پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری
دوره ۶، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، صص ۱۵۶-۱۸۷
نوع مقاله: پژوهشی

پیکربندی زنجیره تأمین مبتنی بر قیمت‌گذاری پویا و بهینه‌سازی استوار

فرجام کایدپور[۱]، مقصود امیری[۲*]، لعیا الفت[۳]، میرسامان پیشوایی[۴]

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.
۲. استاد، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.
۳. استاد، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.
۴. دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۴

چکیده

افزایش سطح پیچیدگی سیستم‌های تولیدی و همچنین شدت گرفتن رقابت در فضای کسب‌وکار، باعث شده است تا مسئله عدم‌قطعیت، به یکی از مشکلات اساسی زنجیره‌های تأمین تبدیل شود. پژوهش حاضر، با هدف مدیریت توأمان عدم‌قطعیت پارامترهای عرضه و تقاضا، به توسعه مدلی جهت پیکربندی زنجیره تأمین چند دوره‌ای، چند محصولی و چند سطحی، به‌منظور بیشینه‌سازی سود کل زنجیره تأمین اختصاص یافته است. در مدل حاضر عدم‌قطعیت پارامترها توسط دو رویکرد بهینه‌سازی استوار و قیمت‌گذاری پویا مهار گردید. پس از حل مدل توسط نرم‌افزار GAMS و مقایسه عملکرد مناسب آن در قیاس با یک مدل پایه قطعی، اعتبارسنجی نتایج توسط تحلیل حساسیت انجام شد. در گام بعدی با شبیه‌سازی تصادفی نوسانات عرضه و تقاضا، عملکرد مدل تحت شرایط مختلف عدم‌قطعیت مورد ارزیابی قرار گرفت و نشان داده شد که پاسخ بهینه حاصل از این مدل حتی در مواجهه با نوسانات شدید عرضه و تقاضا نیز می‌تواند در برابر ناموجه‌شدن مقاومت نماید.

کلیدواژه‌ها: قیمت‌گذاری پویا، بهینه‌سازی استوار، مجموعه‌های عدم‌قطعیت، شبیه‌سازی، پیکربندی زنجیره تأمین

---

* **نویسنده مسئول مقاله** E-mail: Amiri@atu.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های پایانی قرن بیستم بسیاری از شرکت‌های تولیدی، تلاش می‌کرند تا از طریق سه استراتژی «افزایش سطح درآمد»، «کاهش هزینه» و «کاهش سطح دارایی»، میزان سودآوری خود را افزایش دهند. به‌منظور افزایش سطح درآمد، آن‌ها به ایجاد تنوع بیشتر در تولیدات، کاهش زمان معرفی محصولات جدید و گسترش بازارهای فروش روی آوردند. کاهش هزینه‌ها نیز با بهره‌گیری از فلسفه تولید ناب[۱](جهت حذف اتلاف‌های گوناگون)، استفاده از سیستم‌های موجودی مبتنی بر تولید به هنگام[۲](JIT) با هدف کاهش میزان انواع موجودی و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل با استفاده از حذف واسطه‌ها و کاهش اتلافات محقق گردید. در نهایت با هدف آزادسازی منابع مالی و همچنین چابک‌سازی سازمان، آن‌ها به کاهش سطح دارایی‌های خود از طریق برون‌سپاری بخش بزرگی از فرآیند تولید و خدمات مانند حمل‌ونقل و انبارش اقدام نمودند. تمامی این فعالیت‌ها مبتنی بر این پیش‌فرض اساسی شکل گرفته‌اند که ثباتی نسبی بر محیط کسب‌وکار حاکم است؛ اما با آغاز هزاره سوم، این پیش‌فرض به مرور با چالش‌های مهمی روبه‌رو گردید.

امروزه زنجیره‌های تأمین بیش از پیش در سطح جهانی فعالیت می‌کنند و تغییرات مداوم ناشی از نوآوری در فناوری‌ها و نیازهای مشتریان منجر به نوسانات شدید در میزان تقاضای نهایی این زنجیره‌ها شده است [۱–۳]. این عدم‌قطعیت فراگیر در تمامی جنبه‌ها و لایه‌های زنجیره تأمین شامل بخش‌های تأمین، تولید، ذخیره‌سازی، حمل‌ونقل و فروش نیز مشاهده می‌شود و با افزایش تمایل شرکت‌ها به استفاده از مدل‌های عملیاتی ناب و همچنین مدل‌های برون‌سپاری جهانی[۳]رو به افزایش است. با این وجود، مطابق با نظر چوپرا و سودهی،[۴] از استراتژی‌های مختلفی می‌توان به منظور کاهش ریسک و غلبه بر عدم‌قطعیت کلی زنجیره تأمین بهره برد. مهم‌ترین این استراتژی‌ها که به خصوص در هنگام طراحی زنجیره تأمین می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند، عبارت‌اند از افزایش ظرفیت، استفاده از تأمین‌کنندگان مازاد،[۵] افزایش بهینه موجودی، تجمیع و ادغام تقاضا،[۶] افزایش انعطاف‌پذیری و پاسخگویی [۴].

استراتژی‌های فوق مبنای توسعه مدل پیکربندی زنجیره تأمین ارائه شده در پژوهش حاضر می‌باشند؛ در این مدل علاوه بر امکان استفاده از موجودی، ظرفیت و امکان تأمین مازاد، از رویکرد قیمت‌گذاری پویا با هدف تحقق استراتژی «تجمیع و ادغام تقاضا» و از

رویکرد بهینه‌سازی استوار با هدف افزایش «انعطاف‌پذیری» بهره گرفته شده است.

۲- مروری بر ادبیات تحقیق (پیشینه پژوهش)

موضوع پیکربندی زنجیره تأمین در دهه‌های اخیر مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است [۵, ۶]. همچنین مسئله عدم‌قطعیت در طراحی زنجیره تأمین، بر اساس رویکردهای متنوعی مانند بهینه‌سازی فازی، سناریوهای تصادفی و بهینه‌سازی تصادفی بررسی شده است که از آن میان می‌توان به مطالعه تارین و همکارنش اشاره نمود که با ارائه یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط فازی دو مرحله‌ای، به بررسی یک زنجیره تأمین بازگشتی تحت شرایط عدم‌قطعیت پرداختند [۷]. در مطالعه دیگری بقالیان و همکارانش مدل‌سازی خود را با استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی برای یک زنجیره تأمین چند سطحی و با در نظر گرفتن ظرفیت تسهیلات تولید، مراکز توزیع و خرده‌فروشان توسعه دادند [۸]. رادفر و همکارانش نیز با استفاده از روش‌های مبتنی بر سناریو موضوع عدم قطعیت را در طراحی یک زنجیره تأمین سبز چندهدفه بازگشتی مورد توجه قرار دادند [۹].

از جمله اولین مطالعاتی که در آن با استفاده از رویکرد بهینه استوار به حل مسئله زنجیره تأمین پرداخته شده است، می‌توان به بررسی تأثیر عدم‌قطعیت پارامترهای تخمینی در زنجیره تأمین، در حضور خطاهای اندازه‌گیری، پیش‌بینی‌های غیردقیق و الگوهای متغیر تقاضا توسط لارنس اشنایدر[۱] اشاره نمود [۱۰]. پس از او برتسیماس و تایل[۲]، به‌منظور حل مسئله مدیریت بهینه زنجیره تأمین در برابر تقاضای تصادفی برای دوره‌های زمانی گسسته یک متدولوژی عمومی مبتنی بر بهینه‌سازی استوار، ارائه کردند [۱۱]. پیشوایی و همکارانش نیز از بهینه‌سازی استوار به منظور طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته با متغیرهای عدد صحیح مختلط، در حضور عدم قطعیت استفاده کردند [۱۲]. بن‌تال[۳]و همکارانش روشی برای توسعه یک برنامه لجستیک استوار با به‌کارگیری معیارهای Min-Max جهت کاهش عدم‌قطعیت تقاضا در زنجیره‌های تأمین کمک‌های بشردوستانه ارائه کردند [۱۳]. همچنین پَن و نَگی[۴]مسئله طراحی زنجیره تأمین در بازارهای جدید و تحت تأثیر عدم‌قطعیت تقاضا در یک محیط تولید چابک را مورد مطالعه قرار دادند [۱۴]. هر چند در این پژوهش از بهینه‌سازی استوار سناریو محور و مبتنی بر رویکرد مالویِ[۵]استفاده شده است و در آن توجهی به مدل‌های بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه‌های غیر قطعی نشده است.

سانگایاه[۱] و همکارانش نیز با استفاده از بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه‌های عدم‌قطعیت، اقدام به طراحی و توسعه یک زنجیره تأمین و انتقال گاز مایع طبیعی توسط یک مدل MILP و در حضور پارامترهای غیر قطعی عرضه نمودند [۱۵]. در مطالعه‌ای دیگر، غلامی و همکارانش با در نظر گرفتن اختلالات و بلایای طبیعی بر اساس یک مدل MILP چند هدفه و بهینه‌سازی استوار سناریو محور به طراحی یک زنجیره تأمین چهار سطحی پرداختند [۱۶]. زرین‌پور و امیدواری نیز با استفاده از بهینه‌سازی استوار، مدل ریاضی زنجیره تأمین نفت خام را شامل مسائل مکان‌یابی، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل و تخصیص تقاضا و با درنظر گرفتن اثرات گلخانه‌ای توسعه دادند. پارامترهای ظرفیت واحدهای بهره‌برداری، حمل‌ونقل، بودجه و استراج و تولید و تقاضای نفت خام در این پژوهش به‌صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است [۱۷]. آلماراج و ترافالیس[۲] از بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه‌های عدم‌قطعیت جهت طراحی یک زنجیره تأمین حلقه بسته و با در نظر گرفتن مسئله کیفیت محصولات استفاده نمودند [۱۸]. همچنین حسینی‌مطلق و همکارانش بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه‌های عدم‌قطعیت (رویکرد برتسیماس و سیم) را جهت مدل‌سازی مسئله MILP طراحی زنجیره تأمین گندم تحت شرایط عدم‌قطعیت مورد بررسی قرار دادند [۱۹].

موضوع قیمت‌گذاری به صورت معمول در سطح شرکت انجام می‌شود و بر همین اساس تحقیقات زیادی در خصوص قیمت‌گذاری در زنجیره تأمین صورت نگرفته است. از معدود پژوهش‌هایی که موضوع قیمت‌گذاری را در طراحی زنجیره تأمین مورد توجه قرار داده است، می‌توان به مقاله برزین‌پور و تاکی[۳]اشاره نمود که مدل خود را به منظور طراحی شبکه‌ای شامل دو کانال توزیع در یک زنجیره تأمین سبز با در نظر گرفتن قیمت‌گذاری و انتخاب روش حمل‌ونقل ارائه نمودند [۲۰]. همچنین تنگ و نورمایا[۴] با هدف مدیریت تقاضا، از موضوع قیمت‌گذاری پویا بهره گرفته و یک مدل کمی مبتنی بر تابع تقاضا در یک فضای رقابتی به منظور مدیریت سطح تقاضای کالاهای مختلف ارائه نمودند [۲۱].

