

بهینه‌سازی کنترل موجودی در یک زنجیره تامین سه سطحی از طریق شبیه‌سازی و الگوریتم جستجوی هارمونی

نسترن بخشی زاده*، پرهام عظیمی**

تاریخ دریافت: ۹۴/۲/۴ - تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۳۰

چکیده

در بازارهای امروز رقابت در حال افزایش است و شرکت‌ها را به سمت بهینه‌سازی فرایندهای مدیریتی سوق می‌دهد. این موضوع هماهنگی مسائل مختلفی نظیر به اشتراک گذاری اطلاعات، برنامه ریزی ظرفیت تولید و قابلیت اطمینان میان اعضای درگیر شبکه را شامل می‌شود. یکی از مهمترین ابعاد شبکه زنجیره تامین بهینه سازی عملیاتها با هدف حداقل کردن هزینه می‌باشد. احتمالی بودن تقاضا و زمان تولید محصولات، که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته اند، مهم ترین عدم قطعیت‌هایی هستند که یک زنجیره تامین با آن مواجه است. با توجه به این پیچیدگی‌ها بهینه‌سازی شبکه زنجیره تامین کار بسیار سختی می‌باشد. به منظور مقابله با این پیچیدگی و تعیین شرایط بهینه این تحقیق رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی، روش تاگوجی، تجزیه و تحلیل رگرسیون غیرخطی و الگوریتم جستجوی هارمونی پیشنهاد می‌دهد. در این رویکرد در ابتدا مفاهیم طراحی آزمایشات به کار گرفته می‌شود و تعدادی سناریو برای زنجیره تامین تعریف می‌شود. سپس هر یک از این سناریوها در محیط شبیه‌سازی شده اجرا می‌شوند. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی به منظور تخمین رابطه بین عوامل موثر بر زنجیره و هزینه‌های زنجیره استفاده می‌شود. در نهایت با بهینه‌سازی این رابطه می‌توان هزینه‌های زنجیره تامین را حداقل کرد. این پژوهش به شرکت‌ها کمک می‌کند تا بتوانند پیچیدگی‌ها و وابستگی میان فاکتورهای مختلف زنجیره تامین را هموار کرده و راهکاری برای تولیدکنندگان در راستای تعیین برنامه ظرفیت مناسب و همچنین استراتژی به تاخیر انداختن معرفی محصول جدید ایجاد می‌کند.

واژگان کلیدی: شبکه زنجیره تامین، شبیه‌سازی، رگرسیون، الگوریتم جستجوی هارمونی

* دانشجوی دکتری مدیریت تحقیق در عملیات، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی

** دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده مهندسی صنایع و مکانیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین.

ایران (نویسنده مسئول) p.azimi@yahoo.com

مقدمه

در بازار جهانی و رقابت امروز برای رسیدن به موفقیت بیشتر در صنایع مختلف، مدیریت زنجیره تامین نقش بسیار حیاتی ایفا می‌کند. زنجیره تامین شبکه ای از تامین کنندگان، تولید کنندگان، توزیع کنندگان و مشتریانی است که با مسائل مختلفی نظیر: حمل و نقل، به اشتراک گذاری اطلاعات و زیر ساخت‌های مالی به هم مرتبط شده اند [۱]. هدف زنجیره تامین ارائه محصولات و خدمات با کیفیت به مصرف کننده نهایی با کارایی بالا و کمترین هزینه می‌باشد. [۲]. تاکنون مجموعه گسترده ای از تحقیقات به مسائل مختلف مرتبط با زنجیره تامین پرداختند. گاویرنی و همکاران [۳] بر مدیریت جریان مواد تمرکز کردند در حالیکه استرادر همکاران [۴] و هویت [۵] در همین سال بر نقش فن اوری اطلاعات در شبکه زنجیره تامین تاکید کردند. شانک و همکارانش [۶] در سال ۲۰۰۳ رویکرد یکپارچه سازی را برای زنجیره تامین بکار گرفتند.

اسپکمن [۷] و تامپکینز [۸] وابستگی میان اعضای مختلف زنجیره تامین مانند خرده فروشان، تولید کنندگان و تامین کنندگان را مورد مطالعه قرار دادند. در سال ۲۰۰۶ کواک و همکاران [۹] مدل " خریدار تامین کننده " را برای فرایند چانه زنی در حالی پیشنهاد دادند که مدل آنها بر مدل: ساخت الکترونیکی و زنجیره تامینی که توسط ژانگ و همکاران [۱۰] در همان سال پیشنهاد شده بود استوار بود.

التیپارماک و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۰۶ شبکه زنجیره تامین را بصورت یک مساله بهینه سازی چند هدفه در نظر گرفتند و آنرا با الگوریتم ژنتیک حل کردند. در گذشته محققان رویکردهای مختلفی را برای مقابله با مشکلات زنجیره تامین ابداع کردند که برخی از آنها بر رویکردهای قطعی و برخی دیگر بر رویکردهای غیرقطعی متمرکز بودند. کوهن و لی [۱۲]، ارتزن و همکاران [۱۳]، هریهاران و زیپکین [۱۴] برنامه ریزی ریاضی را به عنوان یک رویکرد قطعی برای بهینه سازی شبکه زنجیره تامین بکار گرفتند. در حالیکه ژن و زیپکین [۱۵]، وانهو تام و همکاران [۱۶] بر مدل سازی تصادفی مسائل زنجیره تامین تمرکز کردند. به منظور دستیابی به مزیت رقابتی در زنجیره تامین باید فاکتورهای انعطاف پذیری، سرعت در

پاسخگویی قابلیت اطمینان و هزینه مناسب را در نظر داشت این اهداف می‌توانند با سرعت بالای جریان اطلاعات و جریان مواد و پایین آوردن هزینه‌های سربار تحقق یابند. از طرفی هماهنگی و یکپارچگی در اطلاعات مختلف مانند اطلاعات فروش، اطلاعات موجودی و فعالیتهای مختلف نظیر تبلیغات و حمل و نقل برای موفقیت زنجیره تامین ضروری هستند. یکی از مسائل مهم شبکه زنجیره تامین به حداقل رساندن هزینه‌ها با شرایط بهینه عملیات‌های آن می‌باشد. که البته بدلیل پیچیدگی‌های میان تعاملات زنجیره کار بسیار سختی می‌باشد. برای حل این پیچیدگی‌ها و به حداکثر رساندن عملکرد اعضای زنجیره تامین باید ابتدا مسئولیتها و نقش‌های هر یک از اعضا به همراه مکانیسم همکاری آنان در زنجیره را تعریف کنیم. بسیاری از محققان به مسائل تک بعدی در زنجیره تامین مانند تعیین ظرفیت عملکردی زنجیره تامین پرداختند در حالیکه رویکردی که بطور همزمان دو یا چند عامل را در زنجیره در نظر بگیرد وجود ندارد.

در این تحقیق نقش و مسئولیت هر یک از اعضا در پیاده سازی و اجرای استراتژی بهینه سازی زنجیره تامین به روشنی بیان شده است به عبارتی در این تحقیق تلاش می‌کنیم تا بتوانیم هزینه‌های کل زنجیره تامین را مینیمم کنیم و از طرفی شرایط بهینه را برای عوامل درگیر در زنجیره با در نظر گرفتن پارامترهای مختلفی نظیر: به تاخیر انداختن معرفی محصول جدید، به اشتراک گذاری اطلاعات، تعیین ظرفیتهای بازننگری سیاستها، زمان تحویل و قابلیت اطمینان تامین کنندگان ایجاد نماییم. به منظور برآورده کردن این اهداف ما یک رویکرد ترکیبی شبیه سازی با روش تاگوچی و تجزیه و تحلیل رگرسیون غیرخطی [۱۷] و الگوریتم جستجوی هارمونی ارائه شده است. در این راستا ابتدا رویکرد شبیه سازی را برای مدل سازی شبکه زنجیره تامین مورد استفاده قرار دادیم اگر چه شبیه سازی تنها اثربخشی شرایط از قبل تعیین شده را ارزیابی می‌کند و نمی‌تواند وسیله ای برای بهینه سازی عملکرد سیستم باشد. لذا مدل شبیه سازی را با روش تاگوچی، تجزیه و تحلیل رگرسیون غیرخطی و الگوریتم جستجوی هارمونی ترکیب کرده ایم.

به منظور پاسخ گویی مؤثر به رویدادهای پیش بینی نشده نظیر: تغییر در تقاضا، مقدار سفارش و یا زمان تحویل و نیز پایداری و ثبات سیستم باید زنجیره تامین را به شکل مقاوم در برابر تغییرات احتمالی توسعه دهیم. رویکرد تاگوچی بهترین راه برای رسیدن به این هدف می باشد چراکه ثبات سیستم را افزایش، هزینه ها را کاهش و کیفیت را در کلیه سطوح مختلف سیستم بهبود می بخشد. ما روش ارایه متعامد تاگوچی را بررسی کرده و پارامترهای مناسب جهت قوی تر شدن زنجیره تامین را شناسایی کردیم.

