پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰، صص ۹۷-۱۲۳
نوع مقاله: پژوهشی

ارائه یک مدل ریاضی در زنجیره تأمین هوشمند بر مبنای ICPT در محیط MTS

محمدباقر فخرزاد[۱*] ، مرضیه کشاورز[۲]، عباسعلی جعفری ندوشن[۳]

۱. استاد، دانشکده صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۲. دانشجوی دکتری، دانشکده صنایع، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۳. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه میبد، یزد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷ تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۰۲/۰۵

چکیده

با توجه به افزایش الزامات در صنعت تولید و پیشرفت سریع تکنولوژی، زنجیره تأمین‌های سنتی با چالش‌های زیادی مانند تغییرات تقاضا و مشکلات حمل‌ونقل مواجه هستند؛ به طوری‌که آن‌ها نیاز به انعطاف‌پذیری در ظرفیت، زمان تدارک و کانال‌های توزیع دارند. در این پژوهش برای غلبه بر مشکلات زنجیره تأمین سنتی، یک زنجیره تأمین مبتنی بر ICPT به نام زنجیره تأمین هوشمند در محیط تولیدی MTS شامل چهار سطح تولیدکننده، انبار، توزیع کننده و مشتری در نظر گرفته شده است که هدف حداکثرسازی سود و حداقل نمودن زمان تدارک می‌باشد. در ابتدا یک مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط برای این مسئله ارائه شد. سپس یک نمونه مسئله توسط روش محدودیت اپسیلون تقویت شده در نرم‌افزار GAMS حل و نتایج آن تحلیل گردید. در ادامه دو سناریوی افزایش تقاضا و اضافه شدن محصول جدید نیز مورد بررسی قرار گرفته شد که نتایج بیان‌کننده صحت مدل و کارآیی روش پیشنهادی می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: زنجیره تأمین هوشمند، انعطاف‌پذیری، محدودیت اپسبلون تقویت شده، Make to Stock، اطلاعات و ارتباطات و تکنولوژی تولید (ICPT).[۱]

---

* نویسنده مسئول مقاله E-mail: mfakhrzad@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

سازمان‌ها و افراد با گذر زمان و با ورود به قرن بیست و یک در حال تجربه پدیده‌های جدیدی هستند که به نوعی ریشه در سال‌های قبل دارد [۱]. در سال‌های اخیر پیچیدگی و الزامات در صنایع تولیدی افزایش یافته و افزایش رقابت جهانی، نوسانات بازار، تقاضا برای محصولات سفارشی و کوتاه شدن چرخه عمر محصول، چالش‌هایی را برای شرکت‌ها به وجود آورده است [۲]. به نظر می‌رسد روش‌های موجود در ایجاد ارزش نتوانند پاسخگوی این حجم از چالش‌ها باشند [۳]. از یک طرف الزامات موجود در صنعت تولید افزایش یافته و از طرف دیگر پیشرفت سریع فناوری، پتانسیل‌ها و فرصت‌های تجاری جدید را ایجاد نموده است؛ به طوری‌که فناوری‌های جدید در تولید با اطلاعات و ارتباطات ظهور کرده و همگرا می‌شوند که اطلاعات، ارتباطات و فناوری تولید[۱] نامیده می‌شود [۴]. سه انقلاب صنعتی تاکنون منجر به تغییر پارادایم در حوزه تولید شده است. با این حال صنایع به همراه پژوهشگران و سیاست‌گذاران در سراسر جهان، به طور فزاینده‌ای از چهارمین انقلاب صنعتی حمایت کرده‌اند [۵]. کشور آلمان که به عنوان یک تولیدکننده قوی در جهان شناخته شده است، صنعت ۴ را به عنوان بخشی از استراتژی پیشرفته خود راه‌اندازی کرد و ایده صنعت کاملاً یکپارچه را مطرح نمود [۶]. از آن زمان به بعد صنعت ۴ از اهمیت بیشتری برخوردار شده است و در دستور کار دیگر کشورها و حتی مجمع جهانی اقتصاد نیز قرار گرفت [۷]. صنعت ۴ که به عنوان ساخت هوشمند[۲] تولید هوشمند، صنعت یکپارچه و اینترنت صنعتی نیز نامیده می‌شود، گرایش به سمت دیجیتالی شدن، اتوماسیون محیط تولید و استفاده از فناوری اطلاعات و ارتباطات را بیان می‌کند [۸]. صنعت ۴ ویژگی‌های خود را مدیون مشخصات ICPT است و انتظار می‌رود ICPT که شامل اینترنت اشیا[۳] تجزیه‌وتحلیل داده‌های بزرگ[۴] سیستم‌های سایبری فیزیکی[۵] هوش مصنوعی و فناوری چاپ سه بعدی می‌باشد، در کارخانجات هوشمند مورد استفاده قرار گیرد [۴، ۹]. زنجیره تأمین، شبکه‌ای از سازمان‌هاست که با ایجاد ارتباط بین آن‌ها و انجام فعالیت‌ها و فرآیندها، به ارائه محصول و خدمات برای مشتریان اقدام می‌کند و از این طریق تولید ارزش می‌نماید [۱۰]. با افزایش رقابت در دنیای کسب‌وکار، طراحی مناسب ساختار زنجیره تأمین تأثیر بسیاری روی عملکرد کلی زنجیره و انعطاف‌پذیری و رقابت‌پذیری آن‌ها خواهد داشت [۱۱]. همچنین به دلیل تعاملات نزدیک و اجتناب‌ناپذیر واحدها در زنجیره تأمین، ایجاد هماهنگی و ارتباط سازنده

بین آن‌ها بیشتر از گذشته مورد توجه واقع شده است [۱۲، ۱۳]. پل ارتباطی بین حوزه‌های دیجیتال و فیزیکی در زنجیره تأمین IOT می‌باشد؛ به طوری که زنجیره تأمین را به یک شبکه هوشمند از اشیاء به هم پیوسته مستقل و باهوش تبدیل می‌کند که در زمان واقعی با یکدیگر تعامل و ارتباط برقرار می‌کنند [۱۴]. CPS از اسکنرهایی تشکیل شده است که آمارها، مدل‌های رایانه‌ای و داده‌های واقعی حاصل از سیستم‌های فیزیکی را اسکن و با یکدیگر ترکیب می‌کند و با مدل‌سازی واکنش یک سیستم تحت سناریوهای مختلف جهت تصمیم‌گیری در زمان واقعی از آن‌ها استفاده می‌نماید [۱۵]. فناوری چاپ سه بعدی افق جدیدی را در ساخت هوشمند ایجاد می‌کند؛ به طوری که برای سفارشی‌سازی، نمونه‌سازی و ساخت قطعات یدکی با سرعت و تولید در محل، انعطاف‌پذیر است و باعث صرفه‌جویی در زمان تولید و هزینه می‌گردد [۹]. تمام مؤلفه‌ها در زنجیره تأمین مانند پرسنل، ماشین‌آلات و تجهیزات، حمل‌ونقل و محصولات، می‌توانند توسط ICPT به یکدیگر متصل و همگرا شده و با یکدیگر اطلاعات واقعی را تبادل کنند [۴]. اطلاعات با سرعت جمع‌آوری، طبقه‌بندی و تجزیه‌وتحلیل می‌شوند، سپس در اختیار اعضای زنجیره تأمین قرار می‌گیرد. در واقع ICPT با اشتراک اطلاعات در مراحل مختلف، هماهنگی میان اعضای زنجیره تأمین و کارآیی آن‌ها را افزایش می‌دهد. در این تحقیق، برای غلبه بر مشکلات زنجیره تأمین سنتی و حل چالش‌های موجود، با استفاده از ICPT و پلت فرم مجازی و جمع‌آوری اطلاعات همه اعضای زنجیره تأمین همگرایی هر چه بیشتر زنجیره تأمین ایجاد می‌شود.

در ادامه و در بخش دوم، برخی از تحقیقات انجام گرفته در زمینه زنجیره تأمین هوشمند و صنعت ۴ معرفی شده است. در بخش سوم تعریف مسئله و مدل ریاضی ارائه شده است. روش حل و نتایج محاسباتی و تجزیه‌وتحلیل آن به ترتیب در بخش چهارم و پنجم ذکر می‌گردد. در نهایت، نتیجه‌گیری و پیشنهادات در بخش ششم ارائه شده است.