احمدی‌جاوید و قندالی بر اساس یک مدل بهینه‌سازی خطی عدد صحیح مختلط به حل مسئله تخصیصِ مکان[۵]در یک زنجیره تأمین متشکل از مراکز توزیع با ظرفیت محدود و تقاضای حساس به قیمت[۶]مصرف‌کنندگان پرداختند [۲۲]. در مطالعه دیگری احمدی‌جاوید و حسین‌پور به ارائه یک مسئله موجودی-مکان‌یابی در یک زنجیره تأمین چند محصولی با

تقاضای حساس به قیمت پرداختند. آن‌ها برای این منظور یک مدل غیر خطی عدد صحیح مختلف[1](MINL) را برای دو حالت مراکز توزیع با ظرفیت محدود و مراکز توزیع با ظرفیت نامحدود توسعه دادند [۲۳]. فتاحی و همکارانش نیز مسئله طراحی و برنامه‌ریزی یک زنجیره تأمین چندسطحی، چند محصولی و در چند افق زمانی مختلف برای مشتریانی مبنتنی بر تقاضای حساس به قیمت مورد بررسی قرار گرفته است. آن‌ها روشی را جهت تعیین قیمت بر اساس رابطه بین تقاضا و قیمت توسعه داده و برای این کار یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را ارائه نمودند [۲۴].

۳- بیان مسئله و مدل ریاضی

در این بخش مدل ریاضی زنجیره تأمین چهار سطحی (شامل تأمین‌کنندگان، تولیدکنندگان، انبارهای توزیع و مشتریان) با در نظر گرفتن تقاضا به عنوان تابعی از قیمت تشریح می‌گردد. در این مدل، تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب تأمین‌کنندگان، انتخاب از میان مراکز تولید و مراکز توزیع بالقوه، در کنار تعیین میزان تولید، میزان ارسال مواد/قطعات و همچنین کالاهای ساخته شده و سطوح موجودی قابل ذخیره در مراکز تولید (جهت نگهداری موجودی مواد اولیه و کالاهای ساخته شده) و در مراکز توزیع (جهت نگهداری محصولات تکمیل شده) انجام می‌شود. در مراکز تولید در هر دوره زمانی مجموعه‌ای از محصولات تولید و به مراکز توزیع منتقل خواهد شد. هر یک از مراکز تولیدی، امکان نگهداری سطحی از موجودی مواد اولیه/قطعات دریافتی از تأمین‌کنندگان و همچنین سطحی از موجودی محصولات تولید شده را داراست. جریان محصولات پس از عبور از مراکز تولید به سمت مراکز توزیع ادامه پیدا خواهد کرد. مراکز توزیع نیز در هر دوره زمانی امکان نگهداری سطحی از موجودی محصولات تولید شده را دارا هستند. میزان تقاضای مشتریان بر اساس تابع قیمت-پاسخ تعیین و وابسته به قیمت محصولات در نظر گرفته خواهد شد. انتخاب سطح قیمتی مناسب برای محصولات به گونه‌ای که ضمن تأمین حداقل میزان تقاضای موجود، میزان سود زنجیره تأمین را حداکثر نماید، از جمله مهم‌ترین تصمیمات قابل اتخاذ توسط مدل است.

۳-۱- مفروضات مسئله

۱. شبکه زنجیره تأمین در این مدل شامل چهار لایه اصلی تأمین‌کنندگان، مراکز تولید، مراکز

توزیع و مشتریان است.

۲. برنامه‌ریزی به صورت چند دوره‌ای است و به دو افق زمانی استراتژیک (η) و افق زمانی عملیاتی (t) تقسیم می‌گردد.

۳. مراکز تولید امکان تولید چندین نوع محصول مختلف را بر اساس فرآیندهای تولید مشخص و از پیش تعیین شده با توجه به مواد خام/ قطعات معین دارا هستند.

۴. مجموعه تمامی محصولات قابل تولید و همچنین مجموعه مواد خام/ قطعات مورد استفاده، در مرحله طراحی زنجیره تأمین مشخص هستند.

۵. در هر دوره زمانی استراتژیک، تکنولوژی تولید محصول (میزان ضرایب مصرف مواد خام) و سطوح قیمتی محصولات به صورت ثابت لحاظ شده است.

۶. مجموعه‌ای بالقوه از مکان‌های مشخص جهت تخصیص به تسهیلات زنجیره تأمین (شامل مراکز تولید و مراکز توزیع) در نظر گرفته می‌شود.

۷. در خصوص فعال یا غیرفعال بودن تسهیلات در هر یک از لایه‌های زنجیره تأمین، در ابتدای دوره استراتژیک تصمیم‌گیری خواهد شد و در طول این دوره تغییری در خصوص فعالیت تسهیلات اتفاق نخواهد افتاد.

۸. در صورتی‌که یکی از تسهیلات مرتبط با تولید و یا انبارش در یک دوره زمانی استراتژیک فعال در نظر گرفته شود، در دوره‌های بعدی نیز باید فعال باقی بماند.

۹. ظرفیت تأمین‌کنندگان، مراکز تولید و مراکز توزیع به صورت محدود و غیرقطعی است.

۱۰.میزان ظرفیت قابل تخصیص به حمل‌ونقل میان لایه‌های مختلف شبکه زنجیره تأمین محدود و غیرقطعی در نظر گرفته می‌شود.

۱۱.مراکز تولید، دارای انبار مواد اولیه/ قطعات و همچنین انبار کالای ساخته شده مجزا می‌باشند.

۱۲.امکان ارسال مستقیم کالا از مراکز تولید به مشتریان وجود ندارد. بنابراین، وجود حداقل یک مرکز توزیع فعال در هر دوره زمانی استراتژیک الزامی است.

۱۳.موجودی اول دوره برای تمامی انبارها و مراکز توزیع در ابتدای اولین دوره استراتژیک ($\eta = 1$) برابر صفر در نظر گرفته می‌شود.

۱۴.تقاضای هر یک از مشتریان از هر کدام از محصولات در هر دوره زمانی بر اساس تابع قیمت-پاسخ وابسته به قیمت محصول و به صورت غیرقطعی نظر گرفته می‌شود.

۱۵.تمامی هزینه‌های مرتبط با زنجیره تأمین شامل هزینه ثابت مربوط به برپایی تسهیلات، هزینه‌های مرتبط با تهیه، تولید و انبارش و همچنین هزینه‌های حمل‌ونقل میان تسهیلات مختلف زنجیره تأمین به صورت معین در نظر گرفته شده است.

۲-۳- اندیس‌ها، پارامترها و متغیرها

اندیس‌ها و مجموعه‌ها	
$s=\{1,2,...,\|S\|\}$	تأمین‌کننده s از مجموعه تأمین‌کنندگان S
$m=\{1,2,...,\|M\|\}$	مرکز تولید m از مجموعه مراکز تولید M
$w=\{1,2,...,\|W\|\}$	مرکز توزیع w از مجموعه مراکز توزیع (انبارها) W
$c=\{1,2,...,\|C\|\}$	مشتری c از مجموعه مشتریان C
$\eta=\{1,2,...,\|\mathrm{H}\|\}$	دوره زمانی استراتژیک η از مجموعه دوره‌های استراتژیک H
$t=\{1,2,...,\|T\|\}$	دوره زمانی عملیاتی t از مجموعه دوره‌های زمانی عملیاتی T
$k=\{1,2,...,\|K\|\}$	ماده اولیه k از مجموعه مواد اولیه K
$p=\{1,2,...,\|P\|\}$	محصول p از مجموعه محصولات P
$l=\{1,2,...,\|L\|\}$	سطح قیمتی l از مجموعه سطوح قیمتی L در هر دوره زمانی
پارامترها و اعداد ثابت	
$C_{s\eta}^{FixS}$	هزینه ثابت استفاده از تأمین‌کننده s در طول دوره استراتژیک η
$C_{m\eta}^{FixM}$	هزینه ثابت استفاده از مرکز تولید m در طول دوره استراتژیک η
$C_{w\eta}^{FixW}$	هزینه ثابت استفاده از مرکز توزیع w در طول دوره استراتژیک η
$Pr_{p\eta l}$	قیمت محصول p به ازای سطح قیمتی l در دوره استراتژیک η
$C_{pc\eta}^{SoPC}$	هزینه مازاد کمبود هر واحد محصول p برای مشتری c در دوره استراتژیک η
$Int_{cp\eta t}$	عرض از مبدأ تابع تقاضای محصول p برای مشتری c در دوره زمانی ηt
$Slp_{cp\eta t}$	شیب تابع تقاضای محصول p برای مشتری c در دوره زمانی ηt
$C_{sk\eta t}^{SupSK}$	هزینه خرید و تأمین ماده خام k از تأمین‌کننده s در دوره زمانی ηt

$C_{mp\eta t}^{ProMP}$	هزینه متغیر تولید محصول p توسط مرکز تولید m در دوره زمانی ηt
$C_{smk\eta t}^{TrSM}$	هزینه ارسال ماده خام k از تأمین‌کننده s به مرکز تولید m در دوره زمانی ηt
$C_{mwp\eta t}^{TrMW}$	هزینه ارسال محصول p از مرکز تولید m به مرکز توزیع w در دوره زمانی ηt
$C_{wcp\eta t}^{TrWC}$	هزینه ارسال محصول p از مرکز توزیع w به مشتری c در دوره زمانی ηt
$C_{smk\eta t}^{InMK}$	هزینه نگهداری ماده اولیه k تهیه شده از تأمین‌کننده s در مرکز تولید m در دوره زمانی ηt
$C_{mp\eta t}^{InMP}$	هزینه نگهداری هر واحد محصول p در مرکز تولید m در دوره زمانی ηt
$C_{wp\eta t}^{InWP}$	هزینه نگهداری هر واحد محصول p در انبار w در دوره زمانی ηt
$\lambda_{pks\eta}$	نرخ مصرف محصول p از ماده خام k که توسط تأمین‌کننده s در دوره استراتژیک η تأمین می‌گردد
متغیرهای پیوسته	
$V_{cp\eta tl}^{UdCL}$	مقدار تقاضای محقق نشده مشتری c از محصول p در سطح قیمتی l در دوره زمانی ηt
$V_{smk\eta t}^{TrSM}$	مقدار ماده خام k ارسالی از تأمین‌کننده s به مرکز تولید m در دوره زمانی ηt
$V_{smkp\eta t}^{SupSK}$	مقدار ماده خام k که برای تولید محصول p از تأمین‌کننده s توسط مرکز تولید m در دوره زمانی ηt تهیه شده است
$V_{mp\eta t}^{ProMP}$	مقدار تولید محصول p توسط مرکز تولید m در دوره زمانی ηt
$V_{mwp\eta t}^{TrMW}$	مقدار محصول p ارسالی از مرکز تولید m به مرکز توزیع w در دوره زمانی ηt
$V_{wcp\eta t}^{TrWC}$	مقدار محصول p ارسالی از مرکز توزیع w به مشتری c در دوره زمانی ηt
$V_{smk\eta t}^{InMK}$	سطح موجودی ماده اولیه k در مرکز تولید m در دوره زمانی ηt
$V_{mp\eta t}^{InMP}$	سطح موجودی محصول p در مرکز تولید m در دوره زمانی ηt

$V_{wp\eta t}^{InWP}$	سطح موجودی محصول p در مرکز توزیع w در دوره زمانی ηt

متغیرهای باینری (صفر یا یک)	
$\alpha_{cp\eta tl}$	برابر یک است در صورتی‌که سطح قیمتی l برای تقاضای مشتری c از محصول p در دوره استراتژیک η و دوره عملیاتی t انتخاب شود و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود
$\varphi_{s\eta}$	برابر یک است در صورتی‌که با تأمین‌کننده s در دوره استراتژیک η قرارداد همکاری بسته شود و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.
$\psi_{m\eta}$	برابر یک است در صورتی‌که مرکز تولید m در دوره استراتژیک η فعال در نظر گرفته شود و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.
$\omega_{w\eta}$	برابر یک است در صورتی‌که مرکز توزیع w در دوره استراتژیک η فعال در نظر گرفته شود و در غیر این صورت برابر صفر خواهد بود.