مونت گومری [۱۷] در سال ۲۰۰۱ اظهار داشت که ارایه متعامد تاگوچی برای بررسی دقیق فضای مورد مطالعه در زمانی که پارامترها بطور مستمر تغییر می کنند مناسب و کارآمد نیست. لذا این روش تنها برای متغیرهای کیفی بهینه سازی مناسب هستند و برای متغیرهای کمی نمی توانند مؤثر واقع شوند. بنابراین برای رفع این محدودیت ما از تجزیه و تحلیل رگرسیون و الگوریتم جستجوی هارمونی در کنار شبیه سازی و روش تاگوچی استفاده می کنیم. این مقاله از اطلاعات موجود در [۱۸] بهره می گیرد و سعی دارد تا با توجه به آن به توسعه یک الگوریتم فراابتکاری جدید پردازد.

تجزیه و تحلیل رگرسیون برای تعیین رابطه عملکردی میان متغیرهای کمی و هزینه های زنجیره تامین مورد استفاده قرار می گیرد. از طرفی الگوریتم جستجوی هارمونی به عنوان ابزار بهینه سازی جهت تعیین مقدار بهینه متغیرهای کمی استفاده می شود. الگوریتم جستجوی هارمونی^۱ یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر عملکرد سازهای موسیقی است که اولین بار توسط جیم و همکاران [۱۹] معرفی شد. نتایج بدست آمده از الگوریتم جستجوی هارمونی با نتایج بدست آمده از الگوریتم های فراابتکاری موجود در ادبیات با هم مقایسه می شوند. این مقایسه نشان می دهد که الگوریتم جستجوی هارمونی از نظر کاهش هزینه های زنجیره تامین بر دیگر الگوریتم ها برتری دارد.

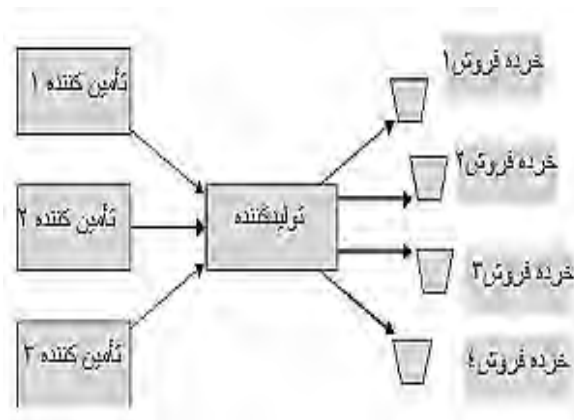
در ادامه مقاله در بخش ۲ به مدل شبیه سازی شبکه زنجیره تامین و پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن، در بخش ۳ آزمایشات لازم برای بدست آوردن هزینه های شبکه تحت تاثیر پارامترهای

1. Harmony Algorithm

مختلف طراحی می شوند. در بخش ۴ مدلسازی ریاضی با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون انجام می شود. در بخش ۵ بهینه سازی با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی و در آخر در بخش های ۶ و ۷ نتایج محاسباتی و پیشنهادات برای تحقیقات آتی ارائه می گردد.

مدل شبیه سازی شبکه زنجیره تامین

شبیه سازی راهکاری مناسب برای پیش بینی ارتباطها و وابستگی ها میان اعضای شبکه زنجیره تامین می باشد و می تواند برای مدلسازی شبکه زنجیره تامین نیز بکار گرفته شود. با توجه به اینکه زنجیره تامین و هزینه های مرتبط با آن به شدت تحت تاثیر عوامل احتمالی مانند تقاضا و زمان تولید است طراحی و توسعه یک مدل تحلیلی برای آن تا حدی ناممکن است. مدل های توسعه داده شده در ادبیات نیز همگی تقریبی از دنیای واقعی هستند. در چنین شرایطی شبیه سازی می تواند تمامی شرایط یک زنجیره در دنیای واقعی را به هنگام مدل سازی در نظر گرفته و دقیق ترین نتایج را ارائه دهد. در گذشته محققانی نظیر باشکاران [۲۰] و بیامون و شن [۲۱] از تکنیک شبیه سازی برای بررسی ابعاد مختلف زنجیره تامین نظیر: چگونگی تاثیر متغیرهای عملیاتی بر عملکرد زنجیره و تقاضا استفاده کردند. در این مقاله ما از شبیه سازی برای مدل سازی شبکه زنجیره تامین با هدف شناسایی و تعیین مقدار بهینه فاکتورهای موثر بر زنجیره که قادرند هزینه را به حداقل برسانند استفاده می کنیم. در این بررسی یک زنجیره سه سطحی شامل ۴ خرده فروش و ۱ تولیدکننده و ۳ تامین کننده در نظر گرفته می شود که در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. یک شبکه زنجیره تامین

در این شکل کاملاً واضح است که هر عضو زنجیره به عضو دیگر وابسته است بطوریکه خروجی هر سطح به عنوان ورودی برای سطح بعد عمل می‌کند. ما نرم افزار ای دی^۱ را برای شبیه سازی کار خود انتخاب کردیم. زنجیره تامین موردنظر سه سطحی و در رابطه با تلویزیون می‌باشد. خرده فروشان در این مدل مقدار تقاضا را برای محصول پیش بینی می‌کنند آنها به دنبال اجرای استراتژی‌های زیر برای رسیدن به اهداف خود هستند:

- ۱- پس از برآورد مقدار تقاضای آینده تصمیمات مربوط به برنامه ریزی و کنترل موجودی اتخاذ می‌شود.
- ۲- بر اساس مقدار موجودی، سفارش جدید برای به تولیدکننده صادر می‌شود.
- ۳- مقدار کالای درخواست شده از تولیدکننده دریافت شده سپس هزینه آنها و خدمات مربوطه ارزیابی می‌شود.

برای سادگی مدل فرض کردیم که تقاضای محصول دارای منحنی S شکل با میانگین ۱۸۰۰ واحد در ماه می‌باشد. از آنجا که تلویزیون دارای چرخه عمر کوتاه می‌باشد مدت اجرای شبیه سازی نیز کوتاه در نظر گرفته شده است (مثلاً ۱۸ ماه). متغیرهای شبکه زنجیره تامین در شبیه

1. ED (Enterprise Dynamics), Version 8.0

سازی در جدول ۱ لیست شده اند. عوامل مؤثر بر عملکرد زنجیره تامین (هزینه های زنجیره تامین) در زیر مورد بررسی قرار می گیرد:

(A) به تاخیر انداختن معرفی محصول جدید:

الدرسون [۲۲] اولین کسی بود که استراتژی به تعویق انداختن معرفی محصول جدید را برای کاهش تاثیرات منفی ناشی از تنوع تقاضای مشتریان در زنجیره تامین ابداع کرد. برای پیروزی در رقابت فشرده امروز و افزایش سطح پاسخگویی به خواسته های مشتریان شرکتها بطور بی سابقه ای به سمت تولید انعطاف پذیر و چابک روی آوردند. این استراتژی از مقدار کالای در جریان ساخت کم کرده و تا زمان رسیدن تقاضای مشتریان آنها را به محصول نهایی تبدیل نمی کند و انرا به تاخیر می اندازد. با این استراتژی می توان فرایند پرهزینه تولید محصول جدید را به تعویق انداخت چراکه تنها موجودی نگهداری شده مربوط به قطعات اصلی و پایه محصولات بوده و به محض رسیدن سفارش عملیاتهای تبدیل این قطعات به محصول نهایی مورد تقاضا انجام می گیرد. با نگهداری موجودی های ارزان تر شرکتها می توانند هزینه های نگهداری موجودی را کاهش دهند. این استراتژی برای به حداقل رساندن هزینه های ناشی از تنوع تقاضا برای محصولات جدید بسیار مناسب بوده و از طرفی می تواند خدمات خوبی را برای مشتریان ایجاد کند. [۲۳]

جدول ۱. مقدار فاکتورهای قابل کنترل و غیرقابل کنترل در شبیه سازی

| فاکتورهای قابل کنترل و سطوح آنها | | | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------|----------------------|-----------|
| A | به تاخیر انداختن معرفی محصول جدید | اصلا رخ ندهد | نه بطور کامل (قسمتی) | بطور کامل |
| B | به اشتراک گذاری اطلاعات | اصلا رخ ندهد | نه بطور کامل (قسمتی) | بطور کامل |
| C | ظرفیت تولید در واحد زمان | ۵۰ | ۱۰۰ | ۱۵۰ |
| D | سیاست موجودی خرده فروش | ۲۵ | ۵۰ | ۷۵ |
| E | زمان تحویل | ۶ | ۱۰ | ۱۴ |
| F | قابلیت اطمینان تامین کننده | ۵۰ | ۷۰ | ۹۰ |

(B) به اشتراک گذاری اطلاعات (i):

این استراتژی نقش بسیار مهمی در شبکه زنجیره تامین بازی می کند. هر یک از اعضای شبکه تصمیم خود را بر اساس اطلاعات دریافت شده از عضو پایین دستی خود در زنجیره اتخاذ می کند. برای مقابله با نوسانات زیاد تقاضا، اعضای زنجیره تامین تمایل به نگهداری موجودی اضافی برای جلوگیری از کمبود موجودی دارند چنین اقدامی باعث تشدید اثر شلاق چرمی و افزایش هزینه های موجودی می گردد. به اشتراک گذاری اطلاعات باعث افزایش دید هر عضو زنجیره و در نتیجه مانع تقویت اثر شلاقی و بهبود هزینه ها و افزایش سطح خدمات می گردد و برای کل زنجیره تامین سودمند است. عدم به اشتراک گذاری اطلاعات میان اعضای زنجیره باعث تشدید اثر شلاق چرمی می شود که تاثیر بسیار نامطلوبی بر هزینه های زنجیره تامین می گذارد.

