

ارائه‌ی مدلی برای قیمت‌گذاری کالاهای فاسدشدنی غیرآنی با در نظر گرفتن سن، قیمت و تقاضا به‌عنوان متغیر و رضایت مراکز زنجیره تأمین به‌عنوان تابع هدف

الهه کامکار^۱، دنیا رحمانی^{۲*}، عماد روغنیان^۳

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

خلاصه

قیمت‌گذاری یکی از مهم‌ترین تصمیماتی است که یک شرکت یا سازمان می‌تواند اتخاذ کند، چون قیمت بازتاب‌دهنده‌ی میزان ارزشی است که یک محصول آن را دارا است و مشتری حاضر به پرداخت بهای آن است. این موضوع زمانی اهمیت بیشتری پیدا خواهد کرد که محصول با فساد روبه‌رو است. لذا در این مقاله به بررسی قیمت‌گذاری کالاهای فاسدشدنی غیر آنی خواهیم پرداخت، به‌طوری‌که تقاضا تابعی غیر خطی از قیمت و سن محصول است. همچنین قیمت تابعی از سن محصول است. مدل مذکور یک مدل دو هدفه است که علاوه بر حداکثر سازی سود، سعی در حداکثرسازی رضایت مراکز مختلف در سطوح زنجیره تأمین دارد. برای حل مدل از روش‌های فرا ابتکاری الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی میرایی ارتعاشات استفاده شده است. نتایج، اعتبار مدل پیشنهادی و عملکرد روش‌ها را تایید می‌کند.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۳۹۸/۷/۱۷

پذیرش ۱۳۹۸/۱۲/۲۲

کلمات کلیدی:

قیمت‌گذاری

کالاهای فاسدشدنی

رضایت مشتریان

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم بهینه‌سازی میرایی

ارتعاشات

درآمد در مدیریت تقاضا، افزایش رضایت مشتری و در نتیجه افزایش سود و درآمدزایی سازمان بسیار تأثیرگذار است. برای توضیح موضوع موردنظر لازم است ابتدا مفاهیم قیمت‌گذاری و کالاهای فاسدشدنی غیر آنی شرح داده شود.

۱-۱- قیمت‌گذاری

مدل‌های قیمت‌گذاری در حوزه مدیریت درآمد غالباً بر پایه محصولات فصلی یا محصولات با دوره عمر محدود توسعه یافته‌اند. از دیگر مفروضات اصلی این مدل‌ها افق فروش محدود، تقاضا وابسته به قیمت و همچنین شرط عدم بازپرسازی ظرفیت می‌باشند [۱]. قیمت از نظر لغوی یعنی سنجش، ارزیابی، اندازه و معیار. قیمت در بازار عبارت است از ارزش مبادله‌ای کالا و خدمت که به‌صورت واحد پول بیان می‌شود.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به رقابتی شدن بازار و همچنین توجه زیاد مشتریان به عواملی نظیر قیمت، کیفیت، مدت زمان تحویل محصول و تنوع زیاد محصولات سبب شده تا مدیریت زنجیره تأمین در سازمان‌های تولیدی اهمیت زیادی پیدا کند. یکی از مهم‌ترین وظایف در مدیریت زنجیره تأمین کاهش هزینه‌ها است. به‌عبارت‌دیگر دیدگاه نوین در زنجیره تأمین بر این است تا از طریق کاهش هزینه‌های زنجیره تأمین، سود زنجیره تأمین را افزایش دهد. اما سؤالی که در اینجا مطرح است این است که آیا تنها کاهش هزینه‌ها کافی است؟ مسلماً جواب این سؤال منفی است. زیرا در محیط‌های رقابتی، سازمانی پویا و زنده است که درآمدزا باشد. بنابراین تعیین قیمت بهینه و استفاده از مباحث مدیریت

* نویسنده مسئول: دنیا رحمانی

تلفن: ۰۲۱-۸۴۰۶۳۳۵۷؛ پست الکترونیکی: drahmani@kntu.ac.ir

را ساده می‌سازد اما نمی‌تواند شرایط واقعی فاسد شدن را بازتاب دهد. بنابراین نرخ فساد با ملاحظات زمان در تحقیقات اخیر شرایط متفاوتی را به وجود آورده است [۳].

پاندا و سها یک مدل برای کالاهای فاسدشدنی با تخفیف قیمت و تقاضای وابسته به موجودی گسترش دادند. در این مدل پس از یک زمان خاص کالا شروع به فساد می‌کند. قیمت فروش ثابت است و تابع تقاضا تا زمان بازپرسازی محصولات تازه، بستگی به موجودی در دسترس و بعد از آن ثابت است [۴].

تیموری و کاظمی به توسعه مدل قیمت‌گذاری کالاهای زوال‌پذیر با نرخ زوال ثابت و با در نظر گرفتن جایگزینی کالاهای فاسد شده پرداختند. در این تحقیق یک زنجیره تأمین سه سطحی، شامل یک تولیدکننده، یک توزیع‌کننده و یک خرده‌فروش در نظر گرفته شده که در آن فقط یک نوع کالای فسادپذیر با نرخ خرابی ثابت عرضه می‌شود. تقاضا در این زنجیره تأمین قطعی و تابعی خطی از قیمت محصول است و بازپرسازی در آن لحظه‌ای است [۵].

پورعلی خوانی و همکاران یک مدل موجودی تولیدکننده برای کالاهای فاسدشدنی وابسته به زمان که از توزیع دو پارامتری وایبول تبعیت می‌کند، توسعه داده‌اند. هدف این مقاله یافتن قیمت بهینه فروش تولیدکننده، سپس زمان بهینه تولید و تعداد دوره‌های تحویل کالا با ملاحظه بیشینه‌سازی سود است [۶].

زانگ و همکاران به قیمت‌گذاری مطلوب پویا و بازپرسازی برای کالاهای رو به وخامت غیرآنی با تقاضای وابسته به سطح موجودی برای یک دوره پرداختند. در این مدل تقاضا وابسته به قیمت و سطح موجودی است. همچنین نرخ فساد ثابت است. منظور از بازپرسازی نقطه‌ای که در آن میزان موجودی به حدی رسیده است که با توجه به رویکرد مربوطه اقدام به سفارش‌دهی و تأمین موجودی موردنیاز می‌نمایند [۷].

اسچولوسر مدل قیمت‌گذاری پویا و تبلیغات کالاهای فاسدشدنی با هزینه نگهداری موجودی را ارائه داد. این مدل در دو حالت تصادفی و قطعی حل گردید. همچنین در این مدل به جای بررسی سطح موجودی بزرگ، موجودی با اندازه‌های مختلف به منظور تعیین رفتار جانبی مدل‌های تصادفی برای موجودی‌های کوچک، در نظر گرفته شده است. نرخ فساد در این مدل ثابت در نظر گرفته شده است و میزان فروش به قیمت و نرخ تبلیغات بستگی دارد [۸].

ربانی و همکاران یک مدل قیمت‌گذاری به همراه سیاست بازپرسازی را با در نظر گرفتن فساد مربوط به کیفیت و کاهش مقدار فیزیکی محصول ناشی از فساد بررسی کردند. زوال کیفیت را آنی و زوال ناشی از کاهش مقدار فیزیکی محصول را غیر آنی در نظر گرفتند [۹].

دی و یانگ مدلی برای قیمت‌گذاری پویای بهینه و سرمایه‌گذاری فناوری حفاظت برای محصولات رو به وخامت با تأثیر قیمت مرجع را ارائه دادند. در این مقاله فرض شده است که کالاهای رو به وخامت از یک متغیر وابسته به زمان تبعیت می‌کند. همچنین فرض شده است که خرده‌فروش قادر به سرمایه‌گذاری برای فناوری برای کاهش نرخ

بر این اساس قیمت‌گذاری به‌طور ساده یعنی تعیین قیمت برای کالا یا خدمت. قیمت‌گذاری فعالیتی است که باید تکرار شود و فرآیندی مداوم و پیوسته است. این تداوم ناشی از تغییرات محیطی و عدم ثبات شرایط بازار است که لزوم جرح و تعدیل قیمت را ایجاد می‌کند.

۱-۲- کالاهای فاسدشدنی غیرآنی

در بسیاری از مدل‌های موجودی فرض بر آن بوده که، اقلام موجودی برای مدت زمان نامحدودی قابل ذخیره هستند. درحالی‌که زوال امری است که در دنیای واقعی برای بسیاری از محصولات با گذشت زمان رخ می‌دهد و چنانچه نرخ زوال قابل چشم‌پوشی نباشد، لحاظ کردن آن در مدل‌سازی سیستم امری ضروری است. تا اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی، تمامی اقلام دارای طول عمر نامتناهی و کاربردپذیری تغییرناپذیر در نظر گرفته می‌شدند. انواع بسیاری از اقلام به اشتباه در این فرض قرار می‌گرفتند. گویال و گیری، اقلام موجودی را در سه دسته تقسیم‌بندی نمودند.

محصولات با طول عمر نامحدود: عمده مدل‌های موجودی با این فرض که محصولات قابل ذخیره‌سازی برای مدت زمان نامحدودی می‌باشند، توسعه یافته‌اند.

محصولات منسوخ شدنی: که اشاره به اقلامی دارد که به دلایل تغییرات سریع تکنولوژی یا ظهور محصولات جدید توسط رقبا، با گذشت زمان ارزش خود را از دست می‌دهند. چنین کالاهایی پس از گذشت فصل فروش آن‌ها یا باید با قیمت بسیار پایین فروخته شده و یا به‌طور کلی از بین بروند. برای مثال قطعات یدکی هواپیماهای نظامی از جمله این کالاها می‌باشند.

محصولات زوال‌پذیر: بسیاری از محصولات نظیر انواع مواد غذایی، دارویی، شیمیایی و خون و ... در این دسته قرار می‌گیرند. در واقع زوال به انواع آسیب‌دیدگی، ضایعات، خشک شدن و یا تبخیر اشاره دارد. زوال به این معناست که کالا از عملکرد مورد انتظار خود انحراف داشته باشد. زوال به‌صورت فسادپذیری، آسیب‌دیدگی، ضایعات، تبخیر، منسوخ شدن، کاهش مطلوبیت یا از بین رفتن سود حاشیه‌ای یک کالا که منجر به کاهش اثربخشی آن می‌شود، تعریف می‌گردد. به‌طور کلی محصولات زوال‌پذیر را می‌توان در سه دسته طبقه‌بندی کرد:

فساد مستقیم؛ مانند سبزیجات، میوه‌ها و سایر مواد غذایی.

تهی شدن فیزیکی؛ مانند گازوئیل و الکل.

نقص فیزیکی؛ مانند کاهش اثربخشی و کیفیت در لوازم الکترونیکی و محصولات دارویی [۲].

در ادامه به‌مرور تعدادی از مقالاتی که در این حوزه منتشر شده‌اند پرداخته شده است و تفاوت این مقاله با مقالات مورد مطالعه آورده شده است.

۲- مرور ادبیات

نرخ فساد فاکتور مهمی در مطالعه کالاهای فاسدشدنی است که ماهیت فاسد شدن اقلام را توصیف می‌کند. در ابتدا اغلب در مطالعات نرخ فساد به‌صورت ثابت در نظر گرفته می‌شدند. درحالی‌که نرخ ثابت مسأله

از قیمت و سن محصول است. چنین تابعی جز در موارد بسیار اندکی نمی‌تواند یک تابع خطی باشد و براساس ضرایب الاستیسیته‌ی متفاوتی که ارائه دادند توابع غیرخطی متفاوتی ارائه داده و تحلیل کردند. شکاف تحقیقاتی مهم دیگری که به چشم می‌خورد این است که با پیشرفت تکنولوژی اطلاعاتی و اینترنت، توزیع کالاهای فاسدشدنی از طریق سفارش‌ها اینترنتی در جهان رو به رشد است درحالی‌که در مقالات مربوط به این حوزه، طراحی کانال‌های چندگانه و ترکیبی سنتی و اینترنتی کمتر به چشم می‌خورد. همچنین در اکثر مطالعات، قیمت را یا به‌صورت ثابت و یا تابعی خطی از سن در نظر گرفته‌اند که این نیز از تطبیق مسئله با دنیای واقعی می‌کاهد.

در این مقاله برای برطرف کردن این شکاف‌های مهم مسأله زنجیره تأمین کالاهای فاسدشدنی غیر آبی با در نظر گرفتن تقاضا به‌صورت تابعی غیر خطی از قیمت و سن محصول که به محصولات فاسدشدنی غیرآبی مانند محصولات کشاورزی منطبق‌تر موردبررسی قرار گرفته است. علاوه بر آن حساسیت فاکتورهای قیمت و سن به هم نیز، به‌عنوان فاکتورهای مجزایی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین قیمت تابعی از سن محصول است. علاوه بر آن، طراحی زنجیره‌ی تأمین موردنظر به‌صورت دو کاناله بر مبنای کانال سنتی و اینترنتی فروش با در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی موردبررسی قرار گرفته است. یکی دیگر از نکات مهم بررسی شده در این مقاله در نظر گرفتن رضایت مراکز مختلف زنجیره تأمین علاوه بر رضایت مشتریان نهایی است که به‌عنوان یک هدف لحاظ شده و مدل سعی در حداکثرسازی این هدف دارد. جدول (۱) نتیجه‌ی مقایسه‌ی تحقیق حاضر با برخی از مرتبط‌ترین تحقیقات قبلی را نشان می‌دهد. در ادامه مدل موردنظر به تشریح آورده شده است.

جدول (۱) بررسی اهداف و رویکرد مقالات مروری

شماره مرجع	تابع هدف		تقاضا وابسته به قیمت	تقاضا وابسته به سن	تقاضا ثابت	محصولات فاسدشدنی	محصولات با عمر	قیمت‌گذاری	چندکاناله
	سود	رهاین							
۱	*				*		*	*	
۲	*				*	*			
۳	*			*		*		*	
۴	*				*	*		*	
۵	*				*	*		*	
۶	*		*			*		*	
۷	*		*			*		*	
۸	*		*			*		*	
۱۰	*		*				*	*	
۲۱	*		*	*		*		*	
۲۲	*		*	*		*		*	
۲۳	*	*			*	*		*	*
این مقاله	*	*	*	*		*		*	*

زوال است. سپس با استفاده از روش برنامه‌ریزی ماکزیمم مقدار سود محاسبه شده و بیشترین مقدار قیمت به‌دست می‌آید [۱۰].

فان و همکاران یک مدل قیمت‌گذاری پویا برای محصولات فاسدشدنی با در نظر گرفتن چهار روش ابتکاری برای بازپرسازی ارائه دادند. نتیجه‌ی مهم تحقیق آن‌ها این بود که نقطه و میزان سفارش بر مبنای میزان تازگی اولیه محصولات کاهش می‌یابد [۱۱].

تسکر و همکاران یک مدل جدید برای قیمت‌گذاری پویا با سیاست بازپرسازی برای محصولات فسادپذیر ارائه دادند. آن‌ها فرض کردند که نرخ فساد وابسته به زمان است [۱۲].

سونی و سوتار یک مدل موجودی را برای کالای فاسدشدنی غیر آبی که در آن تقاضا از نظر ماهیت تصادفی است و به قیمت و تبلیغات بستگی دارد، ارائه دادند، درحالی‌که نرخ خراب شدن متناسب با زمان متغیر است. آن‌ها یک مدل ریاضی با هدف به حداکثر رساندن سود پیش‌بینی‌شده در واحد زمان با تعیین قیمت بهینه و طول چرخه دوباره پر کردن توسعه دادند [۱۳].