پارامترهای غیرقطعی تقاضا و ظرفیت	
$\tilde{D}_{cp\eta tl}$	مقدار غیرقطعی تقاضای مشتری cاُم از محصول p در سطح قیمتی l در دوره زمانی ηt
$\tilde{Cap}_{sk\eta t}^{SupSK}$	ظرفیت غیرقطعی تأمین‌کننده s از ماده خام k در دوره زمانی ηt
$\tilde{Cap}_{mp\eta t}^{ProMP}$	ظرفیت غیرقطعی مرکز تولید m برای تولید محصول p در دوره زمانی ηt
$\tilde{Cap}_{smk\eta t}^{InMK}$	ظرفیت غیرقطعی مرکز تولید m برای نگهداری ماده اولیه k تهیه شده از تأمین‌کننده s در دوره زمانی ηt
$\tilde{Cap}_{mp\eta t}^{InMP}$	ظرفیت غیرقطعی مرکز تولید m برای نگهداری محصول p در دوره زمانی ηt
$\tilde{Cap}_{wp\eta t}^{InWP}$	ظرفیت غیرقطعی مرکز توزیع w برای محصول p در دوره زمانی ηt
$\tilde{Cap}_{sm\eta t}^{TrSM}$	ظرفیت غیرقطعی حمل‌ونقل میان تأمین‌کننده s و مرکز تولید m دوره زمانی

	ηt
$C\tilde{a}p_{mw\eta t}^{TrMW}$	ظرفیت غیرقطعی حمل‌ونقل میان مرکز تولید m و مرکز توزیع w در دوره زمانی ηt
$C\tilde{a}p_{wc\eta t}^{TrWC}$	ظرفیت غیر قطعی حمل‌ونقل میان مرکز توزیع w و مشتری c دوره زمانی ηt

۳-۳- توابع قیمت-پاسخ

به منظور صورت‌بندی مسئله براساس رویکرد قیمت‌گذاری پویا، تقاضای مشتریان مبتنی بر تابع قیمت-پاسخ تعیین خواهد شد. فُرم خطی تابع قیمت-پاسخ در رابطه (۱) نمایش داده شده است.

$$D_{cp\eta tl}^{Linear} = Int_{cp\eta t} - Slp_{cp\eta t} Pr_{p\eta l}, \qquad \forall c \in C, p \in P, \eta \in \mathrm{H}, t \in T, l \in L. \qquad (۱)$$

در اینجا با هدف اجتناب از غیرخطی شدن تابع درآمد زنجیره تأمین، از مجموعه مقادیر گسسته $Pr_{p\eta l}$ استفاده خواهد شد. مقدار گسسته $Pr_{p\eta l}$ به ازای سطوح مختلف قیمتی l با رابطه (۲) تعریف می‌شود. در رابطه (۲) مقدار $Pr_{p\eta}^{\max}$ بیشینه قیمت هر کالا در هر دوره زمانی استراتژیک را نشان می‌دهد که مقدار آن در تابع قیمت-پاسخ خطی برابر $Int_{cp\eta t} / Slp_{cp\eta t}$ خواهد بود.

$$Pr_{p\eta l} = \frac{l-1}{|L|-1} Pr_{p\eta}^{\max}, \qquad \forall p \in P, \eta \in \mathrm{H}, l \in L. \qquad (۲)$$

همچنین با هدف اجتناب از منفی شدن مقدار تقاضا، به ازای برخی از سطوح قیمتی، رابطه (۳) جایگزین رابطه (۱) خواهد شد.

$$D_{cp\eta tl}^{Linear} = \max\left\{\left(Int_{cp\eta t} - Slp_{cp\eta t} \frac{l-1}{|L|-1} Pr_{p\eta}^{\max}\right), 0\right\}, \qquad (۳)$$

$$\forall c \in C, p \in P, \eta \in \mathrm{H}, t \in T, l \in L.$$

۴-۳- تابع هدف مدل

تابع هدف این مسئله از شش بخش کلی تشکیل شده است. بخش اول درآمد ناشی از فروش محصولات و سایر بخش‌ها هزینه‌های لازم جهت تأمین مواد اولیه، تولید و توزیع محصول را

نمایش می‌دهند. بخش اول تابع هدف که در رابطه (۴) با $T\tilde{R}V$[1] نمایش داده شده است، بیانگر مجموع درآمد غیرقطعی ناشی از فروش محصولات به مشتریان در هر دوره زمانی است. با توجه به آنکه در مسئله قیمت‌گذاری پویا، میزان تقاضا تابعی از قیمت در نظر گرفته می‌شود، در رابطه (۴) به منظور اجتناب از غیرخطی شدن $T\tilde{R}V$، از مجموعه مقادیر گسسته $Pr_{p\eta l}$ و متغیر تصمیم صفر یا یک α_{cptl} برای انتخاب سطح قیمت مورد نظر مشتریان از هریک از محصولات استفاده شده است. بر اساس این متغیر، قیمت بهینه هر محصول برای هر یک از مشتریان در هر دوره زمانی به نحوی از میان سطوح مختلف قیمتی انتخاب خواهد شد که مجموع در آمد ناشی از حاصل‌ضرب قیمت در میزان تقاضا بیشینه گردد. مقدار غیرقطعی $\tilde{D}_{cp\eta tl}$ با توجه به رابطه (۳) تعیین خواهد گردید (در این خصوص در بخش ۶-۳- توضیحات تکمیلی ارائه خواهد شد).

$$T\tilde{R}V = \sum_{c\in C}\sum_{p\in P}\sum_{\eta\in H}\sum_{t\in T}\sum_{l\in L} Pr_{p\eta l}\tilde{D}_{cp\eta tl}\alpha_{cp\eta tl} \qquad (۴)$$

همچنین هزینه‌های زنجیره تأمین توسط روابط (۵) تا (۹) نمایش داده شده است. این هزینه‌ها، شامل هزینه لازم جهت بهره‌برداری از هر یک از تسهیلات زنجیره تأمین[2] (TFC)، مجموع هزینه‌های تولید[3] (شامل هزینه‌های خرید مواد اولیه و ساخت محصولات) در هر مرکز تولیدی (TPC)، مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل[4] (TTC)، مجموع هزینه‌های متغیرِ مرتبط با نگهداری سطوح مختلف موجودی[5] (TIC) و در نهایت مجموع هزینه‌های فرصت ناشی از عدم تحقق کامل تقاضای مشتریان[6] (TOC) می‌باشند. درنهایت تابع هدف مدل، یعنی بیشینه‌سازی سود را می‌توان به صورت رابطه (۱۰) نمایش داد.

$$TFC = \sum_{\eta\in H}\left(\sum_{s\in S} C_{s\eta}^{FixS}\varphi_{s\eta} + \sum_{m\in M} C_{m\eta}^{FixM}\psi_{m\eta} + \sum_{w\in W} C_{w\eta}^{FixW}\omega_{w\eta}\right) \qquad (۵)$$

$$TPC = \sum_{m\in M}\sum_{\eta\in H}\sum_{t\in T}\left(\sum_{s\in S}\sum_{k\in K} C_{sk\eta t}^{SupSK}V_{smk\eta t}^{TrSM} + \sum_{p\in P} C_{mp\eta t}^{ProMP}V_{mp\eta t}^{ProMP}\right) \qquad (۶)$$

$$TTC = \sum_{\eta\in H}\sum_{t\in T}\left(\begin{array}{c}\sum_{s\in S}\sum_{m\in M}\sum_{k\in K} C_{smk\eta t}^{TrSM}V_{smk\eta t}^{TrSM} + \sum_{m\in M}\sum_{w\in W}\sum_{p\in P} C_{mwp\eta t}^{TrMW}V_{mwp\eta t}^{TrMW} \\ + \sum_{w\in W}\sum_{c\in C}\sum_{p\in P} C_{wcp\eta t}^{TrWC}V_{wcp\eta t}^{TrWC}\end{array}\right) \qquad (۷)$$

پژوهش‌های نوین در تصمیم‌گیری ـــ
$$TIC = \sum_{\eta\in \mathrm{H}}\sum_{t\in T}\left(\begin{array}{c}\sum_{s\in S}\sum_{m\in M}\sum_{k\in K} C^{InMK}_{smk\eta t}V^{InMK}_{smk\eta t} + \sum_{m\in M}\sum_{p\in P} C^{InMP}_{mp\eta t}V^{InMP}_{mp\eta t} \\ + \sum_{w\in W}\sum_{p\in P} C^{InWP}_{wp\eta t}V^{InWP}_{wp\eta t}\end{array}\right) \quad (۸)$$

$$TOC = \sum_{c\in C}\sum_{p\in P}\sum_{\eta\in \mathrm{H}}\sum_{t\in T}\sum_{l\in L}(Pr_{p\eta l} + C^{SoPC}_{pc\eta})V^{UdCL}_{cp\eta tl} \quad (۹)$$

$$Max \quad \tilde{Z} = T\tilde{R}V - \left(TFC + TPC + TTC + TIC + TOC\right) \quad (۱۰)$$

۵-۳- محدودیت‌های مدل

قیدهای اساسی مدل شامل محدودیت ظرفیت مراکز تأمین، تولید و توزیع، محدودیت نگهداری موجودی در این مراکز و محدودیت ظرفیت مسیرهای حمل‌ونقل میان آن‌ها است.

$$\sum_{m\in M} V^{TrSM}_{smk\eta t} \le C\tilde{a}p^{SupSK}_{sk\eta t}\varphi_{s\eta}, \qquad \forall s\in S, k\in K, \eta\in \mathrm{H}, t\in T. \quad (۱۱)$$

$$\sum_{k\in K} V^{TrSM}_{smk\eta t} \le C\tilde{a}p^{TrSM}_{sm\eta t}\varphi_{s\eta}\psi_{m\eta}, \qquad \forall s\in S, m\in M, \eta\in \mathrm{H}, t\in T. \quad (۱۲)$$

$$\begin{cases}\sum_{k\in K} V^{TrSM}_{smk\eta t} \le C\tilde{a}p^{TrSM}_{sm\eta t}u_{sm\eta} \\ u_{sm\eta} \ge \varphi_{s\eta} + \psi_{m\eta} - 1 \\ u_{sm\eta} \le \varphi_{s\eta} \\ u_{sm\eta} \le \psi_{m\eta}\end{cases} \qquad \forall s\in S, m\in M, \eta\in \mathrm{H}, t\in T. \quad (۱۳)$$

$$V^{InMK}_{smk\eta t} = V^{InMK}_{smk\eta(t-1)} + V^{TrSM}_{smk\eta t} - \sum_{p\in P} V^{SupSK}_{smkp\eta t}, \quad \forall s\in S, m\in M, k\in K, \eta\in \mathrm{H}, t\in T\setminus\{1\}. \quad (۱۴)$$

$$V^{InMK}_{smk\eta t} = V^{InMK}_{smk(\eta-1)|T|} + V^{TrSM}_{smk\eta t} - \sum_{p\in P} V^{SupSK}_{smkp\eta t}, \quad \forall s\in S, m\in M, k\in K, \eta\in \mathrm{H}\setminus\{1\}, t=1. \quad (۱۵)$$

$$V^{InMK}_{smk\eta t} \le C\tilde{a}p^{InMK}_{smk\eta t}\psi_{m\eta}, \qquad \forall s\in S, m\in M, k\in K, \eta\in \mathrm{H}, t\in T. \quad (۱۶)$$