(C) ظرفیت تولید (c):

ظرفیت نشان دهنده توانایی برای برآوردن تقاضای آینده و یا مقدار محصولی است که می تواند در هر دوره تولید شود. برای برنامه ریزی یکپارچه زنجیره نیاز به اشتراک گذاری اطلاعات مربوط به ظرفیت هر یک از اعضای زنجیره داریم [۲۴]. زمانیکه تولیدکننده از ظرفیت هر تامین کننده آگاه باشد می تواند تصمیمات بهتری را درخصوص صرفه جویی در هزینه هایش اتخاذ کند [۲۵].

(D) سفارش مجدد (R):

هر خرده فروش سیاست (S - S) را برای کنترل موجودی اتخاذ می کند در صورتیکه مقدار موجودی کمتر یا مساوی نقطه سفارش (S) باشد خرده فروش سفارشی به اندازه S می دهد این سیاست همچنین به نام سیاست کمینه-بیشینه^۱ نیز نامیده می شود.

(E) زمان تحویل (LT):

زمان تحویل یکی از مهمترین فاکتورهای مؤثر بر عملکرد زنجیره تامین می باشد که می تواند بصورت فاصله زمانی بین سفارش تا دریافت آن تعریف شود. کاهش زمان تحویل، یکی از عناصر مهم در مدیریت زنجیره تامین می باشد. با کاهش زمان تحویل می توانیم بطور همزمان هم سطح موجودی را کنترل کرده و هم استفاده بهتری از ظرفیت در زنجیره داشته باشیم. علاوه بر این اثر شلاقی نیز با کم شدن عدم اطمینان در تقاضا کاهش می یابد. طولانی بودن زمان تحویل، نتیجه به اشتراک گذاری کم اطلاعات می باشد [۲۶]. همچنین طولانی شدن زمان تحویل نقش عمده ای در افزایش اثر شلاقی دارد [۲۷].

(F) قابلیت اطمینان تامین کنندگان:

قابلیت اطمینان تامین کنندگان در زنجیره بصورت در دسترس بودن مواد و قطعات با کیفیت در زمان تولید خود را نشان می دهد و بر عملکرد زنجیره تامین تاثیرگذار است. عرضه نامطمئن باعث کاهش کیفیت محصول نهایی و افزایش تغییرات تقاضا می گردد. رویکرد شبیه سازی شامل ۳ مرحله اصلی می باشد که در قسمت های بعدی مورد بررسی قرار می گیرد.

۳- تولید تقاضا و سیاست موجودی:

هر خرده فروش تقاضا را با استفاده از مدل باس^۱ و در نظر گرفتن مقدار واریانس تقاضا برآورد می کند. فرض می شود تقاضای پیش بینی شده بیشتر از تقاضای واقعی باشد بنابراین امکان ایجاد تقاضای منفی (کمبود تقاضا) ناچیز خواهد بود. [۲۸] تقاضا برای تمام خرده فروشان برای یک دوره ۱۸ ماهه در نظر گرفته شده و ظرفیت تولید نیز مطابق مقدار تقاضا برنامه ریزی شده است. فرض کنید ظرفیت ماهیانه تولیدکننده $C =$ باشد و خرده فروشان سیاست (S, S) را برای کنترل سطح موجودی خود بکار می برند. بر اساس سیاست کمیته-بیشینه هر هفته اگر موجودی کمتر از S شود خرده فروشان سفارش گذاری جدیدی را برای حفظ موجودی در سطح S انجام می دهند. این سطح از موجودی با تعیین مقدار موجودی مورد نیاز در فاصله

1. Bass

زمانی سفارش گذاری تا دریافت سفارش بعلاوه مقدار ذخیره اطمینان موجودی برای پاسخگویی به تغییرات تقاضا، تعیین می شود. رابطه ریاضی S بصورت زیر تعریف می شود:

$$S = \mu(T + LT) + \theta\sigma\sqrt{T + LT} \quad (1)$$

μ = مقدار تقاضای پیش بینی شده دوره ای که می تواند بوسیله مدل Bass

پیش بینی شود.

T = فاصله زمانی بین سفارشات که در این مدل ۱ هفته می باشد.

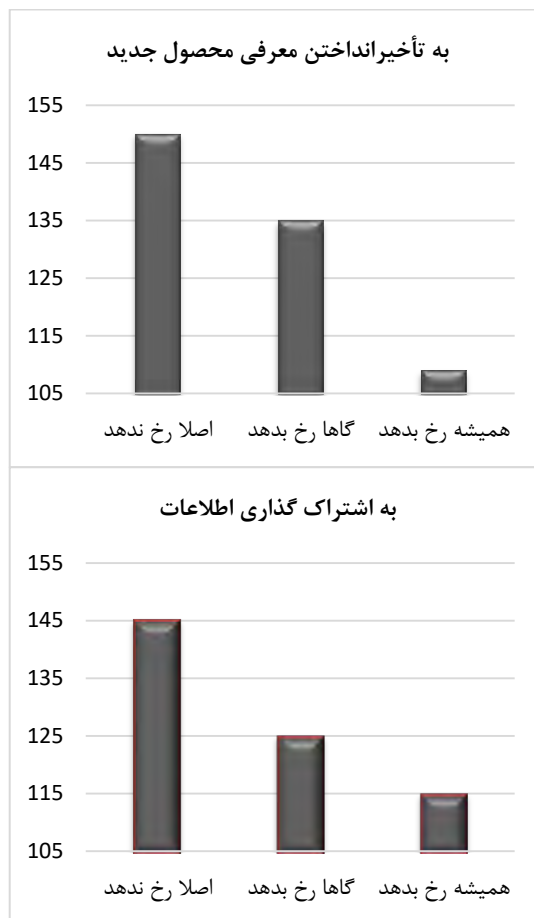
LT = زمان تحویل (Lead Time) که مقدار زمان تولید مورد نیاز است در

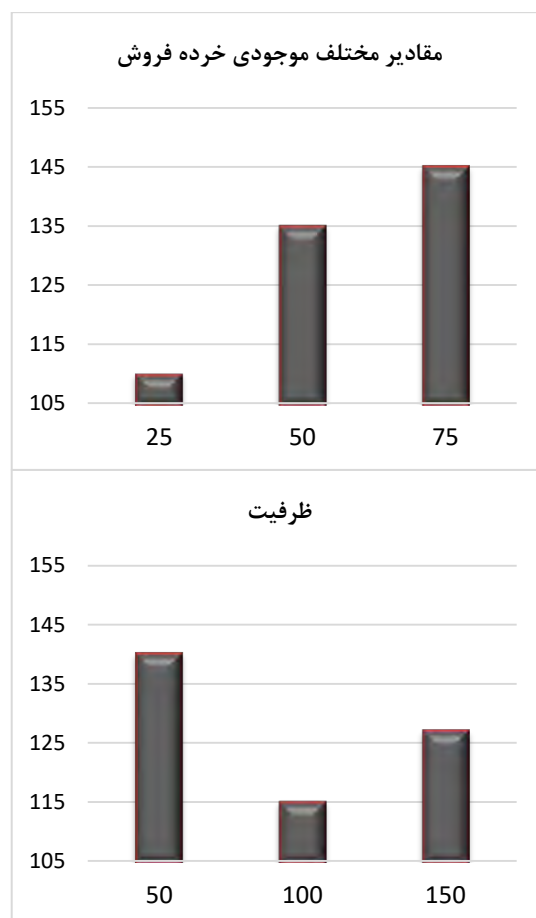
حالتیکه اطلاعات به اشتراک گذاشته نشده و هیچ تنوع و نوآوری برای محصولات در نظر گرفته نشده است.