واقلا و شاه یک الگوی بازپرسازی برای اقلام فاسدشدنی با سرمایه‌گذاری جهت تبلیغات و تقاضای خرده‌فروشی وابسته به قیمت با محدودیت بودجه در نظر گرفتند. آن‌ها یک مدل بهینه‌سازی به‌منظور قیمت‌گذاری، کنترل هزینه‌های تبلیغاتی و سیاست بازپرسازی با نرخ زوال ثابت جهت حداکثرسازی سود ارائه دادند [۱۴]. لی و همکاران به بررسی قیمت‌گذاری، بازپرسازی و مسئله سرمایه‌گذاری برای تکنولوژی نت برای کالاهای زوال‌پذیر غیرآبی پرداختند. تکنولوژی نت هم بر طول دوره عدم زوال و هم بر میزان زوال تأثیر می‌گذارد. در مدل آن‌ها تقاضای وابسته به قیمت، فساد متغیر با زمان و نرخ عقب‌افتادگی وابسته به زمان انتظار در نظر گرفته شده است [۱۵].

لازم به ذکر است که از آنجاکه مدل‌های ریاضی توسعه داده شده برای قیمت‌گذاری محصولات در زنجیره‌های تأمین جزو مسائل NP-Hard هستند در ادبیات موضوع از روش‌های فراابتکاری زیادی برای حل آن‌ها استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری است که در این حوزه کاربردهای زیادی داشته است [۱۶]. در میان الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاشات که اولین بار توسط مهدی‌زاده و توکلی مقدم [۱۷] ارائه گردید در سال‌های اخیر در این حوزه موردتوجه قرار گرفته است [۱۸-۲۰]. در این مقاله نیز از این دو روش ابتکاری برای حل مسئله در ابعاد بزرگ استفاده شده است.

با مرور تحقیقات صورت گرفته در این حوزه می‌بینیم که شکاف‌های تحقیقاتی مهمی در زمینه‌ی قیمت‌گذاری محصولات فاسدشدنی وجود دارد. اول اینکه وابستگی تقاضا به سن و قیمت به‌صورت همزمان به‌ندرت به چشم می‌خورد. در صورت بررسی نیز از توابع ساده‌شده‌ی خطی برای آن استفاده شده است که لزوماً تطبیقی با واقعیت ندارد. اندزو و همکاران [۲۱] در تحقیق خود این مسئله را موردانتقاد قرار دادند و تشریح کردند در واقعیت بخش عظیمی از محصولات فاسدشدنی غیر آبی مانند صیفی‌جات، میوه‌ها و سبزیجات، تقاضا تابعی

۳- تشریح مسئله و مدل‌سازی

در بسیاری از مطالعات انجام گرفته در زمینه قیمت‌گذاری کالاهای فاسدشدنی، میزان تقاضا یا به‌صورت ثابت و یا تابعی خطی از قیمت و یا سن محصول در نظر گرفته شده است. ادنزو و همکاران در تحقیق خود نشان دادند که بسیاری از محصولات فاسدشدنی غیرآنی از یک تابع غیرخطی وابسته به سن و قیمت تبعیت می‌کنند. آن‌ها میزان تقاضا را به شکل زیر نشان دادند [۲۱].

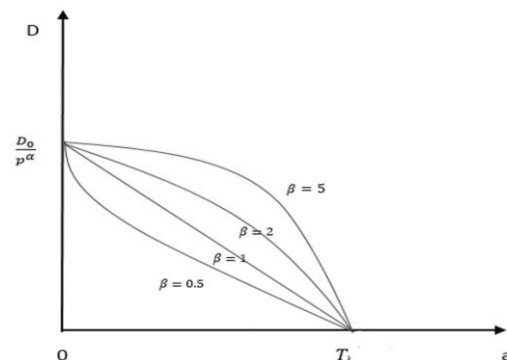
$$D(P, a) = D_0 \times \left(\frac{P}{P_0}\right)^{-\alpha} \times \left(1 - \left[\frac{a}{T_l}\right]^\beta\right) \quad (1)$$

همچنین در آن مطالعه، قیمت‌گذاری به شکل زیر انجام گرفت:

$$P(a) = P_0 \times \left(1 - \left[\frac{a}{T_l}\right]^\beta\right)^\gamma \quad (2)$$

در این مقاله نیز چون مسئله مربوط به قیمت‌گذاری محصولات فاسدشدنی غیرآنی است از روابط فوق برای نشان دادن میزان تقاضا و قیمت‌گذاری مناسب استفاده شده است.

همان‌طور که در تعریف کالاهای فاسدپذیر گفته شد یکی از فاکتورهای بسیار مهم در مسائل مدیریت زنجیره تأمین فاکتور فساد محصولات است. در نظر نگرفتن فساد می‌تواند سبب کاهش سود و افزایش هزینه‌ها گردد. همان‌طور که می‌بینیم در روابط فوق، علاوه بر در نظر گرفتن تأثیر بین قیمت و تقاضا فاکتورهای دیگری نیز مؤثر واقع شده‌اند. میزان تقاضا بدون در نظر گرفتن قیمت و سن محصول (D_0)، قیمت فروش محصول (P)، قیمت بدون در نظر گرفتن تقاضا و سن (P_0)، حساسیت تقاضا به قیمت (α)، حساسیت تقاضا به سن محصول (β)، حساسیت قیمت به سن محصول (γ)، سن محصول (a) و همچنین حداکثر زمانی که برای محصول تقاضا وجود دارد (T_l).



شکل (۱): تأثیر سن محصول بر تقاضا (وابسته به پارامتر β) [۲۱]

با توجه به شکل (۱) در روابط مربوط به قیمت و تقاضا در صورتی که مقدار $\beta = 1$ در نظر گرفته شود، با افزایش سن محصول میزان تقاضا به‌صورت خطی کاهش پیدا می‌کند تا جایی که در حداکثر زمان عمر محصول میزان تقاضا به صفر می‌رسد. در صورتی که مقدار $\beta > 1$ در نظر گرفته شود میزان تقاضا با افزایش سن کاهش پیدا می‌کند اما این کاهش کمتر از حالت $\beta = 1$ خواهد بود. به‌عبارت‌دیگر

کاهش تقاضا با افزایش سن محصول در ابتدای عمر محصول کم است. یعنی سرعت کاهش تقاضا در روزهای ابتدای عمر محصول کم است. اما حالت سوم زمانی است که مقدار $\beta < 1$ را در نظر بگیریم. این حالت به این معنی که در ابتدای عمر محصول کاهش تقاضا سرعت زیادی دارد که در عمل این‌چنین نیست. بهترین حالت، حالت دوم است که به واقعیت نزدیک‌تر است، این مقاله نیز مقدار $\beta > 1$ را برای واقعی‌تر شدن مدل مدنظر قرار داده است. نمودار قیمت براساس سن محصول که حساسیت پارامتر β را نشان می‌دهد نیز از همان رویه شکل ۱ پیروی خواهد کرد.

با توجه به نمودار و توضیحات داده شده سیاست کاهش قیمت نیز باید مانند الگوی کاهش تقاضا در نظر گرفته شود. یعنی $\gamma \geq 0$. در اینجا اگر $a = T_l$ باشد قیمت به صفر می‌رسد یعنی در انتهای زمان عمر محصول که محصول به فساد رسیده است قیمت به صفر می‌رسد و به‌تبع میزان تقاضا نیز صفر خواهد بود. اکنون $\gamma = 0$ به این معنی است که قیمت پویا نیست و سن و قیمت بدون ارتباط هستند درحالی‌که مقادیر بالاتر برای γ باعث کاهش قیمت با توجه به سن خواهد شد. در صورتی که مقدار $\gamma = \beta = 1$ باشد مدل خطی خواهد بود. اما با توجه به رابطه (۱-۳) می‌توان رابطه تقاضا را به این صورت نوشت:

$$D(a) = D_0 \times \left(1 - \left[\frac{a}{T_l}\right]^\beta\right)^{1-\alpha\gamma} \quad (3)$$

با توجه به $1 - \alpha\gamma$ سه حالت مختلف را می‌توان در نظر گرفت که عبارتند از:

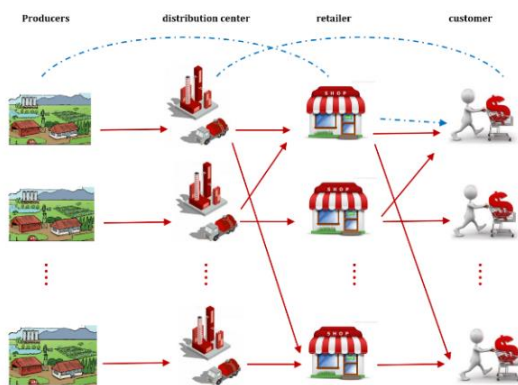
۱- اگر $\gamma = \frac{1}{\alpha}$ تقاضا برای هر سنی مقدار ثابتی است. یعنی این کاهش قیمت برای محصولات مسن‌تر است که، سبب کاهش تقاضا شده است.

۲- اگر $\gamma < \frac{1}{\alpha}$ تقاضا با افزایش سن کاهش می‌یابد.

۳- حالت آخر اگر $\gamma > \frac{1}{\alpha}$ تقاضا برای محصولات مسن افزایش می‌یابد که به معنی تخفیف بسیار شدید است که این حالت در اینجا در نظر گرفته نمی‌شود.

و در نهایت برای حفظ بهینه‌سازی و الاستیسیته $\alpha > 1$ در نظر گرفته خواهد شد.

نمای کلی زنجیره تأمین موردنظر به‌صورت شکل (۲) خواهد بود:



شکل (۲): شبکه زنجیره تأمین کالاهای فاسدشدنی

- همان‌طور که از شکل بالا می‌توان فهمید این زنجیره تأمین دارای ۴ سطح و ۲ کانال است. سطوح زنجیره تأمین عبارتند از: تولیدکننده-ها، مراکز توزیع، خرده‌فروش‌ها و مشتریان. در این شکل خطوط توپر نشان‌دهنده عرضه از طریق کانال سنتی و خط‌چین‌ها عرضه به صورت اینترنتی را نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به خطوط می‌توان سه مسیر را برای رسیدن کالاها به دست مشتریان در نظر گرفت؛ مسیری که تماماً سنتی هستند، مسیرهای تماماً اینترنتی و مسیرهای مختلط که هم سنتی و هم اینترنتی می‌باشند. علت تفکیک این مسیرها به دو نوع اینترنتی و سنتی، تأثیر در هزینه‌ی حمل‌ونقل و رسیدن سریع‌تر محصول به دست مشتری است. در عرضه به صورت سنتی هر مشتری و یا مرکز به مرکز قبل مراجعه نموده و میزان تقاضای خود را خریداری می‌کند. اما در مسیرهای تماماً اینترنتی و یا مختلط به این شکل خواهد بود که هر کدام از مشتری‌ها و مراکز، میزان تقاضای خود از مرکز قبل را به صورت اینترنتی ثبت نموده و طی مدت زمان مشخصی سفارش به دست مشتری می‌رسد. با توجه به تعاریف فوق این سه مسیر عبارتند از:

مسیر ۱: $ijkl$ مسیر تماماً سنتی

مسیر ۲: ijl مسیر مختلط (سنتی، اینترنتی)

مسیر ۳: ikl مسیر تماماً اینترنتی

به صورت خلاصه می‌توان گفت که در این مقاله هدف این است با توجه به رابطه‌ای که بین قیمت و تقاضا وجود دارد قیمت محصولات طوری در نظر گرفته شود که زنجیره تأمین حداکثر تقاضا و در نتیجه حداکثر سود را داشته باشد. یکی از نقاط قوت مقاله پیش رو این است که علاوه بر در نظر گرفتن رضایت و مطلوبیت مشتریان که از طریق قیمت‌گذاری مناسب انجام می‌شود، رضایت مراکز زنجیره تأمین را نیز مدنظر قرار داده است و به دنبال حداکثر کردن رضایت این مراکز نیز هست. می‌توان گفت در این مقاله هدف این است که محصولات مناسب در زمان مناسب و با قیمت مناسب به مشتریان برسند.

علاوه بر قیمت‌گذاری، تصمیمات مهم دیگری نیز در این مدل پیشنهادی مطرح هستند. تعیین مراکز برای احداث تولیدکننده‌ها، توزیع‌کننده‌ها و خرده‌فروش‌ها از تصمیمات مهم این مدل است. مقدار کالای ارسالی بین سطوح مختلف و تعیین سن و قیمت برای محصول در هر نقطه‌ی مکانی نیز تعیین می‌شود. تصمیم‌گیری در خصوص اینکه کانال اینترنتی برای فروش بین سطوح مختلف در نظر گرفته شود نیز از تصمیمات اثرگذاری است که در این مدل بررسی می‌شود.

۳-۱- مفروضات مدل

- زنجیره تأمین موردنظر به صورت تک دوره‌ای در نظر گرفته شده است.
- زنجیره تأمین مورد مطالعه‌ی مسئله تک محصوله است.
- برای تطابق با دنیای واقعی و محدودیت بودجه تعداد تسهیلات قابل فعال شدن محدود است.
- برای تقاضاهایی که پاسخ داده نمی‌شوند هزینه فروش از دست رفته در نظر گرفته شده است.

۳-۲- مجموعه‌ها، اندیس‌ها و پارامترها

I	نشان‌دهنده تعداد تولیدکننده‌های کاندید است
J	نشان‌دهنده تعداد مراکز توزیع کاندید است
K	نشان‌دهنده تعداد خرده‌فروش کاندید است
L	نشان‌دهنده تعداد مشتری‌ها است
D_0	میزان تقاضای مشتری بدون در نظر گرفتن سن و قیمت محصول
P_0	قیمت محصول بدون در نظر گرفتن سن محصول
b_{ij}	نرخ فساد کالا بین تولیدکننده i و مرکز توزیع j
b_{ik}	نرخ فساد کالا بین تولیدکننده i و خرده‌فروش k
b_{jk}	نرخ فساد کالا بین مرکز توزیع j و خرده‌فروش k
b_{jl}	نرخ فساد کالا بین مرکز توزیع j و مشتری l
b_{kl}	نرخ فساد کالا بین خرده‌فروش k و مشتری l از طریق کانال سنتی
b'_{kl}	نرخ فساد کالا بین خرده‌فروش k و مشتری l از طریق کانال اینترنتی
T_j	حداکثر زمان تقاضای محصول توسط مرکز توزیع j
T_k	حداکثر زمان تقاضای محصول توسط خرده‌فروش k
T_l	حداکثر زمان تقاضای محصول توسط مشتری l
t_j	زمان ایدئالی که محصول می‌تواند به مرکز توزیع j برسد
t_k	زمان ایدئالی که محصول می‌تواند به خرده‌فروش k برسد
t_l	زمان ایدئالی که محصول می‌تواند به مشتری l برسد
t_{ij}	زمان حمل‌ونقل بین تولیدکننده i و مرکز توزیع j
t_{ik}	زمان حمل‌ونقل بین تولیدکننده i و خرده‌فروش k
t_{jk}	زمان حمل‌ونقل بین مرکز توزیع j و خرده‌فروش k
t_{jl}	زمان حمل‌ونقل بین مرکز توزیع j و مشتری l
t_{kl}	زمان حمل‌ونقل بین خرده‌فروش k و مشتری l از طریق کانال سنتی