قید (۱۱) مجموع مواد خام/ قطعات ارسالی به مراکز تولید را محدود به ظرفیت تأمین‌کنندگان می‌کند. محدودیت (۱۲) میزان ارسال مواد خام/ قطعات میان تأمین‌کنندگان و

مراکز تولید را به ظرفیت حمل‌ونقل میان آن‌ها محدود می‌سازد. مجموعه روابط (۱۳) با کمک متغیر $u_{sm\eta}$ رابطه غیرخطی (۱۲) را به صورت مجموعه‌ای از قیود خطی تبدیل می‌کند. دو تساوی (۱۴) و (۱۵) قیود تعادلی موجودی مواد خام/ قطعات را در هر مرکز تولیدی مشخص می‌کنند و رابطه (۱۶) بیانگر محدودیت ظرفیت نگهداری مواد اولیه/ قطعات در هر مرکز تولیدی است.

$$\sum_{s\in S} V_{smkp\eta t}^{SupSK}\lambda_{pks\eta} = V_{mp\eta t}^{ProMP}, \qquad \forall m\in M, k\in K, p\in P, \eta\in \mathrm{H}, t\in T. \tag{۱۷}$$

$$V_{mp\eta t}^{ProMP} \le C\tilde{a}p_{mp\eta t}^{ProMP}\psi_{m\eta}, \qquad \forall m\in M, p\in P, \eta\in \mathrm{H}, t\in T. \tag{۱۸}$$

(۱۹)

$$V_{mp\eta t}^{InMP} = V_{mp\eta(t-1)}^{InMP} + V_{mp\eta t}^{ProMP} - \sum_{w\in W} V_{mwp\eta t}^{TrMW}, \quad \forall m\in M, p\in P, \eta\in \mathrm{H}, t\in T\setminus\{1\}.$$

(۲۰)

$$V_{mp\eta t}^{InMP} = V_{mp(\eta-1)|T|}^{InMP} + V_{mp\eta t}^{ProMP} - \sum_{w\in W} V_{mwp\eta t}^{TrMW}, \quad \forall m\in M, p\in P, \eta\in \mathrm{H}\setminus\{1\}, t=1.$$

$$V_{mp\eta t}^{InMP} \le C\tilde{a}p_{mp\eta t}^{InMP}\psi_{m\eta}, \qquad \forall m\in M, p\in P, \eta\in \mathrm{H}, t\in T. \tag{۲۱}$$

$$\sum_{p\in P} V_{mwp\eta t}^{TrMW} \le C\tilde{a}p_{mw\eta t}^{TrMW}\psi_{m\eta}\omega_{w\eta}, \quad \forall m\in M, w\in W, \eta\in \mathrm{H}, t\in T. \tag{۲۲}$$

$$\begin{cases} \sum_{p\in P} V_{mwp\eta t}^{TrMW} \le C\tilde{a}p_{mw\eta t}^{TrMW} v_{mw\eta} \\ v_{mw\eta} \ge \psi_{m\eta} + \omega_{w\eta} - 1 \\ v_{mw\eta} \le \psi_{m\eta} \\ v_{mw\eta} \le \omega_{w\eta} \end{cases} \qquad \forall m\in M, w\in W, \eta\in \mathrm{H}, t\in T. \tag{۲۳}$$

(۲۴)

$$V_{wp\eta t}^{InWP} = V_{wp\eta(t-1)}^{InWP} + \sum_{m\in M} V_{mwp\eta t}^{TrMW} - \sum_{c\in C} V_{wcp\eta t}^{TrWC}, \ \forall w\in W, p\in P, \eta\in \mathrm{H}, t\in T\setminus\{1\}.$$

$$V_{wp\eta t}^{InWP} = V_{wp(\eta-1)|T|}^{InWP} + \sum_{m\in M} V_{mwp\eta t}^{TrMW} - \sum_{c\in C} V_{wcp\eta t}^{TrWC}, \quad \forall w\in W, p\in P, \eta\in \mathrm{H}\setminus\{1\}, t=1. \tag{۲۵}$$

رابطه (۱۷) میزان تولید هر یک از محصولات را بر اساس ضریب مصرف مواد اولیه/

قطعات معین می‌سازد. عبارت (۱۸) مقدار تولید محصولات را به ظرفیت تولید مراکز تولیدی محدود می‌کند. دو رابطه (۱۹) و (۲۰) محدودیت‌های تعادلی موجودی محصولات را در هر مرکز تولیدی نشان می‌دهند. رابطه (۲۱) مقدار محصولات نگهداری شده در مراکز تولیدی را به ظرفیت آن‌ها محدود می‌کند. همچنین بر اساس محدودیت (۲۲) در هر دوره زمانی، میزان محصولات ارسالی از مراکز تولید به مراکز توزیع نباید از ظرفیت حمل‌ونقل میان آن‌ها تجاوز کند. از مجموعه روابط (۲۳) و متغیر $v_{mw\eta}$ جهت خطی‌سازی رابطه (۲۲) استفاده می‌شود. مجموعه معادلات تعادلی موجودی محصولات نهایی در هر مرکز توزیع، توسط روابط (۲۴) و (۲۵) مشخص شده است.

$$V_{wp\eta t}^{InWP} \leq C\tilde{a}p_{wp\eta t}^{InWP}\omega_{w\eta}, \qquad \forall w \in W, p \in P, \eta \in \mathrm{H}, t \in T. \quad (۲۶)$$

$$D_{cp\eta tl}^{Linear} = Int_{cp\eta t} - Slp_{cp\eta t}\frac{l-1}{|L|-1}Pr_{p\eta}^{\max}, \quad \forall c \in C, p \in P, \eta \in \mathrm{H}, t \in T, l \in L. \quad (۲۷)$$

$$\sum_{w \in W} V_{wcp\eta t}^{TrWC} + \sum_{l \in L} V_{cp\eta tl\delta}^{UdCL} \geq \sum_{l \in L} \tilde{D}_{cp\eta tl}\alpha_{cp\eta tl}, \quad \forall c \in C, p \in P, \eta \in \mathrm{H}, t \in T. \quad (۲۸)$$

$$\sum_{p \in P} V_{wcp\eta t}^{TrWC} \leq C\tilde{a}p_{wc\eta t}^{TrWC}\omega_{w\eta}, \qquad \forall w \in W, c \in C, \eta \in \mathrm{H}, t \in T. \quad (۲۹)$$

$$V_{cp\eta tl}^{UdCL} \leq \tilde{D}_{cp\eta tl}\alpha_{cp\eta tl}, \qquad \forall c \in C, p \in P, \eta \in \mathrm{H}, t \in T, l \in L. \quad (۳۰)$$

$$\sum_{l \in L} \alpha_{cp\eta tl} = 1, \qquad \forall c \in C, p \in P, \eta \in \mathrm{H}, t \in T. \quad (۳۱)$$

$$\psi_{m(\eta+1)} \geq \psi_{m\eta}, \qquad \forall m \in M, \eta \in \mathrm{H}/\{|\mathrm{H}|\}. \quad (۳۲)$$

$$\omega_{w(\eta+1)} \geq \omega_{w\eta}, \qquad \forall w \in W, \eta \in \mathrm{H}/\{|\mathrm{H}|\}. \quad (۳۳)$$

$$\sum_{w \in W} \omega_{w\eta} \geq 1, \qquad \eta \in \{1\}. \quad (۳۴)$$

رابطه (۲۶) محدودیت ظرفیت موجودی مراکز توزیع را نشان می‌دهد. رابطه (۲۷) میزان تقاضای مشتریان از هر یک از محصولات را به‌صورت تابعی از قیمت آن محصول بیان می‌کند. محدودیت (۲۸)، مجموع محصولات ارسال شده از مراکز توزیع به هر یک از مشتریان را، به میزان تقاضای آن مشتری در سطح قیمتی l محدود می‌سازد. رابطه (۲۹) محدودیت

ظرفیت حمل‌ونقل میان مراکز تولید و مشتریان را مشخص می‌کند. برمبنای محدودیت (۳۰) تقاضای محقق نشده هر محصول، تنها برای «سطوح قیمتی انتخاب شده» قابل تعریف است. به عبارت بهتر، در صورت عدم انتخاب یک سطح قیمتی، تقاضای محقق نشده آن برابر صفر در نظر گرفته خواهد شد. بر اساس محدودیت (۳۱) در هر دوره زمانی، مشتریان تنها می‌توانند به ازای یک سطح قیمتی مشخص، محصول مورد نظر خود را تقاضا کنند و امکان تقاضای یک محصول با دو قیمت مختلف وجود ندارد. در نهایت محدودیت‌های (۳۲) و (۳۳) مشخص می‌کنند که در صورت فعال بودن یکی از تسهیلات در یک دوره زمانی، آن مرکز باید در دوره‌های زمانی بعدی نیز به صورت فعال به کار خود ادامه دهد و رابطه (۳۴) از فعال بودن حداقل یک مرکز توزیع در اولین دوره زمانی استراتژیک اطمینان حاصل می‌کند. همچنین باید خاطر نشان کرد که تمامی متغیرهای مسئله از نوع مثبت می‌باشند.

۶-۳- رویکرد بهینه‌سازی استوار جهت پیاده‌سازی عدم‌قطعیت در قیود مسئله

به منظور مواجهه با محدودیت‌های غیر قطعی مسئله حاضر، از مفاهیم بهینه‌سازی استوار مبتنی بر مجموعه‌های عدم‌قطعیت، استفاده خواهد شد. از این رو، در ادامه اشاره مختصری به نحوه تولید همتای استوار[1] محدودیت‌ها خواهد شد.