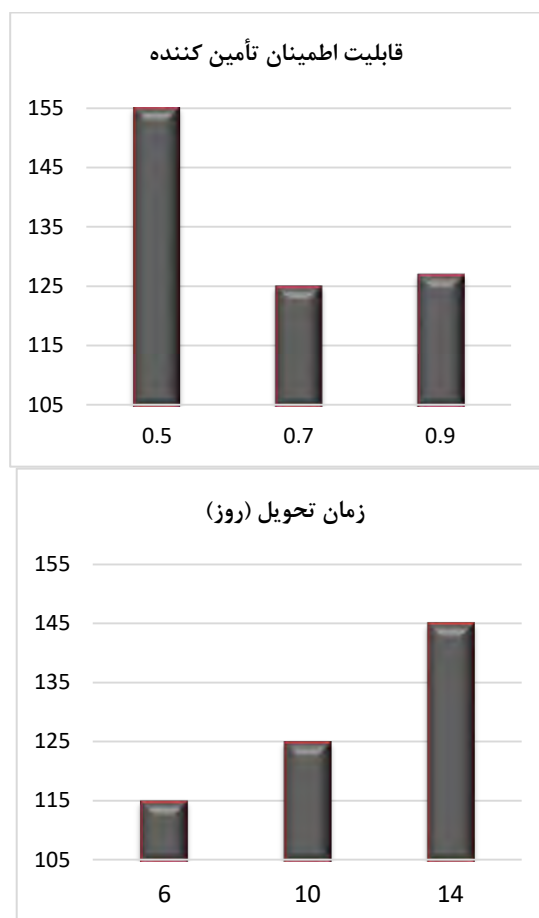
θ = انحراف استاندارد مرتبط با سطح خدمت مورد نظر که در این مدل شبیه

سازی سطح خدمت ۹۷٫۵٪ در نظر گرفته شده است.

σ = انحراف استاندارد تقاضا در هر دوره زمانی







شکل ۲. هزینه کل متغیرهای قابل کنترل

با توجه به الگوی S شکل تقاضا و سیاست (S,s) اتخاذ شده برای موجودی، نقطه سفارش را برای هر دوره تعیین می‌کنیم. پارامترهای مدل Bass بوسیله مقدار فروش دوره‌های قبل محصولات مشابه در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. پارامترهای ω و ν و K در مدل با استفاده از الگوریتم حداقل سازی مجموع مربعات خطا تعیین می‌شوند. لازم به ذکر است برای یک محصول جدید بدون هیچ آماری از فروش گذشته آن، مقدار تقاضا را می‌توان بر اساس محصولات مشابه که قدیمی تر هستند تخمین زد و برآورد کرد.

جدول ۲. مقدار برآورد شده برای ω, ν, K

| ماه T | تقاضای تلویزیون d_t | تقاضای تجمعی $D(t)$ | مقدار پیش بینی شده $F(t)$ | مربع خطا $d_t - f_t$ |
|--------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | |
| ۱ | ۶۹ | ۶۹ | ۶۳,۵۹ | ۲۹,۲۶ |
| ۲ | ۷۱ | ۱۴۰ | ۷۳,۶۵ | ۷,۰۴ |
| ۳ | ۸۲ | ۲۲۲ | ۸۲,۹۷ | ۰,۹۴ |
| ۴ | ۸۷ | ۳۰۹ | ۹۲,۴۱ | ۲۹,۳۱ |
| ۵ | ۹۶ | ۴۰۵ | ۱۰۰,۹ | ۲۳,۹۸ |
| ۶ | ۱۱۰ | ۵۱۵ | ۱۰۸,۴۲ | ۲,۵ |
| ۷ | ۱۱۶ | ۶۳۱ | ۱۱۴,۶۷ | ۱,۷۸ |
| ۸ | ۱۳۲ | ۷۶۳ | ۱۱۸,۵۱ | ۱۸۱,۹۵ |
| ۹ | ۱۱۵ | ۸۷۸ | ۱۱۹,۴۶ | ۱۹,۹ |
| ۱۰ | ۱۲۳ | ۱۰۰۱ | ۱۱۷,۳۲ | ۳۲,۳۱ |
| ۱۱ | ۱۰۴ | ۱۱۰۵ | ۱۱۱,۹۶ | ۶۳,۳۵ |
| ۱۲ | ۱۰۰ | ۱۲۰۵ | ۱۰۴,۹۶ | ۲۴,۵۹ |
| ۱۳ | ۹۷ | ۱۳۰۲ | ۹۶,۰۹ | ۰,۸۲ |
| ۱۴ | ۷۲ | ۱۳۹۴ | ۸۵,۴۹ | ۴۲,۳۳ |
| ۱۵ | ۷۴ | ۱۴۶۸ | ۷۳,۶۲ | ۰,۱۴ |
| ۱۶ | ۵۷ | ۱۵۲۵ | ۶۲,۷۹ | ۳۳,۴۹ |
| ۱۷ | ۴۹ | ۱۵۷۴ | ۵۳,۶۶ | ۲۱,۷۱ |
| ۱۸ | ۴۵ | ۱۶۱۹ | ۴۵,۲۷ | ۰,۰۷ |
| ۱۹ | ۴۲ | ۱۶۶۱ | ۳۷,۱۲ | ۲۳,۴۷ |
| مجموع | ۱۶۹۲ | | ۱۶۹۲ | ۵۴۲,۷۳ |
| برآورد | | ω | ν | K |
| | | ۰,۰۳۵ | ۰,۱۸۸ | ۱۸۰۰,۳۲ |

تصمیم گیری در خصوص تولید و تحویل

تولیدکننده روش اندازه بسته^۱ را برای برنامه ریزی فعالیتهای تولید بکار می گیرد [۲۹]. به منظور تولید متناسب با مقدار تقاضا و کاهش کالاهای در جریان ساخت، تولیدکننده باید تمام تلاش خود را در راستای کاهش اثر شلاقی بکار گیرد [۲۷] با بررسی بیشتر زنجیره تامین به روشنی درمی یابیم که خرده فروشان و نیز تولیدکننده برای برنامه ریزی تولید خود نیاز به اشتراک گذاری اطلاعات بیشتری دارند. اگر اطلاعات به اشتراک گذاشته نشود تامین کنندگان تنها سفارشی که تولیدکننده به او داده را می داند و نیز تولیدکننده هم تنها اطلاعات سفارش را از خرده فروشان دریافت می کند. تولیدکننده تولید خود را بر اساس پیش بینی برنامه ریزی می کند بر اساس اطلاعات به اشتراک گذاشته شده تولیدکننده سیاست های تولید خود را بر اساس پیش بینی های ارائه شده برنامه ریزی کرده و تولیدش را بر اساس تقاضای آینده خرده فروشان تنظیم می کند. هرگاه تقاضایی بوجود می آید تولیدکننده مقدار تولید خود را بر اساس آن تنظیم می کند که این همان ویژگی های سیستم تولید کششی می باشد. اگر موجودی در دسترس کافی نباشد خرده فروش به مقدار سفارش خود و سفارش عقب افتاده کالا دریافت خواهد کرد حمل و نقل کالاها نیز در طول مدت زمان تحویل انجام می گیرند.

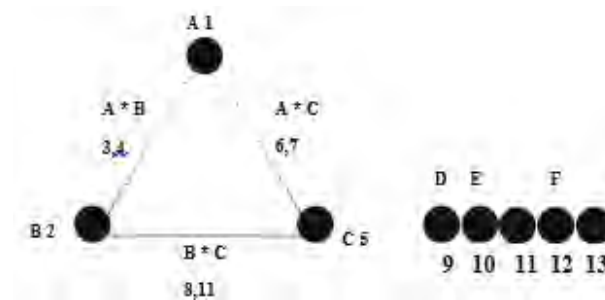
اجرای مدل شبیه سازی و اندازه گیری عملکرد

تلوژیون های تولید شده دارای دوره عمر کوتاهی هستند بنابراین ما رفتار سیستم را در تمام دوره عمر محصول بررسی می کنیم. این شبیه سازی در لحظه $t=0$ شروع شده تا $t=18$ ماه پایان می یابد. همچنین ۱۲۰۰ تکرار جهت رسیدن به یک برآورد خوب انجام می گیرد. هدف ما در این تحقیق به حداقل رساندن هزینه ها با تعیین مقدار بهینه پارامترهای مؤثر بر عملکرد زنجیره تامین می باشد. هزینه کل زنجیره تامین شامل هزینه حمل و نقل، هزینه سفارش دهی، هزینه راه اندازی و هزینه سفارش عقب افتاده می باشد. رابطه میان فاکتورهای مؤثر و هزینه کل زنجیره در شکل ۲ نشان داده شده است.