۲- ادبیات موضوع

اخیراً با توجه به ویژگی‌های صنعت ۴ و چالش‌های موجود در زنجیره تأمین سنتی مانند افزایش ناگهانی تقاضا، عدم هماهنگی، مشکلات حمل‌ونقل و تأخیر در تحویل کالا، توجه زیادی به صنعت ۴ و زنجیره تأمین هوشمند با استفاده از ICPT به منظور بهبود عملکرد زنجیره تأمین نشان داده شده است. اوح و جوآنگ[۱] [۴] در مطالعه خود زنجیره تأمین

هوشمند مبتنی بر ICPT را بررسی و یک مدل برنامه‌ریزی جهت موازنه بین Lead time و سود ارائه نمودند که با آزمایش‌های عددی اعتبار مدل را تأیید کردند. فویال و همکاران[۱][۹] در تحقیق خود ابتدا سیستم تولید هوشمند و الزامات آن را مطالعه نموده، سپس شکاف بین سیستم تولید فعلی و تولید هوشمند را تجزیه‌وتحلیل کردند. در ادامه فناوری‌های مورد نیاز تولید هوشمند، تأثیرات، فرصت‌ها و چالش‌های اجرای آن مورد بحث قرار گرفته است. لی و همکاران[۲][۱۶] یک معماری پنج لایه یکپارچه برای اجرای سیستم‌های سایبری فیزیکی در راستای ایجاد یک سیستم تولیدی صنعت ۴ پیشنهاد دادند که یک راهنمای عملی و کاربردی جهت افزایش کیفیت محصول و قابلیت اطمینان سیستم ارائه می‌نماید. زوادزکی و ژیویکی[۳] [۱۷] مفاهیم طراحی محصول و کنترل تولید هوشمند را به عنوان مهم‌ترین عناصر ایجاد یک کارخانه هوشمند بررسی نموده و نشان دادند که این مفاهیم در تحقق استراتژی سفارشی-سازی انبوه نقش کلیدی دارند. ایوانف و همکاران[۴][۱۸] یک مدل پویا و یک الگوریتم برای برنامه‌ریزی کوتاه مدت زنجیره تأمین در کارخانه هوشمند صنعت ۴ پیشنهاد دادند. لئو و همکاران[۵] [۱۹] تولید هوشمند بدون انبار را تعریف و به بررسی اصول، شیوه‌ها و فناوری‌های اصلی آن پرداخته‌اند. همچنین یک پلت فرم تولید هوشمند بدون انبار را به کمک IOT توسعه دادند. ادگار و پیستیکوپولوس[۶][۲۰] تولید هوشمند و بهره‌وری انرژی را مورد بررسی قرار داده و با در نظر گرفتن سه مطالعه موردی نشان دادند که استفاده از فناوری اطلاعات، بهینه‌سازی بی‌سابقه‌ای را به همراه خواهد داشت.

لو و ونگ[۷][۲۱] در تحقیق خود نقشه راه فناوری را از طریق مصاحبه با ۳۰ صنعت تولید هوشمند از کشورهای مهم تهیه نمودند؛ به طوری‌که تکنولوژی‌های غالب در تولید هوشمند و روند توسعه فناوری‌های در حال ظهور را نشان می‌دهد. ژنگ و همکاران[۸][۲۲] در تحقیق خود یک زنجیره تأمین دو سطحی را بررسی کردند که اطلاعات مربوط به تقاضا و ظرفیت از طریق IoT و big data بین تولیدکننده و خرده‌فروش به اشتراک گذاشته می‌شود. آن‌ها نشان دادند که با اشتراک اطلاعات، همکاری بین خرده‌فروش و تولیدکننده به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که باعث بهبود سود زنجیره در حدود ۱۶٪ می‌گردد. گلس و کلیمان[۹] [۲۳] تحلیل کیفی کارخانه هوشمند و صنعت ۴ را از طریق مصاحبه با مدیران هفت صنعت مختلف مورد بررسی قرار دادند که نتایج نشان از تأثیر مثبت صنعت ۴ روی عملکرد کارخانه‌ها و زنجیره تأمین دارد. عبدالباسط و همکاران[۱۰][۲۴] چارچوبی برای مدیریت

زنجیره تأمین براساس فناوری IOT و FRID پیشنهاد نمودند که قادر به شناسایی محصولات، ردیابی آن‌ها و ارائه اطلاعات کامل از چرخه عمر کالاها به مدیران می‌باشد. این چارچوب با حذف واسطه‌ها و ایجاد ارتباط مستقیم بین بخش‌های مختلف زنجیره باعث کاهش هزینه و زمان و افزایش رضایت مشتریان شده است.

با توجه به اهمیت ICPT در زنجیره تأمین، در این مقاله یک زنجیره تأمین هوشمند در محیط تولیدی MTS[1] که شامل چهار سطح تولید کننده، انبار، توزیع کننده و مشتری می‌باشد مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف در این زنجیره، حداکثرسازی سود و حداقل نمودن زمان تدارک[2] می‌باشد. در ابتدا یک مدل ریاضی برای مسئله ارائه خواهد شد، سپس مدل با روش محدودیت اپسیلون حل و نتایج آن ارائه می‌گردد.

۳- تعریف مسئله و مدل‌سازی

در این بخش مسئله موردنظر و نمادهای آن تعریف و بر اساس آن مدل‌سازی انجام می‌گیرد. در این مقاله، یک زنجیره تأمین عملیاتی هوشمند در یک محیط تولیدی MTS شامل چهار سطح تولیدکننده، انبار، توزیع کننده و مشتری در نظر گرفته شده است. تمام اعضای زنجیره تأمین با استفاده از ICPT و پلت فرم مجازی به یکدیگر متصل شده و با اشتراک اطلاعات به صورت بلادرنگ، همکاری و هماهنگی بین اعضای زنجیره و مراحل آن افزایش می‌یابد. هدف در این زنجیره حداکثرسازی سود و حداقل نمودن زمان تدارک می‌باشد. پارامتر تقاضا با استفاده از ICPT تخمین زده شده و زنجیره تأمین ظرفیت کافی برای برآورده سازی همه تقاضاها را دارد. براین اساس مفروضات مسئله به شرح زیر است:

- تولید در یک محیط *MTS* صورت گرفته است.
- با توجه به فعالیت زنجیره تأمین در یک محیط تولیدی *MTS*، هزینه نگهداری درنظر گرفته شده است.
- پیش‌بینی تقاضا با استفاده از *ICPT* صورت گرفته و کلیه تقاضاها برآورده می‌شوند.
- کمبود مجاز است؛ به طوری‌که می‌تواند در انبار و توزیع کننده اتفاق افتد و به ترتیب توسط تولیدکننده و انبار قابل تأمین می‌باشد.
- زنجیره تأمین شامل چهار سطح تولیدکننده، انبار، توزیع‌کننده، و مشتری است.

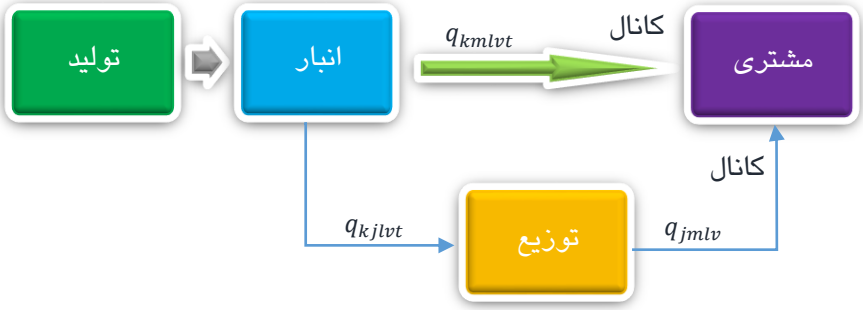
- امکان تأمین کالا به دو صورت آنلاین (مستقیم از انبار) و آفلاین (از توزیع کننده) برای مشتری امکان‌پذیر است.
- نوع محصول و قیمت برای مشتری در هر دو حالت آنلاین و آفلاین یکسان است.
- همه پارامترها از جمله قیمت، هزینه‌ها و ... قطعی و از پیش تعیین‌شده است.
- افق برنامه‌ریزی چند دوره‌ای در نظر گرفته شده است.
- زمان و هزینه حمل‌ونقل متناسب با مقدار کالای حمل‌ونقل شده است.
- با توجه به مسیرهای توزیع، چهار نوع حمل‌ونقل و در نتیجه چهار نوع هزینه برای آن در نظر گرفته شده است:
  - ✓ حمل‌ونقل از تولیدکننده به انبار
  - ✓ حمل‌ونقل از انبار به توزیع کننده
  - ✓ حمل‌ونقل از توزیع کننده به مشتری
  - ✓ حمل‌ونقل از انبار به مشتری

شبکه زنجیره تأمین مورد نظر براساس ویژگی‌های بیان شده، در شکل ۱ طراحی شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، این زنجیره تأمین متفاوت از زنجیره تأمین سنتی است؛ به طوری‌که مشتری می‌تواند محصولات را به دو صورت زیر خریداری کند:

۱. خریداری محصول به صورت مستقیم و از طریق یک کانال آنلاین از انبار
۲. خریداری محصول به صورت غیرمستقیم و از طریق کانال آفلاین از توزیع کننده

این مسئله با وجود دو نوع فروش آنلاین و آفلاین، یک زنجیزه تأمین هوشمند کاربردی و عملیاتی است که برای بسیاری از فروشگاه‌ها در دنیای واقعی مناسب و قابل اجزا است.

شکل ۱. شبکه زنجیره تأمین و انواع کانال‌ها



۳-۱- نمادگذاری مساله

برای مدل‌سازی مسئله از نمادهای زیر استفاده شده است.