عبارت (۳۵) نمایش مجموعه‌ای از i محدودیت عدد صحیح مختلط است که در آن برخی از ضرایب متغیرها در محدودیت‌ها و همچنین اعداد سمت راست دارای عدم‌قطعیت هستند.

$$\sum_{m\notin M_i} a_{im}x_m + \sum_{k\notin K_i} b_{ik}y_k + \sum_{m\in M_i} \tilde{a}_{im}x_m + \sum_{k\in K_i} \tilde{b}_{ik}y_k \le \tilde{p}_i \qquad (۳۵)$$

در این رابطه x_m معرف متغیر پیوسته mاُم و y_k معرف متغیر عدد صحیح kاُم است. همچنین M_i و K_i به ترتیب زیرمجموعه‌ای از اندیس متغیرهای تصمیم پیوسته و عدد صحیح در محدودیت i هستند که ضرایب‌شان به صورت غیر قطعی است. در این عبارت مقادیر غیرقطعی $\tilde{a}_{ij}$ و $\tilde{b}_{ij}$ به ترتیب ضرایب متغیرهای پیوسته و عدد صحیح را نمایش می‌دهند. این مقادیر به طور کلی از یک جزء قطعی با مقادیر اسمی a_{ij} و b_{ij} و یک جزء غیرقطعی به صورت $\hat{a}_{ij}\xi_{ij}$ و $\hat{b}_{ij}\xi_{ij}$ تشکیل شده‌اند که در آن متغیر تصادفی ξ_{ij} به‌صورت یکنواخت در بازه $[-1,1]$ توزیع شده است. $\hat{a}_{ij}$ و $\hat{b}_{ij}$ نیز به‌ترتیب مقدار نوسان ثابت

ضرایب متغیرهای پیوسته و عدد صحیح را نمایش می‌دهند که هر دو به‌صورت مثبت تعریف می‌شوند. به عبارت بهتر، برای متغیر تصمیم مثبت $\tilde{a}_{ij}$ داریم $\tilde{a}_{ij} = a_{ij} + \hat{a}_{ij}\xi_{ij}$ و به همین ترتیب نیز برای متغیر تصمیم عددی صحیح $\tilde{b}_{ij}$ داریم $\tilde{b}_{ij} = b_{ij} + \hat{b}_{ij}\xi_{ij}$. همچنین در این رابطه، $\tilde{p}_i = p_i + \xi_i \hat{p}_i$ مقادیر سمت راست برای محدودیت iاُم را نشان می‌دهد که در آن p_i مقدار اسمی عدد سمت راست و $\hat{p}_i$ نوسان ثابت آن می‌باشند و ξ_i نیز متغیر تصادفی با مقداری بین $[-1,1]$ خواهد بود. با توجه به تعریف $\tilde{a}_{ij}$ ، $\tilde{b}_{ij}$ و $\tilde{p}_i$، می‌توان عبارت (۳۵) را به صورت رابطه (۳۶) بازنویسی کرد:

$$\sum_{m \notin M_i} a_{im} x_m + \sum_{k \notin K_i} b_{ik} y_k + \left\{ -\xi_i \hat{p} + \sum_{m \in M_i} \xi_{im} \hat{a}_{im} x_m + \sum_{k \in K_i} \xi_{ik} \hat{b}_{ik} y_k \right\} \le p_i \qquad (۳۶)$$

در اینجا، هدف از بهینه‌سازی استوار، یافتن پاسخ‌هایی است که به ازای تمامی ξ ها که بر روی یک مجموعه عدم‌قطعیت U تعریف شده‌اند، «شدنی استوار[1]» باشند، یعنی باید به ازای تمام مقادیر مجموعه عدم‌قطعیت، در برابر ناشدنی[2]بودن مقاومت کنند.

بنابراین با در نظر گرفتن مجموعه‌های عدم‌قطعیت U برای هر یک از محدودیت‌ها می‌توان محدودیت (۳۶) را به‌صورت عبارت (۳۷) بازنویسی کرد.

(۳۷)

$$\sum_{m \notin M_i} a_{im} x_m + \sum_{k \notin K_i} b_{ik} y_k + \max_{\xi_{ij} \in U} \left\{ -\xi_{i0} \hat{p}_i + \sum_{m \in M_i} \xi_{im} \hat{a}_{im} x_m + \sum_{k \in K_i} \xi_{ik} \hat{b}_{ik} y_k \right\} \le p_i$$

اشکال مختلفی از مجموعه‌های عدم‌قطعیت U را می‌توان در نظر گرفت. از مهم‌ترین این اشکال، «مجموعه عدم‌قطعیت جعبه‌ای[3]»، «مجموعه عدم‌قطعیت چندوجهی[4]»، «مجموعه عدم‌قطعیت بیضوی[5]» و همچنین برخی ترکیبات آن‌ها را می‌توان نام برد. در پژوهش حاضر، از مجموعه عدم‌قطعیت ترکیبی «جعبه‌ای+بیضوی» بهره گرفته شده است. این مجموعه عدم‌قطعیت را می‌توان با استفاده از اشتراک نُرم ۲ و نُرم بی‌نهایت برای بردارِ داده‌هایِ غیرقطعی به‌صورت زیر تعریف نمود.

$$U_{2\cap\infty} = \left\{ \xi \mid \sqrt{\sum_{j \in J_i} \xi_j^2} \le \Omega,\ \left|\xi_j\right| \le \Psi, \quad \forall j \in J_i \right\}$$

در اینجا Ω و Ψ پارامترهای قابل تنظیمی هستند که اندازه مجموعه عدم‌قطعیت را کنترل می‌کنند. به طورکلی، چنانچه $\Psi \leq 1$ و $\Omega \geq \sqrt{|J_i|}$ (که در آن $|J_i|$ تعداد اعضا یا کاردینالیتی[1] مجموعه J_i است)، در این صورت تمام فضای عدم‌قطعیت با مجموعه U پوشش داده می‌شود.

براساس تعاریف فوق، اگر U «مجموعه عدم‌قطعیت جعبه‌ای+بیضوی» باشد، همتای استوار عبارت غیرقطعی (۳۵) را می‌توان در نهایت به صورت مجموعه روابط (۳۸) نمایش داد [۲۵].

$$\begin{cases} \sum_{m\notin M_i} a_{im}x_m + \sum_{k\notin K_i} b_{ik}y_k + \Psi\left[\sum_{m\in M_i}\hat{a}_{im}u_{im} + \sum_{k\in K_i}\hat{b}_{ik}u_{ik} + \hat{p}_i u_{i0}\right] \\ \qquad + \Omega\sqrt{\sum_{m\in M_i}\hat{a}_{im}^2 z_{im}^2 + \sum_{k\in K_i}\hat{b}_{ik}^2 z_{ik}^2 + \hat{p}_i^2 z_{i0}^2} \leq p_i \\ -u_{im} \leq x_m - z_{im} \leq u_{im} \qquad \forall m \in M_i \\ -u_{ik} \leq y_k - z_{ik} \leq u_{ik} \qquad \forall k \in K_i \\ -u_{i0} \leq 1 + z_{i0} \leq u_{i0} \end{cases} \qquad (۳۸)$$

۴- حل مدل و یافته‌های پژوهش

این بخش از مقاله به مطالعه عددی مسئله طراحی زنجیره تأمین مبتنی بر قیمت‌گذاری پویا و بهینه‌سازی استوار اختصاص دارد. در این بخش با بررسی نتایج عددی به مقایسه رفتار مدل اصلی مقاله در مقایسه با «مدل زنجیره تأمین مبتنی بر پارامترهای قطعی و قیمت‌گذاری ایستا» پرداخته خواهد شد.

پیش از هر چیز لازم است پارامترهای مورد استفاده در این مدل معرفی پرداخت شوند. با هدف تطابق هرچه بیشتر مدل با شرایط واقعی، تلاش گردید تا با بهره‌گیری از مطالعات ارائه شده در ادبیات تحقیق، پارامترها به گونه‌ای تعریف شوند که تخمین مناسبی از واقعیت ارائه دهند. از میان این مطالعات در اینجا از مطالعه پِنگ و اشنایدر[2] جهت تعریف و مقداردهی پارامترهای مسئله به خصوص پارامترهای ظرفیت استفاد شد [۲۶].

مسئله حاضر شامل پنج تأمین‌کننده بالقوه، چهار مکان بالقوه جهت مراکز تولید، پنج مکان بالقوه جهت مراکز توزیع و پنج محل مختلف جهت تحویل محصولات به مشتریان است. همچنین از نظر افق زمانی، مسئله برای دو دوره زمانی استراتژیک که هر یک شامل چهار

دوره عملیاتی هستند، مدل‌سازی گردید. به علاوه فرض گردید، زنجیره تأمین به تولید سه نوع محصول مختلف (متشکل از حداکثر سه نوع مواد اولیه و قطعات مختلف) اختصاص دارد. همچنین شش سطح قیمت‌گذاری گسسته برای محصولات در نظر گرفته شد. سایر داده‌های مسئله به صورت تصادفی و براساس تابع توزیع یکنواخت تعریف شده‌اند که حدود آن‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است. همچنین لازم است در خصوص تنظیم پارامترهای مختلف مسائل، از جمله پارامترهای مرتبط با هزینه و ظرفیت تسهیلات شبکه تأمین، نکاتی که در ادامه می‌آیند، مورد توجه قرار گیرد:

۱. هزینه حمل‌ونقل، متناسب با فاصله میان این تسهیلات تعیین گردید.

۲. با در نظر گرفتن عوامل اقتصادی از قبیل نرخ تورم، فرض گردید در هر دوره استراتژیک هزینه‌های تأمین، تولید و حمل‌ونقل نسبت به دوره قبل ۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

۳. با در نظر گرفتن بهبود عملکرد و همچنین ارتقاء تکنولوژی، فرض گردید ظرفیت تمامی تسهیلات در هر دوره زمانی استراتژیک، ۱۵ درصد افزایش می‌یابد.

۴. هزینه فرصت از دست‌رفته در هر دوره زمانی برای هر یک از محصولات، برابر قیمت آن محصول به علاوه ۱۰ درصد از حداقل قیمتی که مشتریان برای آن محصول حاضر به پرداخت هستند در نظر گرفته شده است.

۵. ظرفیت مسیرهای مواصلاتی میان مراکز مختلف زنجیره تأمین نیز با توجه به امکان بهبود عملکرد و ارتقاء تکنولوژی با افزایش ۱۵ درصدی نسبت به دوره استراتژیک قبلی در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- داده‌های پایه مدل

ظرفیت تأمین و تولید محصولات		هزینه ثابت احداث تسهیلات	
$\tilde{Cap}^{SupSK}_{sk\eta t}$	U(3000, 5000)	$C^{FixS}_{s\eta}$	U(10000, 30000)
$\tilde{Cap}^{ProMP}_{mp\eta t}$	U(3000, 5000)	$C^{FixM}_{m\eta}$	U(50000, 150000)
ظرفیت نگهداری مواد اولیه و محصولات		$C^{FixW}_{w\eta}$	U(20000, 80000)
$\tilde{Cap}^{InMK}_{smk\eta t}$	U(1500, 2500)	هزینه تهیه مواد اولیه و تولید محصولات	
$\tilde{Cap}^{InMP}_{mp\eta t}$	U(750, 1250)	$C^{SupSK}_{sk\eta t}$	U(30, 60)
$\tilde{Cap}^{InWP}_{wp\eta t}$	U(750, 1250)	$C^{ProMP}_{mp\eta t}$	U(70, 120)
ظرفیت حمل‌ونقل میان تسهیلات		هزینه‌های حمل‌ونقل	

$C^{TrSM}_{smk\eta t}$	$U(0.5, 1.5) * D(s, m)$	$\tilde{Cap}^{TrSM}_{sm\eta t}$	$U(3000, 5000)$
$C^{TrMW}_{mwp\eta t}$	$U(0.5, 1.5) * D(m, w)$	$\tilde{Cap}^{TrMW}_{mw\eta t}$	$U(3000, 5000)$
$C^{TrWC}_{wcp\eta t}$	$U(0.5, 1.5) * D(w, c)$	$\tilde{Cap}^{TrWC}_{wc\eta t}$	$U(3000, 5000)$
هزینه‌های نگهداری موجودی		پارامترهای تابع تقاضا محصولات	
$C^{InMK}_{smk\eta t}$	$U(2, 12)$	$Int_{cp\eta t}$	$U(1000, 1600)$
$C^{InMP}_{mp\eta t}$	$U(2, 12)$	$Slp_{cp\eta t}$	$U(1, 1.6)$
$C^{InWP}_{wp\eta t}$	$U(2, 12)$		