1. Lot Sizing

طراحی پارامتر - روش تاگوچی

بررسی طراحی پارامترها یک تکنیک کارآمد برای بهینه سازی می باشد ولی مستلزم صرف زمان زیادی است. از طرف دیگر ممکن است آزمایشات به دلیل هزینه زیاد ناگهان متوقف شوند. اگر بخواهیم ۶ پارامتر طراحی را در ۳ سطح بررسی کنیم نیاز به انجام 3^6 آزمایش داریم که بسیار زمانبر و پرهزینه می باشد. رویکرد تاگوچی وسیله بسیار مناسب و مؤثری برای تعیین مقدار بهینه پارامترها با استفاده از ارایه متعامد و گراف های خطی می باشد. ما $L_{27}(3^6)$ طراحی را برای فاکتورهای قابل کنترل انتخاب کردیم. با استفاده از L_{27} ارایه ۱۳ پارامتر را می توان در ۳ سطح با انجام تنها ۲۷ آزمایش به جای 3^6 آزمایش انجام داد. گراف خطی مدل در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. گراف خطی برای $L_{27}(3^{13})$ ارایه متعامد

در گراف خطی برای $L_{27}(3^{13})$ هر دایره نشان دهنده یک ستون از ارایه ها می باشد. ستون ۱ و ۲ نشان دهنده فاکتورهای A، B و C هستند. ستون ۳ یا ۴، ۶ یا ۷، ۸ یا ۱۱ می توانند تعاملات داخلی بین A، B و C، B، C و A، B، C را نشان می دهند. ستونهای ۹ و ۱۰ و ۱۲ بطور تصادفی برای فاکتورهای باقی مانده D، E و F اختصاص می یابند.

نسبت S/N (سیگنال به نویز)

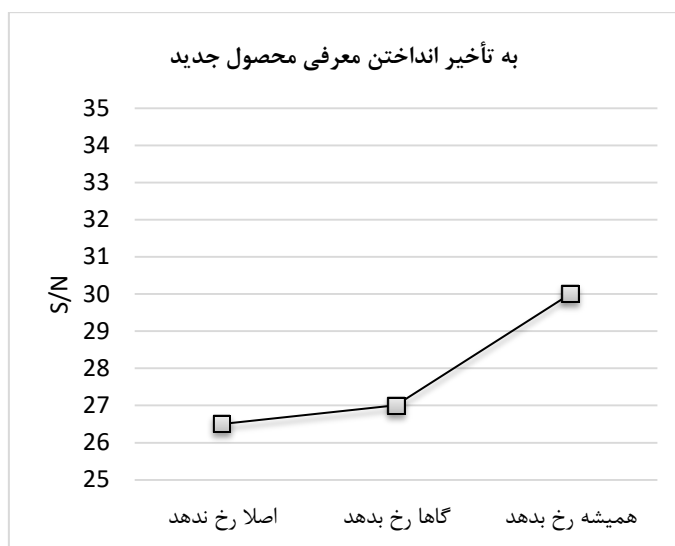
نسبت S/N قدرت نتایج بدست آمده از مدل تاگوچی را اندازه گیری می کند و میزان تغییر پذیری را اندازه گیری می کند و این نسبت نشان دهنده میزان تاثیر اجزای نامطلوب است [۱۸]. نسبت S/N برای هزینه های زنجیره تامین و همه توابع هر چه کمتر بهتر بصورت زیر تعریف می شود:

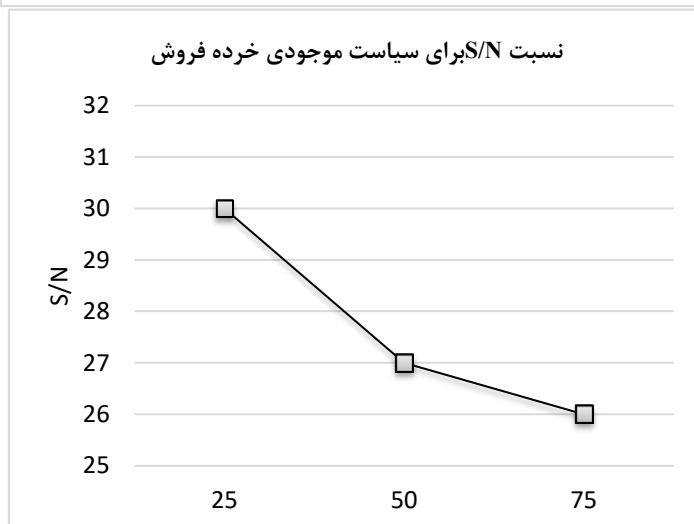
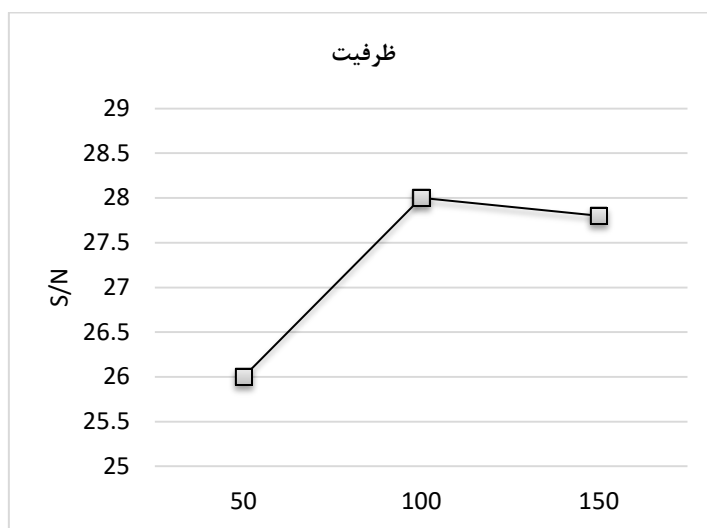
$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} |S_0| \quad (1)$$

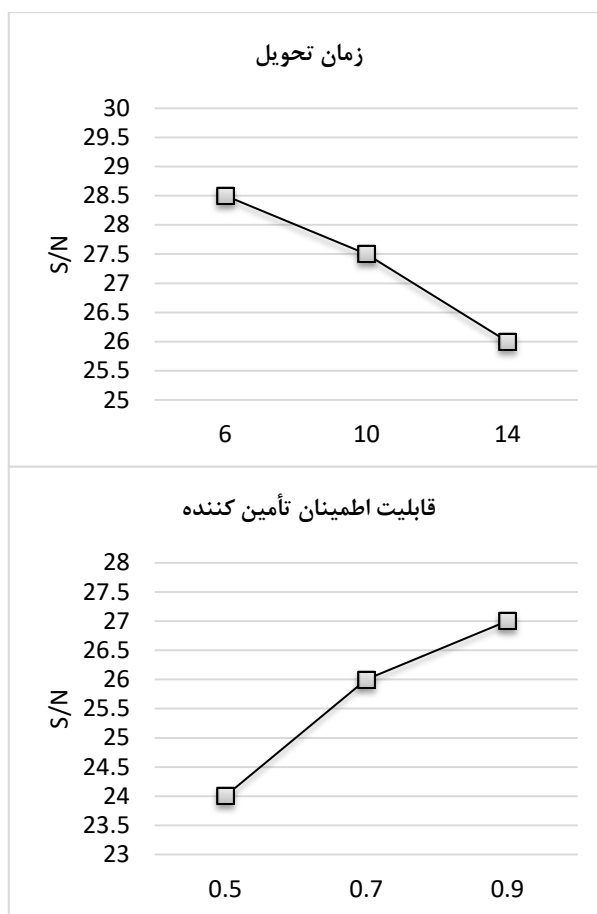
در صورتیکه:

$$S_0 = 1/n \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad \begin{array}{l} \text{تعداد تکرار} = n \\ \text{امین عملکرد} \quad \hat{i} = y_i \end{array} \quad (2)$$

نسبت S/N برای نتایج بدست آمده از روش تاگوچی در شکل ۴ آمده است.







شکل ۴. نمودارهای نسبت S/N از نتایج روش تاگوچی

در نتیجه مقدار بهینه هر فاکتور بصورت زیر بدست می آید :

فاکتور A (به تاخیر انداختن معرفی محصول جدید) = بطور کامل

فاکتور B (به اشتراک گذاری اطلاعات) = بطور کامل

فاکتور C (ظرفیت تولید ماهیانه) = ۱۰۰

فاکتور D (مقدار سفارش مجدد) = ۲۵

فاکتور E (Lead Time) = ۶ روز

فاکتور F (قابلیت اطمینان تامین کنندگان) = ۹۰٪

روش تاگوچی در مسائل بهینه سازی دارای یک محدودیت است و آن اینست که مقدار فاکتورها یک مقدار احتیاطی فرض می شود و نمی توان آنها را زمانیکه پیوسته تغییر می کنند تعیین کرد. بنابراین ما تنها ۲ فاکتور کیفی : به تاخیر انداختن معرفی محصول جدید و به اشتراک گذاری اطلاعات را با رویکرد تاگوچی بهینه می کنیم و مقدار بهینه چهار فاکتور دیگر از طریق تجزیه و تحلیل رگرسیون مشخص می شود.