t'_{kl}	زمان حمل‌ونقل بین خرده‌فروش k و مشتری l از طریق کانال اینترنتی	a_{kl}	سن محصول لحظه رسیدن به مشتری l زمانی که از خرده‌فروش k تأمین شده باشند (کانال سنتی)
tt_i	مدت زمانی که محصول در مرکز تولید i سپری می‌کند	a_{jl}	سن محصول لحظه رسیدن به مشتری l زمانی که از مرکز توزیع j تأمین شده باشند
tt_j	مدت زمانی که محصول در مرکز توزیع j سپری می‌کند	P_{kl}	قیمت محصول با توجه به سن برای مشتری l اگر خرده‌فروش k از طریق کانال سنتی تأمین‌کننده تقاضای مشتری باشد
tt_k	مدت زمانی که محصول در مرکز خرده‌فروش k سپری می‌کند	P'_{kl}	قیمت محصول با توجه به سن برای مشتری l اگر خرده‌فروش k از طریق کانال اینترنتی تأمین‌کننده تقاضای مشتری باشد
w_d	واحد هزینه ضایعات	P_{ji}	قیمت محصول با توجه به سن برای مشتری l اگر مرکز توزیع j تأمین‌کننده تقاضای مشتری باشد
w_t	واحد هزینه سفارش‌دهی	D_{kl}	میزان تقاضای مشتری l از خرده‌فروش k از کانال سنتی با توجه به قیمت و سن محصول
w_l	واحد هزینه فروش از دست رفته	D'_{kl}	میزان تقاضای مشتری l از خرده‌فروش k از کانال اینترنتی با توجه به قیمت و سن محصول
s_{ij}	واحد هزینه حمل‌ونقل بین تولیدکننده i و مرکز توزیع j	D_{jl}	میزان تقاضای مشتری l از مرکز توزیع j با توجه به قیمت و سن محصول
e_{jk}	واحد هزینه حمل‌ونقل بین مرکز توزیع j و خرده‌فروش k	x_{ij}	مقدار محصول حمل شده بین تولیدکننده i و مرکز توزیع j
s_{ik}	واحد هزینه حمل‌ونقل بین تولیدکننده i و خرده‌فروش k	x_{ik}	مقدار محصول حمل شده بین تولیدکننده i و خرده‌فروش k
e_{jl}	واحد هزینه حمل‌ونقل بین مرکز توزیع j و مشتری l	x_{jk}	مقدار محصول حمل شده بین مرکز توزیع j و خرده‌فروش k
u_{kl}	واحد هزینه حمل‌ونقل بین خرده‌فروش k و مشتری l از طریق کانال سنتی	x_{jl}	مقدار محصول حمل شده بین مرکز توزیع j و مشتری l
u'_{kl}	واحد هزینه حمل‌ونقل بین خرده‌فروش k و مشتری l از طریق کانال اینترنتی	x_{kl}	مقدار محصول حمل شده بین خرده‌فروش k و مشتری l از طریق کانال سنتی
cap_i	ظرفیت تولید مرکز تولیدکننده i	x'_{kl}	مقدار محصول حمل شده بین خرده‌فروش k و مشتری l از طریق کانال اینترنتی
cap_j	ظرفیت فضای مرکز توزیع j	W_t	هزینه سفارش‌دهی محصول
cap_k	ظرفیت فضای خرده‌فروش k	W_l	هزینه فروش از دست رفته
$cost_i$	هزینه تأسیس مرکز تولید i	W_d	هزینه ضایعات
$cost_j$	هزینه تأسیس مرکز توزیع j	M_{ij}	اگر سن محصول لحظه رسیدن به مرکز توزیع j ، وقتی از تولیدکننده i تأمین شده باشد، در بهترین حالت باشد برابر ۱؛ در صورتی که سن محصول در زمان ممکن باشد مقدار بین صفر و یک؛ در غیر این صورت برابر ۰
$cost_k$	هزینه تأسیس مرکز خرده‌فروشی k	M_{ik}	اگر سن محصول لحظه رسیدن به خرده‌فروش k ، وقتی از تولیدکننده i تأمین شده باشد، در بهترین حالت باشد برابر ۱؛ در صورتی که سن محصول در زمان ممکن باشد مقدار بین صفر و یک؛ در غیر این صورت برابر ۰
V	حداکثر تعداد مراکز تولیدکننده که می‌تواند بهره‌برداری شود	M_{jk}	اگر سن محصول لحظه رسیدن به خرده‌فروش k ، وقتی از مرکز توزیع j تأمین شده باشد، در بهترین حالت باشد برابر ۱؛ در صورتی که سن محصول در زمان ممکن باشد مقدار بین صفر و یک؛ در غیر این صورت برابر ۰
R	حداکثر تعداد مراکز توزیع که می‌تواند تأسیس شود		
F	حداکثر تعداد مراکز خرده‌فروشی که می‌تواند تأسیس شود		
α	حساسیت تقاضا به قیمت محصول		
β	حساسیت تقاضا به سن محصول		
γ	حساسیت قیمت به سن محصول		
M	عدد بسیار بزرگ		
ε	عدد بسیار کوچک		
۳-۳- متغیرهای تصمیم			
a_{ij}	سن محصول لحظه رسیدن به مشتری j زمانی که از مرکز تولید i تأمین شده باشد		
a_{jk}	سن محصول لحظه رسیدن به خرده‌فروش k زمانی که از مرکز توزیع j تأمین شده باشند		
a_{ik}	سن محصول لحظه رسیدن به خرده‌فروش k زمانی که از تولیدکننده i تأمین شده باشند		
a'_{kl}	سن محصول لحظه رسیدن به مشتری l زمانی که از خرده‌فروش k تأمین شده باشند (کانال اینترنتی)		

Z_{jl}	متغیر صفر و یک. اگر ۱ بگیرد مقدار محصولات حمل شده بین مرکز توزیع j و مشتری l می‌تواند مقدار مثبتی باشد و در غیر این صورت *	y_{ij}^1	متغیر صفر و یک. در صورتی که زمان طی شده بین تولیدکننده i و مرکز توزیع j از زمان ایدئال مورد انتظار کمتر باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر *
Z_{kl}	متغیر صفر و یک. اگر ۱ بگیرد مقدار محصولات حمل شده بین خرده‌فروش k و مشتری l از طریق کانال سنتی می‌تواند مقدار مثبتی باشد و در غیر این صورت *	y_{ik}^1	متغیر صفر و یک. در صورتی که زمان طی شده بین تولیدکننده i و خرده‌فروش k از زمان ایدئال مورد انتظار کمتر باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر *
Z'_{kl}	متغیر صفر و یک. اگر ۱ بگیرد مقدار محصولات حمل شده بین خرده‌فروش k و مشتری l از طریق کانال اینترنتی می‌تواند مقدار مثبتی باشد و در غیر این صورت *	y_{jk}^1	متغیر صفر و یک. در صورتی که زمان طی شده بین مرکز توزیع j و خرده‌فروش k از زمان ایدئال مورد انتظار کمتر باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر *

۴-۳- توابع هدف و محدودیت‌ها

$$\begin{aligned} \max Z_1 = & \sum_k \sum_l p_{kl} \times x_{kl} + \sum_k \sum_l p'_{kl} \times x'_{kl} \\ & + \sum_j \sum_l p_{jl} \times x_{jl} \\ & - \left(\sum_i \sum_j s_{ij} \times x_{ij} \right. \\ & + \sum_i \sum_k s_{ik} \times x_{ik} \\ & + \sum_j \sum_k e_{jk} \times x_{jk} \\ & + \sum_j \sum_l e_{jl} \times x_{jl} \\ & + \sum_k \sum_l u_{kl} \times x_{kl} \\ & + \sum_k \sum_l u'_{kl} \times x'_{kl} + \sum_i cost_i \\ & \times v_i + \sum_j cost_j \times r_j + \sum_k cost_k \\ & \left. \times f_k + W_d + W_t + W_l \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \max Z_2 = & \sum_i \sum_j x_{ij} \times M_{ij} \\ & + \sum_i \sum_k x_{ik} \times M_{ik} \\ & + \sum_j \sum_k x_{jk} \times M_{jk} \end{aligned} \quad (5)$$

s.t

$$\sum_i x_{ij} + \sum_k x_{ik} \leq cap_i \times v_i \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_i (1 - b_{ij}) \times x_{ij} \leq cap_j \times r_j \quad \forall j \quad (7)$$

y_{ij}^2 متغیر صفر و یک. در صورتی که زمان طی شده بین تولیدکننده i و مرکز توزیع j بین حداقل و حداکثر زمان مورد انتظار باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر *

y_{ik}^2 متغیر صفر و یک. در صورتی که زمان طی شده بین تولیدکننده i و خرده‌فروش k بین حداقل و حداکثر زمان مورد انتظار باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر *

y_{jk}^2 متغیر صفر و یک. در صورتی که زمان طی شده بین مرکز توزیع j و خرده‌فروش k بین حداقل و حداکثر زمان مورد انتظار باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر *

y_{ij}^3 متغیر صفر و یک. در صورتی که زمان طی شده بین تولیدکننده i و مرکز توزیع j از حداکثر زمان مورد انتظار بیشتر باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر *

y_{ik}^3 متغیر صفر و یک. در صورتی که زمان طی شده بین تولیدکننده i و خرده‌فروش k از حداکثر زمان مورد انتظار بیشتر باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر *

y_{jk}^3 متغیر صفر و یک. در صورتی که زمان طی شده بین مرکز توزیع j و خرده‌فروش k از حداکثر زمان مورد انتظار بیشتر باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر *

v_i متغیر صفر و یک، در صورتی که تولیدکننده i تأسیس شده باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر *

r_j متغیر صفر و یک، در صورتی که مرکز توزیع j تأسیس شده باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر *

f_k متغیر صفر و یک، در صورتی که خرده‌فروش k تأسیس شده باشد برابر ۱ و در غیر این صورت برابر *

Z_{ij} متغیر صفر و یک، اگر ۱ بگیرد مقدار محصولات حمل شده بین تولیدکننده i و مرکز توزیع j می‌تواند مقدار مثبتی باشد و در غیر این صورت *

Z_{ik} متغیر صفر و یک، اگر ۱ بگیرد مقدار محصولات حمل شده بین تولیدکننده i و خرده‌فروش k می‌تواند مقدار مثبتی باشد و در غیر این صورت *

Z_{jk} متغیر صفر و یک، اگر ۱ بگیرد مقدار محصولات حمل شده بین مرکز توزیع j و خرده‌فروش k می‌تواند مقدار مثبتی باشد و در غیر این صورت *

$$a'_{kl} = (tt_i + t_{ij}) \times z_{ij} + (tt_j + t_{jk}) \times z_{jk} + (tt_k + t'_{kl}) \times z'_{kl} \quad \forall i,j,k,l \quad (۳۷)$$

$$a_{jl} = (tt_i + t_{ij}) \times z_{ij} + (tt_j + t_{jl}) \times z_{jl} \quad \forall i,j,l \quad (۳۸)$$

$$p_{kl}(a_{kl}) = p_0 \times (1 - \left[\frac{a_{kl}}{T_l}\right]^\beta)^\gamma \quad \forall l \quad (۳۹)$$

$$p'_{kl}(a'_{kl}) = p_0 \times (1 - \left[\frac{a'_{kl}}{T_l}\right]^\beta)^\gamma \quad \forall l \quad (۳۰)$$

$$p_{jl}(a_{jl}) = p_0 \times (1 - \left[\frac{a_{jl}}{T_l}\right]^\beta)^\gamma \quad \forall l \quad (۳۱)$$

$$D_{kl}(p_{kl}, a_{kl}) = D_0 \times \left(\frac{p_{kl}}{p_0}\right)^{-\alpha} \times \left(1 - \left(\frac{a_{kl}}{T_l}\right)^\beta\right) \quad \forall l \quad (۳۲)$$

$$D'_{kl}(p'_{kl}, a'_{kl}) = D_0 \times \left(\frac{p'_{kl}}{p_0}\right)^{-\alpha} \times \left(1 - \left(\frac{a'_{kl}}{T_l}\right)^\beta\right) \quad \forall l \quad (۳۳)$$

$$D_{jl}(p_{jl}, a_{jl}) = D_0 \times \left(\frac{p_{jl}}{p_0}\right)^{-\alpha} \times \left(1 - \left(\frac{a_{jl}}{T_l}\right)^\beta\right) \quad \forall l \quad (۳۴)$$

$$W_d = w_d \times \left[\sum_i \sum_j b_{ij} \times x_{ij} + \sum_i \sum_k b_{ik} \times x_{ik} + \sum_j \sum_k b_{jk} \times x_{jk} + \sum_j \sum_l b_{jl} \times x_{jl} + \sum_k \sum_l b_{kl} \times x_{kl} + \sum_k \sum_l b'_{kl} \times x'_{kl} \right] \quad (۳۵)$$

$$W_t = w_t \times \left[\sum_i \sum_j (1 - b_{ij}) \times x_{ij} + \sum_i \sum_k (1 - b_{ik}) \times x_{ik} + \sum_j \sum_k (1 - b_{jk}) \times x_{jk} \right] \quad (۳۶)$$

$$\sum_i (1 - b_{ij}) \times x_{ij} = \sum_k x_{jk} \quad \forall j \quad (۸)$$

$$+ \sum_l x_{jl}$$

$$\sum_i (1 - b_{ik}) \times x_{ik} + \sum_j (1 - b_{jk}) x_{jk} \quad \forall k \quad (۹)$$

$$= \sum_l x_{kl} + \sum_l x'_{kl}$$

$$\sum_i (1 - b_{ik}) \times x_{ik} + \sum_j (1 - b_{jk}) x_{jk} \leq cap_k f_k \quad \forall k \quad (۱۰)$$

$$(1 - b_{kl}) \times x_{kl} \leq D_{kl} \quad \forall k, l \quad (۱۱)$$

$$(1 - b'_{kl}) \times x'_{kl} \leq D'_{kl} \quad \forall k, l \quad (۱۲)$$

$$(1 - b_{jl}) \times x_{jl} \leq D_{jl} \quad \forall j, l \quad (۱۳)$$

$$\sum_i v_i \leq V \quad \forall i \quad (۱۴)$$

$$\sum_j r_j \leq R \quad \forall j \quad (۱۵)$$

$$\sum_k f_k \leq F \quad \forall k \quad (۱۶)$$

$$x_{ij} \leq cap_i \times z_{ij} \quad \forall i, j \quad (۱۷)$$

$$x_{ik} \leq cap_i \times z_{ik} \quad \forall i, k \quad (۱۸)$$

$$x_{jk} \leq cap_j \times z_{jk} \quad \forall j, k \quad (۱۹)$$

$$x_{jl} \leq cap_j \times z_{jl} \quad \forall j, l \quad (۲۰)$$

$$x_{kl} \leq cap_k \times z_{kl} \quad \forall k, l \quad (۲۱)$$

$$x'_{kl} \leq cap_k \times z'_{kl} \quad \forall k, l \quad (۲۲)$$

$$a_{ij} = (tt_i + t_{ij}) \times z_{ij} \quad \forall i, j \quad (۲۳)$$

$$a_{jk} = (tt_i + t_{ij}) \times z_{ij} + (tt_j + t_{jk}) \times z_{jk} \quad \forall i, j, k \quad (۲۴)$$

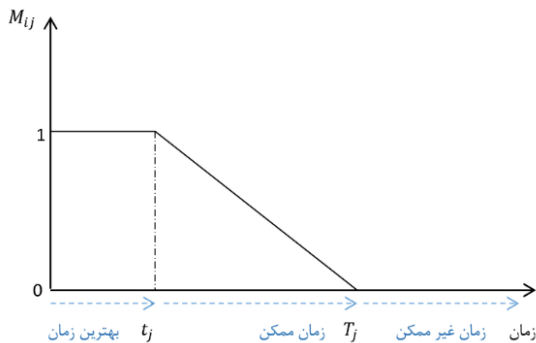
$$a_{ik} = (tt_i + t_{ik}) \times z_{ik} \quad \forall i, k \quad (۲۵)$$

$$a_{kl} = (tt_i + t_{ij}) \times z_{ij} + (tt_j + t_{jk}) \times z_{jk} + (tt_k + t_{kl}) \times z_{kl} \quad \forall i, j, k, l \quad (۲۶)$$

به اینکه سن محصولات تابعی از مسیری است که محصولات طی می‌کنند؛ بنابراین برای محصولات با عمر متفاوت قیمت‌های مختلفی در نظر گرفته خواهد شد. روابط (۲۹) تا (۳۱) قیمت محصولات را تعیین می‌کنند. همچنین برای محصولات با سنین متفاوت میزان تقاضاهای متفاوتی وجود دارد بنابراین تقاضای هر مسیر متفاوت از دیگری خواهد بود. از این‌رو می‌توان تقاضای مشتری در هر مسیر را با توجه به قیمت و سن محصول با استفاده از روابط (۳۲) تا (۳۴) محاسبه نمود. محدودیت (۳۵) تا (۳۷) به ترتیب تعیین‌کننده هزینه‌های ضایعات و سفارش‌دهی و فروش از دست رفته می‌باشند. محدودیت‌های (۳۸) تا (۴۰) نیز تعریف متغیرهای M_{ij}, M_{ik}, M_{jk} را در قالب روابط نشان می‌دهند که هر کدام از متغیرها از یک تابع سه ضابطه‌ای پیروی می‌کنند. محدودیت (۴۱) نوع متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کند.