پس از تنظیم داده‌های پایه‌ای، مسئله پیکربندی زنجیره تأمین مبتنی بر قیمت‌گذاری پویا و بهینه‌سازی استوار، با استفاده از نرم‌افزار GAMS و بسته حل‌کننده Gurobi[1] حل گردید. لازم به توضیح است که ماهیت مدل بهینه‌سازی استوار «جعبه‌ای+بیضوی» از نوع برنامه‌ریزی مقید درجه‌دوم عددصحیح مختلط (MIQCP)[2] است. موضوع دیگری که در اینجا باید به آن اشاره شود، تنظیم «سطح استواری»[3] یا «سطح مقاومت» برای پارامترهای غیرقطعی مسئله است. منظور از سطح استواری این است که پارامترهای مدل بهینه‌سازی استوار به گونه‌ای تنظیم شوند که برای تمامی حالات غیرقطعی، در صورت نوسان در محدوده سطح استواری، پاسخ بهینه، همچنان موجه و بهینه باقی بماند. بر این اساس حل مسئله بهینه‌سازی استوار در سطح استواری ده درصد، به این معنا است که پاسخ بهینه با توجه به این واقعیت محاسبه شده است که مقدار تمامی پارامترهای غیرقطعی مسئله می‌توانند در محدوده ۹۰ تا ۱۱۰ درصدی مقدار اسمی پارامترها نوسان کنند، بدون آنکه پاسخ بهینه، از حالت بهینگی خارج شود.

پس از حل مسئله پیکربندی زنجیره تأمین مبتنی بر دو رویکرد قیمت‌گذاری پویا و بهینه‌سازی استوار (در سطح استواری ۱۰٪)، به منظور تعیین سنجش عملکرد این مدل، یک مدل دیگر با فرض قیمت‌گذاری ایستا (قیمت ثابت) و پارامترهای قطعی (بر اساس داده‌های پایه‌ای) نیز مورد حل قرار گرفت تا معیار مشخصی جهت بررسی عملکرد مدل اصلی مقاله حاضر باشد. در مدل قیمت‌گذاری ایستا از متوسط تقاضا و قیمت در تابع قیمت-پاسخ مشتریان استفاده خواهد شد. بر همین اساس، مقدار تقاضای قطعی و همچنین قیمت ایستا به صورت $\bar{Pr}_{p\eta} = Int^{Linear}_{cp\eta t} / 2Slp^{Linear}_{cp\eta t}$ و $D^{Static}_{cp\eta t} = Int^{Linear}_{cp\eta t} / 2$ تعیین خواهد شد. به

علاوه به جای پارامترهای غیرقطعی مسئله اصلی، در این مدل پارامترها به صورت قطعی در نظر گرفته شده و مقدار آن‌ها برابر مقدار اسمی پارامتر متناظر در نظر گرفته شده است.

۱-۴- نتایج محاسباتی و تحلیل حساسیت

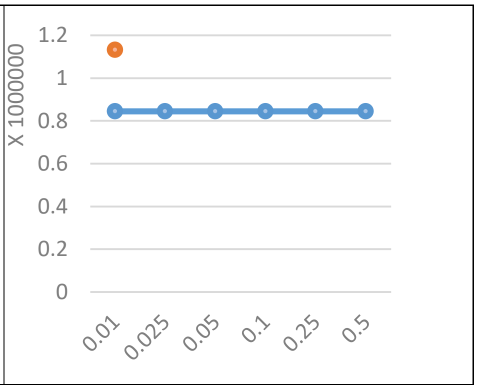
با بررسی نتایج جدول ۲ مشخص می‌شود «مدل مبتنی بر قیمت‌گذاری پویا و بهینه‌سازی استوار» به‌صورت کلی نسبت به «مدل قیمت‌گذاری ایستا» عملکرد مناسب‌تری دارد. این موضوع ناشی از کاهش هزینه‌های تولید و توزیع (شامل مجموع هزینه‌های ثابت، هزینه حمل‌ونقل، هزینه نگهداری و تعمیرات، هزینه فرصت از دست‌رفته و همچنین هزینه تولید) است. این کاهش هزینه که به سبب ادغام تقاضا و مدیریت نوسانات آن رخ می‌دهد، موجب می‌گردد تا در حالی که مدل قیمت‌گذاری ایستا (به دلیل فروش محصولات در سطوح قیمتی بالاتر) درآمدی بیشتر از مدل اصلی کسب می‌کند، با این حال پس از کسر هزینه‌ها، عملکرد نامناسب‌تری را به نمایش بگذارد.

جدول ۲- نتایج «مدل قیمت‌گذاری پویا و بهینه‌سازی استوار» و «مدل قیمت‌گذاری ایستا»

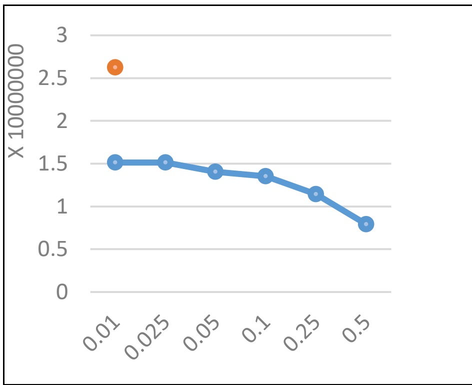
سطح استواری ۱۰ ٪	قیمت گذاری ایستا	
۲۴۸۲۷۵۱۵	۴۴۳۱۸۶۴۹	*مجموع کل درآمد زنجبره تأمین*
۸۴۳۹۳۵,۲	۱۱۳۱۹۵۳	*مجموع هزینه‌های ثابت*
۱۳۵۰۷۷۱۰	۲۶۲۴۵۰۴۴	*مجموع هزینه‌های تهیه و تولید*
۱۷۰۹۰۶۳	۳۳۵۸۹۹۸	*مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل*
۱۱۴۳۸۹,۷	۱۹۲۱۸۱,۲	*مجموع هزینه‌های نگهداری*
۰,۰۰۴۴۵۹	۸۳۱۲۲۶۶	*مجموع هزینه‌های فرصت از دست‌رفته*
۸۳۸۷۲۱۹	۵۰۷۸۲۰۷	*سود کل زنجیره تأمین*
۰:۰۱:۵۴	۰:۰:۰:۵	*زمان حل*

نمودارهای مندرج در شکل ۳ و ۴ به تحلیل حساسیت «سطح استواری» و تأثیر آن بر هزینه‌ها و سود زنجیره تأمین اختصاص دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش «سطح استواری»، به دلیل محافظه‌کاری مدل‌های مبتنی بر بهینه‌سازی استوار، با کاهش میزان تولید روبرو خواهیم بود (بخش f از نمودار شکل ۳). این امر خود موجب کاهش مقدار هزینه‌های تولید، نگهداری و حمل‌ونقل خواهد شد. هرچند این هزینه‌ها حتی در سطوح پایین مقاوت نیز در مقابل هزینه‌های متناظر در «مدل قیمت‌گذاری ایستا» که در نمودارها با نقاط

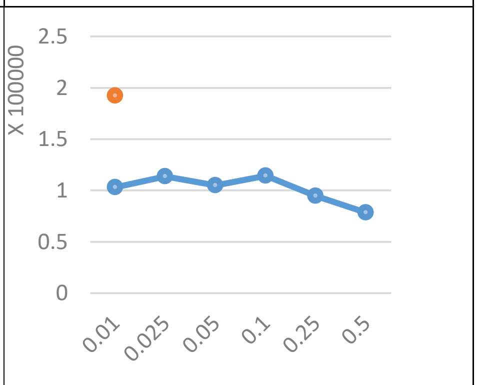
قرمز رنگ نمایش داده شده است، به شکل قابل‌توجهی کمتر است. لازم به توضیح است که به دلیل آنکه هزینه فرصت از دست‌رفته در مدل‌های مبتنی بر قیمت‌گذاری پویا تقریباً برابر صفر است، از گزارش تحلیل حساسیت آن صرف نظر شده است.



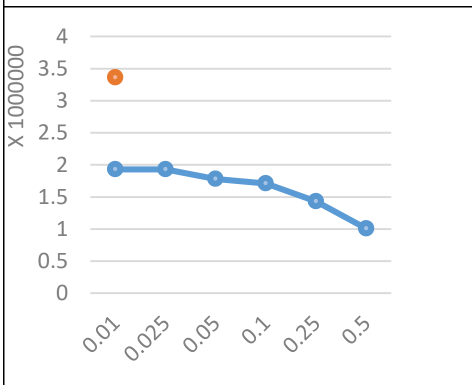
a. تحلیل حساسیت هزینه‌های ثابت



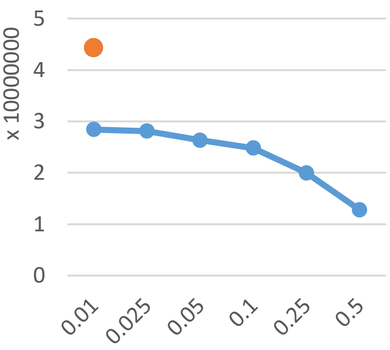
b. تحلیل حساسیت هزینه‌های تولید



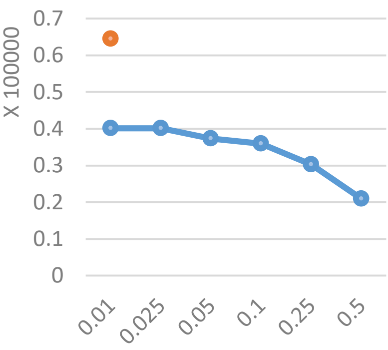
c. تحلیل حساسیت هزینه‌های نگهداری



d. تحلیل حساسیت هزینه‌های حمل‌ونقل



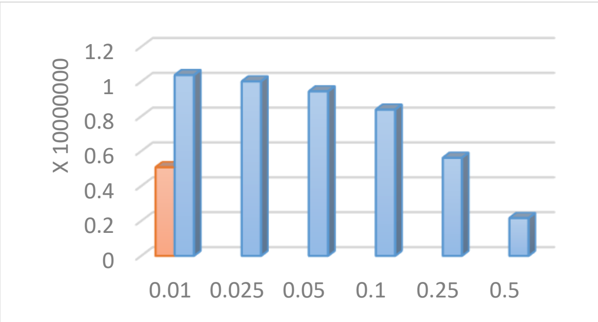
e. تحلیل حساسیت درآمد کل



f. تحلیل حساسیت مجموع محصول تولیدی

شکل ۱– تحلیل حساسیت توابع هزینه و درآمد بر اساس سطح استواری

همچنین با بررسی تحلیل حساسیت میزان سود کل زنجیره تأمین در شکل ۴، مشخص می‌گردد تا سطح استواری ۲۵٪ ، به‌طورکلی عملکرد مدل مقاله حاضر در مقایسه با «مدل مبتنی بر قیمت‌گذاری ایستا و پارامترهای قطعی» به شکل قابل‌توجهی بهتر خواهد بود.



