقلام - با فرض بروز اختلال در تأمین - به طور همزمان صورت پذیرد.

1 Construction projects

در این تحقیق دو مبحث «انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارشات» و «برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه با منابع محدود» با یکدیگر ترکیب شده‌اند و در نتیجه آن، مدلی یکپارچه ارائه شده است که در آن مقوله «اختلال» نیز با استفاده از ابزار «احتمالات» در نظر گرفته شده است. روشی که برای مدل‌سازی در این پژوهش استفاده شده است، «برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط احتمالی» می‌باشد. دلیل استفاده از روش پیش‌گفته لزوم بهره‌گیری از متغیرهای عدد صحیح و صفر و یک در مدل پیشنهادی می‌باشد.

اسمیت دنیلز و آکیولانو^[۱] به منظور ترکیب توابع زمان‌بندی و خرید و با هدف در دسترس‌پذیری همه منابع مورد نیاز پروژه و فعالیت‌ها، الگوریتمی به نام الگوریتم منابع محدود شده^۱ ارائه کردند؛ آن‌ها با استفاده از یک زمان‌بندی ابتکاری و با در نظر گرفتن منابع مصرفی و غیرمصرفی و نیز زمان تدارک، زمان‌بندی پروژه را به همراه برنامه‌ریزی احتیاجات آن ارائه دادند. اسمیت دنیلز^[۲] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط^۲ را به منظور دستیابی به زمان‌بندی بهینه فعالیت‌های پروژه و سفارشات مواد ارائه دادند. آن‌ها در مدل ارائه شده خود دو فرض - پرداخت‌ها به پیمانکاران در آخر پروژه و دسترسی به منابع غیرمصرفی و سرمایه نامحدود - را در نظر گرفتند.

دودین و الیم^[۳] به منظور بررسی مسئله PSMO^۳ یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را توسعه دادند. در این مدل فرض بر این است که منابع غیرمصرفی نامحدود می‌باشند. شیخ‌سجادی و دیگران^[۴] مسئله یکپارچه زمان‌بندی پروژه و سفارش مواد را با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله کردند. آن‌ها مقوله «تخفیفات شمار سفارش» را در مسئله خود مد نظر قرار داده‌اند. زورقی و دیگران^[۵] مسئله برنامه‌ریزی و زمان‌بندی فعالیت‌های پروژه و سفارشات مواد را با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله کردند. در این مدل فرض بر این است که منابع غیرمصرفی بدون

1 Constrained resource algorithm

2 Mixed Integer Programming model

3 Project Scheduling & Material Ordering

محدودیت هستند. فو[۶] مسئله ترکیبی چند روشی برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و سفارش‌دهی مواد برای پروژه‌های ساخت و احداث را با استفاده از ابزار برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فرموله کرده است. نیاکی و دیگران[۷] در مقاله‌ای کار قبلی خود را با اضافه کردن محدودیت منابع غیرمصرفی فرموله و حل کرده‌اند. شهسوار و دیگران[۸] تلفیق سیاست کلی تخفیف شمارش در تدارکات مواد مربوط به یک مسئله زمان‌بندی پروژه را با استفاده از مدل‌سازی ریاضی انجام داده‌اند. تبریزی و قادری[۹] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را به منظور مواجهه با مسئله زمان‌بندی پروژه و سفارش مواد ارائه داده‌اند. آن‌ها در این مدل تخفیفات شمار سفارش را در نظر گرفته‌اند. زورقی و دیگران[۱۰] مدلی را جهت برنامه‌ریزی و زمان‌بندی پروژه با منابع محدود و سفارش مواد در حالت چند روشه ارائه کرده‌اند. ژانگ و دیگران[۱۱] رویکردی دو مرحله‌ای را به منظور مسئله زمان‌بندی پروژه و سفارش مواد در پیش گرفتند. برزین‌پور و دیگران[۱۲] یک چارچوب یکپارچه شده برای PSMO با ملاحظات پایداری^۱ را ارائه داده‌اند. چارچوب ارائه‌شده دارای ۲ فاز می‌باشد: ۱- محاسبه سنج‌های اجتماعی و زیست‌محیطی تأمین‌کنندگان بالقوه منابع پروژه ۲- ایجاد و حل یک مدل ریاضی بر پایه داده‌های حاصل شده. موسوی[۱۳] یک زنجیره تأمین دو سطحی را شامل پیمانکار و تأمین‌کنندگان در نظر گرفت و هزینه‌های مربوط به پروژه و موجودی را برای هر دو عضو زنجیره کمینه‌سازی نمود. او محدودیت‌های مالی و محدودیت ظرفیت تأمین‌کنندگان را اعمال نمود. سپس با توجه به عدم قطعیت موجود در محیط پروژه، با استفاده از روش فازی، مدل به صورت فازی توسعه داده شده است.

رضا لطفی[۱۴] مسئله زمان‌بندی پروژه‌ها با تعیین سیاست سفارش‌گذاری مواد اولیه به صورت چند دوره‌ای را با کمک توسعه مدل کنترل موجودی روزنامه فروش چند دوره‌ای حل کرد. فهیمه شوروزی[۱۵] مسئله زمان‌بندی تأمین مواد پروژه را با در نظر گرفتن تخفیف

1 Sustainability considerations

نموی و محدودیت فضای انبار فرموله و حل کرده است. پرویزی صاریانی [۱۶] مسئله برنامه‌ریزی موجودی و زمان‌بندی فعالیت‌ها در زنجیره تأمین پروژه را با در نظر گرفتن هم‌زمان هزینه‌های پیمانکار و تأمین‌کنندگان مدل کرده است. او در این مدل روش‌های مختلف پرداخت، محدودیت منابع مصرفی و غیر مصرفی، تأمین‌کنندگان چندگانه و محدودیت ظرفیت تأمین‌کنندگان و پیمانکار را در نظر گرفته است. آرش خجسته [۱۷] مسئله زمان‌بندی فعالیت‌ها و تأمین پروژه (PSMO) را با ابزار برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و با مفروضات وجود تخفیف کلی، وجود چند تأمین‌کننده، چند کالایی و قیمت‌های متفاوت مدل کرده است.

ساویک [۱۸] سلسله مقالاتی را در مورد مبحث برنامه‌ریزی و زمان‌بندی زنجیره تأمین با در نظر گرفتن ریسک اختلال تحت شرایط گوناگون منتشر کرده است و نتایج حاصل از مقالات را در کتابی تحت عنوان «مدیریت اختلالات زنجیره تأمین با استفاده از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط احتمالی»^۱ به چاپ رسانده است. ترابی و دیگران [۱۹] به موضوع انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش استوار تحت ریسک‌های اختلال و عملیاتی پرداختند. آن‌ها مدلی را طراحی و از طریق یک راه حل ۵ مرحله‌ای حل و چند استراتژی پیشگیرانه را ارائه کرده‌اند. پراسانا و گوه [۲۰] به موضوع انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش با در نظر گرفتن ریسک اختلال پرداخته‌اند. آن‌ها در این مقاله دو فاز را برای مسئله خود تعریف کرده‌اند. در فاز ۱، به بحث ارزیابی و رتبه‌بندی تأمین‌کنندگان و در فاز ۲ به انتخاب تأمین‌کنندگان و تخصیص سفارشات می‌پردازند.

حمدی و دیگران [۲۱] طی یک مقاله‌ای با عنوان انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش با در نظر گرفتن ریسک اختلال، دو مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را ایجاد کرده‌اند. یکی برای تصمیم‌گیرنده ریسک‌خشی به منظور حداکثرسازی سود و دیگری برای تصمیم‌گیرنده ریسک‌گریز به جهت حداقل‌سازی شکست عملیاتی. سپس نتایج اتفاق افتاده در این

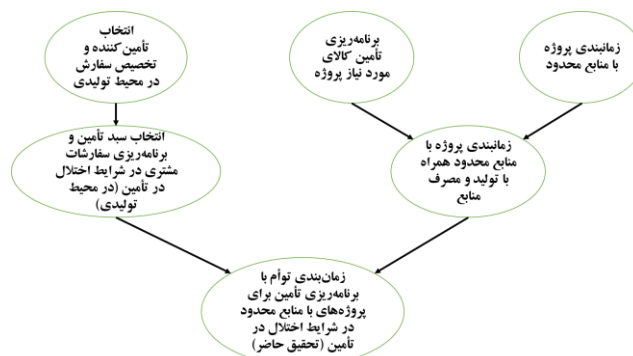
1 Supply chain disruption management using stochastic mixed integer programming (SMIP)

دو مدل را با هم مقایسه می‌کنند. مینا و سارماه [۲۲] مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش را در حالت وجود اختلال و با در نظر گرفتن تخفیفات شمار سفارش بررسی کرده‌اند. در این مقاله نویسندگان مدلی ریاضی و راه حل آن را ارائه داده‌اند. وحیدی و دیگران [۲۳] یک مدل برنامه‌ریزی ترکیبی احتمالی - امکان‌پذیری دوسطحی دوهدفه را جهت دستیابی به برنامه انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش پایدار تحت ریسک‌های عملیاتی و اختلال پدید آورده‌اند که در آن ابتدا بهترین معیارهای پایداری انتخاب و سپس نمره پایداری هر یک از تأمین‌کنندگان محاسبه می‌گردد. پس از آن نمره مقاومت شبکه تأمین هر یک از تأمین‌کنندگان محاسبه و سپس نتایج این‌ها به عنوان پارامتر وارد یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه می‌شوند.