۳-۵- خطی کردن محدودیت‌های غیر خطی

همان‌طور که مشاهده نمودیم علاوه بر بیشینه نمودن سود، هدف دیگری که در این مقاله مدنظر قرار گرفته است رضایت مشتریان و همچنین رضایت مراکز توزیع و خرده‌فروش است. رضایت مشتریان را می‌توان وابسته به میزان خرید آن‌ها در نظر گرفت زیرا مشتریان با توجه به فاکتورهایی مانند قیمت و سن محصول و... میزان تقاضای خود را خریداری می‌کنند. اما این مقاله به دنبال حداکثر کردن میزان رضایت مراکز توزیع و خرده‌فروش نیز هست که برای این کار از یک تابع مطلوبیت استفاده شده است به طوری که میزان مطلوبیت این مراکز را در میزان خرید آن‌ها مؤثر دانسته است که در رابطه (۳۸) تا (۴۰) تابع مطلوبیت مراکز تعریف شد. در شکل زیر تابع مطلوبیت مرکز توزیع i از تولیدکننده i را در قالب نمودار مشاهده می‌کنیم [۲۴].



شکل (۳): رضایت مرکز توزیع i از تولیدکننده i

با توجه به نمودار فوق که میزان مطلوبیت مرکز توزیع i را از تولیدکننده i نشان می‌دهد می‌توان پی برد که حداکثر مطلوبیت مقدار ۱ است. در صورتی که تولیدکننده i میزان تقاضای مرکز i را در بهترین زمان مرکز i (کمتر یا مساوی با t_j) تأمین کند میزان رضایت مرکز توزیع i از تولیدکننده i برابر ۱ خواهد بود. بهترین زمان مورد انتظار مرکز i زمانی است که محصولات غیر آبی بدون تأثیر از فساد می‌گذرانند و دوره تازگی محصولات است. حال در صورتی که میزان تقاضای مرکز توزیع i توسط تولیدکننده i در زمان ممکن (بین t_j و T_j) تأمین شود میزان مطلوبیت مرکز توزیع i از تولیدکننده مقداری بین

$$W_i = w_i \left[\sum_k \sum_l (D_{kl} - (1 - b_{kl})x_{kl}) + \sum_j \sum_l (D_{jl} - (1 - b_{jl})x_{jl}) + \sum_k \sum_l (D'_{kl} - (1 - b'_{kl})x'_{kl}) \right] \quad (۳۷)$$

$$M_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } a_{ij} \leq t_j \\ \frac{(T_j - a_{ij})}{T_j - t_j} & \text{if } t_j < a_{ij} \leq T_j \\ 0 & \text{if } a_{ij} > T_j \end{cases} \quad (۳۸)$$

$$M_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{if } a_{ik} \leq t_k \\ \frac{(T_k - a_{ik})}{T_k - t_k} & \text{if } t_k < a_{ik} \leq T_k \\ 0 & \text{if } a_{ik} > T_k \end{cases} \quad (۳۹)$$

$$M_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{if } a_{jk} \leq t_k \\ \frac{(T_k - a_{jk})}{T_k - t_k} & \text{if } t_k < a_{jk} \leq T_k \\ 0 & \text{if } a_{jk} > T_k \end{cases} \quad (۴۰)$$

$$v_i, r_j, f_k \in \{0, 1\}$$

$$M_{ij}, M_{ik}, M_{jk} \in [0, 1] \quad \forall i, \forall j, \forall k \quad (۴۱)$$

$$x_{ij}, x_{ik}, x_{jk}, x_{jl}, x_{kl}, x'_{kl} \geq 0$$

همان‌طور که می‌بینیم تابع هدف اول به دنبال حداکثر کردن سود مجموعه است [۲۲]. بخش اول این رابطه مربوط به درآمد و بخش دوم مربوط به هزینه‌هاست که به ترتیب شامل هزینه حمل‌ونقل، هزینه تأسیس مراکز و تولیدکننده، هزینه ضایعات، هزینه سفارش‌دهی و هزینه فروش از دست رفته است [۲۳]. تابع هدف دوم گویای حداکثر کردن رضایت خرده‌فروش از مرکز توزیع و همچنین رضایت مرکز توزیع و خرده‌فروش از تولیدکننده است. محدودیت‌های (۶) تا (۱۰) ظرفیت مراکز را تعیین می‌کنند. محدودیت (۱۱) تا (۱۳) جریان مواد از هر کانال به مشتریان را جهت برآورده کردن نیاز مشتریان با توجه به سن و قیمت محصول نشان می‌دهد. محدودیت (۱۴) تا (۱۶) به دنبال تعیین تعداد مراکز بهره‌برداری شده با توجه به حداکثر تعداد مراکز قابل بهره‌برداری هستند. محدودیت (۱۷) تا (۲۲) نیز متغیرهای $Z_{ij}, Z_{ik}, Z_{jk}, Z_{jl}, Z_{kl}, Z'_{kl}$ را تعریف می‌کند که این صورت که متغیرهای صفر و یک $Z_{ij}, Z_{ik}, Z_{jk}, Z_{jl}, Z_{kl}, Z'_{kl}$ زمانی که مقدار ۱ می‌گیرند متغیرهای $x_{ij}, x_{ik}, x_{jk}, x_{jl}, x_{kl}, x'_{kl}$ می‌توانند مقدار مثبتی داشته باشند و در غیر این صورت مقدار ۰ می‌گیرند. محدودیت (۲۳) تا (۲۸) سن محصول زمانی که به مراکز مختلف می‌رسد را تعیین می‌کنند. همان‌طور که دیده شد در این مقاله سن محصولات به‌عنوان یک فاکتور مهم در قیمت و تقاضای محصولات در نظر گرفته شده است. با توجه

$$M_{jk} = 1 \times y_{jk}^1 + \left(\frac{T_k - a_{jk}}{T_k - t_k} \right) \times y_{jk}^2 + 0 \times y_{jk}^3 \quad (49)$$

رابطه فوق نیز در قالب محدودیت‌های زیر جایگزین رابطه (۳۹) می‌شود:

$$a_{jk} - t_k - M \times (1 - y_{jk}^1) \leq 0 \quad \forall j, k \quad (50)$$

$$a_{jk} - \left((t_k + \varepsilon) \times (1 - y_{jk}^1) \right) \geq 0 \quad \forall j, k \quad (51)$$

$$a_{jk} + \left((M - T_k) \times (1 - y_{jk}^3) \right) \leq M \quad \forall j, k \quad (52)$$

$$a_{jk} + \left((T_k + \varepsilon) \times (1 - y_{jk}^3) \right) \geq T_k + \varepsilon \quad \forall j, k \quad (53)$$

$$y_{jk}^1 + y_{jk}^2 + y_{jk}^3 = 1 \quad \forall j, k \quad (54)$$

$$M_{jk} \times (T_k - t_k) = \left(T_k - a_{jk} \right) \times y_{jk}^2 + y_{jk}^1 \times (T_k - t_k) \quad \forall j, k \quad (55)$$

محدودیت (۴۰) را نیز با استفاده از متغیرهای صفر و یک می‌توان به شکل زیر نشان داد:

$$M_{ik} = 1 \times y_{ik}^1 + \left(\frac{T_k - a_{ik}}{T_k - t_k} \right) \times y_{ik}^2 + 0 \times y_{ik}^3 \quad (56)$$

رابطه فوق در قالب محدودیت‌های زیر جایگزین رابطه (۴۰) می‌شود:

$$a_{ik} - t_k - M \times (1 - y_{ik}^1) \leq 0 \quad \forall i, k \quad (57)$$

$$a_{ik} - \left((t_k + \varepsilon) \times (1 - y_{ik}^1) \right) \geq 0 \quad \forall i, k \quad (58)$$

$$a_{ik} + \left((M - T_k) \times (1 - y_{ik}^3) \right) \leq M \quad \forall i, k \quad (59)$$

$$a_{ik} + \left((T_k + \varepsilon) \times (1 - y_{ik}^3) \right) \geq T_k + \varepsilon \quad \forall i, k \quad (60)$$

$$y_{ik}^1 + y_{ik}^2 + y_{ik}^3 = 1 \quad \forall i, k \quad (61)$$

$$M_{ik} \times (T_k - t_k) = \left(T_k - a_{ik} \right) \times y_{ik}^2 + y_{ik}^1 \times (T_k - t_k) \quad \forall i, k \quad (62)$$

۴- روش حل

در این بخش تلاش شده است تا با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاشات مدل ارائه شده در بخش قبل حل گردد. برای حل مدل از نرم‌افزار GAMS و MATLAB استفاده شده است. به دلیل اینکه مدل ارائه شده غیرخطی است از حل‌کننده‌ی BARON که یک حل‌کننده قوی در حل مدل‌های غیر خطی است استفاده شده است. همچنین از سیستم کامپیوتری با ۱۲ گیگابایت رم و پردازنده‌ی ۸ هسته‌ای استفاده شده است.

صفر و یک خواهد داشت. و هرچه محصولات دیرتر به مرکز توزیع برسند میزان مطلوبیت به صفر نزدیک‌تر می‌شود. زمان ممکن زمانی است که فساد محصولات غیر آبی شروع شده اما قابل استفاده هستند و هنوز برای محصولات در مراکز توزیع تقاضا وجود دارد. در نهایت در صورتی که میزان تقاضای مرکز توزیع J توسط تولیدکننده i در زمان غیرممکن مرکز J (بیشتر از T_j) تأمین شود میزان مطلوبیت مرکز توزیع از تولیدکننده صفر خواهد بود. زمان غیرممکن مرکز J زمانی است که با وجود اینکه محصول هنوز قابل استفاده است اما از حداکثر زمانی که برای محصول در مراکز توزیع تقاضا وجود داشته باشد، بیشتر است. بدین معنی که اگر محصول در زمان غیرممکن موردنظر مرکز توزیع J به دستش برسد با اینکه هنوز محصول فاسد نشده اما با توجه به اینکه باید محصول زمان دیگری سپری کند تا به مرکز k و سپس به مشتری برسد تا آن زمان محصول فاسد شده و غیر قابل استفاده می‌شود و در این صورت برای محصول از طرف مشتری تقاضایی وجود نخواهد داشت. بنابراین در صورتی که محصول در زمان غیرممکن به مرکز توزیع برسد میزان مطلوبیت صفر خواهد بود و مرکز توزیع در این زمان از تولیدکننده تقاضای خود را درخواست نمی‌کند. تابع سه ضابطه‌ای (۳۸) را با استفاده از متغیرهای صفر و یک به یک رابطه به شکل زیر بازنویسی می‌کنیم:

$$M_{ij} = 1 \times y_{ij}^1 + \left(\frac{T_j - a_{ij}}{T_j - t_j} \right) \times y_{ij}^2 + 0 \times y_{ij}^3 \quad (42)$$

رابطه فوق را در قالب محدودیت‌های زیر جهت خطی کردن مدل جایگزین رابطه (۳۸) می‌کنیم:

$$a_{ij} - t_j - M \times (1 - y_{ij}^1) \leq 0 \quad \forall i, j \quad (43)$$

$$a_{ij} - \left((t_j + \varepsilon) \times (1 - y_{ij}^1) \right) \geq 0 \quad \forall i, j \quad (44)$$

$$a_{ij} + \left((M - T_j) \times (1 - y_{ij}^3) \right) \leq M \quad \forall i, j \quad (45)$$

$$a_{ij} + \left((T_j + \varepsilon) \times (1 - y_{ij}^3) \right) \geq T_j + \varepsilon \quad \forall i, j \quad (46)$$

$$y_{ij}^1 + y_{ij}^2 + y_{ij}^3 = 1 \quad \forall i, j \quad (47)$$

$$M_{ij} \times (T_j - t_j) = \left(T_j - a_{ij} \right) \times y_{ij}^2 + y_{ij}^1 \times (T_j - t_j) \quad \forall i, j \quad (48)$$

محدودیت (۴۳) و (۴۴) نشان می‌دهند که متغیر صفر و یک y_{ij}^1 زمانی مقدار یک می‌گیرد که محصولات موردنیاز از تولیدکننده i در بهترین زمان مورد انتظار مرکز توزیع J تأمین می‌شوند. محدودیت (۴۵) و (۴۶) بازگوکننده این موضوع هستند که اگر محصولات موردنیاز مرکز توزیع J در زمان غیرممکن تأمین شوند متغیر صفر و یک y_{ij}^3 مقدار یک می‌گیرد. محدودیت (۴۷) نشان‌دهنده این است که تنها یکی از متغیرهای y_{ij}^1 و y_{ij}^2 و y_{ij}^3 مقدار یک می‌گیرند. محدودیت (۴۸) تعریف متغیر M_{ij} است.