اندیس‌ها

i	اندیس تولیدکننده $(i=1,2,\dots,I)$
j	اندیس توزیع کننده $(j=1,2,\dots,J)$
k	اندیس انبار $(k=1,2,\dots,K)$
m	اندیس مشتری $(m=1,2,\dots,M)$
l	اندیس محصول $(l=1,2,\dots,L)$
v	اندیس وسیله حمل‌ونقل $(r=1,2,\dots,R)$
t	اندیس دوره زمانی $(t=1,2,\dots,T)$

پارامترها

CB_{iklvt}	هزینه تأمین کمبود محصول l از تولید کننده i به انبار k با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
CB_{kjlvt}	هزینه تأمین کمبود محصول l از انبار k به توزیع‌کننده j با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
TB_{iklvt}	زمان تأمین کمبود محصول l از تولید کننده i به انبار k با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
TB_{kjlvt}	زمان تأمین کمبود محصول l از انبار k به توزیع کننده j با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
H_{klt}	هزینه نگهداری محصول l در انبار k در دوره t
H_{jlt}	هزینه نگهداری محصول l در در مرکز توزیع jدر دوره t
LT_{iklvt}^{up}	کران بالا برای زمان تدارک مجاز محصول l از تولیدکننده i به انبار k با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t

LT^{up}_{kjlvt}	کران بالا برای زمان تدارک مجاز محصول l از انبار k به توزیع کننده j با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
LT^{up}_{kmlvt}	کران بالا برای زمان تدارک مجاز محصول l از انبار k به مشتری m با وسیله حمل-ونقل v در دوره t
LT^{up}_{jmlvt}	کران بالا برای زمان تدارک مجاز محصول l از توزیع کننده j به مشتری m با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
LT^{max}_{iklvt}	حداکثر زمان تدارک مجاز برای محصولl از تولیدکننده i به انبار k با وسیله حمل-ونقل v در دوره t
LT^{max}_{kjlvt}	حداکثر زمان تدارک مجاز برای محصولl از انبار k به توزیع کننده j با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
LT^{max}_{kmlvt}	حداکثر زمان تدارک مجاز برای محصولl از انبار k به مشتری m با وسیله حمل-ونقل v در دوره t
LT^{max}_{jmlvt}	حداکثر زمان تدارک مجاز برای محصول l از توزیع کننده j به مشتری m با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
tt_{ikvt}	زمان حمل‌ونقل از تولید کننده i به انبار k با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
tt_{kjvt}	زمان حمل‌ونقل از انبار k به توزیع کننده j با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
tt_{kmvt}	زمان حمل‌ونقل از انبار k به مشتری m با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
tt_{jmvt}	زمان حمل‌ونقل از توزیع کننده j به مشتری m با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
P_{kml}	قیمت فروش هر واحد محصول l از انبار k به مشتری m
P_{jml}	قیمت فروش هر واحد محصول l از توزیع کننده j به مشتری m
P_{kjl}	قیمت فروش هر واحد محصول l از انبار k به توزیع کننده j
P_{ikl}	قیمت فروش هر واحد محصول l از تولید کننده i به انبار k
t_{ikvt}	هزینه حمل‌ونقل از تولید کننده i به انبار k با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t

t_{kjvt}	هزینه حمل‌ونقل از انبار k به توزیع کننده j با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
t_{jmvt}	هزینه حمل‌ونقل از توزیع کننده j به مشتری m با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
t_{kmvt}	هزینه حمل‌ونقل از انبار k به مشتری m با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
a_{ilt}^{+}, a_{ilt}^{-}	میزان ممکن افزایش یا کاهش ظرفیت محصول l برای تولید کننده i در دوره t
b_{jlt}^{+}, b_{jlt}^{-}	میزان ممکن در افزایش یا کاهش ظرفیت محصول l برای توزیع کننده j در دوره t
c_{klt}^{+}, c_{klt}^{-}	میزان ممکن در افزایش یا کاهش ظرفیت محصول l برای انبار k در دوره t
$ac_{ilt}^{+}, ac_{ilt}^{-}$	هزینه افزایش یا کاهش ظرفیت محصول l برای تولید کننده i در دوره t
$bc_{jlt}^{+}, bc_{jlt}^{-}$	هزینه افزایش یا کاهش ظرفیت محصول l برای توزیع کننده j در دوره t
$cc_{jlt}^{+}, cc_{jlt}^{-}$	هزینه افزایش یا کاهش ظرفیت محصول l برای انبار k در دوره t
cp_{ilt}	ظرفیت فعلی تولیدکننده i برای محصول l در دوره t
cp_{jlt}	ظرفیت فعلی توزیع کننده j برای محصول l در دوره t
cp_{klt}	ظرفیت فعلی محصول l در انبار k در دوره t
d_{mlt}	مقدار تقاضای مشتری m برای محصول l در دوره t
CP_{it}	ماکزیمم ظرفیت تولیدکننده i در دوره t
CP_{jt}	ماکزیمم ظرفیت توزیع کننده j در دوره t
CP_{kt}	ماکزیمم ظرفیت انبار k در دوره t
st_{ivt}	زمان آماده‌سازی تولیدکننده i برای ارسال با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
st_{jvt}	زمان آماده‌سازی توزیع کننده j در ارسال با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t
st_{kvt}	زمان آماده‌سازی انبار k برای ارسال با وسیله حمل‌ونقل v در دوره t

متغیرهای تصمیم

I_{klt}	سطح موجودی محصول l در انبار k در دوره t
I_{jlt}	سطح موجودی محصول l برای توزیع کننده j در دوره t
B_{klt}	مقدار کمبود محصول l در انبار k در دوره t
B_{jlt}	مقدار کمبود محصول l در توزیع کننده j در دوره t
q_{iklvt}	مقدار محصول l ارسال شده از تولیدکننده i به انبار k با وسیله v در دوره t
q_{kjlvt}	مقدار محصول l ارسال شده از انبار k به توزیع کننده j با وسیله v در دوره t
q_{jmlvt}	مقدار محصول l ارسال شده از توزیع کننده j به مشتری m با وسیله v در دوره t
q_{kmlvt}	مقدار محصول l ارسال شده از انبار k به مشتری m با وسیله v در دوره t
X_{iklvt}	اگر محصول l از تولید کننده i به انبار k با وسیله v در دوره t تحویل داده شود ۱، در غیر این صورت ۰
X_{kjlvt}	اگر محصول l از انبار k به توزیع کننده j با وسیله v در دوره t تحویل داده شود ۱، در غیر اینصورت ۰
X_{jmlvt}	اگر محصول l از توزیع کننده j به مشتری m با وسیله v در دوره t تحویل داده شود ۱، در غیر اینصورت ۰
X_{kmlvt}	اگر محصول l از انبار k به مشتری m با وسیله v در دوره t تحویل داده شود ۱، در غیر این صورت ۰
XB_{iklvt}	اگر کمبود محصول l در انبار k توسط تولیدکننده i با وسیله v در دوره t تأمین شود ۱، در غیر این صورت ۰
XB_{kjlvt}	اگر کمبود محصول l برای توزیع کننده j توسط انبار k با وسیله v در دوره t تأمین شود ۱، در غیر این صورت ۰
y_{ilt}	اگر تولیدکننده i محصول l را در دوره t تولید کند ۱، در در غیر این صورت ۰

y_{jlt}	اگر توزیع کننده j محصول l را در دوره t توزیع کند ۱، در غیر این صورت ۰
y_{klt}	اگر انبار k محصول l را در دوره t ارسال کند ۱، در عیر این صورت ۰
$cp^{\#}_{ilt}$	ظرفیت برنامه‌ریزی شده محصول l برای تولیدکننده i در دوره t
$cp^{\#}_{jlt}$	ظرفیت برنامه‌ریزی شده محصول l برای توزیع کننده j در دوره t
$cp^{\#}_{klt}$	ظرفیت برنامه‌ریزی شده محصول l برای انبار k در دوره t
$cp^{+}_{ilt}, cp^{-}_{ilt}$	اگر ظرفیت تولیدکننده i برای محصول l در دوره t افزایش یا کاهش یابد ۱، در غیر این صورت ۰
$cp^{+}_{jlt}, cp^{-}_{jlt}$	اگر ظرفیت توزیع کننده j برای محصول l در دوره t افزایش یا کاهش یابد ۱، در غیر این صورت ۰
$cp^{+}_{klt}, cp^{-}_{klt}$	اگر ظرفیت انبار k برای محصول l در دوره t افزایش یا کاهش یابد ۱، در غیر این صورت ۰

۳-۲- مدل مسئله

با توجه به تعریف نمادها، مدل مسئله به صورت زیر ارائه می‌گرد که شامل دو هدف سود و زمان تدارک و محدودیت‌های مرتبط می‌باشد.