خلیلی و دیگران [۲۴] یک مدل برنامه‌ریزی احتمالی سناریومحور دو مرحله‌ای امکان‌پذیری مختلط چند هدفه را ارائه داده‌اند تا مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارشات را در یک زنجیره بین‌المللی تحت ریسک‌های اختلال و عملیاتی مدیریت کنند. جوادی [۲۵] به موضوع تخصیص سفارش تحت شرایط اختلال پرداخته است. در این پژوهش دو دسته تأمین‌کننده قابل اطمینان و غیر قابل اطمینان در نظر گرفته شده و همچنین مدلی چند هدفه از جنس «برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط» معرفی گشته که با روش‌های مجموع وزن‌دار، برنامه‌ریزی تصادفی تحت سناریوبندی و برنامه‌ریزی آرمانی فازی چند گزینه‌ای بررسی شده است. عطائی [۲۶] با معرفی یک مدل برنامه‌ریزی مختلط عدد صحیح، به انتخاب یک پورتفولیوی تأمین تاب‌آور تحت شرایط ریسک اختلال می‌پردازد که از طریق کمینه نمودن ارزش در معرض ریسک شرطی بهینه می‌شود. در جدول ۱ خلاصه‌ای از مرور ادبیات تحقیق ذکر شده است.

تعریف مسأله

با بررسی ادبیات تحقیق در بخش قبل به طور خلاصه ارتباط تحقیق حاضر با تحقیقات قبلی به صورت شکل ۱ قابل مشاهده است:



شکل ۱- ارتباط تحقیق حاضر با تحقیقات قبلی

جدول ۱- خلاصه‌ای از مرور ادبیات تحقیق

ردیف	مرجع	نوع مسئله										نوع اختلال				نوع مواجهه با اختلال				ابزار مواجهه با اختلال				نوع مدل سازی				تایید هدف		روش حل	
		PSP	RCPSP	SS	OA	MOP	یکبارجه	همیشه	Su	Re	AD	Pv	Re	P-R	احتمالی	تقری	استمرار	Rec	تاریخ نگارش	یک هدفه	چند هدفه	Min	Max	دقیق	تکنیکی	فرایندی	سایر				
۱	[۱]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۲	[۲]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۳	[۳]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۴	[۴]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۵	[۵]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۶	[۶]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۷	[۷]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۸	[۸]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۹	[۹]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۱۰	[۱۰]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۱۱	[۱۱]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۱۲	[۱۲]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۱۳	[۱۳]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۱۴	[۱۴]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۱۵	[۱۵]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۱۶	[۱۶]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۱۷	[۱۷]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۱۸	[۱۸]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۱۹	[۱۹]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۲۰	[۱۲]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۲۱	[۱۳]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۲۲	[۱۴]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۲۳	[۱۵]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۲۴	[۱۶]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۲۵	[۱۶]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۲۶	[۱۷]	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				
۲۷	پژوهش حاضر	✓					✓	✓												✓	Cost						✓				

مسئله مورد نظر عبارت است از زمان‌بندی بخشی از یک پروژه ساخت و احداث به همراه برنامه‌ریزی تأمین یکی از اقلام پرکاربرد مورد نیاز آن پروژه که از نوع منابع «مصرفی» و به عبارت دیگر «تجدید ناپذیر» می‌باشد. تعداد m تأمین‌کننده برای این کالا وجود دارد که در مناطق مختلف واقع شده‌اند و هر کدام از آن‌ها ممکن است با اختلال مواجه شوند. هر تأمین‌کننده دارای ظرفیت ثابت و معلومی است که در کل زمان پروژه قابل تحویل می‌باشد. در هر سناریو، هر تأمین‌کننده یا به طور کامل دچار اختلال می‌شود و یا امکان تحویل کالا را تا اتمام ظرفیت خود دارد. بنابراین تعداد کل سناریوهای قابل بررسی برابر 2^m خواهد بود. سناریوی اول حالتی است که هیچکدام از تأمین‌کنندگان مختل نمی‌شوند و سناریوی آخر آن است که همه تأمین‌کنندگان مختل می‌شوند. تا قبل از وقوع اختلال، تمامی سفارشات مطابق سناریوی ۱ انجام می‌شود و در صورت بروز اختلال، برنامه تعیین شده برای سناریوی مربوطه باید اجرا شود. به منظور پاسخ‌دهی برای حالتی که تمامی تأمین‌کنندگان دچار اختلال شوند (سناریوی آخر) یا تأمین‌کنندگان مختل نشده پاسخگوی نیاز نباشند و جلوگیری از امکان‌ناپذیری جواب، یک تأمین‌کننده پشتیبان در نظر گرفته شده است که هیچگاه دچار اختلال نمی‌گردد اما تأمین از آن با هزینه‌های بسیار زیادتر از تأمین‌کنندگان عادی همراه است.

۱-۲- مفروضات مدل

۱. پروژه دارای « m » فعالیت می‌باشد. فعالیت‌های « 0 » و « $m+1$ » نیز به عنوان فعالیت‌های مجازی «شروع» و «پایان» در نظر گرفته می‌شوند؛
۲. فعالیت‌های پروژه غیرقابل انقطاع هستند یعنی اگر یک فعالیت شروع شد تا پایان انجام فعالیت، توقف آن مجاز نمی‌باشد؛
۳. طول دوره انجام فعالیت‌ها قطعی است؛
۴. یک فعالیت تنها در صورتی می‌تواند در یک دوره آغاز شود که کالای مورد نیاز آن در ابتدای آن دوره تأمین شده باشد؛

۵. ریسک تأمین به صورت احتمال هرگونه اختلال شامل «اختلال در هر تأمین‌کننده خاص، اختلال نیمه فراگیر (اختلال منطقه‌ای) و اختلال فراگیر» در نظر گرفته می‌شود؛
۶. مدل‌سازی زمان‌بندی پروژه به صورت «زمان گسسته محور» می‌باشد؛
۷. موعد تکمیل پروژه، زودترین زمان پایان آخرین فعالیت در نظر گرفته می‌شود؛
۸. دیرترین زمان‌های شروع و پایان فعالیت‌ها با توجه به افق برنامه‌ریزی تعیین می‌شوند، به عبارت دیگر امکان تکمیل پروژه تا زمان افق برنامه‌ریزی وجود دارد؛
۹. دریافت کالا از هر تأمین‌کننده در ابتدای دوره انجام می‌شود؛
۱۰. هزینه نگهداری به کالاهای باقی‌مانده در انتهای هر دوره تعلق می‌گیرد؛
۱۱. مدت زمان تحویل^۱ ثابت و معلوم در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برنامه سفارشات از تأمین‌کنندگان، زمان‌های دریافت کالا را مشخص می‌کنند و بدیهی است که زمان سفارش بایستی به میزان مدت تحویل به عقب کشیده شود؛
۱۲. برنامه‌ریزی به منظور مواجهه با اختلال به صورت «پیشگیرانه» و با ابزار «احتمال» صورت پذیرفته است؛
۱۳. مدل‌سازی در این مدل سناریو محور می‌باشد؛
۱۴. تصمیم‌گیرنده در شرایط «ریسک خنثی» قرار دارد، یعنی نه ریسک‌پذیر و نه ریسک‌گریز است و براساس ارزش انتظاری هزینه‌ها تصمیم می‌گیرد.