محدودیت (۳۹) با استفاده از متغیرهای صفر و یک به صورت زیر به یک رابطه تبدیل می‌شود:

۴-۱- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک اولین بار توسط جان هالند برای حل مسائل پیچیده ارائه شد [۲۵]. این الگوریتم جزو الگوریتم‌های تکاملی است که بر پایه‌ی انتخاب شایسته‌ترین افراد و تکامل نسل‌های متوالی استوار است. در این روش جستجو با یک جمعیت اولیه از جواب‌ها که کروموزوم نام دارند آغاز می‌گردد. عملگرهای این الگوریتم با استفاده از تغییرات مشخص بر روی جواب‌های هر مرحله نسل بعدی از جواب‌ها را ایجاد می‌کنند. گام‌های الگوریتم ژنتیک به صورت زیر است:

تولید جمعیت اولیه

حلقه

محاسبه تابع ارزیابی هر کدام از کروموزوم‌ها

انتخاب چند کروموزوم

انجام تقاطع بر روی کروموزوم‌های انتخاب شده

انجام جهش بر روی کروموزوم

جایگزینی جمعیت موجود با کروموزوم‌های تولید شده

تا شرایط اختتام محقق نشده حلقه تکرار می‌شود

پایان

۴-۲- الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاشات

مفهوم الگوریتم بهینه‌سازی میرایی ارتعاشات اولین بار توسط مهدی زاده و توکلی مقدم [۱۷] ارائه گردید و از فرآیند میرایی ارتعاشات مکانیکی نشأت گرفته است. رابطه مناسب و سودمندی بین ارتعاشات یعنی رفتار سیستم نوسانگر در حالت میرایی و بهینه‌سازی ترکیبی (یافتن حداقل مقدار یک تابع مفروض با تعداد زیادی پارامتر) وجود دارد. وقتی منبع انرژی یک نوسانگر قطع می‌شود، دامنه نوسان رفته‌رفته کم می‌شود و بالاخره نوسانگر از نوسان بازمانده و یا به اصطلاح میرا می‌شود. به طور خلاصه می‌توان ذکر کرد که جهت حل مسأله بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم VDO چهار قدم مهم باید طی شود:

• کدینگ مسأله

• تعریف تابع برازندگی

• تعریف مکانیزم تولید حل همسایه

• تعریف برنامه میرا نمودن ارتعاشات؛

با توجه به رابطه جابه‌جایی در تئوری ارتعاشات یکی از برنامه‌های میرایی می‌تواند به صورت $A = A_0 e^{-Q.t/2}$ باشد که A دامنه نوسان، A_0 دامنه نوسان اولیه، Q ضریب میرایی، t تعداد تکرار حلقه میرایی است. Q پارامتری است که سرعت کاهش دامنه نوسان را به عهده دارد. هرچه مقدار Q بزرگ‌تر در نظر گرفته شود سرعت کاهش دامنه پایین بوده و برعکس هر چه مقدار Q کوچک‌تر در نظر گرفته شود سرعت کاهش دامنه نوسان بالاتر خواهد بود. بنابراین در انتخاب مقدار Q باید نهایت دقت را به عمل آورد تا اولاً به کیفیت موردنظر در مسأله دست یافت، ثانیاً زمان اجرای الگوریتم نیز مناسب باشد. تعداد تکرار حلقه داخلی به درصد موفقیت وابسته است

که از بحث ارتعاش واداشته تبعیت می‌کند. تعداد زیاد تکرار حلقه داخلی باعث می‌شود تا در یک دامنه مشخص تعداد زیادی جستجو صورت گیرد. تعداد تکرار حلقه داخلی با زمان الگوریتم رابطه مستقیم دارد یعنی هر چه تعداد حلقه داخلی زیاد باشد زمان الگوریتم نیز افزایش می‌یابد و شاید هم بهبودی در کیفیت جواب ایجاد نکند و برعکس هر چه تعداد تکرار حلقه داخلی کمتر باشد، زمان الگوریتم نیز کاهش می‌یابد. معیار توقف یکی از مباحث مهم در الگوریتم VDO محسوب می‌شود. به صفر رسیدن دامنه نوسان یک معیار توقف محسوب می‌شود و موارد دیگری نظیر رسیدن تعداد تکرار حلقه میرایی به اندازه مشخص شده یا تفاوت مقادیر توابع هدف در دو تکرار متوالی حلقه خارجی کمتر از ϵ ، می‌توانند ضوابط دیگر باشند. هر الگوریتم فراابتکاری نیاز به یک حرکت دارد، به این معنی که چگونه می‌توان از یک حالت به حالت دیگر رفت. در این الگوریتم باید همسایگی طوری تعریف شود که تا حد ممکن همگرایی مسأله برای رسیدن به جواب حفظ شود.

گام‌های الگوریتم VDO به صورت زیر است:

گام ۱: تعیین پارامترهای الگوریتم که شامل A_0 دامنه نوسان اولیه، γ ضریب میرایی، L تعداد تکرار حلقه میرایی، σ انحراف استاندارد و $MaxIt$ تعداد تکرار حلقه‌ی بیرونی $t = 1$

گام ۲: تولید جواب اولیه براساس ساختار تعیین‌شده

گام ۳: محاسبه‌ی مقدار تابع ارزیابی جواب‌های اولیه‌ی تولید شده U_0

گام ۴: حلقه‌ی بیرونی، این مرحله شامل گام‌های ۵ تا ۸ می‌شود.

گام ۵: حلقه‌ی داخلی: در این مرحله، حلقه‌ی داخلی از $l = 1$ شروع می‌شود و تا زمانی که $l \leq L$ است، تکرار می‌شود.

گام ۶: تولید جواب جدید براساس ساختار همسایگی و مقدار تابع ارزیابی را محاسبه کنید U

گام ۷: براساس جواب جدید تولید شده، قرار دهید $\Delta = U - U_0$

اگر $\Delta < 0$ باشد، جواب جدید را بپذیرید، اگر $\Delta \geq 0$ باشد عدد تصادفی r را از بازه $(0,1)$ تولید کنید

اگر $r < 1 - e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}}$ جواب جدید را بپذیرید، در غیر این صورت جواب جدید رد می‌شود.

اگر $l > L$ قرار دهید $t = t + 1$ و به گام ۸ بروید در غیر این صورت قرار دهید $l = l + 1$ و به گام ۶ بروید.

گام ۸: به‌روزرسانی دامنه نوسان، در این گام، رابطه‌ی

$A_t = A_0 e^{-\frac{\gamma t}{2}}$ برای کاهش دامنه‌ی نوسان در هر تکرار حلقه‌ی بیرونی بکار برده می‌شود. اگر $t > MaxIt$ به گام ۹ بروید در غیر این صورت به گام ۵ بروید.

گام ۹: معیار توقف الگوریتم: در این مرحله، الگوریتم ارائه شده بعد از تعداد تکرار تعیین‌شده متوقف شده و جواب نهایی حاصل می‌شود [۱۶].

۳-۴- گام‌های اصلی در الگوریتم‌های ارائه شده

• نمایش جواب الگوریتم GA و VDO

کروموزوم طراحی شده برای مسأله‌ی موردنظر دارای دو بخش مکانیابی و تخصیص است. بخش اول نمایش جواب تعیین کننده‌ی این است که کدام یک از مراکز توزیع، خرده‌فروش‌ها و مراکز تولیدکننده احداث خواهند شد. در جدول ۲ نمونه‌ای از کروموزوم طراحی شده برای ۶ مکان بالقوه خرده‌فروش، ۴ مکان بالقوه مرکز توزیع و ۲ مرکز بالقوه تولیدکننده برای همه مراکز نشان داده شده است.

با توجه به بخش اول کروموزوم جدول (۲) مشاهده می‌شود که مرکز خرده‌فروش‌های ۱، ۲، ۴ و ۵ احداث شده است، از طرفی مشاهده می‌شود که در مکان بالقوه ۳ مرکز خرده‌فروشی احداث نشده است. برای مراکز توزیع و تولیدکننده نیز چنین توضیحاتی قابل ارائه است. براساس این بخش از نمایش جواب متغیرهای V_i و R_j و F_k قابل محاسبه است.

جدول (۲): نمونه‌ای از ساختار کروموزوم در بخش مکان‌یابی

مرکز خرده فروش	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
	۱	۱	۰	۱	۱	۰
مرکز توزیع	J_1	J_2	J_3	J_4		
	۰	۱	۱	۰		
مرکز تولید کننده	I_1	I_2				
	۱	۱				

بخش دوم نمایش جواب تعیین کننده‌ی تخصیص مشتری‌ها به مراکز خرده‌فروشی و توزیع احداث شده، تخصیص مراکز خرده‌فروشی به مراکز توزیع و تولیدکننده‌های احداث شده و تخصیص مراکز توزیع به مراکز تولیدکننده است. در جدول ۳ نمونه‌ای از این نوع تخصیص‌ها برای $L=6$ مشتری براساس بخش اول نمایش جواب (تعیین کننده انبارهای و مکان‌های احداث شده) نشان داده شده است.

جدول (۳): نمونه‌ای از ساختار کروموزوم در بخش تخصیص مشتری

		مشتری					
		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
مرکز خرده فروشی	K_1	۱	۰	۱	۰	۰	۱
	K_2	۱	۰	۱	۰	۱	۰
	K_3	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	K_4	۱	۰	۰	۱	۱	۰
	K_5	۱	۰	۰	۰	۱	۱
	K_6	۰	۰	۰	۰	۰	۰
		مشتری					
		L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
مرکز توزیع	J_1	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	J_2	۰	۱	۰	۰	۱	۰
	J_3	۰	۰	۱	۰	۰	۱
	J_4	۰	۰	۰	۰	۰	۰

براساس این جدول نیز می‌توان متغیرهای Z_{jl} و Z_{kl} را محاسبه کرد. برای تخصیص مراکز خرده‌فروشی به مراکز توزیع و تولیدکننده‌ها نیز ۲ ماتریس با ابعاد $J \times K$ و $K \times K$ به صورت تصادفی تولید می‌شود و متغیرهای Z_{jk} و Z_{ik} را محاسبه کرد. در نهایت ماتریسی با ابعاد $I \times J$ نیز جهت تعیین تخصیص مراکز توزیع احداث شده به تولیدکننده‌ها نیز به صورت تصادفی تولید می‌شود و متغیر Z_{ij} محاسبه می‌شود.

• تابع ارزیابی

تابع ارزیابی در الگوریتم ارائه شده همان تابع هدف مدل ریاضی است. به دلیل اینکه در مدل ریاضی ارائه شده دارای دو تابع هدف می‌باشیم، براساس رابطه‌ی زیر این دو تابع هدف به یک تابع هدف تبدیل شده‌اند.

$$Z_T = w_1 \left(\frac{Z_1^* - Z_1}{Z_1} \right) + w_2 \left(\frac{Z_2^* - Z_2}{Z_2} \right) \quad (63)$$

در رابطه‌ی بالا w_1 و w_2 ضرایب توابع هدف می‌باشند و محدودیت $w_1 + w_2 = 1$ را برای این ضرایب داریم. مقدار تابع هدف کلی است.

برای ارضای محدودیت‌های ظرفیت مراکز از روش جریمه استفاده کرده‌ایم. روش جریمه یک مسئله بهینه‌سازی محدود را با مجموعه‌ای از مسائل بدون قید جایگزین می‌کند. مسائل بدون قید با افزودن یک شرط به تابع هدفی به وجود می‌آیند که متشکل از یک پارامتر جریمه و میزانی از نقض قید و محدودیت‌ها هستند. زمانی که محدوده‌ها نقض شوند، میزان نقض مخالف صفر و زمانی که محدوده‌ها نقض نشوند، برابر با صفر است.

استفاده از پارامترهای جریمه منفی در سال ۱۹۹۹ در مدل‌سازی محدوده‌های سامانه‌های سازه‌ای، به منظور محاسبه بسامدهای طبیعی با استفاده از روش ریلی-ریتز معرفی شد. برای چنین مسائلی، نشانه خطای ناشی از نقض شرایط محدودیت، به نشانه ضریب جریمه بستگی دارد. از این رو، اثبات شده است که خطای ناشی از نقض محدودیت با استفاده از روش جریمه، قابل تعریف و کنترل با استفاده از ترکیبی از پارامترهای جریمه مثبت و منفی است. فرض می‌کنیم که مسأله مقید زیر را می‌خواهیم حل کنیم:

$$\min f(x) \quad (64)$$

$$c_i(x) \geq T \quad \forall i \in I$$

این مسأله می‌تواند به عنوان مجموعه‌ای از مسئله‌های مقید کمینه‌سازی حل شوند.

$$\min \Phi_k(x) = f(x) + \sigma_k \sum_{i \in I} g(c_i(x)) \quad (65)$$

که در آن:

$$g(c_i(x)) = \min(0, c_i(x) - T) \quad (66)$$

در معادله (۶۶)، $g(c_i(x))$ یک تابع جریمه است که در آن σ_k ضریب‌های جریمه هستند. در هر تکرار k از متد، ضریب پنالتی σ_k را

است که در زیر توضیحات آن معیارها آورده شده است:

- شاخص کیفیت جواب: این شاخص نشان‌دهنده‌ی کیفیت جواب نهایی به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌ها است. این شاخص مهم‌ترین شاخص مقایسه کارایی الگوریتم‌ها است.
- شاخص زمان حل: یکی از دلایل استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری سرعت بالای این الگوریتم‌ها در حل مسائل با ابعاد بالا است. لذا هر الگوریتمی که سرعت همگرایی بالاتری داشته باشد و در زمان کمتر، به جواب بهتری نسبت به الگوریتم دیگر دست پیدا کند، بهتر است.

جدول (۴): مقداردهی به عوامل (پارامترها) GA در سه سطح

سطح زیاد (۳)	سطح متوسط (۲)	سطح کم (۱)	پارامتر GA
۱۵۰	۱۰۰	۵۰	MaxIt
۱۵۰	۱۰۰	۵۰	nPop
۰/۹	۰/۸	۰/۷	Pc
۰/۴	۰/۳	۰/۲	Pm

جدول (۵): مقداردهی به عوامل (پارامترها) VDO در سه سطح

سطح زیاد (۳)	سطح متوسط (۲)	سطح کم (۱)	پارامتر VDO
۱۵۰	۱۰۰	۵۰	MaxIt
۱۵۰	۱۰۰	۵۰	nPop
۳۰	۲۰	۱۰	A_0
۰/۳	۰/۲	۰/۱	γ

جدول (۶): آزمایشات طراحی شده به روش تاگوچی برای

تنظیم پارامترها الگوریتم GA و VDO

شماره آزمایش	سطح γ و Pm	سطح A_0 و Pc	سطح nPop	سطح MaxIt
۱	۱	۱	۱	۱
۲	۱	۱	۱	۲
۳	۱	۱	۱	۳
۴	۱	۲	۱	۱
۵	۱	۲	۱	۲
۶	۱	۲	۱	۳
۷	۱	۳	۱	۱
۸	۱	۳	۱	۲
۹	۱	۳	۱	۳
۱۰	۲	۱	۱	۱
۱۱	۲	۱	۱	۲
۱۲	۲	۱	۱	۳
۱۳	۲	۲	۱	۱
۱۴	۲	۲	۱	۲
۱۵	۲	۲	۱	۳
۱۶	۲	۳	۱	۱
۱۷	۲	۳	۱	۲
۱۸	۲	۳	۱	۳

افزایش می‌دهیم (مثلاً با ضریب ۱۰)، مسأله بدون قید را حل می‌کنیم و جواب را به‌عنوان حدس اولیه برای تکرار بعدی به کار می‌بریم. راه‌حل‌های مسائل بدون قید بعدی سرانجام به راه‌حل مسأله مقید اصلی می‌انجامد. لذا تابع ارزیابی در الگوریتم ارائه شده به‌صورت عبارت (۶۵) است.

• تقاطع در الگوریتم GA

عملگر تقاطع باعث می‌شود تا پراکندگی جواب‌ها افزایش پیدا کند و فضای جواب به‌صورت گسترده‌ای موردبررسی قرار گیرد. در این الگوریتم از تقاطع یک نقطه‌ای برای تولید فرزندان استفاده شده است. در این روش، پس از انتخاب دو والد برای عمل تقاطع، ابتدا نقطه‌ای را به‌صورت تصادفی از ساختار کروموزوم به‌عنوان نقطه‌ی برش انتخاب می‌کنیم و سپس سمت راست نقطه‌ی برش را با هم عوض می‌کنیم و دو فرزند به دست می‌آید. در این روش، فرزندان تولید شده از اطلاعات هر دو والد خود استفاده می‌کنند.

• جهش و همسایگی در الگوریتم GA و VDO

این عملگر باعث می‌شود که احتمال جستجوی هر نقطه از فضا هیچ‌گاه صفر نشود. به عبارتی بدون توجه به سایر اعضای موجود در جمعیت، تغییرات کوچکی بر روی کروموزوم اعمال می‌کند تا بتوانیم در صورت امکان جواب‌های خوب یافت شده در الگوریتم در طول فرایند بهینه‌سازی را بهبود ببخشیم. در الگوریتم‌های ارائه شده از دو روش جهش (همسایگی) جابجایی و معکوس سازی استفاده شده است.

- جهش (همسایگی) جابجایی

در این نوع جهش، ابتدا دو ستون از ساختار کروموزوم به‌صورت تصادفی انتخاب شده و مقادیر موجود در آن دو ستون با یکدیگر عوض می‌شود.