۵- مدلسازی ریاضی شبکه زنجیره تامین با استفاده از تجزیه و تحلیل رگرسیون همانطوریکه قبلا اشاره شد یکی از اهداف ما طراحی شبکه ای است که بتواند در برابر اختلالات پایدار باشد برای رسیدن به این هدف مقدار اولیه فاکتورها را بوسیله روش تاگوچی تعیین می کنیم. بنابراین فرایند جستجوی مقادیر بهینه متغیرها را از نقاط زیر شروع می کنیم:

$$(x1) \text{ ظرفیت تولید} = 100$$

$$(x2) \text{ مقدار سفارش مجدد} = 25$$

$$(x3) \text{ زمان تحویل} = 6$$

$$(x4) \text{ قابلیت اطمینان تامین کننده} = 90\%$$

ازمایشات انجام شده در جدول ۳ لیست شده اند. لازم به ذکر است در جدول زیر منظور از a, b, c, d مقادیر اولیه فاکتورهای مربوطه می باشد .

جدول ۳. هزینه‌های کل زنجیره با در نظر گرفتن مقادیر مختلف فاکتورها

| ازمایش | فاکتورها | | | | هزینه کل زنجیره تامین |
|--------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| | X ₁ 100 ^a | X ₂ 25 ^b | X ₃ 6 ^c | X ₄ 90 ^d | |
| ۱ | ۹۸,۳ | ۲۵,۸۵ | ۶,۴۳ | ۸۹,۴ | ۲۰۳ |
| ۲ | ۹۶,۶ | ۲۶,۷ | ۶,۸۶ | ۸۸,۸ | ۱۷۶ |
| ۳ | ۹۴,۹ | ۲۷,۵۵ | ۷,۲۹ | ۸۸,۲ | ۱۶۲ |
| ۴ | ۹۳,۲ | ۲۸,۴ | ۷,۷۲ | ۸۷,۶ | ۱۴۸ |
| ۵ | ۹۱,۵ | ۲۹,۲۵ | ۸,۱۵ | ۸۷ | ۱۴۳ |
| ۶ | ۸۹,۸ | ۳۰,۱ | ۸,۵۸ | ۸۶,۴ | ۱۳۸ |
| ۷ | ۸۸,۸ | ۳۰,۹۵ | ۹,۰۱ | ۸۵,۸ | ۱۲۷ |
| ۸ | ۸۶,۴ | ۳۱,۸ | ۹,۴۴ | ۸۵,۲ | ۱۲۵ |
| ۹ | ۸۴,۷ | ۳۲,۶۵ | ۹,۸۷ | ۸۴,۶ | ۱۲۹ |
| ۱۰ | ۸۳ | ۳۳,۵ | ۱۰,۳ | ۸۴ | ۱۳۰ |
| ۱۱ | ۸۱,۳ | ۳۴,۳۵ | ۱۰,۷۳ | ۸۳,۴ | ۱۳۴ |
| ۱۲ | ۷۹,۶ | ۳۵,۲ | ۱۱,۱۶ | ۸۲,۸ | ۱۳۶ |
| ۱۳ | ۷۷,۹ | ۳۶,۰۵ | ۱۱,۵۹ | ۸۲,۲ | ۱۴۳ |
| ۱۴ | ۷۶,۲ | ۳۶,۹ | ۱۲,۰۲ | ۸۱,۶ | ۱۵۰ |
| ۱۵ | ۷۴,۵ | ۳۷,۷۵ | ۱۲,۴۵ | ۸۱ | ۱۵۷ |
| ۱۶ | ۷۲,۸ | ۳۸,۶ | ۱۲,۸۸ | ۸۰,۴ | ۱۶۳ |
| ۱۷ | ۷۱,۱ | ۳۹,۴۵ | ۱۳,۳۱ | ۷۹,۸ | ۱۶۷ |
| ۱۸ | ۶۹,۴ | ۴۰,۳ | ۱۳,۷۴ | ۷۹,۲ | ۱۷۵ |
| ۱۹ | ۶۷,۱ | ۴۱,۱۵ | ۱۴,۱۷ | ۷۸,۶ | ۱۹۸ |
| ۲۰ | ۶۶ | ۴۲ | ۱۴,۶ | ۷۸ | ۲۰۵ |

برای ساده شدن کار متغیرهای مستقل در یک بازه زمانی (۱- و ۱) بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$x_i = \frac{\text{actual value of } i^{\text{th}} \text{ factor} - \chi_i}{\gamma_i} \quad (۳)$$

$$\chi_i = \frac{(\text{Upper bound})_i + (\text{Lower bound})_i}{2}$$

$$\gamma_i = \frac{(\text{Upper bound})_i - (\text{Lower bound})_i}{2}$$

حد بالا و حد پایین پارامترها بصورت زیر تعریف می شوند :

$$\text{ظرفیت} = [65, 100]$$

$$\text{مقدار سفارش مجدد} = [25, 43]$$

$$\text{زمان تحویل} = [6, 15]$$

$$\text{قابلیت اطمینان} = [77, 99]$$

با استفاده از معادلات (۳) متغیرهای شبکه می توانند بصورت زیر تعریف شوند :

$$x_1 = \left(\frac{\text{capacity} - 82.5}{17.5} \right) \quad (۴)$$

$$x_2 = \left(\frac{\text{Reorder quantity} - 34}{9} \right)$$

$$x_3 = \left(\frac{\text{Lead time} - 10.5}{4.5} \right)$$

$$x_4 = \left(\frac{\text{Supplier reliability} - 88}{11} \right)$$

مقدار متغیرها در جدول ۴ آمده است :

جدول ۴. مقادیر فاکتورها

| ردیف | فاکتورها | | | |
|------|----------|--------|--------|--------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
| ۱ | ۰,۹۰۳ | ۰,۹۰۶- | ۰,۹۰۴- | ۰,۱۲۷ |
| ۲ | ۰,۰۲۹ | ۰,۸۱۱- | ۰,۸۰۹- | ۰,۰۷۳ |
| ۳ | ۰,۰۵۶ | ۰,۷۱۷- | ۰,۷۱۳- | ۰,۰۱۸ |
| ۴ | ۰,۰۴۴ | ۰,۶۲۲- | ۰,۶۱۸- | ۰,۰۳۶- |
| ۵ | ۰,۵۱۴ | ۰,۵۲۸- | ۰,۵۲۲- | ۰,۰۹۱- |
| ۶ | ۰,۴۱۷ | ۰,۴۳۳- | ۰,۴۲۷- | ۰,۱۴۵- |
| ۷ | ۰,۳۶۵ | ۰,۳۳۹- | ۰,۳۳۱- | ۰,۰۲- |
| ۸ | ۰,۲۲۳ | ۰,۲۴۴- | ۰,۲۳۶- | ۰,۲۵۵- |
| ۹ | ۰,۱۲۶ | ۰,۱۵- | ۰,۱۴- | ۰,۳۰۹- |
| ۱۰ | ۰,۰۲۹ | ۰,۰۵۶- | ۰,۰۴۴- | ۰,۳۶۴- |
| ۱۱ | ۰,۰۶۹- | ۰,۰۳۹ | ۰,۰۵۱ | ۰,۴۱۸- |
| ۱۲ | ۰,۱۶۶- | ۰,۱۳۳ | ۰,۱۴۷ | ۰,۴۷۳- |
| ۱۳ | ۰,۲۶۳- | ۰,۲۲۸ | ۰,۲۴۲ | ۰,۵۲۷- |
| ۱۴ | ۰,۳۶۹- | ۰,۳۲۲ | ۰,۳۳۸ | ۰,۵۸۲- |
| ۱۵ | ۰,۴۵۷- | ۰,۴۱۷ | ۰,۴۳۳ | ۰,۶۳۶- |
| ۱۶ | ۰,۵۵۴- | ۰,۵۱۱ | ۰,۵۲۹ | ۰,۶۹۱- |
| ۱۷ | ۰,۶۵۱- | ۰,۶۰۶ | ۰,۶۲۴ | ۰,۷۴۵- |
| ۱۸ | ۰,۷۴۹- | ۰,۷۴۶ | ۰,۷۲۶ | ۰,۸۴۷- |
| ۱۹ | ۰,۸۸۵- | ۰,۷۹۴ | ۰,۸۱۶ | ۰,۸۵۵- |
| ۲۰ | ۰,۹۴۳- | ۰,۸۸۹ | ۰,۹۱۱ | ۰,۹۰۹- |

تجزیه و تحلیل رگرسیون رابطه عملکردی بین متغیرهای مستقل و نتیجه آنها را مشخص می کند. معادله رگرسیون بصورت زیر تعریف می شود:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i + \sum_{i=1}^k \hat{\beta}_i x_i^2 + \sum_{i < j} \hat{\beta}_{ij} x_i x_j \quad (5)$$

با توجه به معادله بالا تابع هدف بصورت زیر تعریف می شود:

$$Y = 121.67 + 1.342x_1 - 1.223x_2 + 4.509x_3 + 1.295x_4 + 0.5583x_1^2 + 3.219x_2^2 + 1.222x_3^2 + 2.719x_4^2 + 0.428x_1x_2 + 2.315x_1x_3 + 0.0261x_1x_4 + 3.183x_2x_3 + 7.271x_2x_4 - 1.172x_3x_4 \quad (6)$$

با حل این معادله بوسیله ابزارهای بهینه سازی مناسب مقدار فاکتورها پیش بینی می شوند.