$$Max(Profit) =$$

$$\begin{aligned}
&\sum_{l}\sum_{i}\sum_{k}\sum_{v}\sum_{t} q_{iklvt}P_{ikl} + \sum_{l}\sum_{k}\sum_{m}\sum_{v}\sum_{t} q_{kmlvt}P_{kml} \\
&+\sum_{l}\sum_{k}\sum_{j}\sum_{v}\sum_{t} q_{kjlvt}P_{kjl} + \sum_{l}\sum_{j}\sum_{m}\sum_{v}\sum_{t} q_{jmlvt}P_{jml} \\
&-\sum_{l}\sum_{k}\sum_{t} H_{klt}I_{klt} - \sum_{l}\sum_{j}\sum_{t} H_{jlt}I_{jlt} - \sum_{i}\sum_{k}\sum_{l}\sum_{v}\sum_{t} CB_{iklvt}B_{klt} \\
&-\sum_{k}\sum_{j}\sum_{l}\sum_{v}\sum_{t} CB_{kjlvt}B_{jlt} - \sum_{l}\sum_{i}\sum_{k}\sum_{v}\sum_{t} X_{iklvt}t_{ikvt} \\
&-\sum_{l}\sum_{k}\sum_{m}\sum_{v}\sum_{t} X_{kmlvt}t_{kmvt} - \sum_{l}\sum_{k}\sum_{j}\sum_{v}\sum_{t} X_{kjlvt}t_{kjvt} \\
&-\sum_{l}\sum_{j}\sum_{m}\sum_{v}\sum_{t} X_{jmlvt}t_{jmvt} - \sum_{l}\sum_{i}\sum_{t} (ac^{+}_{ilt}cp^{+}_{ilt} + ac^{-}_{ilt}cp^{-}_{ilt}) \\
&-\sum_{l}\sum_{j}\sum_{t} (bc^{+}_{jlt}cp^{+}_{jlt} + bc^{-}_{jlt}cp^{-}_{jlt}) - \sum_{l}\sum_{k}\sum_{t} (cc^{+}_{klt}cp^{+}_{klt} + cc^{-}_{klt}cp^{-}_{klt})
\end{aligned} \qquad (۱)$$

$$\begin{aligned}
Min(LT) &= \sum_{i}\sum_{k}\sum_{l}\sum_{v}\sum_{t} X_{iklvt}(tt_{ikvt} + st_{ivt}) \\
&+\sum_{k}\sum_{j}\sum_{l}\sum_{v}\sum_{t} X_{kjlvt}(tt_{kjvt} + st_{kvt}) \\
&+\sum_{\boldsymbol{k}}\sum_{\boldsymbol{m}}\sum_{\boldsymbol{l}}\sum_{\boldsymbol{v}}\sum_{\boldsymbol{t}} X_{kmlvt}(tt_{kmvt} + st_{kvt}) \\
&+\sum_{\boldsymbol{j}}\sum_{\boldsymbol{m}}\sum_{\boldsymbol{l}}\sum_{\boldsymbol{v}}\sum_{\boldsymbol{t}} X_{jmlvt}\left(tt_{jmvt} + st_{jvt}\right) \\
&+\sum_{\boldsymbol{i}}\sum_{\boldsymbol{k}}\sum_{\boldsymbol{l}}\sum_{\boldsymbol{v}}\sum_{\boldsymbol{t}} Xb_{iklvt}TB_{iklvt} + \sum_{\boldsymbol{k}}\sum_{\boldsymbol{j}}\sum_{\boldsymbol{l}}\sum_{\boldsymbol{v}}\sum_{\boldsymbol{t}} Xb_{kjlvt}TB_{kjlvt}
\end{aligned} \qquad (۲)$$

$$X_{iklvt}(tt_{ikvt} + st_{ivt}) + Xb_{iklvt}TB_{iklvt} \le LT^{up}_{iklvt} \le LT^{max}_{iklvt} \qquad \forall\, i,k,l,v,t \qquad (۳)$$

$$X_{kjlvt}(tt_{kjvt} + st_{kvt}) + Xb_{kjlvt}TB_{kjlvt} \le LT^{up}_{kjlvt} \le LT^{max}_{kjlvt} \qquad \forall\, k,j,l,v,t \qquad (۴)$$

$$X_{kmlvt}(tt_{kmvt} + st_{kvt}) \le LT^{up}_{kmlvt} \le LT^{max}_{kmlvt} \qquad \forall\, m,k,l,v,t \qquad (۵)$$

$$X_{jmlvt}(tt_{jmvt} + st_{jvt}) \le LT^{up}_{jmlvt} \le LT^{max}_{jmlvt} \qquad \forall\, j,m,l,v,t \qquad (۶)$$

$$\sum_{k}\sum_{v} q_{kmlvt} + \sum_{j}\sum_{v} q_{jmlvt} = d_{mlt} \qquad \forall\, m,l,t \qquad (۷)$$

$$I_{klt-۱} - B_{klt-۱} + \sum_{i}\sum_{v} q_{iklvt} - I_{klt} + B_{klt} = \sum_{j}\sum_{v} q_{kjlvt} + \sum_{m}\sum_{v} q_{kmlvt} \qquad \forall\, k,l,t \qquad (۸)$$

$$I_{jlt-۱} - B_{jlt-۱} + \sum_{k}\sum_{v} q_{kjlvt} - I_{jlt} + B_{jlt} = \sum_{m}\sum_{v} q_{jmlvt} \qquad \forall\, j,l,t \qquad (۹)$$

$$cp^{\#}_{ilt} = cp_{ilt} + a^{+}_{ilt}cp^{+}_{ilt} - a^{-}_{ilt}cp^{-}_{ilt} \qquad \forall\, i,l,t \qquad (۱۰)$$

$$cp^{\#}_{jlt} = cp_{jlt} + b^{+}_{jlt}cp^{+}_{jlt} - b^{-}_{jlt}cp^{-}_{jlt} \qquad \forall\, j,l,t \qquad (۱۱)$$

$$cp^{\#}_{klt} = cp_{klt} + c^{+}_{klt}cp^{+}_{klt} - c^{-}_{klt}cp^{-}_{klt} \qquad \forall\, k,l,t \qquad (۱۲)$$

$$\sum_{l} cp^{\#}_{ilt} \le CP_{it} \qquad \forall\, i,t \qquad (۱۳)$$

$$\sum_{l} cp^{\#}_{jlt} \le CP_{jt} \qquad \forall\, j,t \qquad (۱۴)$$

$$\sum_{l} cp^{\#}_{klt} \le CP_{kt} \qquad \forall\, k,t \qquad (۱۵)$$

$$cp^{+}_{ilt} + cp^{-}_{ilt} \le ۱ \quad \forall\, i,l,t \qquad (۱۶)$$

$$cp^{+}_{jlt} + cp^{-}_{jlt} \le ۱ \quad \forall\, j,l,t \qquad (۱۷)$$

$$cp^{+}_{klt} + cp^{-}_{klt} \le ۱ \quad \forall\, k,l,t \qquad (۱۸)$$

$$cp^{\#}_{ilt} y_{ilt} \ge \sum_{k}\sum_{v} q_{iklvt} \qquad \forall\, i,l,t \qquad (۱۹)$$

$$cp^{\#}_{jlt} y_{jlt} \ge \sum_{k}\sum_{v} q_{jklvt} \qquad \forall\, j,l,t \qquad (۲۰)$$

$$cp^{\#}_{klt} y_{klt} \ge \sum_{m}\sum_{v} q_{kmlvt} + \sum_{j}\sum_{v} q_{kjlvt} \qquad \forall\, k,l,t \qquad (۲۱)$$

$$MX_{iklvt} \ge q_{iklvt} \qquad \forall\, i,k,t,l,v \qquad (۲۲)$$

$$MX_{kjlvt} \ge q_{kjlvt} \qquad \forall\, j,k,t,l,v \qquad (۲۳)$$

$$MX_{kmlvt} \ge q_{kmlvt} \qquad \forall\, k,m,t,l,v \qquad (۲۴)$$

$$MX_{jmlvt} \ge q_{jmlvt} \qquad \forall\, j,m,t,l,v \qquad (۲۵)$$

$$q_{iklvt}, q_{kjlvt}, q_{kmlvt}, q_{jmlvt}, cp^{\#}_{klt}, cp^{\#}_{ilt}, cp^{\#}_{jlt}, I_{klt}, I_{jlt}, B_{klt}, B_{jlt} \geq 0 \quad (26)$$

$$X_{iklvt}, X_{kjlvt}, X_{kmlvt}, X_{jmlvt}, y_{ilt}, y_{jlt}, y_{klt}, Xb_{iklvt}, Xb_{kjlvt}, cp^{+}_{ilt}, cp^{-}_{ilt}, cp^{+}_{jlt}, cp^{-}_{jlt}, cp^{+}_{klt}, cp^{-}_{klt} \in \{0,1\} \quad (27)$$