1 Lead time

۳- مدل پیشنهادی

با توجه به توضیحات فوق مدل پیشنهادی به شرح زیر است:

۳-۱- نمادها

مجموعه‌ها

$I = \{1, 2, \dots, n\}$	$i \in I$	مجموعه فعالیت‌های پروژه
$K = \{1, 2, \dots, m\}$	$k \in K$	مجموعه تأمین‌کنندگان
$T = \{1, 2, \dots, \bar{T}\}$	$t \in T$	مجموعه دوره‌های زمانی
$S = \{1, 2, \dots, \bar{S}\}$	$s \in S$	مجموعه سناریوهای اختلال
$R = \{1, 2, \dots, \bar{R}\}$	$r \in R$	مجموعه مناطق جغرافیایی

۳-۲- پارامترها

e_k	هزینه ثابت سفارش‌دهی از تأمین‌کننده k
o_k	قیمت خرید واحد کالا از تأمین‌کننده k
h	هزینه نگهداری هر واحد کالا در یک دوره برنامه‌ریزی
g	هزینه تأخیر در تحویل هر واحد کالا به ازای یک دوره برنامه‌ریزی
q_i	زمان پردازش فعالیت i
ES_i	زودترین زمان شروع فعالیت i
LS_i	دیرترین زمان شروع فعالیت i
D	زمان مقرری تکمیل پروژه
c_i	میزان مصرف فعالیت i از کالا
p_k	احتمال اختلال خاص تأمین‌کننده k
p^r	احتمال اختلال نیمه‌فراگیر در مجموعه تأمین‌کنندگان در منطقه r
p^*	احتمال اختلال فراگیر
P_s	احتمال سناریوی اختلال S
P_s^r	احتمال سناریوی اختلال S در منطقه r
π_k	احتمال هرگونه اختلال در تأمین‌کننده k
a_k^s	اگر در سناریوی اختلال S تأمین‌کننده k دچار اختلال شود ۱ در غیر این صورت صفر
B_k	ظرفیت تأمین‌کننده k

B	مقدار کل مورد نیاز از کالا در پروژه
K_s	تأمین کنندگانی که در سناریوی اختلال S دچار اختلال نشده‌اند
K^r	تأمین کنندگان منطقه r
τ_k	زمان تحویل تأمین کننده k

۳-۳- متغیرهای تصمیم

u_{kt}^s	اگر سفارش کالا از تأمین کننده k تحت سناریوی اختلال S در دوره t برنامه‌ریزی شود برابر ۱ و در غیر اینصورت برابر صفر است.
b_{kt}^s	مقدار کالایی که از تأمین کننده k تحت سناریوی اختلال S در دوره t برنامه‌ریزی t ، تأمین می‌شود.
x_{it}	اگر فعالیت i در دوره t برنامه‌ریزی شود برابر ۱ و در غیر اینصورت برابر صفر است.
S_i	زمان شروع فعالیت i
I_t^s	مقدار موجودی از کالا در آخر دوره برنامه‌ریزی t تحت سناریوی اختلال S

۳-۴. روابط مربوط به محاسبه احتمالات اختلال [۱۸]

اگر احتمال اختلال برای هر تأمین کننده را با π_k نشان دهیم، به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\pi_k = p^* + (1 - p^*)p^r + (1 - p^*)(1 - p^r)p_k \quad k \in K^r, r \in R \quad (۱)$$

احتمال سناریوی اختلال S به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_s = \begin{cases} (1 - p^*) \prod_{r \in R} P_s^r & \text{if } K_s \neq \emptyset \\ p^* + (1 - p^*) \prod_{r \in R} P_s^r & \text{if } K_s = \emptyset \end{cases} \quad (۲)$$

$$P_s^r = \begin{cases} (1 - p^r) \prod_{k \in K^r \cap K_s} (1 - p_k) \prod_{k \in K^r \setminus K_s} p_k & \text{if } K^r \cap K_s \neq \emptyset \\ p^r + (1 - p^r) \prod_{k \in K^r} p_k & \text{if } K^r \cap K_s = \emptyset \end{cases} \quad (۳)$$

۳-۵- تابع هدف

$$\begin{aligned} \text{Min } E^c = & \sum_s P_s \left[\sum_k \sum_t e_k u_{kt}^s \right. \\ & \left. + \sum_k \sum_t o_k b_{kt}^s + \sum_t h I_t^s \right] + g(S_{n+1} - \text{Deadline}) \end{aligned} \quad (۴)$$

این تابع از دو قسمت هزینه مربوط به تأمین و نگهداری و هزینه مربوط به جریمه تأخیر تشکیل شده است. به دلیل اینکه متغیرهای تصمیم مربوط به تأمین و نگهداری سناریو محور هستند احتمال هر سناریوی اختلال در مقدار هزینه‌ها ضرب شده است.

۶-۳- محدودیت‌ها

محدودیت‌های مربوط به مسئله زمان‌بندی پروژه:

$\sum_{t=ES_j}^{LS_j} tx_{jt} \geq \sum_{t=ES_i}^{LS_i} tx_{it} + q_i \quad \forall i, j \in E$	(۵)
$\sum_{t=ES_i}^{LS_i} x_{it} = 1 \quad \forall i \in I \cup \{n+1\}$	(۶)
$S_i = \sum_{t=ES_i}^{LS_i} tx_{it} \quad \forall i \in I \cup \{n+1\}$	(۷)
$ES_i \leq S_i \leq LS_i \quad \forall i \in I \cup \{n+1\}$	(۸)
$x_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \cup \{n+1\}, \forall t \in T$	(۹)
$x_{00} = 1$	(۱۰)

محدودیت‌های مربوط به بحث انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش:

$b_{kt}^s \leq Mu_{kt}^s \quad \forall k \in K, \forall t \in T, \forall s \in S$	(۱۱)
$\sum_k \sum_t b_{kt}^s = \sum_i c_i \quad \forall s \in S$	(۱۲)
$\sum_t b_{kt}^s \leq (1 - a_k^s) B_k \quad \forall k \in K, \forall s \in S$	(۱۳)
$\sum_s \sum_t P_s b_{kt}^s \leq (1 - \pi_k) B_k \quad \forall k \in K$	(۱۴)
$b_{kt}^s \geq 0, Integer \quad \forall k \in K, \forall t \in T, \forall s \in S$	(۱۵)
$u_{kt}^s \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall t \in T, \forall s \in S$	(۱۶)

در این قسمت ارتباط بین زمان‌بندی پروژه و مسئله تأمین از طریق تابع موجودی برقرار شده است:

$$I_t^s = I_{t-1}^s + \sum_k b_{kt}^s - \sum_i x_{it} c_i \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (17)$$

$$I_t^s \geq 0, \text{Integer} \quad \forall t \in T, \forall s \in S \quad (18)$$

$$I_0 = 0 \quad (19)$$

مدل پیش‌رو یک مدل یکپارچه زمان‌بندی و تأمین «سناریو محور» می‌باشد که در تابع هدف، احتمال هر سناریو دخیل است و نتایج خروجی مدل برای هر سناریو، متفاوت خواهد بود. در به‌دست آوردن احتمال وقوع هر سناریو، همانطور که در فرمول‌های (۲) و (۳) مشخص است «احتمالات اختلال در تأمین‌کننده‌ای خاص، اختلال نیمه‌فراگیر یک منطقه جغرافیایی خاص و اختلال فراگیر که تمام تأمین‌کنندگان را درگیر می‌کند»، در نظر گرفته می‌شود. این برای آن است که تمامی حالاتی که ممکن است باعث ایجاد اختلال در روند تأمین کالاها و اقلام مورد نیاز پروژه باشد، در نظر گرفته شود.