شکل ۲– تحلیل حساسیت سود کل زنجیره تأمین بر اساس سطح استواری

۵- شبیه‌سازی و ارزیابی استواری مدل در برابر نوسانات پارامترهای غیرقطعی

به منظور ارزیابی نتایج مدل‌های مذکور در شرایط واقعی، از شبیه‌سازی[۱]استفاده خواهد شد. شبیه‌سازی، یا به طور دقیق‌تر محقق‌سازی[۲]وقوع داده‌های غیر قطعی، از جمله راه‌هایی است که به منظور سنجش کیفیت پاسخ‌ها در بهینه‌سازی تحت شرایط عدم‌قطعیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. شیوه پیاده‌سازی این رویکرد به صورت کامل توسط یک شبه کُد در

شکل ۳ نمایش داده شده است. به طور خلاصه، در این شیوه پاسخ به دست‌آمده برای مدل، بر اساس مقادیر تصادفی (مبتنی بر یک تابع توزیع مناسب) پارامترهای غیرقطعی مسئله ارزیابی خواهد شد. باید توجه داشت که در این حالت امکان نقض شدن برخی از قیود مسئله وجود خواهد داشت. در این حالت با جریمه کردن تابع هدف (متناسب با میزان نقض قیود)، کیفیت پاسخ برای آن شبیه‌سازی خاص ارزیابی می‌شود. این جریمه معمولاً به صورت ضریبی از هزینه‌های لازم جهت موجه‌سازی قیود نقض شده لحاظ خواهد شد. بنابراین، مقدار جدید تابع هدف برابر خواهد بود با مقدار تابع هدف به ازای پاسخ ناموجه، منهای حاصل‌ضرب هزینه لازم جهت موجه‌سازی پاسخ در یک ضریب جریمه از پیش مشخص شده.

گام ۰ (مقداردهی اولیه):

تنظیم پارامترهای مسئله شامل:

- پارامترهای قیمت و تقاضا بر اساس تابع قیمت–پاسخ
- پارامترهای ساختاری مسئله شامل ظرفیت، ضرایب تولید، هزینه‌های تولید، نگهداری و حمل‌ونقل و ...

گام ۱ (حل اولیه):

- حل مسئله مبتنی بر قیمت‌گذاری ایستا (متوسط تقاضا) و پارامترهای قطعی
- حل مسئله مبتنی بر قیمت‌گذاری پویا، پارامترهای غیرقطعی و بهینه‌سازی استوار

گام ۲ (شبیه‌سازی):

به ازای مجموعه ضرایب جریمه $\{1,1/5,2\}$ **تکرار شود:**

به ازای تعداد حالات در نظر گرفته شده برای نوسانات $\{0/01,0/05,0/1,\dots\}$ **تکرار شود:**

به ازای تعداد آزمایشات ($n=30$) **تکرار شود:**

- یک مقدار تصادفی برای پارامترهای غیرقطعی مسئله تولید شود.
- پاسخ‌های حاصل از گام اول، بر اساس این مقادیر تصادفی، ارزیابی شود.

اگر پاسخ‌ها به ازای مقادیر تصادفی موجه بود **آنگاه** :

- به گام ۳ بروید

در غیر این صورت:

- مقدار تابع هدف را به میزان درجه ناموجه بودن پاسخ (و بر اساس ضریب جریمه) جریمه کرده و سپس به گام ۳ بروید.

پایان تکرار

پایان تکرار

پایان تکرار

گام ۳ (ارزیابی):

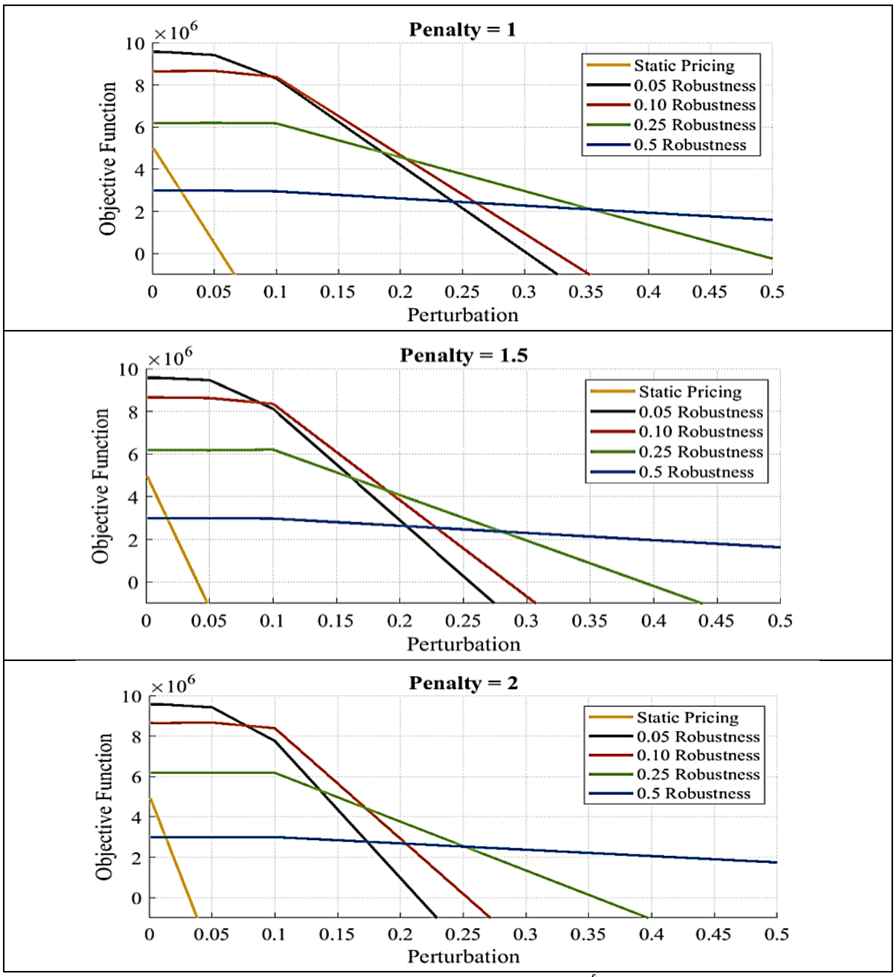
- تعیین میانگین مقادیر توابع هدف گام ۲، جهت مقایسه عملکرد مدل‌ها با یکدیگر.

شکل ۳- شبه کد ارزیابی پاسخ مدل‌ها

به منظور انجام شبیه‌سازی وقوع نوسانات، مجموعه مختلفی از نوسانات در نظر گرفته شد. بر اساس این نوسانات مقدار محقق شده پارامترهای غیرقطعی مسئله، به صورت تصادفی در محدوده (مقدار اسمی × نوسان ± مقدار اسمی) تعیین گردید. همچنین به منظور تحلیل حساسیت تأثیر ضرایب جریمه برای حالات نشدنی، از سه سطح مختلف جریمه استفاده شد. در نهایت با هدف افزایش قابلیت اطمینان نتایج، در هر یک از سطوح نوسان مورد مطالعه، ۳۰ آزمایش متفاوت انجام شد؛ که متوسط پاسخ‌های بهینه به ازای هر یک از سطوح نوسان در نمودارهای شکل ۶ نمایش داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سطح استواری، مقدار متوسط تابع هدف «مدل‌های مبتنی بر قیمت‌گذاری پویا و بهینه‌سازی استوار» با سرعت بسیار کمتری در برابر نوسانات موجود کاهش پیدا خواهند کرد. برای مثال درسطح جریمه واحد (که به معنای رفع مسئله ناموجه‌بودگی[1]با صرف همان هزینه معمول است)، مدل‌های استوار با سطح استواری ۱۰ درصد (منحنی قرمز رنگ) و ۲۵ درصد (منجنی سبز رنگ) تا محدوده نوسانات ۱۰ درصد، بی‌آنکه شاهد کاهش سود باشیم، در برابر نوسانات مقاومت نشان داده و در همان سطح سودآوری به عملکرد خود ادامه خواهند داد. این در حالی است که مقدار تابع هدف مدل مبتنی بر قیمت‌گذاری ایستا (که در شکل با رنگ زرد نمایش داده شده است) در محدوده پنج درصد از حالت سوددهی خارج شده و به فرم زیان‌ده تبدیل خواهد شد.

طبیعی است که با افزایش سطح استواری، مقدار سود زنجیره تأمین کاهش خواهد یافت، با این حال، همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تجزیه‌وتحلیل هزینه-فرصت برای این کاهش سود در مقایسه با میزان استواری کسب شده، می‌تواند حائز اهمیت باشد. برای مثال در سطح جریمه واحد، با افزایش سطح استواری از ۵ درصد به ۲۵ درصد (یعنی پنج برابر شدن سطح استواری) مقدار تابع هدف تنها به میزان ۴۰ درصد کاهش پیدا خواهد کرد. این در حالی است مدل اول (منحنی مشکی رنگ با سطح استواری ۵٪) عملاً در شرایطی که نوسانات پارامترهای غیرقطعی ۳۰ درصد یا بیشتر باشد، زیان‌ده خواهد بود. در حالی که مدل دوم (منحنی سبز رنگ با سطح استواری ۱۰٪) همچنان می‌تواند عملکرد زنجیره را حفظ کند (اگر چه در حدود ۵۰ درصد از سود آوری خود را از دست می‌دهد). این تجزیه‌وتحلیل به ذی‌نفعان و تصمیم‌گیران زنجیره تأمین امکان می‌دهد تا به منظور مدیریت ریسک زنجیره، تصمیمات مقتضی را به گونه‌ای اتخاذ نمایند که عملکرد و سودآوری طولانی مدت زنجیره را تضمین نماید.



شکل ۴- نتایج شبیه‌سازی تأثیر نوسانات بر تابع هدف در حضور ضرایب جریمه مختلف

در نهایت، بررسی متوسط مقدار جریمه اعمال شده بر روی این مدل‌ها، به خوبی توانایی آن‌ها را در تولید پاسخ‌های «بهینه استوار» و «شدنی استوار» به نمایش می‌گذارد. برای توضیح این موضوع مقدار متوسط جریمه اعمال شده را برای تمامی مدل‌های مورد مطالعه که در جدول ۴ قابل مشاهده است، بررسی می‌کنیم. مشاهده می‌شود که پاسخ‌های بهینه به

دست آمده از مدل‌های طراحی شده بر اساس رویکرد بهینه‌سازی استوار، به ازای نوسانات کوچک‌تر یا مساوی سطح استواری‌شان، در برابر ناموجه‌شدن به خوبی مقاومت کرده و مقدار متوسط تابع جریمه‌شان برابر صفر است. به عبارت دیگر، این پاسخ‌ها همان‌طور که پیشتر گفته شد «شدنی استوار» و «بهینه استوار» می‌باشند. به علاوه در نوسانات بالاتر از سطح استواری نیز، مقدار جریمه تحمیل شده به تصمیم‌گیران توسط این پاسخ‌ها به شکل قابل ملاحظه‌ای کمتر از مدل‌های قطعی است، که حکایت از عملکرد بهتر آن‌ها دارد.