در این بخش، یک مدل برنامه‌ریزی زنجیره تأمین عملیاتی در محیط MTS به صورت یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط[1]ارائه شده است. هدف در این مدل حداکثر کردن سود و حداقل کردن زمان تدارک در زنجیره تأمین هوشمند می‌باشد. سود زنجیره معادل با تفاوت بین درآمد و هزینه کل است که در محدودیت ۱ نشان داده شده است. درآمد کل شامل قیمت کل محصولات و هزینه کل برابر با مجموع هزینه‌های نگهداری، کمبود، حمل-ونقل و افزایش یا کاهش ظرفیت می‌باشد. محدودیت ۲ نشان‌دهنده تابع هدف زمان تدارک است که شامل زمان حمل‌ونقل و زمان آماده‌سازی تمام محصولات برای ارسال و زمان ارسال مجدد محصولات در صورت کمبود در انبارها و مراکز توزیع می‌باشد. محدودیت‌های ۳-۶ به ترتیب زمان تدارک از تولیدکننده به انبار، از انبار به توزیع کننده، از انبار به مشتری و از توزیع کننده به مشتری را محاسبه و کنترل می‌کنند. این زمان شامل زمان حمل‌ونقل، زمان آماده‌سازی و زمان ارسال محصول در صورت وجود کمبود می‌باشد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، کمبود فقط در توزیع کننده و انبار رخ می‌دهد؛ بنابراین محصول جهت تأمین کمبود از تولیدکننده به انبار و از انبار به توزیع کننده ارسال می‌شود که در محدودیت‌های ۳ و ۴ این مورد در نظر گرفته شده است. در این محدودیت‌ها، زمان تدارک به دست آمده باید از کران بالای زمان تدارک کمتر باشد. در صورتی که محصولات با توجه به کران بالای زمان تدارک مجاز، ارسال نگردد، زمان تدارک قابل افزایش به حداکثر زمان تدارک مجاز می‌باشد. محدودیت ۷ تقاضا را تأمین می‌کند؛ به طوری‌که مجموع مقدار محصولی که از انبار و توزیع کننده به مشتری ارسال می‌شود، برابر با مقدار تقاضای مشتری از آن محصول است. سطح موجودی هر محصول در انبار در هر دوره توسط محدودیت ۸ محاسبه می‌شود. این سطح موجودی برابر با تفاوت بین مجموع موجودی باقی مانده از دوره قبل و مقدار محصول ارسال شده از تولید کننده به انبار و مجموع مقادیر ارسال شده از انبار به مشتری و مرکز توزیع می‌باشد. محدودیت ۹ مقدار موجودی مرکز توزیع در هر دوره را بیان می‌کند که برابر با تفاوت بین مجموع موجودی دوره قبل و مقدار محصول ارسالی از انبار به مرکز

توزیع و مجموع محصول تحویل شده از مرکز توزیع به مشتری می‌باشد. اگر ظرفیت‌های فعلی تولیدکننده، توزیع کننده و انبار نتواند تقاضای مشتری را پوشش دهد و یا ظرفیت بیشتر از حد نیاز باشد، با انعطاف‌پذیری در ظرفیت و افزایش یا کاهش آن، این موضوع کنترل می‌شود که توسط محدودیت‌های ۱۲-۱۰ بررسی می‌شود. محدودیت‌های ۱۵-۱۳ تضمین می‌کند که ظرفیت برنامه‌ریزی شده برای تولیدکننده، توزیع‌کننده و انبار از حداکثر ظرفیت کوچکتر باشد. محدودیت‌های ۱۸-۱۶ نشان می‌دهد که حداکثر یکی از موارد افزایش یا کاهش ظرفیت انتخاب می‌شود و امکان انتخاب هر دو به طور همزمان وجود ندارد. محدودیت‌های ۲۱-۱۹ بررسی می‌کند که در هر دوره کدام تولید کننده، توزیع‌کننده و انبار انتخاب می‌شوند. محدودیت‌های ۲۵-۲۲ نشان می‌دهد که چه محصولی توسط کدام تولید کننده، توزیع‌کننده یا انبار و از طریق چه وسیله‌ای به مشتری ارسال شود. محدودیت‌های ۳۳-۳۲ شرایط عدد صحیح یا باینری بودن متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهد.

۳-۳- خطی‌سازی مدل

مدل ارائه شده در این مقاله یک مدل $MINLP$ است. روش‌های حل مدل‌های غیرخطی غالباً از نظر محاسباتی به صرفه نیستند؛ بنابراین اگر بتوان مدل غیرخطی را به یک مدل خطی معادل تیدبل و از روش‌های حل مناسب این مدل‌ها استفاده نمود، می‌توان انتظار جواب دقیق‌تر در زمان کوتاه‌تری داشت. محدودیت‌های ۱۹، ۲۰ و ۲۱ در این مدل غیرخطی هستند و دلیل غیرخطی بودن این محدودیت‌ها، عبارت‌های $cp^{\#}_{ilt}y_{ilt}$، $cp^{\#}_{jlt}y_{jlt}$ و $cp^{\#}_{klt}y_{klt}$ می‌باشد. در محدودیت غیر خطی ۱۹ $cp^{\#}_{ilt}y_{ilt} \geq \sum_k \sum_r q_{iklrt}$، متغیر $cp^{\#}_{ilt}$ پیوسته و نامنفی و y_{ilt} متغیری باینری است. اگر پارامتر UCP_{ilt} کران بالای متغیر $cp^{\#}_{ilt}$ فرض شود برای خطی‌سازی، متغیر پیوسته و نامنفی W_{ilt} را معرفی و جانشین عبارت $cp^{\#}_{ilt}y_{ilt}$ می‌شود. همچنین محدودیت‌های خطی زیر به جای محدودیت غیرخطی ۱۹ در نظر گرفته می‌شود. برای محدودیت‌های ۲۰ و ۲۱ نیز به همین ترتیب جایگزینی صورت می‌گیرد.

$$W_{ilt} \geq \sum_k \sum_v q_{iklvt} \quad (۲۸)$$

$$W_{ilt} \leq UCP_{ilt} y_{ilt} \quad (۲۹)$$

$$W_{ilt} \leq cp^{\#}_{ilt} \quad (۳۰)$$

$$W_{ilt} \geq cp^{\#}_{ilt} - UCP_{ilt}(۱ - y_{ilt}) \quad (۳۱)$$

$$W_{ilt} \geq ۰ \quad (۳۲)$$

۴- روش حل

بسیاری از مسائل در دنیای واقعی نیازمند بهینه‌سازی همزمان چندین تابع هدف هستند که اکثراً با یکدیگر در تضاد و تناقض بوده و بهینگی یک هدف باعث دور شدن هدف دیگر از مقدار بهینه آن خواهد شد. بنابراین جواب بهینه در مسائل چندهدفه مترادف با بهینه شدن تمامی توابع هدف نبوده و یافتن یک پاسخ بهینه در این موارد امکان‌پذیر نیست. به عبارت دیگر در این گونه مسائل باید به دنبال یافتن مجموعه جواب‌های پارتو بود. روش‌های مبتنی بر رویکرد پارتو مجموعه‌ای از جواب‌ها را برای ایجاد تعادل مناسب بین اهداف مشخص می‌کنند. در این مقاله که یک مدل دو هدفه را مدنظر قرار داده، از روش محدودیت اپسیلون تقویت شده AUGMECON2 برای یافتن مجموعه جواب‌های بهینه پارتو استفاده شده است. این روش با بهره‌گیری از روش بهینه‌سازی لکسیکوگراف درصدد تعیین نقاط کارای قوی بوده، به طوری که این نقاط توسط هیچ نقطه دیگری مغلوب نمی‌شود [۲۵]. روش محدودیت اپسیلون تقویت شده به شرح زیر می‌باشد.

$$\begin{aligned} &\text{Min}\left(-Z_1(x)-e\times\left(S_2/r_2+10^{-1}\times S_3/r_3+\ldots+10^{-(P-2)}\times S_P/r_P\right)\right)\\ &\text{s.t.}\\ &Z_k(x)-S_k=\varepsilon_k \end{aligned} \quad (۳۳)$$

x متغیرهای تصمیم در منطقه شدنی، $e \in [۱۰^{-۶}, ۱۰^{-۳}]$ و $Z_k(x)$ توابعی هستند که لازم است بهینه شوند. ε_k مقادیر سمت راست برای تابع هدف k ام، $r_2, r_3, \ldots, r_P$ محدوده توابع هدف و $S_2, S_3, \ldots, S_P$ متغیرهای مازاد هر محدودیت می‌باشند؛ به طوری که $k \in \{۲, \ldots, P\}$.
گام‌های محددیت اپسیلون تقویت شده به شرح زیر است:

گام ۱: تشکیل جدول بازده با استفاده از روش لکسیکوگراف.

گام ۲: تبدیل مسئله چندهدفه به یک هدفه. تابع با بالاترین اولویت را انتخاب و سایر توابع هدف را به محدودیت تبدیل کنید.

گام ۳: حداقل و حداکثر هر هدف تابع هدف را از جدول بازده استخراج کنید و محدوده هر تابع هدف (r_k) برای $k = ۲, \ldots, p$ را مشخص کنید.

گام ۴: r_k را به فاصله‌های مساوی g_k تقسیم کنید و $step_k = r_k / g_k$ را برای هر تابع هدف محاسبه کنید.

گام ۵: در محدوده تابع هدف، مقادیر مختلفی را برای ε_k ($\varepsilon_k = UB_k + i_k * step_k$) محاسبه کنید و به ازای هر مقدار جدید، مسئله تک هدفه را حل کنید و مجموعه جواب‌های بهینه پارتو را تولید کنید.