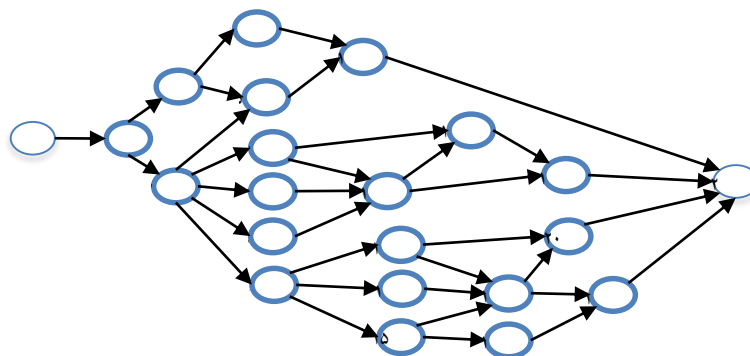
در این مدل با سه دسته محدودیت مواجه هستیم. اولین دسته، محدودیت‌های مرتبط با مبحث زمان‌بندی پروژه می‌باشد. محدودیت (۵) در این دسته لزوم رعایت پیش‌نیازی را می‌رساند. یعنی اگر یکی از دو فعالیت پیش‌نیاز دیگری باشد با وجود این محدودیت زمان‌بندی به گونه‌ای انجام می‌گردد که این پیش‌نیازی رعایت گردد. محدودیت (۶) نیز این اطمینان را حاصل می‌کند که شروع فعالیت i تنها در یک دوره می‌تواند اتفاق بیفتد. رابطه (۷) نیز نشان‌دهنده زمان شروع هر فعالیت می‌باشد. محدودیت (۸) نیز نشان می‌دهد که زمان شروع هر فعالیت باید بین زودترین و دیرترین زمان شروع ممکن برای آن فعالیت باشد. دسته دوم محدودیت‌ها، مربوط به تأمین می‌باشند. محدودیت (۱۱) از این دسته ارتباط بین متغیرهای تصمیم b_{kt} و u_{kt} را نشان می‌دهد به گونه‌ای که اگر متغیر تصمیم u_{kt} مقدار ۱ به

خود بگیرد، متغیر تصمیم b_{kt} می‌تواند مقدار بگیرد در غیر اینصورت، b_{kt} صفر می‌شود. محدودیت (۱۲) نشان می‌دهد که مجموع کل سفارشات کالا که در زمان‌های مختلف برنامه‌ریزی می‌گردد باید برابر با حجم کلی قلم کالای مورد نیاز پروژه باشد. رابطه (۱۳) نشان‌دهنده محدودیت ظرفیت هر تأمین‌کننده می‌باشد. در این محدودیت مقدار a_k نشان‌دهنده اختلال یا عدم اختلال تأمین‌کننده k تحت سناریوی اختلال s می‌باشد به طوریکه اگر اختلال در تأمین‌کننده k تحت سناریوی اختلال s رخ دهد مقدار ۱ و در غیر اینصورت مقدار صفر را به خود می‌گیرد. محدودیت (۱۴) نشان می‌دهد که ارزش انتظاری حجم کلی کالای خریداری شده از هر تأمین‌کننده k باید حداکثر برابر با ارزش انتظاری ظرفیت آن تأمین‌کننده باشد. متغیر b_{kt} ، یک متغیر عدد صحیح مثبت می‌باشد و متغیر u_{kt} ، یک متغیر صفر و یک می‌باشد. دسته سوم از محدودیت‌ها، مربوط به ارتباط بین زمان‌بندی و تأمین از طریق موجودی اقلام می‌باشد. رابطه (۱۷) موجودی کالاها را در آخر دوره t محاسبه می‌کند. متغیر I_t از جنس عدد صحیح مثبت می‌باشد. همچنین مقدار موجودی در زمان صفر هم صفر در نظر گرفته می‌شود.

۴- مطالعه موردی

پروژه مورد نظر شامل بیش از ۲۰۰۰۰ فعالیت است. به همین دلیل پرداختن به مسئله اصلی با توجه به وسعت و پیچیدگی آن خارج از توان این پژوهش است. لذا در این مجال به بخشی از فعالیت‌های این پروژه پرداخته می‌شود. وضعیت تأمین در این پروژه مانند روش سنتی است. یعنی ابتدا زمان‌بندی تهیه و طبق آن سفارشات مواد ارسال می‌شود. در مورد برخی مواد اولیه خاص (مانند سیم و کابل)، ابتدا نیاز به این مواد برآورد می‌شود، سپس به تأمین‌کننده پیشنهاد تأمین داده می‌شود. تأمین‌کننده نیز با توجه به توان و وضعیت خود، برنامه زمانی خود را برای تحویل مواد ارسال می‌کند. پیمانکار براساس برنامه تحویل مواد، زمان‌بندی فعالیت‌های خود را انجام می‌دهد.

اطلاعات این بخش از پروژه که شامل ۲۰ فعالیت است در جدول ۲ بیان می‌شود. همچنین شبکه فعالیت‌های این بخش از پروژه نیز در شکل ۲ رسم شده است.



شکل ۲- شبکه فعالیت‌های مطالعه موردی

۱-۴- داده‌های مسئله

داده‌های مسئله مورد نظر را در جداول ۲ تا ۶ می‌توان مشاهده نمود. افق زمانی در این مسئله ۵۰ هفته (معادل یک سال) هر هفته نیز ۶ روز کاری در نظر گرفته شده است. زودترین زمان تکمیل (موعد تحویل) پروژه که برابر زودترین زمان شروع فعالیت مجازی انتهایی است، برابر ۳۱ هفته است.

جدول ۲- اطلاعات مربوط به زمان‌بندی

شماره فعالیت	زمان (هفته)	فعالیت پیش-نیاز	نیاز ماده اولیه	زودترین زمان شروع	دیرترین زمان شروع
۰	۰	-	-	۰	۱۹
۱	۳	۰	۳۲۰۰	۰	۱۹
۲	۳	۱	۵۰۰۰	۳	۳۴
۳	۳	۱	۱۵۰	۳	۲۲
۴	۱۰	۲	۱۲۲۰۰	۶	۳۷
۵	۸	۳ و ۲	۶۷۵۰	۶	۳۹
۶	۴	۳	۱۶۲۵۰	۶	۳۱

■ ارائه مدل برنامه‌ریزی تأمین کالا توأم با زمان‌بندی پروژه‌های با منابع محدود ...

شماره فعالیت	زمان (هفته)	فعالیت پیش-نیاز	نیاز ماده اولیه	زودترین زمان شروع	دیرترین زمان شروع
۷	۸	۳	۵۴۰	۶	۲۷
۸	۳	۳	۱۵۰۰	۶	۳۲
۹	۳	۳	۸۰۰	۶	۲۵
۱۰	۳	۵۵۴	۶۷۵۰	۱۶	۴۷
۱۱	۳	۸۷۷۶	۷۲۰۰	۱۴	۳۵
۱۲	۸	۱۱۷۶	۱۸۰۰۰	۱۷	۳۸
۱۳	۸	۹	۲۳۰۰	۹	۲۸
۱۴	۵	۹	۳۰۰۰	۹	۳۱
۱۵	۸	۹	۹۰۰	۹	۲۸
۱۶	۴	۱۲۷۱۱	۷۵۰	۲۵	۴۶
۱۷	۹	۱۵۷۱۴۷۱۳	۵۴۰	۱۷	۳۶
۱۸	۸	۱۵	۹۰۰	۱۷	۳۸
۱۹	۴	۱۸۷۱۷	۲۵۰۰	۲۶	۴۶
۲۰	۵	۱۷۷۱۳	۲۱۰۰	۲۶	۴۵
۲۱	۰	۲۰۷۱۹۷۱۶۷۱۰	-	۳۱	۵۰

جدول ۳- اطلاعات مربوط به تأمین‌کنندگان

تأمین‌کننده	هزینه ثابت سفارش‌دهی	هزینه خرید هر واحد	ظرفیت تولید	احتمال اختلال خاص
تأمین‌کننده ۱	۱۰۰۰	۳۰	۷۰۰۰۰	۱۰٪
تأمین‌کننده ۲	۱۵۰۰	۲۵	۶۰۰۰۰	۵٪
تأمین‌کننده ۳	۲۰۰۰	۲۰	۸۰۰۰۰	۱۵٪
تأمین‌کننده ۴	۴۰۰۰	۱۵۰	۹۱۳۳۰	۰

جدول ۴- سایر اطلاعات مسئله

هزینه نگهداری هر واحد در هر واحد زمانی	هزینه جریمه تأخیر در هر واحد زمانی	حجم کلی مواد مصرفی مورد نیاز	زمان مقرر تکمیل پروژه
۱٪	۱۰۰	۳۰۱۳۳۰	۳۱

جدول ۵- تعداد مناطق، تأمین‌کنندگان زیر مجموعه و احتمال اختلال آن‌ها

منطقه	منطقه ۱	منطقه ۲
تأمین‌کنندگان	۱ و ۲	۳
احتمال اختلال	۵٪	۱۰٪
احتمال اختلال فراگیر	۲٪	

جدول ۶- سناریوهای اختلال

	تأمین‌کنندگان			۱ = بروز اختلال
	۱	۲	۳	۰ = عدم بروز اختلال
سناریو	۰	۰	۰	۱
	۰	۰	۱	۲
	۰	۱	۰	۳
	۱	۰	۰	۴
	۰	۱	۱	۵
	۱	۰	۱	۶
	۱	۱	۰	۷
	۱	۱	۱	۸

۲-۴- حل مسئله

ابتدا با توجه به روابط (۱) تا (۳) و احتمال مختل شدن هر تأمین‌کننده، احتمالات اختلال منطقه‌ای نیمه‌فراگیر و احتمال اختلال فراگیر و با در نظر گرفتن تأمین‌کنندگان زیر مجموعه هر منطقه، به وسیله نرم‌افزار Excel احتمال وقوع سناریوهای اختلال و احتمال مختل شدن هر تأمین‌کننده محاسبه شده و در جداول ۷ و ۸ آمده است.