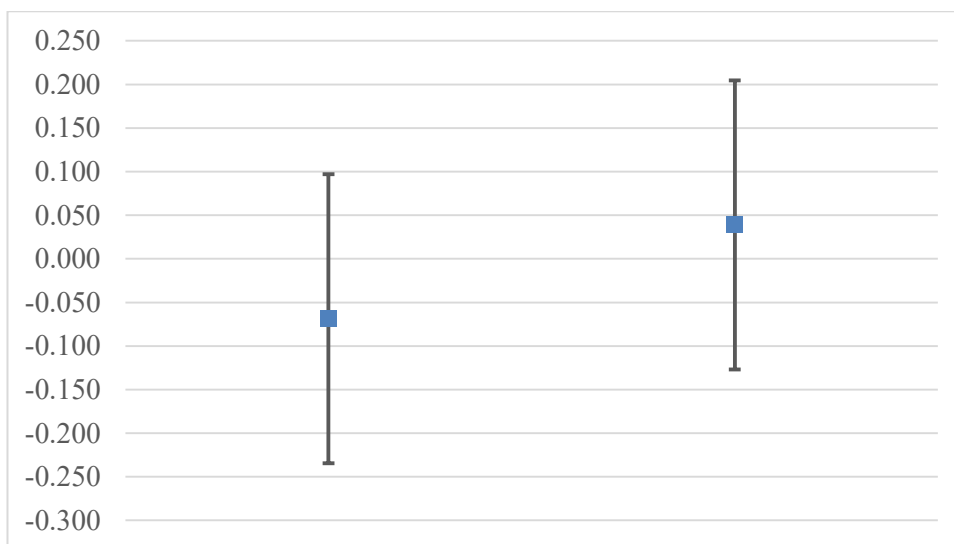
اعتبارسنجی مدل رگرسیون

معمولاً برای بررسی اعتبار متامدل رگرسیون با مدل شبیه سازی، خروجی های این دو مدل را با هم مقایسه می کنند [۳۰].. به منظور اعتبارسنجی مدل رگرسیون ۱۰ بار مدل شبیه سازی با پارامترهای مختلف تصادفی در بازه تعریف شده اجرا می شود. داده های آزمایشات شبیه سازی و نتایج آن در جدول ۵ و شکل ۵ آمده است.

۴ ستون اول مقادیر فاکتورهای شبیه سازی را نشان می دهد ستون پنجم هزینه زنجیره تامین که بوسیله شبیه سازی بدست آمده است ستون ششم هزینه زنجیره تامین که با مدل رگرسیون بدست آمده و ستون هفتم درصد انحراف نتایج مدل رگرسیون و مدل شبیه سازی می باشد. متوسط خطای پیش بینی برابر ۲/۵۰۴ می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که مدل رگرسیون می تواند هزینه ها را با توجه به چهار فاکتور مقدار بهینه ظرفیت، مقدار سفارش مجدد، زمان تحویل و قابلیت اطمینان تامین کننده به خوبی پیش بینی کند.

جدول ۵. اعتبارسنجی مدل رگرسیون زنجیره تامین

| فاکتورها | | | | هزینه زنجیره تامین شبیه سازی شده | هزینه زنجیره تامین با روش رگرسیون | درصد انحراف |
|----------|----------|----------|----------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------|
| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | | | |
| ۰,۰۰۸۵۱۵ | ۰,۸۸۵۴۹- | ۰,۸۰۴۳۷۶ | ۰,۹۶۱۵۵- | ۱۴۲ | ۱۳۵,۸۱۷۳ | ۴,۳۵ |
| ۰,۴۴۳۷۷ | ۰,۸۴۹۳۶۱ | ۰,۰۶۴۲۴- | ۰,۲۶۵۹۰۸ | ۱۲۲ | ۱۲۵,۴۹۷۸ | ۲,۸۶ |
| ۰,۰۱۰۰۴۱ | ۰,۹۳۴۶۳- | ۰,۵۶۲۰۵۹ | ۰,۵۰۴۹۹ | ۱۲۹ | ۱۲۴,۴۷۸۹ | ۳,۵۱ |
| ۰,۸۸۴۸۲- | ۰,۲۴۴۷۳- | ۰,۰۵۸۲۶ | ۰,۵۷۲۶۱۹ | ۱۲۲ | ۱۲۲,۱۶۸۴ | ۰,۱۴ |
| ۰,۹۰۳۹۲۸ | ۰,۹۱۸۷- | ۰,۳۰۳۶۲۹ | ۰,۷۳۳۶۳- | ۱۳۶ | ۱۳۳,۷۱۱۲ | ۱,۶۸ |
| ۰,۸۵۰۷۰۳ | ۰,۸۳۲۱۵- | ۰,۶۵۳۹۸۱ | ۰,۷۸۶۳۷- | ۱۴۴ | ۱۳۵,۱۹۲۹ | ۴,۰۵ |
| ۰,۵۹۳۹۸- | ۰,۴۷۶۷۳ | ۰,۷۰۸۶۷ | ۰,۳۸۷۱۸۸ | ۱۲۳ | ۱۲۶,۹۳۰۷ | ۳,۱۹ |
| ۰,۰۴۵۴۴۲ | ۰,۶۱۹۳۷۳ | ۰,۷۹۷۶۰۱ | ۰,۴۷۲۳۳۵ | ۱۳۲ | ۱۳۱,۱۵۶۲ | ۰,۶۴ |
| ۰,۱۵۶۷۱- | ۰,۸۲۴۳۹۶ | ۰,۵۴۷۲۸۸ | ۰,۶۴۸۶۷۱ | ۱۳ | ۱۳۲,۱۲۲۵ | ۱,۶۳ |
| ۰,۱۳۶۳۸۷ | ۰,۵۵۸۰۹- | ۰,۹۹۶۸۸۷ | ۰,۰۱۴۳۷۴ | ۱۲۴ | ۱۲۷,۷۱۳۳ | ۲,۹۹ |



شکل ۵. مقایسه نتایج بدست آمده از طریق شبیه سازی و رگرسیون

بهینه سازی با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی

الگوریتم جستجوی هارمونی یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر عملکرد سازهای موسیقی است که اولین بار توسط جیم و همکاران [۱۸] معرفی شد. این الگوریتم با مفهومی ساده و تعداد پارامترهای کم و اسان بر مبنای علم امار و ریاضیات است [۱۸]. این الگوریتم از الیات موسیقی الهام گرفته و از بداهه‌سرایی سراینده‌گان تقلید می‌نماید. تابع هدف این الگوریتم تخمین و اندازه گیری هارمونی و اثری است که ان موسیقی در فرد می‌گذارد تا حالت مناسبی از هارمونی در شخص ایجاد شود. لازم به ذکر است که این الگوریتم فرایند بداهه‌سرایی کیفی را به فرایند بهینه‌سازی کمی تبدیل می‌کند. هنگامی که یک سراینده یک الت موسیقی را می‌نوازد با سه حالت روبرو است: (۱) نواختن براساس حافظه‌اش؛ (۲) نواختن براساس تنظیم کوک و (۳) نواختن تصادفی. این سه حالت در واقع سه عملگر کیفی مد نظر این الگوریتم می‌باشد که به ترتیب عملگر حافظه هارمونی (HM)، تنظیم کوک و نواختن تصادفی است. در حقیقت، فرایند بداهه‌سرایی این الگوریتم ترکیب این سه عملگر می‌باشد. شبه کد الگوریتم این الگوریتم و نحوه کار ان در شکل ۶ آورده شده است.