۵- نتایج محاسباتی

جهت ارزیابی و آزمودن صحت و درستی مدل، یک مسئله در سایز کوچک با استفاده از نرم‌افزار *GAMS* و روش محدودیت اپسیلون تقویت شده حل شده است. در این مثال، یک زنجیره تأمین متشکل از چهار تولید کننده (M)، سه انبار (W)، چهار توزیع کننده (D)، دو محصول، دو وسیله حمل‌ونقل، سه مشتری (C) و دو دوره زمانی در نظر گرفته شده به طوری‌که تمام محصولات می‌تواند توسط همه تولیدکنندگان ارائه گردد. داده‌های مربوط به مساله در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱. مجموعه داده‌های مربوطه به مساله

ac_{il}^{+}, ac_{il}^{-} [۱۰۰,۲۰۰]	cc_{jl}^{+}, cc_{jl}^{-} [۵۰,۱۰۰]	bc_{jl}^{+}, bc_{jl}^{-} [۵۰,۱۰۰]	$LT_{....}^{max}$ [۷۷۰,۱۱۰۰]	st_{ivt} [۱۰۰,۲۰۰]
st_{jvt} [۱۰۰,۳۰۰]	st_{kvt} [۳۰۰,۶۰۰]	TB_{iklvt} [۶,۱۲]	TB_{kjlvt} [۸,۱۵]	CB_{iklvt} [۳۰,۴۰]
CB_{kjlvt} [۳۰,۴۰]	tt_{ikv}, tt_{kjv} [۳,۶]	tt_{kmv} [۵,۷]	tt_{jmv} [۴,۷]	d_{mlt} ۲۰۰۰
cp_{ilt} ۲۰۰۰	cp_{klt} ۳۰۰۰	cp_{jlt} ۱۰۰۰	P_{kjl} ۳۰۰	$CP_{it}, CP_{jt}, CP_{kt}$ ۲۰۰۰۰
P_{kml}, P_{jml} ۵۰۰	P_{ikl} ۲۵۰	H_{jlt} [۳۰,۴۰]	H_{klt} [۲۰,۳۰]	$t_{ikvt}, t_{jmvt}, t_{kjvt}, t_{kmvt}$ [۵۰,۱۰۰]

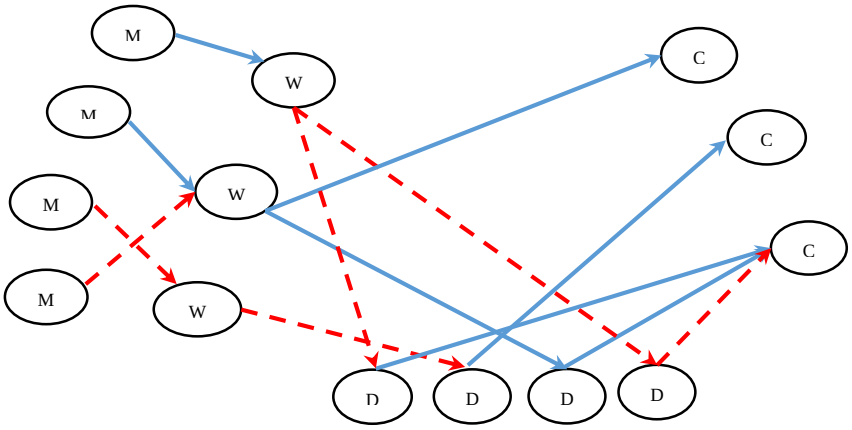
به منظور انعطاف‌پذیری در زمان تدارک، برای هر محصول مقادیر $LT_{kjlr}^{up}, LT_{kmlr}^{up}, LT_{jmlr}^{up}, LT_{iklr}^{up}$ به ترتیب برابر با $۰.۹LT_{kjlr}^{max}, ۰.۹LT_{kmlr}^{max}, ۰.۹\,LT_{jmlr}^{max}, ۰.۹LT_{iklr}^{max}$ در نظر گرفته شده است به طوری که مقدار بافر زمان تدارک برابر با $۰.۱LT_{kjlr}^{max}, ۰.۱LT_{kmlr}^{max}, ۰.۱LT_{jmlr}^{max}, ۰.۱LT_{iklr}^{max}$ می‌باشد. همچنین انعطاف‌پذیری در ظرفیت هر محصول برای تولید کننده، توزیع کننده و انبار نیز به

صورت افزایش یا کاهش در نظر گرفته شده که پارامترهای مرتبط با آن برابر با ۰,۱ ظرفیت فعلی فرض گردیده است. نقاط پارتو به دست آمده از حل مدل با روش محدودیت اپسیلون تقویت شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. نقاط پارتو حاصل از حل مدل با روش محدودیت اپسیلون تقویت شده

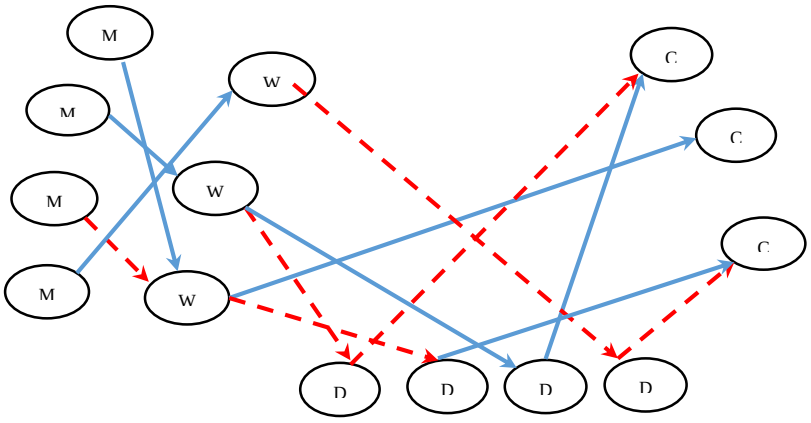
Pareto Points	Objective Value 1	Objective Value 2
۱	۲۴۹۴۸۶۹۴,۰۰	۱۱۰۰۵
۲	۲۴۹۴۸۶۹۳,۰۲	۱۰۸۹۰
۳	۲۴۹۴۸۶۹۳,۰۲	۱۰۸۶۶
۴	۲۴۹۴۸۶۹۱,۰۲	۱۰۷۹۰
۵	۲۴۹۴۸۶۸۶,۰۲	۱۰۷۳۹
۶	۲۴۹۴۸۶۸۴	۱۰۶۸۲
۷	۲۴۹۴۸۶۸۴	۱۰۶۵۱
۸	۲۴۹۴۸۶۸۰	۱۰۶۲۴
۹	۲۴۹۴۸۶۷۷,۰۲	۱۰۶۰۴

نتایج برنامه‌ریزی زنجیره تأمین در مسئله نمونه و در نقطه پارتو ۱ برای محصول ۱ و ۲ به ترتیب در شکل ۲ و ۳ ارائه شده است. بردارهای آبی بیان‌کننده وسیله حمل‌ونقل اول و بردارهای قرمز نشان‌دهنده وسیله حمل‌ونقل دوم هستند. مسیرهای مختلفی برای تولید محصول و ارسال آن به مشتری در شکل ۲ و ۳ وجود دارد. به عنوان مثال و بر اساس شکل ۲، محصول ۱ توسط تولید کننده ۱ (M1) تولید و با وسیله حمل‌ونقل اول به انبار ۱ (W1) منتقل می‌شود. در ادامه محصول توسط وسیله حمل‌ونقل دوم به توزیع کنندگان ۱ و ۴ (D1 و D4) و از آنجا به ترتیب با وسیله حمل‌ونقل اول و دوم به مشتری سوم (C3) ارسال می‌گردد.



شکل ۲. برنامه‌ریزی زنجیره تأمین برای محصول اول در نقطه پارتو ۱

همان‌طور که در شکل ۲ و ۳ مشاهده می‌شود برای مشتریان امکان تأمین کالا به صورت آنلاین و مستقیم از انبار وجود دارد به طوری که در شکل ۲، مشتری C1 محصول ۱ را به صورت مستقیم و با وسیله حمل‌ونقل اول از انبار W2 دریافت می‌کند. این موضوع در شکل ۳ بین مشتری C2 و انبار W3 نیز وجود دارد.