- جهش (همسایگی) معکوس سازی

در این نوع جهش (همسایگی)، ابتدا دو ستون از ساختار کروموزوم اولیه به‌صورت تصادفی انتخاب شده و ستون‌های بین دو ستون انتخاب شده از راست به چپ معکوس می‌شوند.

• معیار توقف

معیارهای مختلفی برای توقف الگوریتم موردنظر می‌توان ارائه کرد، ولی در این الگوریتم طی کردن تعداد تکرار مشخصی از نسل‌ها را به‌عنوان معیار توقف الگوریتم در نظر گرفته شده است [۱۷].

۴-۴- تنظیم پارامترهای الگوریتم‌ها

تأثیر گذارترین پارامترها در الگوریتم GA تعداد جمعیت اولیه ($nPop$)، تعداد تکرار ($MaxIt$)، نرخ تقاطع (Pc)، نرخ جهش (Pm) و در الگوریتم VDO نیز تعداد جمعیت اولیه ($nPop$)، تعداد تکرار ($MaxIt$)، دامنه نوسان اولیه و γ ضریب میرایی است. با استفاده از روش تاگوچی پارامترهای این الگوریتم‌ها تنظیم شده است. در ابتدا نیاز است که معیارهای مقایسه کارایی الگوریتم فراابتکاری توضیح داده شود.

• معیارهای مقایسه‌ی کارایی الگوریتم‌ها

برای بررسی کارایی الگوریتم ارائه شده معیارهای مختلفی وجود دارد که در زیر به آن‌ها پرداخته می‌شود. با استفاده از معیارهای کیفیت جواب و زمان حل، الگوریتم‌های موردنظر با یکدیگر مقایسه شده

۱۶	۰/۰۸	۵۷/۶۴	۰/۱۶	۶۳/۰۹
۱۷	۰/۱۸	۵۷/۴۹	۰/۰۴	۶۳/۴۳
۱۸	۰/۱۶	۶۳/۹۸	۰/۱۰	۵۵/۶۸
۱۹	۰/۱۹	۴۸/۰۱	۰/۰۹	۳۴/۲۹
۲۰	۰/۱۳	۵۲/۳۶	۰/۱۳	۳۵/۰۶
۲۱	۰/۰۱	۵۳/۷۵	۰/۱۴	۳۷/۲۰
۲۲	۰/۱۷	۸۲/۹۴	۰/۱۵	۶۴/۸۲
۲۳	۰/۱۹	۸۸/۵۲	۰/۰۶	۶۳/۵۹
۲۴	۰/۱۴	۸۸/۰۸	۰/۱۴	۶۲/۵۱
۲۵	۰/۱۵	۱۱۹/۲۶	۰/۱۳	۹۵/۶۱
۲۶	۰/۱۵	۱۱۱/۲۲	۰/۰۳	۱۰۰/۳۰
۲۷	۰/۰۸	۸۸/۰۸	۰/۰۲	۱۱۸/۰۱

۱۹	۳	۱	۳	۲
۲۰	۳	۱	۳	۲
۲۱	۳	۱	۳	۲
۲۲	۳	۲	۱	۳
۲۳	۳	۲	۱	۳
۲۴	۳	۲	۱	۳
۲۵	۳	۳	۲	۱
۲۶	۳	۳	۲	۱
۲۷	۳	۳	۲	۱

• تعیین آزمایش‌ها

در الگوریتم GA چهار عامل (پارامتر) $nPop$, $MaxIt$ و Pc و Pm و در الگوریتم VDO چهار عامل $nPop$, $MaxIt$ و A_0 و γ باید در سطوح بهینه تنظیم شوند. برای این منظور، ابتدا برای هر پارامتر سه سطح کم (۱)، متوسط (۲) و زیاد (۳) را در نظر می‌گیریم که در جدول (۴) و (۵) آورده شده است. سپس مجموعه آزمایش‌های پیشنهادی روش تاگوچی برای ۴ عامل در ۳ سطح محاسبه شده است که ۲۷ حالت مختلف بوده و در جدول (۶) نشان داده شده است.

• محاسبه‌ی نتایج آزمایش‌ها

در جداول (۴) و (۵) به ترتیب سطوح پارامترهای GA و VDO مشاهده می‌شود و مشاهده می‌شود که برای هر پارامتر، سه سطح متفاوت در نظر گرفته شده است. در جدول (۶) آزمایش‌های تعیین شده برای تنظیم پارامترهای الگوریتم‌های GA و VDO نشان داده شده است. به عنوان مثال، آزمایش شماره ۴ مربوط به الگوریتم GA، مربوط به حالتی است که پارامتر تعداد تکرار در سطح پایین و پارامترهای تعداد جمعیت، نرخ تقاطع و نرخ جهش در سطح متوسط قرار دارد. در جدول (۷) نتیجه‌ی اجرای الگوریتم‌های GA و VDO برای یک مسأله با ابعاد متوسط آورده شده است.

جدول (۷): نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی

الگوریتم‌های GA و VD

NO	GA		VDO	
	Obj	Time	Obj	Time
۱	۰/۱۸	۱۰/۰۴	۰/۱۳	۱۰/۶۱
۲	۰/۰۳	۹/۷۲	۰/۰۳	۸/۹۴
۳	۰/۱۸	۱۰/۳۴	۰/۱۴	۸/۸۷
۴	۰/۱۳	۲۶/۲۲	۰/۰۱	۱۸/۰۵
۵	۰/۰۲	۲۴/۱۲	۰/۰۶	۱۷/۶۹
۶	۰/۰۶	۲۵/۱۷	۰/۰۱	۱۷/۷۵
۷	۰/۱۱	۴۷/۰۰	۰/۰۲	۲۶/۵۲
۸	۰/۱۹	۳۶/۷۱	۰/۱۶	۲۹/۶۵
۹	۰/۱۹	۴۶/۱۴	۰/۱۴	۳۳/۰۶
۱۰	۰/۰۳	۳۱/۰۵	۰/۰۶	۲۰/۵۸
۱۱	۰/۱۹	۳۱/۰۸	۰/۱۹	۱۹/۶۶
۱۲	۰/۱۹	۳۰/۳۰	۰/۰۱	۱۹/۹۷
۱۳	۰/۱۰	۴۵/۴۰	۰/۰۹	۴۰/۶۶
۱۴	۰/۱۶	۴۱/۹۰	۰/۰۸	۴۰/۹۲
۱۵	۰/۰۳	۴۲/۲۳	۰/۱۵	۴۰/۴۱

• نرمال‌سازی نتایج و تعیین متغیر پاسخ

بر اساس جدول (۸)، مشاهده می‌شود که برای هر آزمایش دو معیار داریم، لذا برای ایجاد یک خروجی از هر آزمایش با استفاده از روش زیر، تمامی شاخص‌ها به یک پاسخ تبدیل می‌شوند.

- ابتدا ماهیت هر شاخص مبنی بر منفی یا مثبت بودن آن باید تشخیص داده شود. در شاخص‌های مورد استفاده در مقایسه‌ی الگوریتم‌های ارائه شده مشاهده می‌شود که مقدار کیفیت جواب هرچقدر بیشتر باشد بهتر است ولی چون مقدار تابع ارزیابی در مدل ریاضی به صورت حداقل سازی هست، هرچقدر مقدار تابع ارزیابی کمتر باشد جواب دارای کیفیت بالاتری است، شاخص زمان نیز هرچقدر کمتر باشد بهتر است. از این رو ماهیت شاخص‌های ارائه شده منفی است. جدول (۸) شاخص‌ها و موقعیت‌های متفاوت که همان آزمایش‌های طراحی شده هستند را نشان می‌دهد.

جدول (۸): ماتریس نتایج آزمایش‌ها

X_j	X_{1-}	X_2
Q_i	(Obj)	(Time)
Q_1	r_{14}	r_{15}
Q_2	r_{24}	r_{25}
.	.	.
.	.	.
.	.	.
Q_n	r_{n4}	r_{n5}

در جدول (۸)، X_j و Q_i به ترتیب نشان‌دهنده‌ی معیار j ام و موقعیت i -ام هستند. همچنین r_{ij} برابر با مقداری است که موقعیت i در شاخص j کسب کرده است.

- مقادیر حاصل شده از شاخص‌ها مطابق با تکنیک بی واحد نمودن فازی در معادله‌های (۶۷) و (۶۸) نرمالایز می‌شوند.

$$X_j^+ \rightarrow R_{ij} = \frac{r_{ij} - \min_{i=1:n}(r_{ij})}{\max_{i=1:n}(r_{ij}) - \min_{i=1:n}(r_{ij})} \quad (67)$$

$$X_j^- \rightarrow R_{ij} = \frac{\max_{i=1:n}(r_{ij}) - r_{ij}}{\max_{i=1:n}(r_{ij}) - \min_{i=1:n}(r_{ij})} \quad (68)$$

در این روش نرمال‌سازی، شاخص‌های منفی پس از نرمال‌سازی،

الگوریتم‌های مورد بررسی به‌طور خلاصه در جدول (۱۰) و (۱۱) آمده است.

۴-۵- نتایج محاسباتی

معیارهای مقایسه‌ی کارایی الگوریتم‌ها کیفیت جواب و زمان حل می‌باشد. برای بررسی کارایی روش‌های حل ارائه شده، ۱۵ مثال با ابعاد کوچک تا بزرگ حل شده و زمان حل و مقادیر توابع هدف به‌دست‌آمده توسط روش‌های حل گزارش شده و تحلیل‌های لازم صورت گرفته است. در جدول (۱۲) ابعاد مسائل موردبررسی آورده شده است. در جدول (۱۳) بازه‌ی مقادیر پارامترهایی که در تولید مسائل نمونه با ابعاد بیان شده در جدول (۱۲) مورد استفاده قرار گرفته شده است مشاهده می‌شود.

هر اندازه مسئله ۱۵ بار حل شده و میانگین جواب‌ها و بهترین جواب برای الگوریتم‌ها مشخص شده است. در ابتدا برای نشان دادن تضاد بین اهداف مسئله نمونه شماره ۱، به ازای وزن‌های متفاوت حل شده است. جدول (۱۴) مقادیر پارتو به ازای وزن‌های مختلف را نشان می‌دهد.

جدول (۹): نتایج نرمالایز شده و محاسبه پاسخ‌ها برای تنظیم

پارامتر الگوریتم‌های GA و VDO

شماره	GA		VDO		پاسخ	شماره
	تایع هدف	زمان	تایع هدف	زمان		
۱	۰/۶۱	۰/۰۰	۶/۱۱	۰/۶۵	۰/۰۲	۶/۴۹
۲	۱/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰	۰/۵۳	۰/۰۰	۵/۲۹
۳	۰/۷۲	۰/۰۱	۷۲/۲۳	۰/۲۹	۰/۰۰	۲/۹۴
۴	۰/۸۹	۰/۱۵	۷۲/۰۴	۰/۷۶	۰/۰۸	۷/۷۳
۵	۰/۱۱	۰/۱۳	۱۱/۲۴	۰/۴۷	۰/۰۸	۴/۷۹
۶	۰/۳۳	۰/۱۴	۳۳/۴۷	۰/۹۴	۰/۰۸	۹/۴۹
۷	۰/۹۴	۰/۳۴	۹۴/۷۸	۰/۷۶	۰/۱۶	۷/۸۱
۸	۰/۸۳	۰/۲۵	۸۳/۵۸	۰/۰۶	۰/۱۹	۰/۷۸
۹	۰/۴۴	۰/۳۳	۴۴/۷۸	۰/۵۳	۰/۲۲	۵/۵۲
۱۰	۰/۸۳	۰/۱۹	۸۳/۵۳	۰/۲۴	۰/۱۱	۲/۴۶
۱۱	۰/۴۴	۰/۱۹	۴۴/۶۴	۰/۸۲	۰/۱۰	۸/۳۳
۱۲	۰/۰۰	۰/۱۹	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۱۰	۱/۸۷
۱۳	۰/۱۱	۰/۳۳	۱۱/۴۴	۰/۰۰	۰/۲۹	۰/۲۹
۱۴	۰/۲۲	۰/۲۹	۲۲/۵۲	۰/۷۶	۰/۲۹	۷/۹۴
۱۵	۰/۶۱	۰/۳۰	۶۱/۴۱	۰/۷۱	۰/۲۹	۷/۳۵
۱۶	۱/۰۰	۰/۴۴	۱۰۰/۴۴	۰/۷۶	۰/۵۰	۸/۱۴
۱۷	۰/۰۶	۰/۴۴	۵/۹۹	۰/۱۸	۰/۵۰	۲/۲۶
۱۸	۰/۹۴	۰/۵۰	۹۴/۹۴	۰/۵۳	۰/۴۳	۵/۷۲
۱۹	۰/۱۱	۰/۳۵	۱۱/۴۶	۰/۴۱	۰/۲۳	۴/۳۵
۲۰	۰/۶۷	۰/۳۹	۶۷/۰۶	۰/۴۷	۰/۲۴	۴/۹۵
۲۱	۰/۶۱	۰/۴۰	۶۱/۵۱	۱/۰۰	۰/۲۶	۱۰/۲۶
۲۲	۱/۰۰	۰/۶۷	۱۰۰/۶۷	۰/۱۸	۰/۵۱	۲/۲۸
۲۳	۰/۲۸	۰/۷۲	۲۸/۵۰	۰/۴۱	۰/۵۰	۴/۶۲
۲۴	۰/۸۳	۰/۷۲	۸۳/۰۵	۰/۳۵	۰/۴۹	۴/۰۲
۲۵	۰/۶۱	۱/۰۰	۶۲/۱۱	۰/۸۸	۰/۷۹	۹/۶۲
۲۶	۱/۰۰	۰/۹۳	۱۰۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۸۴	۱۰/۲۵
۲۷	۰/۵۶	۰/۷۲	۵۲/۲۷	۱/۰۰	۱/۰۰	۱۱/۰۰

ماهیت مثبت پیدا می‌کنند.

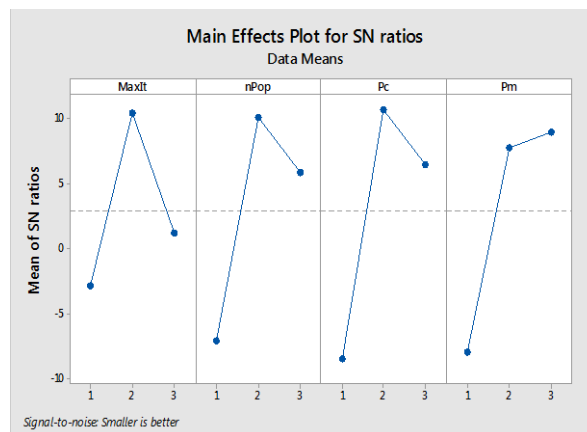
با استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی آرمانی، شاخص‌ها بر حسب اهمیت اولویت بندی شده و متناسب با آن، وزنی برای هر شاخص در نظر گرفته می‌شود. آنگاه با توجه به ضرایب اهمیت، مجموع وزن‌دار شاخص‌های هر آزمایش طبق معادله‌ی (۶۹) محاسبه می‌گردد. در این مسأله وزن‌های زیر براساس اهمیت هر شاخص در نظر گرفته شده است:

$$Response_i = \sum_{j=1}^4 R_{ij}W_j \quad (69)$$

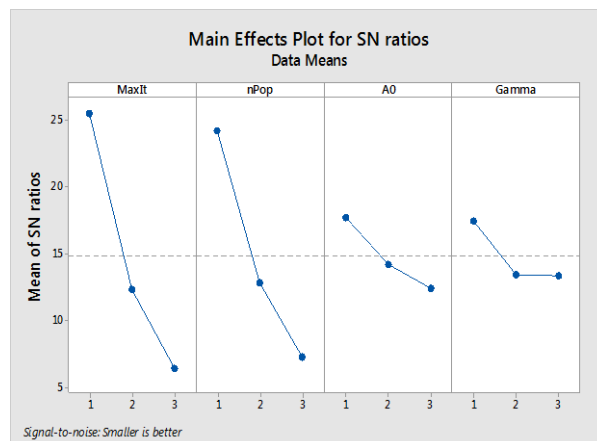
که در عبارت بالا $(W_{Obj}, W_{Time}) = (0,1)$ تعیین شده است. این نتایج در قالب جدول (۹) آورده شده است.