جدول ۳- متوسط جریمه اعمال شده، درشبیه سازی نوسانات

	نوسانات شبیه‌سازی شده					
مدل‌ها	۰,۰۱	۰,۰۵	۰,۱	۰,۲۵	۰,۵	۰,۷۵
قیمت‌گذاری ایستا	۶۷۳۰۱۷	۳۳۶۵۰۸۶	۶۷۳۲۱۴۱	۱۷۰۴۰۸۰۵	۳۴۴۹۱۳۴۷	۵۲۳۵۸۲۸۵
استواری ۵٪	۰	۰	۴۵۳۶۱۴	۳۳۵۰۴۹۶	۱۰۰۹۷۵۰۵	۱۷۸۱۹۱۴۰
استواری ۱۰٪	۰	۰	۰	۲۰۳۰۰۸۰	۸۰۳۲۳۷۵	۱۵۸۰۲۶۶۶
استواری ۲۵٪	۰	۰	۰	۰	۲۹۳۶۵۹۷	۹۰۶۹۱۸۴
استواری ۵۰٪	۰	۰	۰	۰	۰	۲۳۶۲۸۱۵

۶- نتیجه‌گیری و مطالعات آتی

این پژوهش با هدف ارائه یک مدل پیکربندی زنجیره تأمین در شرایط عدم‌قطعیت، بر اساس دو رویکرد بهینه‌سازی استوار و قیمت‌گذاری پویا انجام پذیرفت. پس از صورت‌بندی مدل مذکور، با حل یک مسئله عددی عملکرد آن در مقایسه با یک مدل پایه (قطعی و مبتنی بر قیمت‌گذاری ایستا) مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت با انجام یک شبیه‌سازی گسترده، عملکرد این مدل در شرایط افزایش نوسانانت پارامترهای غیرقطعی سنجیده شد. همان‌طور که به تفصیل توضیح داده شد، مدل حاضر مقاومت و استواری قابل ملاحظه‌ای در برابر نوسانات پارامترهای غیرقطعی نشان داده و حتی برای سطوح بالای نوسان نیز تا حد زیادی از غیرموجه شده پاسخ‌ها جلوگیری می‌کند. همچنین نتایج به دست آمده از حل مدل و شبیه‌سازی‌های انجام شده در خصوص نوسانات، به خوبی عملکرد مناسب مدل ارائه شده را در مقایسه با سایر مدل‌ها نمایش می‌دهد.

از جمله نتایج مدیریتی مدل حاضر، می‌توان کمک به تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب تأمین‌کنندگان و برون‌سپاری تولید و حمل‌ونقل در صورت وقوع اختلال در زنجیره تأمین را

نام برد. همچنین در چنین شرایطی، مدل حاضر امکان تصمیم‌گیری بهینه، جهت مکان‌یابی تسهیلات تولید و انبارش به نحوی که با ارضای حداکثر تقاضای مشتریان، موجب بیشینه‌سازی سود کل زنجیره شود را فراهم می‌آورد. به‌طورکلی، کارآیی هر مدل ریاضی در مقام عمل، به گستره مفروضات در نظر گرفته شده برای آن بستگی دارد. بر همین اساس، خروجی مدل حاضر برای پیکربندی زنجیره‌های تأمین با ماهیت «تولید برای انبار» که چندین محصول مختلف را تولید کرده و از طریق خرده‌فروشان به دست مشتریان می‌رسانند و امکان قیمت‌گذاری دارند، قابل استفاده است. برای مثال می‌توان به زنجیره‌های تأمین تولید خودرو، لوازم خانگی، محصولات الکترونیکی و غیره اشاره نمود.

جهت پیشنهادات آتی، می‌توان به در نظر گرفتن هزینه‌های زنجیره تأمین به‌صورت غیرقطعی، در نظر گرفتن محصولات دارای چرخه بازگشت (زنجیره تأمین حلقه بسته) و در نظر گرفتن محصولات فاسد شدنی اشاره نمود. بررسی اشکال دیگر مجموعه‌های عدم‌قطعیت می‌تواند درک بهتری از مسئله عدم‌قطعیت در زنجیره تأمین را فراهم آورد. همچنین با توجه به زمان حل قطعی مدل مسئله حاضر، استفاده از رویکردهای حل مبتنی بر الگوریتم‌های تجزیه (با توجه به ماهیت عدد صحیح برخی متغیرها) و الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری برای مسائلی با ابعاد بزرگ می‌تواند راهگشا باشد. به علاوه در نظر گرفتن سناریوهای اختلال و از کار افتادن زنجیره تأمین، می‌تواند تطابق مدل حاضر را با مشکلات واقعی ریسک در زنجیره‌های تأمین به شکل قابل‌توجهی افزایش دهد.

۷- پی‌نوشت‌ها

۱. Lean Production
۲. Just in Time
۳. Global Sourcing Models
٤. Chopra and Sodhi
٥. Redundant Suppliers
٦. Pool and Aggregate Demand
۷. Snyder
۸. Bertsimas & Thiele
۹. Ben-Tal
۱۰. Pan & Nagi
۱۱. Mulvey
۱۲. Sangaiah
۱۳. Almaraj & Trafalis
۱٤. Barzinpour & Taki

۱۵. Tang & Nurmaya
۱۶. Location-Allocation problem
۱۷. Price Sensitive Demands
۱۸. Mixed-Integer Nonlinear Programming
۱۹. Total Revenue
۲۰. Total Fixed Cos
۲۱. Total Production Cost
۲۲. Total Transportation Cost
۲۳. Total Inventory Cost
۲۴. Total Opportunity Cost
۲۵. Robust counterpart
۲۶. Robust feasible
۲۷. Infeasibility
۲۸. Box uncertainity set
۲۹. Polyhedral uncertainity set
۳۰. Ellipsoidal uncertainity set
۳۱. Cardinality
۳۲. Peng & Snyder
۳۳. Solver
۳۴. Mixed Integer Quadratic Constraint Programming
۳۵. Level of Robustness
۳۶. Simulation
۳۷. Realization
۳۸. Infeasiblity

۸-منابع

[1] Sheffi, Y. (2005). Building A Culture Of Flexibility: Longer supply chains means more risk. What's needed is a nimble organization, *World Trade*, vol. 18, no. 12, p. 26.

[2] Gong, J., Mitchell, J. E., Krishnamurthy, A., and Wallace, W. A. (2014). An interdependent layered network model for a resilient supply chain, *Omega*, vol. 46, pp. 104–116.

[3] Shah, J. (2009). *Supply Chain Management: Text and Cases*: Pearson Education.

[4] Chopra, S. and Sodhi, M. S. (2004). Supply-chain breakdown, *MIT Sloan Management Review*, vol. 46, no. 1, pp. 53–61.

[5] Kolyaei, M., Azar, A., Amini, M., and Rajabzadeh Gatari, A. (2016). Design of

integrated mathematical model for closed-loop supply chain, *Management Research in Iran*, vol. 20, no. 1 (in Persian).

[6] Tavakkoli-Moghaddam, R., Omidi-Rekavandi, M., and Ghodratnama, A. (2014). Mathematical modeling for the forward and reverse logistics network design, *Management Research in Iran*, vol. 17, no. 4, pp. 43–63 (in Persian).

[7] tarin, n., Azar, A., and ebrahimi, s. a. (2018). Design of multi-period Reverse logistic model with different product recovery routes under uncertainty, *Modern Research in Decision Making*, vol. 2, no. 4, pp. 29–56 (in Persian).

[8] Baghalian, A., Rezapour, S., and Farahani, R. Z. (2013). Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: A real-life case, *European Journal of Operational Research*, vol. 227, no. 1, pp. 199–215.

[9] Radfar, R., khodadadian, d., and toloee eshlaghi, a. (2020). A Multi-Objective Green Supply Chain, *Modern Research in Decision Making*, vol. 5, no. 3, pp. 1–28 (in Persian).

[10] Snyder, L. V. (2003). Supply chain robustness and reliability: Models and algorithms (PHD Thesis), *Dept. of Industrial Engineering and Management Sciences, Northwestern University: Evanston, IL*.

[11] Bertsimas, D. and Thiele, A. A robust optimization approach to supply chain management in *Integer programming and combinatorial optimization*: Springer (2004), pp. 86–100.

[12] Pishvaee, M. S., Rabbani, M., and Torabi, S. A. (2011). A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 35, no. 2, pp. 637–649.

[13] Ben-Tal, A., Chung, B. D., Mandala, S. R., and Yao, T. (2011). Robust optimization for emergency logistics planning, *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 45, no. 8, pp. 1177–1189.

[14] Pan, F. and Nagi, R. (2010). Robust supply chain design under uncertain demand

in agile manufacturing, *Computers & Operations Research*, vol. 37, no. 4, pp. 668–683.

[15] Sangaiah, A. K., Tirkolaee, E. B., Goli, A., and Dehnavi-Arani, S. (2020). Robust optimization and mixed-integer linear programming model for LNG supply chain planning problem, *Soft Computing*, vol. 24, no. 11, pp. 7885–7905.

[16] Gholami, F., Paydar, M. M., Hajiaghaei-Keshteli, M., and Cheraghalipour, A. (2019). A multi-objective robust supply chain design considering reliability, *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 36, no. 6, pp. 385–400.

[17] Zarrinpoor, N. and Omidvari, Z. (2020). A Robust Optimization Model for the Strategic and Operational Design of the Oil Supply Chain, *Industrial Management Perspective*, vol. 10, no. 4, pp. 155–191 (in Persian).

[18] Almaraj, I. I. and Trafalis, T. B. (2019). An integrated multi-echelon robust closed- loop supply chain under imperfect quality production, *Green Manufacturing and Distribution in the Fashion and Apparel Industries*, vol. 218, pp. 212–227.

[19] Hosseini-Motlagh, S.-M., Samani, M. R., and Abbasi Saadi, F. (2019). Strategic optimization of wheat supply chain network under uncertainty, *Operational Research*.

[20] Barzinpour, F. and Taki, P. (2016). A dual-channel network design model in a green supply chain considering pricing and transportation mode choice, *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1–19.

[21] Tang, O., Nurmaya Musa, S., and Li, J. (2012). Dynamic pricing in the newsvendor problem with yield risks, *International Journal of Production Economics*, vol. 139, no. 1, pp. 127–134.

[22] Ahmadi-Javid, A. and Ghandali, R. (2014). An efficient optimization procedure for designing a capacitated distribution network with price-sensitive demand, *Optim Eng*, vol. 15, no. 3, pp. 801–817.

[23] Ahmadi-Javid, A. and Hoseinpour, P. (2015). Incorporating location, inventory

and price decisions into a supply chain distribution network design problem, *Computers & Operations Research*, vol. 56, pp. 110–119.

[24] Fattahi, M., Mahootchi, M., Govindan, K., and Moattar Husseini, S. M. (2015). Dynamic supply chain network design with capacity planning and multi-period pricing, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 81, pp. 169–202.

[25] Li, Z., Ding, R., and Floudas, C. A. (2011). A comparative theoretical and computational study on robust counterpart optimization, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 50, no. 18, pp. 10567–10603.

[26] Peng, P., Snyder, L. V., Lim, A., and Liu, Z. (2011). Reliable logistics networks design with facility disruptions, *Supply chain disruption and risk management*, vol. 45, no. 8, pp. 1190–1211.