جدول ۷- احتمال وقوع سناریوهای اختلال

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
احتمال	۰.۶۰۸۹	۰.۰۶۷۷	۰.۰۳۲۰	۰.۰۱۸۷۱	۰.۰۰۴۱۰	۰.۰۰۲۰۸	۰.۰۰۰۹۸	۰.۰۰۰۳۲۶

جدول ۸- احتمال مختل شدن هر تأمین کننده (با لحاظ کردن احتمال اختلال فراگیر و نیمه فراگیر)

تأمین کننده	تأمین کننده ۱	تأمین کننده ۲	تأمین کننده ۳	تأمین کننده ۴
احتمال اختلال	٪۱۶,۲۱	٪۱۱,۵۶	٪۲۵,۰۳	۰

سپس مسئله به وسیله نرم‌افزار GAMS و استفاده از حل‌کننده CPLEX، حل شده و اطلاعات مربوط به پاسخ آن در جداول ۹ تا ۱۰ آورده شده است.

جدول ٩- مقدار بهينه تابع هدف

مقدار بهینه تابع هدف ۲۵۶۹۲۵۰,۱۲۹

جدول ۱۰- زمان شروع فعالیت‌ها

فعاليات	أعمال شروعية
٠	٠
١	٠
٢	٩
٣	٣
٤	١٧
٥	١٧
٦	٦
٧	٦
٨	٦
٩	٦
١٠	٢٨
١١	١٤
١٢	١٧
١٣	٩
١٤	٩
١٥	٩
١٦	٢٨
١٧	١٧
١٨	١٧
١٩	٢٨
٢٠	٢٨
٢١	٣٣

بنابراین زمان تکمیل پروژه ۳۳ هفته است و چون موعد تحویل ۳۱ هفته بود، پروژه ۲ هفته تأخیر دارد.

جدول ۱۱- مقدار موجودی در انتهای هر دوره

	سناریو	
	۵	۹
	۱۳۰	۱۳۰
	۱۳۰	۱۰
موجودی	۱۳۰	۱۱
	۱۳۰	۱۲
	۱۳۰	۱۳

مقدار موجودی در باقی سناریوها صفر است.

جدول ۱۲- مقدار و زمان سفارش از تأمین‌کنندگان (تأمین‌کننده، زمان)

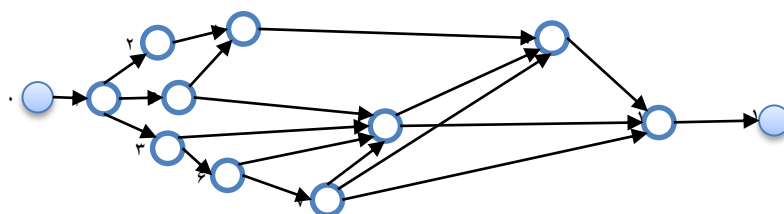
سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
(۰,۱)			۳۲۰۰	۳۲۰۰			۳۲۰۰	
(۳,۱)			۱۵۰	۱۵۰			۱۵۰	
(۶,۱)							۱۹۰۹۰	
(۹,۱)			۷۸۰	۱۱۲۰۰			۱۱۲۰۰	
(۱۴,۱)			۷۲۰۰	۷۲۰۰			۷۲۰۰	
(۱۷,۱)							۱۷۰۶۰	
(۲۸,۱)				۹۵۸۰			۱۲۱۰۰	
(۰,۲)						۳۲۰۰		
(۳,۲)	۱۵۰	۱۵۰				۱۵۰		
(۶,۲)				۱۹۰۹۰		۱۹۰۹۰		
(۹,۲)	۱۱۲۰۰	۱۱۲۰۰				۱۱۲۰۰		
(۱۴,۲)						۷۲۰۰		
(۱۷,۲)				۳۸۳۹۰		۷۰۶۰		
(۲۸,۲)				۲۵۲۰		۱۲۱۰۰		
(۰,۳)	۳۲۰۰	۳۲۰۰			۳۲۰۰			
(۳,۳)					۱۵۰			
(۶,۳)	۱۹۰۹۰	۱۹۰۹۰	۱۹۰۹۰	۱۹۰۹۰		۱۹۰۹۰		
(۹,۳)			۱۰۴۲۰					
(۱۴,۳)	۷۲۰۰	۷۲۰۰			۷۰۷۰			

■ ارائه مدل برنامه‌ریزی تأمین کالا توأم با زمان‌بندی پروژه‌های با منابع محدود ...

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
(۱۷,۳)	۳۸۳۹۰	۳۸۳۹۰	۳۸۳۹۰	۳۸۳۹۰	۳۸۳۹۰			
(۲۸,۳)	۱۲۱۰۰	۱۲۱۰۰	۱۲۱۰۰	۱۲۱۰۰	۱۲۱۰۰			
(۰,۴)							۳۲۰۰	
(۳,۴)							۱۵۰	
(۶,۴)							۱۹۰۹۰	
(۹,۴)					۱۱۳۳۰		۱۱۲۰۰	
(۱۴,۴)					۷۲۰۰			
(۱۷,۴)					۳۸۳۹۰	۲۱۳۳۰	۳۱۳۳۰	
(۲۸,۴)					۱۲۱۰۰			

۵- تحلیل حساسیت

به منظور تحلیل حساسیت مدل معرفی شده یک مسئله متوسط با ۱۰ فعالیت معرفی و حل می‌شود. شبکه آن به صورت زیر می‌باشد:



شکل ۳- شبکه فعالیت‌های مسئله مورد نظر برای تحلیل حساسیت
اطلاعات مسئله در جداول ۱۳ تا ۱۹ آمده است.

جدول ۱۳. اطلاعات مربوط به زمان‌بندی

شماره فعالیت	فعالیت‌های پیش‌نیازی	زمان	نیاز ماده اولیه	زودترین زمان شروع	دیرترین زمان شروع
۰	-	۰	-	۰	۵
۱	۰	۱	۷۰	۰	۵
۲	۱	۱	۱۰۰	۱	۱۵
۳	۱	۲	۱۰۰	۱	۶
۴	۱	۱	۹۰	۱	۱۲
۵	۴ و ۲	۱	۸۰	۲	۱۶
۶	۳	۲	۲۰۰	۳	۸
۷	۶	۳	۱۵۰	۵	۱۰
۸	۳ و ۶ و ۷	۴	۳۶۰	۸	۱۳
۹	۸ و ۷ و ۵	۶	۴۸۰	۱۲	۱۷
۱۰	۹ و ۸ و ۷	۲	۲۰۰	۱۸	۲۳
۱۱	۱۰	۰	-	۲۰	۲۵

جدول ۱۴- اطلاعات مربوط به تأمین

تأمین‌کننده	هزینه ثابت سفارش‌دهی	هزینه خرید	ظرفیت تولید	احتمال اختلال خاص
تأمین‌کننده ۱	۱۰۰	۲۰	۷۰۰	(۰٪-۱۰۰٪)
تأمین‌کننده ۲	۱۰۰	۲۰	۷۰۰	٪۵
تأمین‌کننده ۳	۱۰۰	۲۰	۷۰۰	٪۱۵
تأمین‌کننده ۴	۲۰۰	۱۰۰	۱۸۳۰	۰

در اینجا به دلیل اینکه قصد داریم تغییرات میزان سفارش از تأمین‌کنندگان را با تغییر در احتمال اختلال آن‌ها بررسی کنیم، اطلاعات هزینه‌های سفارش‌دهی و خرید و ظرفیت تولید هر سه تأمین‌کننده برابر در نظر گرفته شده است.