• تحلیل با استفاده از نرم‌افزار مینی تب

در مرحله‌ی آخر براساس متغیر پاسخ محاسبه شده در مرحله‌ی قبل، نرخ S/N محاسبه می‌شود و سطوح بهینه‌ی پارامترهای ورودی مشخص می‌شود (این عملیات توسط نرم‌افزار مینی تب انجام گرفته است).



شکل (۴): نسبت S/N برای تنظیم پارامترها به روش تاگوجی برای الگوریتم GA



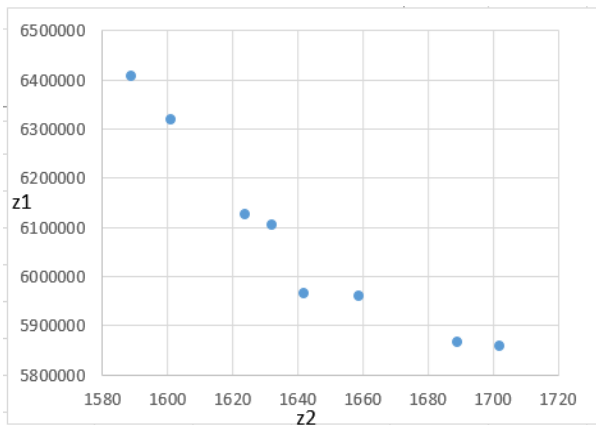
شکل (۵): خروجی مینی تب برای تنظیم پارامتر الگوریتم VDO

با توجه به شکل‌های (۴) و (۵) سطوح بهینه برای پارامترهای

جدول (۱۴): مجموعه نقاط پارتو به ازای وزن‌های متفاوت

W_1	W_2	Z_1	Z_2
۰,۱	۰,۹	۱۵۸۹	۶۴۰۶۳۵۳
۰,۲	۰,۸	۱۶۰۱	۶۳۱۸۹۵۴
۰,۳	۰,۷	۱۶۲۴	۶۱۲۴۹۷۷
۰,۴	۰,۶	۱۶۳۲	۶۱۰۳۹۸۱
۰,۵	۰,۵	۱۶۴۲	۵۹۶۴۱۰۱
۰,۶	۰,۴	۱۶۵۹	۵۹۵۹۴۱۵
۰,۷	۰,۳	۱۶۸۹	۵۸۶۶۵۱۲
۰,۸	۰,۲	۱۷۰۲	۵۸۵۷۹۸۳

با توجه به شکل (۶) تضاد بین اهداف به وضوح مشخص است.



شکل (۶): مجموعه جواب‌های پارتو برای نمونه مسئله ۱

یکی از ویژگی‌های اصلی در نظر گرفته برای مدل پیشنهادی در نظر گرفتن کانال‌های دوگانه فروش سنتی و اینترنتی می‌باشد. برای نشان دادن اثر این مسئله، متغیرهای تصمیم مربوط به کانال اینترنتی آزاد و محدودیت‌های مربوطه بازنویسی شد. مسئله برای اندازه نمونه‌های متفاوت برای تابع هدف اول حل شده و نتایج در جدول (۱۵) نشان داده شده است. در این جدول مقدار اختلاف از درصد تفاوت نسبی ستون دوم و سوم به‌دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نظر گرفتن کانال اینترنتی می‌تواند تا ۲,۳۵٪ افزایش سود برای زنجیره تأمین شود.

جدول (۱۵): بررسی تأثیر کانال اینترنتی بر مقدار تابع هدف اول

شماره مسئله	با کانال اینترنتی	بدون کانال اینترنتی	اختلاف %
۱	۶۴۰۶۳۵۳	۶۳۹۳۱۰۳	۰,۲۰۷
۲	۶۸۲۲۴۶۶	۶۷۸۳۴۸۷	۰,۵۷۵
۳	۹۷۲۸۶۶۵	۹۶۰۹۱۸۷	۱,۲۴۳
۴	۱۰۹۴۸۷۰۹	۱۰۸۷۲۳۵۹	۰,۷۰۲
۵	۱۱۰۴۲۸۲۲	۱۰۸۷۹۳۸۳	۱,۵۰۲
۶	۱۴۲۷۵۰۴۳	۱۴۰۴۱۶۳۰	۱,۶۶۲
۷	۲۰۴۳۶۱۹۸	۲۰۲۴۶۷۴۹	۰,۹۳۶
۸	۲۰۷۳۲۳۲۵	۲۰۴۹۷۱۲۴	۱,۱۴۷
۹	۲۳۳۴۱۴۰۶	۲۲۰۳۲۳۹۲	۱,۴۰۳
۱۰	۲۳۸۲۵۴۴۲	۲۳۲۷۸۱۲۹	۲,۳۵۱

جدول (۱۰): سطوح بهینه‌ی تعیین‌شده برای الگوریتم VDO

MaxIt	nPop	A_0	γ
سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱	سطح ۱
۵۰	۵۰	۱۰	۰/۱

جدول (۱۱): سطوح بهینه‌ی تعیین‌شده برای الگوریتم GA

MaxIt	nPop	Pc	Pm
سطح ۲	سطح ۲	سطح ۲	سطح ۳
۱۰۰	۱۰۰	۰/۸	۰/۴

جدول (۱۲): ابعاد مسائل طراحی شده

شماره	تعداد مراکز تولید	تعداد مراکز توزیع	تعداد مراکز خرده‌فروش	تعداد مشتریان
۱	۲	۲	۲	۲
۲	۲	۲	۲	۲
۳	۲	۳	۲	۲
۴	۲	۴	۴	۲
۵	۵	۳	۷	۳
۶	۹	۷	۷	۵
۷	۱۳	۹	۹	۲
۸	۱۵	۹	۸	۵
۹	۱۸	۱۲	۸	۳
۱۰	۲۵	۱۸	۱۲	۱۵
۱۱	۴۰	۱۵	۱۰	۸
۱۲	۵۰	۱۴	۱۵	۱۸
۱۳	۴۰	۲۰	۱۵	۱۰
۱۴	۱۰۰	۳۰	۲۵	۱۷
۱۵	۱۵۰	۲۰	۲۰	۱۵

جدول (۱۳): بازه‌های مورد استفاده در تولید مسائل

پارامتر	بازه	پارامتر	بازه
D_0	$U[۷۰,۲۰۰]$	P_0	$U[۵,۵۰]$
b_{ij}	$U[۰/۰,۱,۰/۰,۲]$	b_{ik}	$U[۰/۰,۱,۰/۰,۵]$
b_{jk}	$U[۰/۰,۲,۰/۰,۵]$	b_{jl}	$U[۰/۰,۲,۰/۰,۸]$
b_{kl}	$U[۰/۰,۴,۰/۰,۶]$	b'_{kl}	$U[۰/۰,۲,۰/۰,۷]$
T_j	$U[۶,۲۰]$	T_k	$U[۷,۳۰]$
T_l	$U[۸,۳۰]$	t_j	$U[۱,۵]$
t_k	$U[۱,۷]$	t_l	$U[۱,۹]$
t_{ij}	$U[۰/۱,۴]$	t_{ik}	$U[۰/۱,۴]$
t_{jk}	$U[۰/۱,۳]$	t_{jl}	$U[۰/۲,۴]$
t_{kl}	$U[۰/۱,۲]$	t'_{kl}	$U[۰/۱,۲]$
tt_i	$U[۰/۱,۵]$	tt_j	$U[۰/۱,۳]$
tt_k	$U[۰/۱,۱۷]$	W_D	$U[۱,۱۵]$
W_t	$U[۱,۱۰]$	W_L	$U[۵۰,۱۵۰]$
S_{ij}	$U[۱,۵]$	e_{jk}	$U[۱,۴]$
S_{ik}	$U[۱,۶]$	e_{jl}	$U[۱,۷]$
U_{kl}	$U[۱,۵]$	U'_{kl}	$U[۱,۵]$
Cap_i	$U[۷۰۰,۱۰۰۰]$	Cap_j	$U[۴۰۰,۸۰۰]$
Cap_k	$U[۵۰۰,۶۷۰]$	$Cost_i$	$U[۱۰,۲۰]$
$Cost_j$	$U[۸,۱۸]$	$Cost_k$	$U[۵,۱۹]$

که در آن $Best_{gams}$ بهترین جواب ناشی از $Gams$ و $Best_{alg}$ بهترین جواب ناشی از الگوریتم‌های حل است. براساس جدول (۱۷) مشاهده می‌شود که با افزایش ابعاد مسائل مقدار توابع هدف افزایش پیدا می‌کند. زمان حل مسائل توسط نرم‌افزار GAMS با افزایش زمان حل مدل به‌صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند ولی در الگوریتم‌های ارائه شده به این صورت نمی‌باشد و زمان حل الگوریتم‌ها به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. نتایج حاصل از جدول (۱۷) حاکی از آن است که دو الگوریتم VDO و GA در مقایسه‌ی با GAMS جواب‌های با کیفیتی تولید می‌کنند. براساس جدول (۱۷) مشاهده می‌شود حداقل و حداکثر خطا برای الگوریتم VDO نسبت به GA کمتر است. نتایج نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای الگوریتم‌های ارائه شده در حل مسائل ارائه شده است. مشاهده می‌شود که خطای الگوریتم VDO کمتر از GA است و نشان‌دهنده‌ی بهتر بودن عملکرد الگوریتم VDO است.

برای نمونه مسائل ۱۱ تا ۱۵ که GAMS قادر برای حل نبوده است نتایج حل مدل با دو الگوریتم در جدول (۱۸) گزارش شده است. در جدول (۱۸) مقدار خطا به‌صورت زیر محاسبه شده است [۲۶]:

$$RPD\% = \left(\frac{Max_{alg} - Alg_{sto}}{Max_{alg}} \right) \quad (71)$$

که در آن Max_{alg} بهترین جواب الگوریتم در تمام تکرارها و Alg_{sto} جواب هر الگوریتم در هر تکرار است. در نهایت RPD میانگین خطاها به ازای تمام تکرارها می‌باشد. نتایج جدول (۱۸) نشان می‌دهد که در تمامی مسائل VDO بهتر از GA است به جز مسئله ۱۳. شکل (۷) مقادیر مختلف تفاوت‌های ایجاد شده توسط دو الگوریتم را بر مبنای RPD نشان می‌دهد.

برای بررسی اثر فروش اینترنتی روی تابع هدف دوم نیز مسئله به ازای نمونه مسئله‌های متفاوت حل شده و نتایج در جدول (۱۶) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اثر طراحی کانال اینترنتی روی تابع هدف دوم بیشتر که این موضوع می‌تواند ناشی از کاهش زمان محسوس تحویل کالا به مشتری و افزایش سطح رضایت وی شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج تا ۸,۷٪ افزایش رضایت را نشان می‌دهد.

جدول (۱۶): بررسی تأثیر کانال اینترنتی بر مقدار تابع هدف دوم

شماره مسئله	با کانال اینترنتی	بدون کانال اینترنتی	اختلاف %
۱	۱۵۸۹	۱۵۷۸	۰,۷۰
۲	۱۷۳۰	۱۷۲۲	۰,۴۶
۳	۱۷۵۳	۱۷۳۹	۰,۸۱
۴	۱۷۶۳	۱۷۴۴	۱,۰۹
۵	۲۰۵۰	۲۰۲۹	۱,۰۳
۶	۲۰۵۵	۲۰۲۳	۱,۵۸
۷	۲۴۲۰	۲۳۴۸	۳,۰۷
۸	۲۶۴۹	۲۵۱۸	۵,۲۰
۹	۲۷۵۶	۲۶۰۲	۵,۹۲
۱۰	۲۸۴۸	۲۶۱۸	۸,۷۹

• بررسی کارایی روش‌های حل:

در جدول (۱۶) نتایج به‌دست‌آمده از حل مثال‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار GAMS و روش‌های GA و VDO برای ۱۰ مسئله آورده شده است. در این جدول مقدار خطا از رابطه‌ی ۷۰ به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

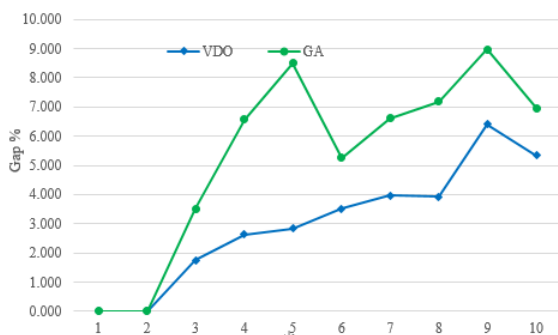
$$Gap\% = \left(\frac{Best_{gams} - Best_{alg}}{Best_{gams}} \right) \quad (70)$$

جدول (۱۷): نتایج به‌دست‌آمده از حل مثال‌های طراحی شده توسط روش‌های حل ارائه شده برای Z_T

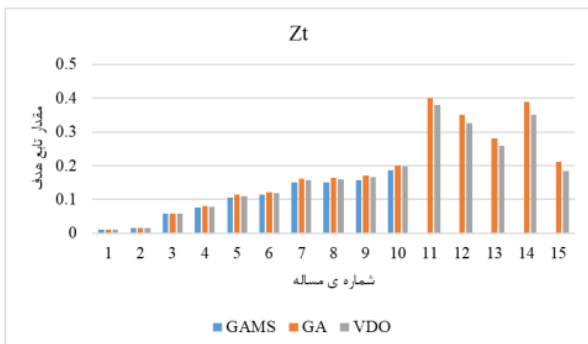
NO.	GAMS		GA		Gap%	VDO		Gap%
	Best solution	CPU Time(s)	Best solution	CPU Time(s)		Best solution	CPU Time(s)	
۱	۰/۰۱۱	۱۷۱	۰/۰۱۱	۶	۰,۰۰	۰/۰۱۱	۳	۰,۰۰
۲	۰/۰۱۵	۵۸۰	۰/۰۱۵	۸	۰,۰۰	۰/۰۱۵	۴	۰,۰۰
۳	۰/۰۵۷	۶۹۲	۰/۰۵۹	۹	۳,۵۱	۰/۰۵۸	۴	۱,۷
۴	۰/۰۷۶	۷۰۴	۰/۰۸۱	۲۲	۶,۵۸	۰/۰۷۸	۱۲	۲,۶
۵	۰/۱۰۶	۱۲۱۰	۰/۱۱۵	۳۵	۸,۴۹	۰/۱۰۹	۱۸	۲,۷
۶	۰/۱۱۴	۱۳۰۰	۰/۱۲	۳۹	۵,۲۶	۰/۱۱۸	۱۶	۳,۵
۷	۰/۱۵۱	۱۹۵۹	۰/۱۶۱	۵۶	۶,۶۱	۰/۱۵۷	۲۷	۳,۹
۸	۰/۱۵۱	۲۷۶۴	۰/۱۶۴	۷۱	۷,۲۲	۰/۱۵۹	۳۵	۳,۹
۹	۰/۱۵۶	۳۶۰۰	۰/۱۷	۸۶	۸,۹۰	۰/۱۶۶	۴۸	۶,۴
۱۰	۰/۱۸۷	۳۶۰۰	۰/۲	۸۹	۶,۹۱	۰/۱۹۷	۴۵	۵,۳

جدول (۱۸): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از حل مثال‌های طراحی شده در ابعاد بزرگ توسط روش‌های حل ارائه شده Z_T

NO.	GA				VDO			
	Average Solution	Best solution	CPU Time	\overline{RPD}	Average Solution	Best solution	CPU Time	\overline{RPD}
۱۱	۰,۵۵	۰/۴	۹۶	۰,۴۴۷	۰,۳۸۵	۰/۳۸	۴۶	۰,۰۱۳
۱۲	۰,۴۸۵	۰/۳۵	۲۰۰	۰,۴۹۲	۰,۳۳۰	۰/۳۲۵	۹۳	۰,۰۱۵
۱۳	۰,۳۱۰	۰/۲۸	۲۰۴	۰,۱۰۳	۰,۳۱۵	۰/۲۹	۹۸	۰,۱۲۱
۱۴	۰,۵۹۸	۰/۳۹	۲۰۶	۰,۷۰۹	۰,۳۷۰	۰/۳۵	۱۱۰	۰,۰۵۷
۱۵	۰,۳۴۰	۰/۲۱	۲۳۳	۰,۸۳۸	۰,۲۰۵	۰/۱۸۵	۱۲۶	۰,۱۰۸

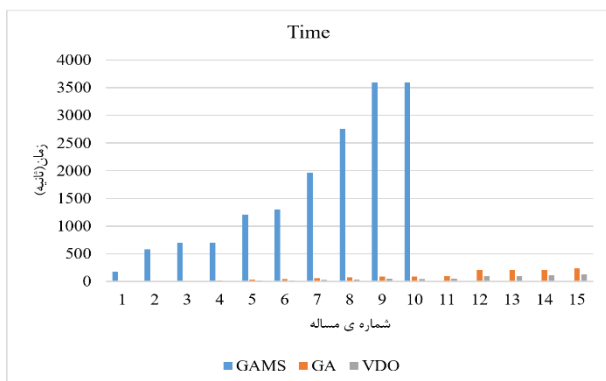


شکل (۷): مقایسه‌ی درصد خطا (Gap) بین الگوریتم‌های GA و VDO



شکل (۸): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای تابع هدف Z_t

در شکل (۹) مقایسه‌ی زمان حل الگوریتم‌های ارائه شده، آورده شده است.