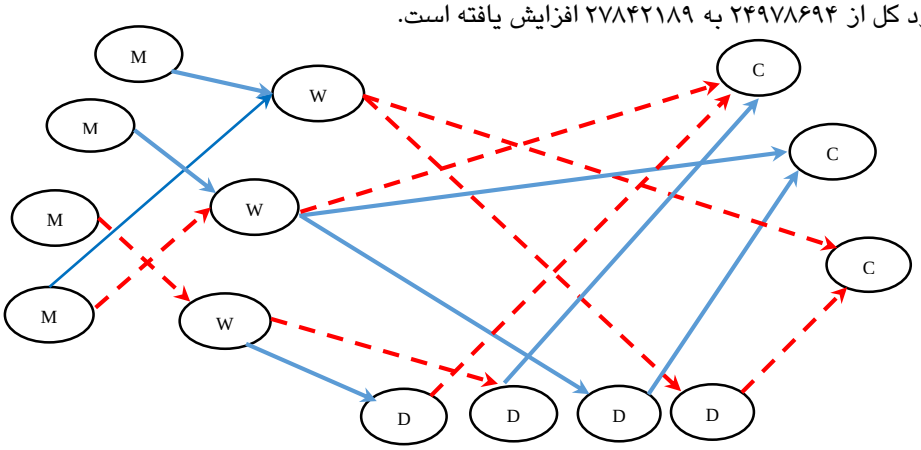
شکل ۳. برنامه‌ریزی زنجیره تأمین برای محصول دوم در نقطه پارتو ۱

۵-۱- تحلیل سناریو

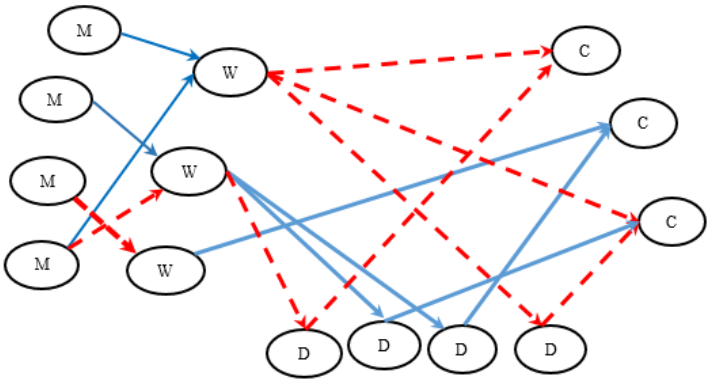
در این بخش به منظور نشان دادن سازگاری مدل پیشنهادی دو سناریوی افزایش تقاضا و معرفی محصول جدید مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفته شده است.

- **سناریوی اول: افزایش تقاضا از ۲۰۰۰ به ۲۵۰۰ برای هر محصول.**
- **سناریوی دوم: معرفی یک محصول جدید ۳ با تقاضای ۲۰۰۰.**

در سناریوی اول تقاضای محصول اول و دوم از ۲۰۰۰ به ۲۵۰۰ افزایش می‌یابد و مقادیر سایر پارامترها ثابت باقی است. با افزایش تقاضا برنامه‌ریزی زنجیره تأمین برای تأمین تقاضای افزایش یافته تغییر می‌کند؛ به طوری که با انعطاف‌پذیری ظرفیت و زمان تدارک، این افزایش تقاضا پوشش داده می‌شود. شکل ۴ و ۵ نتایج برنامه‌ریزی زنجیره تأمین در این سناریو را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، با افزایش تقاضا، تأمین آن به صورت آنلاین نیز افزایش یافته است؛ به طوری که تمام مشتریان، بخشی از تقاضای محصول ۱ و ۲ را مستقیماً از انبارها دریافت می‌کنند که این باعث افزایش تعداد مسیرها و افزایش زمان تدارک از ۱۱۰۰۵ به ۱۴۸۲۳ می‌شود. با توجه به افزایش تقاضا و به تبع آن افزایش حجم فروش از ۴۰۰۰ به ۵۰۰۰، انتظار افزایش سود نیز وجود داشت که سود کل از ۲۴۹۷۸۶۹۴ به ۲۷۸۴۲۱۸۹ افزایش یافته است.

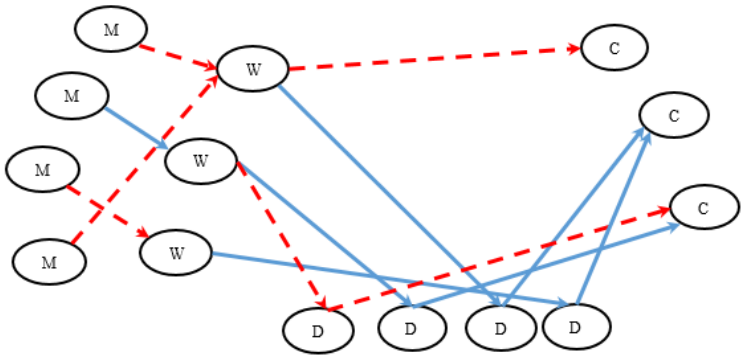


شکل ۴. برنامه‌ریزی زنجیره تأمین برای سناریوی اول و محصول اول



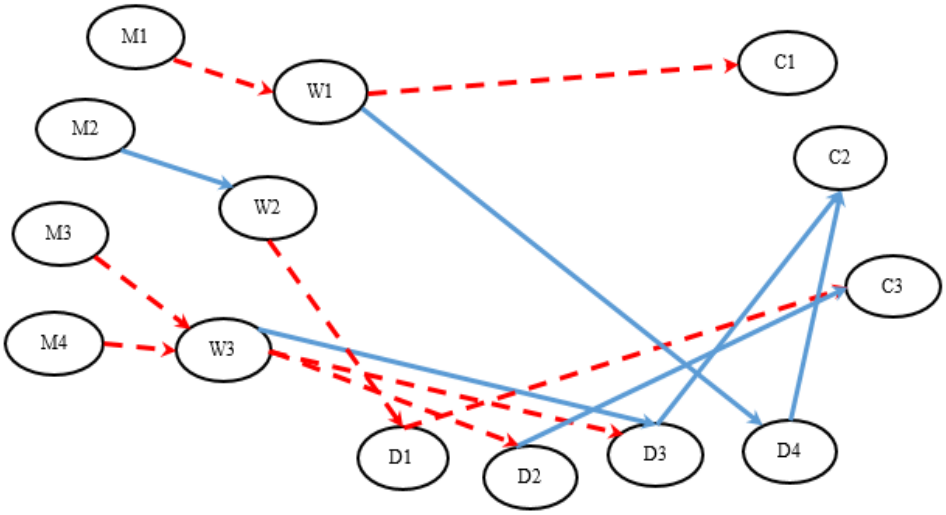
شکل ۵. برنامه‌ریزی زنجیره تأمین برای سناریوی اول و محصول دوم

در سناریوی دوم محصول جدید ۳ با تقاضای ۲۰۰۰ معرفی شده است. نتایج حاصل از اجرای مدل برای سه محصول به ترتیب در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ ارائه شده است. با معرفی محصول جدید، نحوه برنامه‌ریزی برای محصول اول نسبت به حالت قبل (شکل ۲) تغییر می‌کند؛ به طوری‌که تأمین تقاضای مشتریان و توزیع‌کنندگان در شکل ۶ نسبت به شکل ۲ کاملاً متفاوت است. مثلاً در حالت قبل برای محصول اول مشتری ۱ تقاضای خود را مستقیماً با وسیله حمل‌ونقل ۱ از انبار ۲ تأمین می‌کرد ولی در این حالت تقاضای مورد نظر به طور مستقیم با وسیله حمل‌ونقل نوع ۲ و از انبار ۱ دریافت می‌شود.



شکل ۶. برنامه‌ریزی زنجیره تأمین برای سناریوی دوم و محصول اول

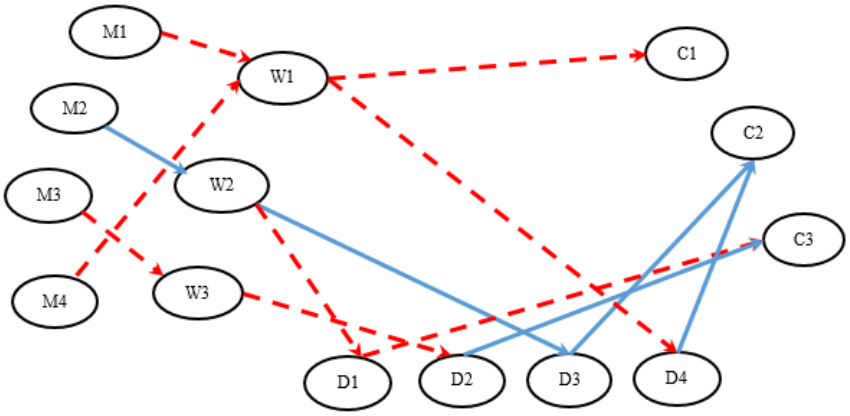
با معرفی محصول سوم، نحوه برنامه‌ریزی برای تأمین تقاضاها در محصول دوم در شکل ۷ نشان داده شده است که نسبت به حالت قبل (شکل ۳) تغییر می‌کند. در این حالت مسیر و نحوه تأمین تقاضا برای محصول دوم تنها برای انبار ۲ و توزیع‌کنندگان ۱ و ۲ ثابت مانده و برای تمام مشتریان و انبارها و توزیع‌کنندگان دیگر تغییر یافته است.



شکل ۷. برنامه‌ریزی زنجیره تأمین برای سناریوی دوم و محصول دوم

نحوه تأمین محصول ۳ و مسیرهای آن در شکل ۸ نشان می‌دهد که مشتری ۱ به صورت مستقیم تقاضای خود را از انبار ۱ و با وسیله حمل‌ونقل ۲ دریافت می‌کند. دو مشتری دیگر نیز سفارش‌های خود را از توزیع‌کنندگان دریافت می‌کنند.