■ ارائه مدل برنامه‌ریزی تأمین کالا توأم با زمان‌بندی پروژه‌های با منابع محدود ...

جدول ۱۵- سایر اطلاعات مسئله

هزینه نگهداری هر واحد در هر واحد زمانی	هزینه جریمه تأخیر در هر واحد زمانی	حجم کلی مواد مصرفی مورد نیاز	زمان مقرر تکمیل پروژه
۱٪	۱۰۰	۳۶۳۰	۲۰

جدول ۱۶- تعداد مناطق و تأمین‌کنندگان زیر مجموعه آنها

منطقه	منطقه ۱	منطقه ۲
تأمین‌کنندگان	۱ و ۲	۳
احتمال اختلال	۵٪	۱۰٪
احتمال اختلال فراگیر	۲٪	

جدول ۱۷- سناریوهای اختلال

سناریو	۱ = بروز اختلال			۰ = عدم بروز اختلال			تأمین‌کنندگان		
	۱	۰	۰	۱	۰	۰	۱	۲	۳
سناریو ۱	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
سناریو ۲	۲	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
سناریو ۳	۳	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱	۰
سناریو ۴	۴	۰	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۱
سناریو ۵	۵	۱	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۰
سناریو ۶	۶	۱	۰	۱	۰	۱	۰	۰	۱
سناریو ۷	۷	۰	۱	۱	۰	۱	۱	۰	۱
سناریو ۸	۸	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱

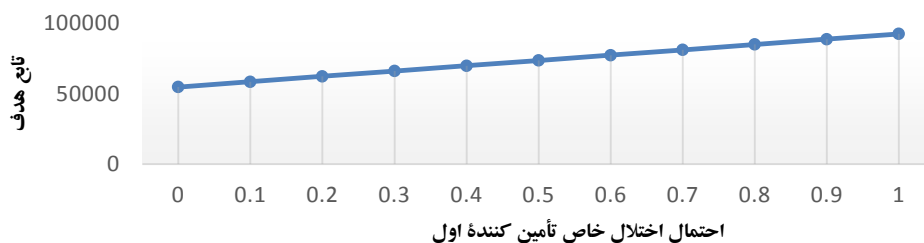
جدول ۱۸- احتمال وقوع سناریوهای اختلال

سناریو	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
احتمال	متغیر	متغیر	متغیر	متغیر	متغیر	متغیر	متغیر	متغیر

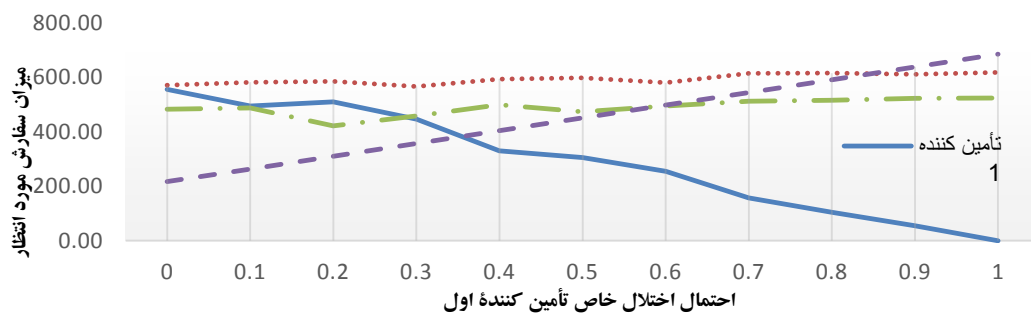
جدول ۱۹- احتمال مختل شدن هر تأمین‌کننده (با لحاظ کردن احتمال اختلال فراگیر و نیمه‌فراگیر)

تأمین‌کننده	تأمین‌کننده ۱	تأمین‌کننده ۲	تأمین‌کننده ۳	تأمین‌کننده ۴
احتمال اختلال	متغیر	متغیر	متغیر	صفر

در این قسمت می‌خواهیم با تغییر احتمال اختلال خاص یکی از تأمین‌کنندگان از ۰ تا ۱، به عنوان مثال تأمین‌کننده اول (هرکدام از تأمین‌کنندگان انتخاب شود تفاوتی ندارد)، تغییرات در تابع هدف و سفارشات نسبی از هر تأمین‌کننده را بررسی نماییم. لازم به ذکر است که به دلیل تغییر در احتمال اختلال خاص تأمین‌کننده اول، احتمالات سناریوها و مختل شدن هر تأمین‌کننده متغیر است. در شکل‌های ۴ و ۵ تغییرات تابع هدف و سفارش نسبی از هر تأمین‌کننده آورده شده است.



شکل ۴- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییر در احتمال اختلال خاص تأمین‌کننده اول



شکل ۵- تغییرات میزان مورد انتظار سفارشات از تأمین‌کنندگان

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با افزایش احتمال اختلال خاص تأمین‌کننده ۱، تابع هدف - که از جنس هزینه است - بیشتر می‌شود. این به خاطر آن است که به تدریج تأمین‌کننده چهارم جایگزین تأمین‌کننده اول شده و با توجه به هزینه‌های زیاد سفارش از تأمین‌کننده چهارم، هزینه‌های کلی سفارش‌دهی افزایش می‌یابد.

مطابق شکل ۵ هر چه احتمال اختلال خاص هر تأمین‌کننده بیشتر شود، میزان سفارش مورد انتظار از آن، کاهش می‌یابد تا به صفر می‌رسد. همچنین میزان سفارش مورد انتظار از تأمین‌کننده چهارم - پشتیبان - افزایش می‌یابد. میزان سفارش از تأمین‌کننده‌های ۲ و ۳ نیز با شیب بسیار کمی افزایش یافته است و به دلیل اینکه احتمال اختلال در تأمین‌کننده دوم کمتر از تأمین‌کننده سوم است، از تأمین‌کننده دوم مقدار بیشتری سفارش داده شده است.

حال همین مسئله را بار دیگر با فرض برابر بودن احتمال اختلال خاص تأمین‌کننده‌های ۲ و ۳ و به صورت همزمان برابر بودن احتمال اختلال مناطق ۱ و ۲ بررسی می‌کنیم. داده‌های تغییر یافته در جداول ۲۰ و ۲۱ نشان داده شده است. باقی اطلاعات مشابه قبل می‌باشد.

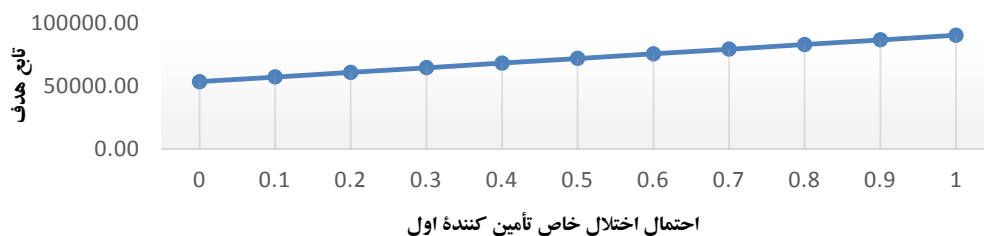
جدول ۲۰- احتمال اختلال خاص هر تأمین‌کننده

تأمین‌کننده	تأمین‌کننده ۱	تأمین‌کننده ۲	تأمین‌کننده ۳	تأمین‌کننده ۴
احتمال اختلال	متغیر از صفر تا ۱۰۰ درصد	۱۰٪	۱۰٪	۰

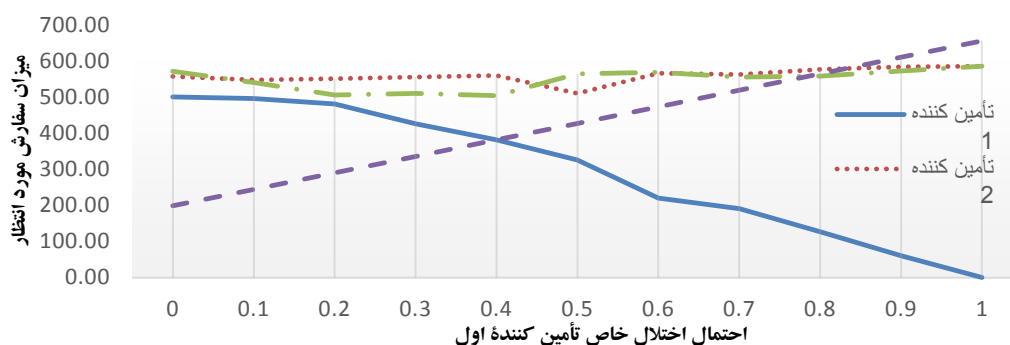
جدول ۲۱- احتمالات اختلال منطقه‌ای نیمه‌فراگیر