شکل (۹): مقایسه زمان حل الگوریتم‌های GA و VDO

برای بررسی دقیق‌تر پس از تست نرمال بودن داده‌های RPD در تمامی تکرارها در هر دو الگوریتم که نتیجه نرمال بودن اثبات شد، از روش ANOVA برای بررسی اختلاف بین دو الگوریتم ارائه شده. جدول (۱۹) نتایج این آزمون را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج مشخص است اختلاف معناداری بین دو الگوریتم وجود دارد.

جدول (۱۹): نتایج ANOVA

منبع	DF	Adj SS	Adj SM	F-Value	P-Value
C6	۱	۰,۵۱۷۶	۰,۵۱۷	۱۲,۶۹	۰,۰۰۷
خطا	۸	۰,۳۲۶۳	۰,۰۴۱		
کل	۹	۰,۸۴۳۸			

برای بررسی بیشتر از آزمون مقایسات توکی [۲۶] استفاده شده است. نتیجه‌ی این آزمون در جدول (۲۰) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است برتری VDO نسبت به ژنتیک به لحاظ آماری محرز می‌باشد.

با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود که مقادیر تابع هدف تجمعی به‌دست‌آمده توسط الگوریتم‌های GA و VDO نسبت به نتایج نرم‌افزار GAMS کیفیت بسیار مناسبی دارند و دارای اختلاف کمی می‌باشند ولی مشاهده می‌شود که اختلاف الگوریتم VDO با نرم‌افزار گمز کمتر از اختلاف الگوریتم GA با نرم‌افزار GAMS است.

جدول (۲۰): مقایسه دو الگوریتم با آزمون توکی

روش‌ها	تفاوت میانگین	SE	T-value	P-Value
VDO-GA	-۰,۴۵۵	۰,۱۲۸	-۳,۵۶	۰,۰۰۷

باشد. که هر کدام از این اولویت‌ها نتایج متفاوتی در بر خواهند داشت.

۲- مراکز دفع، بازیافت برای تولید انرژی و لجستیک معکوس کالاهای فاسدشدنی در نظر گرفته شود.

۳- با توجه به اینکه مدل فوق تک محصولی و تک دوره‌ای است می‌توان با در نظر گرفتن انواع محصولات و چند دوره، مدل را به دنیای واقعی نزدیک‌تر کرد.

مراجع

- [۱] کریمی ناصر، راستی برزکی مرتضی. (۱۳۹۷). "رویکرد نظریه بازی برای قیمت‌گذاری و تعیین سطح تبلیغات و سطح خدمت در یک زنجیره تأمین دارای کانال توزیع دوگانه: تصمیم‌گیری متمرکز". *نشریه پژوهش‌های مهندسی صنایع در سیستم‌های تولید*، ۱۳(۶): ۱۷۹-۱۹۳.
- [2] Goyal, S.K., Giri, B.C. (2001). "Recent trends in modeling of deteriorating inventory". *European Journal of Operational Research*, 134, 1-16.
- [۳] عیدی، آسیه. (۱۳۹۵). قیمت‌گذاری پویا محصولات فاسدشدنی غیرآنی با در نظر گرفتن یک دوره فروش ویژه در زنجیره تأمین. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد. دانشگاه پیام‌نور. مرکز تهران شمال. دانشکده مهندسی صنایع.
- [4] Panda, S. & Saha, S. & Basu, M. (2009). "An EOQ model for perishable products with discounted selling price and stock dependent demand". *CEJOR*. 17, PP. 31-53.
- [۵] تیموری، ابراهیم و کاظمی، محمد مهدی. (۱۳۹۴). "توسعه مدل قیمت‌گذاری کالاهای زوال‌پذیر با نرخ زوال ثابت با در نظر گرفتن جایگزینی کالاهای فاسد شده". *نشریه تخصصی مهندسی صنایع*. دوره ۴۹، شماره ۱، ۱-۹.
- [۶] پورعلی‌خوانی، حامد و کیمیاگری، علی‌محمد و کیوانلو، محسن. (۱۳۹۲). "قیمت‌گذاری و برنامه‌ریزی تولید برای یک تولیدکننده با اقلام فاسدشدنی وابسته به زمان"، *تحقیق در عملیات*. دوره ۱۰، شماره ۳، ۱۱-۲۳.
- [7] Zhang, J., Wang, Y., Lu, L. & Tang, W. (2015). "Optimal dynamic pricing and replenishment cycle for non-instantaneous deterioration items with inventory- level- dependent demand". *Journal Production Economics*. 170, 136-145.
- [8] Schlooser, R. (2015). "Dynamics pricing and advertising of perishable products with inventory holding costs". *Journal of Economic Dynamics & Control*. 57, 163-181
- [9] Rabbani, M., Zia, N.P. and Rafiei, H., (2016). "Joint optimal dynamic pricing and replenishment policies for items with simultaneous quality and physical quantity deterioration". *Applied Mathematics and Computation*, 287, 149-160.
- [10] Dye, C. Y. & Yang, C. T. (2016). "Optimal dynamic pricing and preservation technology investment for deteriorating products with reference price effects". *Omega*. 62, 52-67.

براساس شکل (۹) مشاهده می‌شود با افزایش ابعاد مسائل، زمان حل الگوریتم‌ها به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند و از طرفی زمان حل الگوریتم VDO کمتر از زمان حل الگوریتم GA است و براساس این معیار این الگوریتم بهتر از الگوریتم GA است.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله یک مدل دوکاناله زنجیره تأمین برای قیمت‌گذاری محصولات فاسدشدنی غیرآنی ارائه شد. از آنجاکه مدل پیشنهادی جزو مسائل NP-Hard است برای حل در ابعاد بزرگ از الگوریتم VDO و GA برای حل مدل استفاده شد. با توجه به نتایج مشاهده شده است که کارایی الگوریتم VDO از نظر کیفیت جواب و زمان حل بهتر از الگوریتم GA است و از این رو پیشنهاد می‌شود از الگوریتم VDO در حل مسائل با ابعاد بالا استفاده کرد.

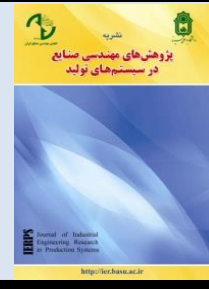
تحلیل حساسیت و نتایج ارائه شده دستاوردهای مدیریتی خوبی برای مدیران این حوزه ارائه می‌دهد. اولین نتیجه این است که طراحی کانال اینترنتی هم سود و هم رضایت مشتریان و مراکز متفاوت زنجیره تأمین را به شکل محسوسی افزایش می‌دهد. بنابراین آماده کردن زیرساخت‌های لازم برای فروش اینترنتی و توزیع ترکیبی محصولات میتواند بسیار مثمرتر باشد. نکته‌ی بعدی این است که تضاد چشم‌گیری بین اهداف وجود دارد و برای رسیدن به برنامه‌ای چیره‌کننده، مدیران باید با توافق نظر و در نظر گرفتن رویکردهای همکارانه وزن توابع را مشخص و به پاسخ و برنامه‌ی قانع‌کننده‌ای برسند. مسئله‌ی بعدی آن است که مدل پیشنهادی می‌تواند در تعیین قیمت کالا در کانال‌های متفاوت به مدیران کمک کند. باید توجه شود که قیمت پیشنهادی برای محصولات در کانال‌های اینترنتی باید کمتر و مناسب‌تر از کانال‌های سنتی باشد تا باعث ترغیب مشتریان برای خرید این محصولات باشد. لازم به ذکر است که این مسئله در جواب‌های تولید شده پس از حل مدل مشاهده شده است. همچنین مدل پیشنهادی می‌تواند در کنترل سطح رضایت مشتریان و مراکز مختلف کمک‌شایانی به مدیران نماید. میزان رضایت مشتریان و اعضای زنجیره تأمین تأثیر مستقیم بر میزان تقاضای آن‌ها دارد و هرچه رضایت بیشتری داشته باشند تقاضا نیز بیشتر است. میزان فساد محصولات، تقاضا، قیمت و سن محصول از پارامترهای کلیدی این مدل هستند که با اندکی تغییر در هر کدام نتایج بسیار متفاوتی حاصل می‌شود و در نهایت همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش قیمت میزان تقاضای مشتریان کاهش می‌یابد که البته میزان تأثیر قیمت بر تقاضا به سن محصول نیز بستگی دارد.

پیشنهاد برای تحقیقات آتی

مواردی که می‌توان برای مطالعات آتی نام برد به‌صورت زیر است:

- ۱- از آنجاکه در دنیای واقعی در شرایط یکسان رفتار همه مشتریان یکسان نیست بنابراین می‌توان مشتریان را گروه‌بندی کرد و انواع آن‌ها را در مدل لحاظ نمود. برای مثال ممکن است برخی مشتریان کیفیت و برخی قیمت محصولات برایشان اهمیت بالاتری داشته

- [۲۴] پسران حاجی عباس، مرجان. (۱۳۹۵). طراحی یک مدل مکانیابی- تخصیص شبکه توزیع دارو با تأکید بر زمان دسترسی. پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی. دانشکده مهندسی صنایع.
- [25] Holland, J. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of michigan press. Ann Arbor.*
- [26] Atabaki, M. S., Mohammadi, M., & Naderi, B. (2017). Hybrid genetic algorithm and invasive weed optimization via priority-based encoding for location-allocation decisions in a three-stage supply chain. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 34(02), 1750008.
- [11] Fan, T., Xu, C. and Tao, F., (2020). "Dynamic pricing and replenishment policy for fresh produce". *Computers & Industrial Engineering*, 139, p.106127.
- [12] Tashakkor, N., Mirmohammadi, S.H. and Iranpoor, M., (2018). "Joint optimization of dynamic pricing and replenishment cycle considering variable non-instantaneous deterioration and stock-dependent demand". *Computers & Industrial Engineering*, 123, 232-241.
- [13] Soni, H.N., Suthar, D.N., (2019). "Pricing and inventory decisions for non-instantaneous deteriorating items with price and promotional effort stochastic demand". *Journal of Control and Decision*, 6(3), 191-215.
- [14] Vaghela, C.R. and Shah, N.H., (2020). "Dynamic Pricing, Advertisement Investment and Replenishment Model for Deteriorating Items". In *Optimization and Inventory Management* (pp. 81-92). Springer, Singapore.
- [15] Li, G., He, X., Zhou, J. and Wu, H., (2019). "Pricing, replenishment and preservation technology investment decisions for non-instantaneous deteriorating items". *Omega*, 84, 114-126.
- [16] Barzinpour, F. and Taki, P., (2018). "A dual-channel network design model in a green supply chain considering pricing and transportation mode choice". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(7), 1465-1483.
- [۱۷] مهدیزاده، اسماعیل و توکلی مقدم، رضا. (۱۳۸۸). بهینه‌سازی یک مسأله زمانبندی ماشین‌های موازی به کمک میرایی ارتعاشات. دومین کنفرانس بین‌المللی تحقیق در عملیات.
- [18] Hajipour, V., Farahani, R.Z. and Fattahi, P., (2016). "Bi-objective vibration damping optimization for congested location-pricing problem". *Computers & Operations Research*, 70, 87-100.
- [19] Tavakkoli-Moghaddam, R., Vazifeh-Noshafagh, S., Taleizadeh, A.A., Hajipour, V. and Mahmoudi, A., (2017). "Pricing and location decisions in multi-objective facility location problem with M/M/m/k queuing systems". *Engineering Optimization*, 49(1), pp.136-160.
- [20] Moghaddam, R.T., (2018). "A multi-objective vibration damping meta-heuristic algorithm for multi-objective p-robust supply chain problem with travel time". *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 11(Special issue: 14th International Industrial Engineering Conference), 176-189.
- [21] Adenzo, B. & Lorenzo, S. & Palacio, A. (2016). "Effects of dynamic pricing of perishable products on revenue and waste". *Applied Mathematical Modeling*. 45, 148-164.
- [22] Tekin, P. & Erol, R. (2017). "A new dynamic pricing model for the effective sustainability of perishable product life cycle". *Journal sustainability*. 28, 211-233.
- [23] Yu, J. & Gan, M. & Ni, S.H. & Chen, D. (2018). "Multi-objective models and real case study for dual-channel FAP supply chain network design with fuzzy information". *Journal Springer*, 29, 389-403.



DOI: 10.22084/ier.2020.20220.1901

A model for Pricing of Non-Instantaneous Perishable Products Considering Age, Price and Demand as Variable Factors and Satisfaction of Supply Chain Centers

E. Kamkar¹, D. Rahmani^{2*}, E. Roghanian³

^{1, 2, 3} Department of Industrial Engineering, K. N. Toosi University of Technology

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 October 2019
Accepted 12 March 2020

Keywords:

Pricing
Perishable Products
Customer Satisfaction
GA
VDO

ABSTRACT

Pricing is one of the most important decisions a company or organization can take, because the reflector price is the amount of value that a product has and the customer is willing to pay. This issue will become even more important for perishable products. Therefore, in this paper, we will examine the pricing of non-instantaneous perishable products, as demand is a nonlinear function of the price and age of the product. Also, the price is a function of the product's age. The model is a bi-objective model, which, in addition to maximizing profit, attempts to maximize this issue, considering the satisfaction of chain centers and customers as a goal. Genetic Algorithm and Vibration Damping Optimization has been used to solve the problem. Results show the validation of the model and the performance of the developed algorithms.

* Corresponding author. D. Rahmani
Tel.: 021-84063357; E-mail address: Drahmani@kntu.ac.ir