با اضافه شدن محصول ۳ به مسئله، سود کل زنجیره از ۲۴۹۴۸۶۹۴ به ۳۷۴۳۵۴۰۵ افزایش می‌یابد که با توجه به افزایش حجم فروش از ۴۰۰۰ به ۶۰۰۰، این یک نتیجه منطقی است. همچنین زمان تدارک نیز ۱۱۰۰۵ به ۱۶۶۶۱ افزایش می‌یابد تا بتوان تقاضای محصول جدید را برآورده کرد.



شکل ۸. برنامه‌ریزی زنجیره تأمین برای سناریوی دوم و محصول سوم

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

زنجیره تأمین‌های سنتی با چالش‌هایی مانند افزایش ناگهانی تقاضا، عدم هماهنگی، مشکلات حمل‌ونقل، تأخیر در تحویل و نیاز به انعطاف‌پذیری رو به رو هستند. با استفاده از *ICPT* و پلتفرم مجازی، همه اعضای زنجیره تأمین در شبکه اطلاعات و ارتباطات به هم متصل شده و در مراحل مختلف، همکاری و هماهنگی میان اعضای زنجیره تأمین افزایش می‌یابد و زنجیره تأمین به صورت هوشمند و کارآمدتر فعالیت می‌کند. در این مقاله یک زنجیر تأمین هوشمند در محیط تولیدی *MTS* شامل چهار سطح تولیدکننده، انبار، توزیع‌کننده و مشتری بررسی و یک مدل غیرخطی عدد صحیح مختلط برای آن ارائه شده است. هدف مدل حداکثر کردن سود و به حداقل رساندن زمان تدارک می‌باشد که با روش محدودیت اپسیلون تقویت شده در نرم‌افزار *GAMS* حل شده است. مدل توسط یک مسئله نمونه و دو سناریو مختلف تست و بررسی شد که نتایج نشان دهنده درستی مدل و کارآیی روش پیشنهادی می‌باشد. برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد که مسئله با در نظر گرفتن اهدافی مانند زمان انتظار مشتریان، هزینه دیرکرد و دیگر معیارهای اقتصادی بررسی شود. جهت انطباق بیشتر مسئله با شرایط واقعی می‌توان از پارامترهای غیرقطعی استفاده نمود و مسئله را در شرایط عدم قطعیت حل کرد. استفاده از رویکردهای فراابتکاری و مقایسه نتایج آن با این مدل از جمله موضوعاتی است که می‌تواند در آینده توسط محققین بررسی گردد. همچنین تغییر در برخی از

مفروضات مسئله مانند غیرمجاز بودن کمبود نیز از دیگر پیشنهادات نویسندگان برای علاقه‌مندان به این موضوع می‌باشد.

۷- پی‌نوشت‌ها

۱. Information, Communication, and Production Technology (ICPT)
۲. Smart Manufacturing
۳. Internet of things (IoT)
٤. Big Data
٥. Cyber-physical Systems (CPS)
٦. Oh & Jeong
۷. Phuyal et al.
۸. Lee et al.
۹. Zawadzki & Żywicki
۱۰. Ivanov et al.
۱۱. Lyu et al.
۱۲. Edgar & Pistikopoulos
۱۳. Lu & Weng
۱٤. Zheng et al.
۱٥. Glas & Kleemann
۱٦. Abdel-Basset et al.
۱۷. Make to Stock (MTS)
۱۸. Lead Time
۱۹. Mixed Integer Non-Linear Programming (MINLP)

۸- منابع

[1] Karami, E. Arab, A. Fallah Lajimi, H. Impacts of success Key factors of supply chain agility on the strategic performance of the Electronics companies in Iran. *Management Researches in Iran.* 2016, 19(4): 186-206.

[2] Fakoor Saghih, A.M. Measuring the Flexibility of Supply Chain by Using Gray System. *Management Researches in Iran.* 2016, 19(4): 117-138.

[3] Fakhrzad, M.B., Khalifehzadeh, Sasan., A modified firefly algorithm for optimizing a multi stage supply chain network with stochastic demand and fuzzy production capacity, *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 133, 42-

56.

[4] Oh, J. Jeong, B. Tactical supply planning in smart manufacturing supply chain. Robotics and Computer Integrated Manufacturing. *2019*, 55(B): 217-233.

[5] Abarqhouei Sadra, N., Hosseini Nasab, H., Fakhrzad, MB., Macro ergonomics interventions and their impact on productivity and reduction of musculoskeletal disorders: including a case study, *Iran occupational health*, 2012, 9(2), 27-3*9.*

[6] Bochmann, L. Gehrke, L. Bockenkamp, A. Weichert, F. Albersmann, R. Prasse, C. Mertens, C. Motta, M. Wegener, K. Towards Decentralized Production: A Novel Method to Identify Flexibility Potentials in Production Sequences Based on Flexibility Graphs. *International. J. of Automation Technology*. 2015, 9(3): 270–282.

[7] Fakhrzad, MB., Fallah Nezhad, MS., Determining an economically optimal (n, c) design via using loss functions, *International Journal of Engineering*, 2012, 25 (3), 197-202.

[8] Eslamipoor, R., Fakhrzad, MB,. Zare Mehrjerdi, Y,. A new robust optimization model under uncertainty for new and remanufactured products, *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2015, 10(2), *137-142*

[9] Phuyal, S. Bista, D. Bista, R. Challenges, Opportunities and Future Directions of Smart Manufacturing: A State of Art Review. *Sustainable Futures*. 2020, 2: 100023.

[10] Sadeghi Moghaddam, M. Karimi, T. Bandesi, Sahar. Service Supply Chain Risk Assessment Applying Rough Set Theory Approach: Case of Payment Service Providers. *Management Researches in Iran.* 2018, 22(1): 69-94.

[11] Ahmadiazar, M. Dorri, B. Alem Tabriz, A. Kassai, M. Modeling and Solving Problem Sustainable Closed Loop Supply Chain Network Design for Petrochemical Products under Uncertainty Conditions. *Modern Researches in Decision Making*. 2020, 4(4): 1-30.

[12] Dorri, M. Jafari Eskandari, M. Chaharsoghi, K. Choosing coordinated ordering policy in the two-level supply chain: A game theory approach. *Modern Researches in Decision Making*. 2019, 4(3): 47-73.

[13] Jalalifar, S. Ehtesham Rasi, R. Mohtashami, A. Design a Fuzzy Goal Programming Model for Optimizing the Cost and Distance of Vehicles in the Four-Echelon Closed-Loop Supply Chain by Using Ant Colony Algorithm. *Modern Researches in Decision Making*. 2021, 6(1): 148-169.

[14] Tuptuk, N, & Hailes, S. Security of smart manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*. 2018, 47: 93-106.

[15] Ahuett-Garza, H, Kurfess, T. A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart Manufacturing. *Manufacturing Letters*. 2018, 15(B): 60-63.

[16] Lee, J. Bagheri, B. Kao, H.A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0- based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015, 3: *18–23.*

[17] Zawadzki, P. & Żywicki, K. Smart product design and production control for effective mass customization in the industry 4.0 concept. *Management and Production Engineering Review*. 2016, 7(3): 105–112.

[18] Ivanov, D. Dolgui, A. Sokolov, B. Werner, F. Ivanova, M. A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0. *International Journal of Production Research*. 2015, 54(2): 386–*402.*

[19] Lyu, Z. Lin, P. Guo, D. Huang, G.Q. Towards Zero-Warehousing Smart Manufacturing from Zero-Inventory Just-In-Time production. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. *2020,* 64: 101932.

[20] Edgar, T.F. Pistikopoulos, E.N. Smart Manufacturing and Energy Systems. *Computers & Chemical Engineering*. 2018, 114(3): 130-144.

[21] Lu, H.P. Weng, C.I. Smart manufacturing technology, market maturity analysis

and technology roadmap in the computer and electronic product manufacturing industry. *Technological Forecasting & Social Change*. 2018, 133(C): 85-94.

[22] Zheng, M. Wub, K., Suna, C. Pana, E. Optimal decisions for a two-echelon supply chain with capacity and demand information. *Advanced Engineering Informatics*. 2019, 39: 248–258.

[23] Glas, A.H. Kleemann, F.C. The impact of industry 4.0 on procurement and supply management: a conceptual and qualitative analysis. *International Journal of Business and Management Invention*. 2016, 5(6): 55 66.

[24] Abdel-Basset, M. Manogaran, G. Mohamed, M. Internet of Things (IoT) and its impact on supply chain: A framework for building smart, secure and efficient systems. *Future Generation Computer Systems*. 2018, 86: 614-628.

[25] Mavrotas, G, Florios, K. An improved version of the augmented e-constraint method (AUGMECON2) for finding the exact pareto set in multi-objective integer programming problems. *Applied Mathematics and Computation*. 2013, 219(18): 9652-9669.