منطقه	منطقه ۱	منطقه ۲
احتمال اختلال	۵٪	۵٪

تغییرات تابع هدف و میزان سفارش مورد انتظار از تأمین‌کنندگان را در اشکال ۶ و ۷ مشاهده می‌نمایید:



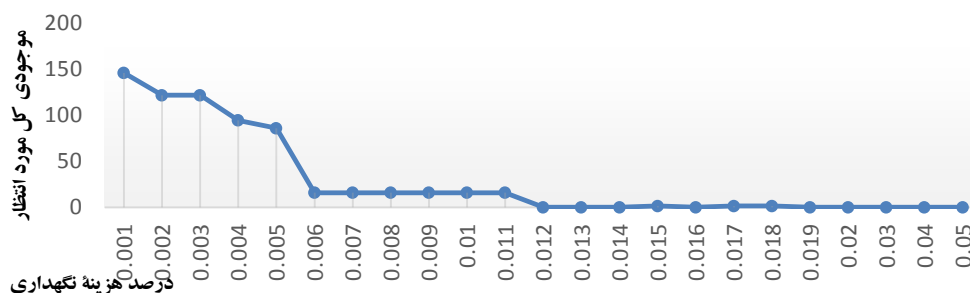
شکل ۶- تغییرات تابع هدف نسبت به تغییر در احتمال اختلال خاص تأمین کننده اول همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود همانند قبل با افزایش احتمال اختلال خاص تأمین کننده ۱، تابع هدف - که از جنس هزینه است - بیشتر می‌شود.



شکل ۷- تغییرات میزان مورد انتظار سفارشات از تأمین کنندگان در این نمودار مشخص است که هر چه احتمال اختلال خاص تأمین کننده اول بیشتر شود میزان سفارش مورد انتظار از تأمین کننده اول با شیب بیشتر از حالت قبل کاهش می‌یابد تا نهایتاً به صفر برسد. همچنین میزان سفارش مورد انتظار از تأمین کننده چهارم افزایش می‌یابد. اما میزان سفارش مورد انتظار از تأمین کنندگان دوم و سوم تقریباً ثابت می‌ماند. تفاوت این حالت با حالت قبل این است که در اینجا چون احتمال مختل شدن تأمین کنندگان دوم و سوم برابر شده است، سطح میزان سفارش مورد انتظار از این دو تأمین کننده تقریباً یکسان

می‌باشد. در صورتی که در حالت قبل سطح میزان سفارش مورد انتظار از تأمین‌کننده دوم - به دلیل احتمال کمترِ مختل شدن - بیشتر بود.

پارامتر دیگری که بر روی آن تحلیل حساسیت صورت می‌پذیرد، هزینه نگهداری می‌باشد. همانطور که در مدل بیان شد هزینه نگهداری به صورت درصدی از قیمت خرید هر واحد محصول به ازای هر واحد زمان نگهداری کالا، تعیین شده است. در شکل ۸ نتایج این بررسی بر مقدار میزان کل موجودی مورد انتظار نگهداری شده در هر بار حل مدل مشخص شده است:



شکل ۸- تغییرات کل موجودی مورد انتظار نسبت به تغییر در درصد هزینه نگهداری

اگر درصد هزینه نگهداری صفر باشد کل نیاز پروژه در همان ابتدا خریداری می‌شود و بنابراین مقدار موجودی نگهداری شده در سیستم بسیار بالا بوده که امکان نشان دادن آن در شکل نیست. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش درصد هزینه نگهداری مقدار موجودی نگهداری شده به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که نهایتاً در مقدار ۱,۳٪ به صفر می‌رسد. یعنی اگر درصد هزینه نگهداری در واحد زمان از این مقدار بیشتر شود مدل به گونه‌ای سفارشات را برنامه‌ریزی می‌کند که موجودی در سیستم نگهداری نشود.

۳-۴- راهکارهای مدیریتی

به دلیل اینکه با افزایش احتمال اختلال یکی از تأمین‌کنندگان هزینه‌های کل - به دلیل سفارش از بیشتر از تأمین‌کننده پشتیبان - افزایش می‌یابد، به منظور جلوگیری از افزایش

هزینه‌ها مدیران می‌توانند با تأمین کنندگان دیگر مذاکره داشته باشند و در طی آن با ارائه بسته‌های تشویقی، آن‌ها را ترغیب به افزایش ظرفیت تولید بکنند. راهکار دیگر در چنین شرایطی آن است که مدیران تیمی را متشکل از متخصصین در حوزه‌های گوناگون به محل تأمین کننده اعزام و مشکل آن را شناسایی و با ارائه بسته‌های حمایتی احتمال اختلال آن را کاهش دهند. این کار در صورتی امکان‌پذیر است که مدیران پروژه با تأمین کننده مورد نظر قراردادهای طویل‌مدت داشته باشند.

۵- نتیجه گیری

در حال حاضر در سازمان‌های پروژه محور اکثر پروژه‌ها به صورت (مهندسی - تدارک و تأمین - ساخت) انجام می‌شود. در بین این سه مرحله، بخش تدارک و تأمین کالا تأثیر عمده‌ای بر هزینه و زمان پروژه دارد. یکی از مسائلی که در این مقاله، تأکید بر برنامه‌ریزی تأمین قطعات و اقلام همزمان با زمان‌بندی فعالیت‌ها با در نظر گرفتن ریسک اختلال می‌باشد. در این مقاله تلاش شد که این مباحث حتی‌الامکان به شکلی مناسب با یکدیگر ترکیب شده و در نتیجه آن، مدلی یکپارچه ارائه شود که در آن مقوله «اختلال» نیز با استفاده از ابزار «احتمالات» در نظر گرفته شده باشد. روشی که برای مدل‌سازی در این پژوهش استفاده شده است، «برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط احتمالی» می‌باشد. دلیل استفاده از روش پیش گفته لزوم بهره‌گیری از متغیرهای حقیقی و صفر و یک در مدل پیشنهادی می‌باشد.

در مدل ارائه شده تلاش بر این بود که با در نظر گرفتن اختلال، فعالیت‌های پروژه و همچنین سفارش مواد به گونه‌ای توأمان برنامه‌ریزی و زمان‌بندی شوند که به همراه عدم دچار شدن به کمبود مواد و اقلام ضروری و مورد نیاز پروژه، هزینه‌های آن نیز حداقل گردد. تمرکز در این تحقیق مقابله با اختلال است و به این منظور رویکرد سناریو محور پیشگیرانه به صورت احتمالی، اتخاذ شد. در این رویکرد تمامی سناریوهایی که ممکن است پس از وقوع اختلال اتفاق بیفتد مورد توجه قرار گرفته و احتمال هر کدام محاسبه شد. در نهایت

این احتمالات محاسبه شده در تابع هدف و محدودیت‌ها تأثیر می‌گذارد. در محاسبه احتمالات سناریوهای اختلال، احتمال ۳ نوع اختلال خاص تأمین‌کنندگان، منطقه‌ای نیمه‌فراگیر، و فراگیر فرامنطقه‌ای نقش ایفا می‌کنند. در واقع هر نوع اختلالی که ممکن است برای یک تأمین‌کننده اقلام رخ دهد در نظر گرفته شده است. روال برخورد با پاسخ این مدل به این شکل است که قبل از شروع فعالیت‌های پروژه در صورتی که هنوز اختلالی رخ نداده باشد، ابتدا مطابق با سناریوی اول عمل می‌شود و اگر هر یک از سناریوهای دوم تا 2^k اتفاق افتاد مطابق با پاسخ آن سناریو عمل می‌شود. در غیر اینصورت اگر در حین انجام پروژه هر یک از سناریوها اتفاق افتاد برای فعالیت‌های آن مرحله به بعد مجدداً مدل اجرا شده و مطابق پاسخ آن، سفارش‌ها انجام می‌شود

یکی از دستاوردهای تحقیق حاضر، ارائه برنامه زمان‌بندی پروژه و برنامه تأمین کالای مورد نیاز آن به صورتی است که تاب‌آوری برنامه در شرایط بروز اختلال در تأمین کالای پروژه افزایش یابد.

نوآوری تحقیق را می‌توان در موارد زیر برشمرد:

۱. در تحقیقات گذشته، در نظر گرفتن اختلال در تأمین بیشتر در محیط‌های تولیدی مورد توجه بوده است اما در محیط‌های پروژه‌ای کمتر مورد بحث واقع شده است. این پژوهش می‌تواند یکی از پژوهش‌هایی باشد که از این ادبیات در موضوع زنجیره تأمین پروژه استفاده کرده است.
۲. از سوی دیگر در ادبیات زمان‌بندی و برنامه‌ریزی تأمین اقلام مورد نیاز پروژه با منابع محدود، برنامه‌ریزی تأمین در شرایط اختلال در تأمین‌کنندگان مورد توجه نبوده است. این پژوهش سعی کرده دو موضوع مذکور را با هم تلفیق نموده به صورت توأم در نظر بگیرد. همچنین این تحقیق باعث می‌شود که پژوهشگران هر چه بیشتر در این جهت گام بردارند و مسائل مربوط به این موضوع مهم را برطرف نمایند.

۳. در این پژوهش تلاش شده است که در هیچ شرایطی پروژه دچار اختلال و در نتیجه با شکست مواجه نشود چرا که برای هر سناریویی یک برنامه مخصوص به آن ترتیب داده شده است.
۴. در این مدل با در نظر گرفتن یک تأمین‌کننده پشتیبان با هزینه بالا، همه راه‌ها برای فرار از شکست پروژه باز گذاشته شده است. در نتیجه باعث می‌شود که آثار اختلال در تأمین منابع، در اجرای به موقع پروژه کاهش یابد.
- پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی حالت‌های دیگری به شرح زیر به منظور واقعی‌تر شدن مدل در نظر گرفته شود:
۱. غیر قطعی بودن طول دوره انجام فعالیت‌ها؛
 ۲. چندهدفه بودن مدل (اهدافی همچون سطح خدمت، زمان تکمیل پروژه و ...)
 ۳. مدل‌سازی زمان‌بندی پروژه به صورت «زمان پیوسته محور»؛
 ۴. تعریف ظرفیت هر تأمین‌کننده در واحد زمان؛
 ۵. برنامه‌ریزی به منظور مواجهه با اختلال به صورت «واکنشی»؛
 ۶. در نظر گرفتن تصمیم‌گیرنده در شرایط «ریسک‌گریز»؛
 ۷. استفاده از رویکرد دو مرحله‌ای در مدل‌سازی و حل، یعنی اینکه در ابتدا زمان‌بندی پروژه انجام شود و پس از آن با توجه به زمان‌بندی صورت پذیرفته و استفاده از رویکردهای تصمیم‌گیری و معرفی معیارهای مناسب که یکی از آن‌ها احتمال اختلال می‌باشد، انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش به آن‌ها انجام شود.
 ۸. در نظر گرفتن ارزش زمانی پول و روش‌های مختلف تأمین مالی پروژه؛
 ۹. اضافه کردن مسائل مربوط به واردات کالا از خارج، نحوه حمل و نقل آن‌ها و اختلالاتی که در این موارد ممکن است اتفاق بیفتد.

فهرست منابع

- تیموری، ابراهیم؛ موسوی، فائزه (۲۰۱۱). «ارائه یک الگوریتم ژنتیک برای مدل برنامه‌ریزی موجودی در زنجیره تأمین پروژه»، نشریه مهندسی صنایع.
- لطفی، رضا (۱۳۹۱). «زمان‌بندی پروژه‌ها با تعیین سیاست سفارش‌گذاری برای مواد اولیه به‌صورت چند دوره‌ای»، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، دانشگاه علم و فرهنگ، دانشکده فنی.
- شوروزی، فهیمه (۱۳۹۳). «زمان‌بندی تأمین مواد پروژه با در نظر گرفتن مدل تخفیف نموی»، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی صنایع.
- پرویزی صاریانی، مهدی؛ حسن‌پور، حسینعلی و نورنگ، احمد (۱۳۹۳). «برنامه‌ریزی موجودی و زمان‌بندی فعالیت‌ها در زنجیره تأمین پروژه و حل آن با یک روش کارا»، دانشگاه امام حسین (ع).
- خجسته، آرش؛ شادرخ، شهرام (۱۳۹۶). «زمان‌بندی تأمین مواد پروژه با فرض سفارش تدریجی مواد با در نظر گرفتن تخفیف کلی و وجود چند تأمین‌کننده»، دانشگاه صنعتی شریف.
- جوادی، فرناز (۱۳۹۶). «مدل‌سازی یک مسئله تخصیص سهم به تأمین‌کنندگان در حالت چند دوره‌ای با تقاضای فازی»، چهارمین کنفرانس سراسری پیشرفت‌های نوین در مهندسی صنایع، مدیریت، اقتصاد و حسابداری.
- عطائی، نسیم (۱۳۹۴). «انتخاب یک پرتفولیوی تأمین تحت شرایط ریسک اختلال به کمک الگوریتم‌های فراابتکاری (مورد مطالعه: شرکت لابراتوارهای داروسازی رازک)»، دانشگاه سمنان.
- smith-Daniels, D.E. and N.J. Aquilano,(1948), *Constrained resource project scheduling subject to material constraints*. Journal of Operations Management, 4(4): p. 369-387.
- Smith-Daniels, D.E. and V.L. Smith-Daniels,(1987). *Optimal project scheduling with materials ordering*. IIE transactions, 19(2): p. 122-129.

Dodin, B. and A. Elimam(2001). Integrated project scheduling and material planning with variable activity duration and rewards. *Iie Transactions*. **33**(11): p. 1005-1018.

SHEYKH, S.M., S. Shadrokh, and F. HASANZADEH,(2009). Concurrent project scheduling and material planning: A genetic algorithm approach.

Zoraghi, N., A.A. Najafi, and N.S.T. AKHAVAN,(2012). An integrated model of project scheduling and material ordering: a hybrid simulated annealing and genetic algorithm.

Fu, F.,(2014). Integrated scheduling and batch ordering for construction project. *Applied Mathematical Modelling*, **38**(2): p. 784-797.

Niaki, S., et al.(2015). Resource constrained project scheduling with material ordering: Two hybridized meta-heuristic approaches. *International Journal of Engineering*. **28**(6): p. 896-902.

Shahsavari, A., B. Abbasi, and N. Zoraghi,(2015). Material ordering with discount policy integrated with a project scheduling problem. in *2015 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. IEEE.

Tabrizi, B.H. and S.F. Ghaderi,(2016). Simultaneous planning of the project scheduling and material procurement problem under the presence of multiple suppliers. *Engineering optimization*. **48**(9): p. 1474-1490.

Zoraghi, N., et al.,(2017). Multi-mode resource-constrained project scheduling problem with material ordering under bonus-penalty policies. *Top*, **25**(1): p. 49-79.

Zhang, Y., et al.,(2019). Robust project scheduling integrated with materials ordering under activity duration uncertainty. *Journal of the Operational Research Society* p. 1-12.

Habibi, F., F. Barzinpour, and S.J. Sadjadi,(2019). A mathematical model for project scheduling and material ordering problem with sustainability considerations: A case study in Iran. *Computers & industrial engineering*, **128**: p. 690-710.

Sawik, T. and Sawik,(2018). Supply chain disruption management using stochastic mixed integer programming. Vol. 256. Springer.

Torabi, S., M. Baghersad, and S. Mansouri,(2015). *Resilient supplier selection and order allocation under operational and disruption risks*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, **79**: p. 22-48.

PrasannaVenkatesan, S. and M. Goh,(2016). *Multi-objective supplier selection and order allocation under disruption risk*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, p. 124-142.

Hamdi, F., et al.,(2016). *Supplier selection and order allocation under disruption risk*. IFAC-PapersOnLine, **49**(12): p. 449-454.

Meena, P.L. and S.P. Sarmah,(2016). *Supplier selection and demand allocation under supply disruption risks*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **83**(1-4): p. 265-274.

Vahidi, F., S.A. Torabi, and M. Ramezankhani,(2018). *Sustainable supplier selection and order allocation under operational and disruption risks*. Journal of Cleaner Production, **174**: p. 1351-1365.

Khalili, S.M., M. Yazdani, and F. Jolai,(2016). Supplier Selection and Order Allocation Planning Under Political and Disruption Risks. .