پارامترهای مساله را تنظیم کنید.
 مجموعه هارمونی یا حافظه هارمونی را تنظیم کنید.
 تا رسیدن به شماره تکرار N-Iteration قدم‌های زیر را انجام دهید (for i=1: n iteration).
 Pr=population
 حلقه داخلی: تا رسیدن به شماره تکرارهای Pop.size
 قدم‌های زیر را انجام دهید (for j=1: Pop.size)
 عددی تصادفی تولید کنید $\epsilon \text{ Rand } [0,1]$
 اگر $\text{Rand} < \text{HMCR}$
 هارمونی تصادفی انتخاب کنید: H
 عددی تصادفی تولید کنید $\epsilon \text{ Rand } [0,1]$
 حال اگر $\text{Rand} < P_{pa}$
 هارمونی H را کوک نمایید:
 وگرنه هارمونی بدون تغییر بماند.
 پایان شرط
 وگرنه
 هارمونی جدیدی را بداهه نوازی نمایید: H
 پایان شرط
 مجموعه جواب هارمونی یا حافظه هارمونی را بروز کن
 پایان حلقه داخلی
 $Q_t = \text{new population}$
 $R_t = P_t \cup Q_t$
 جمعیت نسل بعد P_{t+1} را تشکیل دهید.
 پایان حلقه بیرونی

شکل ۶. شبه کد الگوریتم HS

بردار هارمونی و فرایند رمز گشایی

تولید بردار هارمونی اولین گام در الگوریتم است. این بردار نشان دهنده یک جواب برای مسئله مورد نظر می باشد. با توجه به اینکه متغیرهای تصمیم به شکل کد شده و در بازه (۱، -۱) هستند به منظور تولید جواب های تصادفی به شکل موجه، تمامی اعداد تصادفی در بازه مورد نظر تولید می شوند. شکل ۷ یک بردار هارمونی تصادفی را نشان می دهد که در آن سطوح چهارعامل طور تصادفی انتخاب شده اند.

| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
|---------|---------|----------|---------|
| ۰,۰۶۵۴۶ | ۰,۹۶۸۵۵ | -۰,۵۲۴۷۱ | ۰,۱۵۲۳۶ |

شکل ۷. یک نمونه از بردار هارمونی

فرایند بداهه سرایی

به منظور اجرای فرایند بداهه سرایی در تکرارهای مختلف الگوریتم، یک عدد تصادفی تولید شده و سپس یک یا دو عملگر این الگوریتم جهت اجرای فرایند بداهه سرایی مورد استفاده قرار می گیرند. تشریح عملگرهای این الگوریتم در سه بخش زیر تشریح شده و روابط ۷، ۸ و ۹ احتمال استفاده شدن هر یک از عملگرها را نشان می دهد.

نرخ مراجعه به HM

استفاده از این عملگر در الگوریتم جستجوی هارمونی مشابه بحث نخبه گرایی در الگوریتم ژنتیک است. در واقع این عملگر تضمین می کند که بهترین هارمونی ها در طی فرایند بهینه سازی از حافظه پاک نخواهند شد. این عملگر با نرخ λ به نام نرخ ملاحظه حافظه هارمونی^۱ کنترل می شود. مقادیر کوچک این نرخ باعث کندی همگرایی الگوریتم خواهد شد. علت نیز وجود تعداد کمی هارمونی در فرایند بداهه سرایی است. از طرفی دیگر، مقادیر بالای این نرخ باعث می شود که تنها هارمونی های HM انتخاب شده و مورد استفاده قرار گیرند و لذا

1. HMCR

الگوریتم در بهینه‌های محلی مستقر خواهد شد. بدین منظور جیم و همکاران [۱۸] پیشنهاد دادند که مقدار این نرخ در بازه $[0.75-0.95]$ تنظیم شود.

عملگر تنظیم کوک

در دنیای موسیقی، تنظیم کوک به معنای تغییر ساختار فرکانس‌ها می‌باشد که معادل تولید جواب‌های همسایه در فرایند بهینه‌سازی است. در واقع فضایی از جواب که توسط عملگرهای دیگر یافت نمی‌شود، کشف و مورد جستجو قرار می‌گیرد. این عملگر از نرخ به نام نرخ تنظیم کوک (r_{pa}) بهره‌جسته تا تنظیمات را کنترل نماید. کارکرد این عملگر، مشابه عملگر جهش در الگوریتم ژنتیک است. بنابراین مقادیر بالای عملگر تنظیم کوک، تنوع گرایی را افزایش خواهد داد. افزایش این نرخ باعث این می‌شود که الگوریتم مانند یک روش جستجوی تصادفی عمل نماید. بدین منظور جیم و همکاران پیشنهاد دادند که نرخ r_{pa} در بازه $[0.1-0.5]$ تنظیم شود. همان‌طور که در بالا اشاره شد احتمال بهره‌جستن از این عملگر در رابطه ۸ نشان داده شده است. به منظور تنظیم کوک در این قسمت، از اپراتور جابجایی دوتایی استفاده می‌شود. در این عملگر، همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است دو سلول به تصادف انتخاب شده و مقادیر آنها با هم جابجا می‌شوند.

| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
|---------|---------|----------|---------|
| ۰,۰۶۵۴۶ | ۰,۹۶۸۵۵ | -۰,۵۲۴۷۱ | ۰,۱۵۲۳۶ |

| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
|---------|----------|---------|---------|
| ۰,۰۶۵۴۶ | -۰,۵۲۴۷۱ | ۰,۹۶۸۵۵ | ۰,۱۵۲۳۶ |

شکل ۸. عملگر تنظیم کوک

عملگر تولید جواب‌های تصادفی

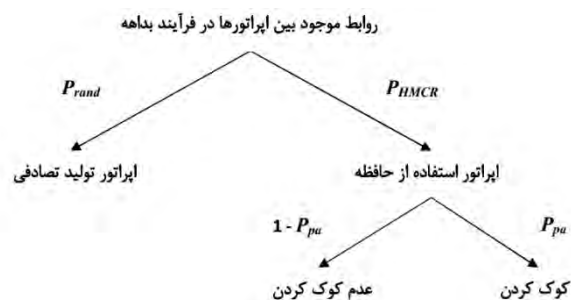
همانطور که از اسم این عملگر مشخص است، جواب‌هایی را به صورت تصادفی تولید کرده و وارد جمعیت می‌کند. این عملگر در چارچوب الگوریتم جستجوی هارمونی عملگر تصادفی سرایی نامیده می‌شود. احتمال تصادفی سرایی نیز از رابطه ۸ قابل محاسبه است.

$$P_{HMCR} = HMCR \quad (۷)$$

$$P_{pa} = HMCR * r_{pa} \quad (۸)$$

$$P_{rand} = 1 - HMCR \quad (۹)$$

در انتها رابطه بین مقادیر احتمالی مختلف در این الگوریتم و در واقع مدل سازی تمامی حالاتی که در تکرارهای مختلف الگوریتم رخ می‌دهد، در شکل ۹ به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۹. روابط احتمالاتی موجود بین اپراتورها در الگوریتم جستجوی هارمونی

الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک روشی جهت بهینه‌سازی است که با الهام از اصل بقای شایسته‌ترین در موجودات زنده عمل می‌کند. در هر چرخه تکاملی دو راه حل کاندید به عنوان والدین انتخاب می‌شوند که برای تولید راه حل فرزندی با هم ادغام می‌گردند. انگاه فرزند با احتمال خاصی جهش می‌یابد و یک جواب جدید به وجود می‌آورد. در نهایت فرزندان و والدین با هم

ترکیب شده و یک جمعیت جدید را برای چرخه تکامل بعدی تشکیل می‌دهند. این فرایند انقدر تکرار می‌شود تا شرط خاتمه برآورده شود. عملگرهای ژنتیکی مورد استفاده در ادامه به طور خلاصه توضیح داده می‌شوند.

ساختار کروموزوم

یکی از اولین و اصلی ترین قدمها در برنامه نویسی الگوریتم ژنتیک انتخاب شیوه مناسب کدگذاری متغیرهای تصمیم مسئله است که به ان طراحی کروموزوم می‌گویند هر کروموزوم نشان دهنده یک راه حل یا جواب می‌باشد. در این تحقیق نحوه تولید کروموزوم مانند نحوه تولید تولید بردار هارمونی در الگوریتم جستجوی هارمونی می‌باشد.

عملگر تقاطع

عملکرد اصلی جهت تولید کروموزوم‌های جدید در الگوریتم ژنتیک ، عملگر تقاطع می‌باشد. یکی از نقاط قابل توجه، استفاده از یک عملگر مناسب است که جواب را از حالت موجه خارج نکند. عملگر تقاطع مورد استفاده در این تحقیق به این صورت است که کروموزوم‌های والد با عملگر جمع به هم ترکیب شده و یک کروموزوم جدید را می‌سازند. سپس تمامی اعضای این کروموزوم جدید تقسیم بر عدد ۲ شده و کروموزوم فرزند را ایجاد می‌کنند (شکل ۱۰).

| والد اول | | | |
|----------|--------|---------|--------|
| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
| ۰,۰۶۵۵ | ۰,۹۶۸۶ | -۰,۵۲۴۷ | ۰,۱۵۲۴ |
| والد دوم | | | |
| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
| ۰,۱۵۶۱ | ۱,۰۸۷۳ | -۰,۴۵۴۶ | ۰,۳۱۷۵ |
| فرزند | | | |
| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
| ۰,۱۱۰۸ | ۱,۰۲۷۹ | -۰,۴۸۹۷ | ۰,۲۳۴۹ |

شکل ۱۰. عملگر تقاطع یکنواخت

عملگر جهش

مهمترین وظیفه عملگر جهش اجتناب از همگرایی و بهینه محلی و جستجو در فضاهای دست نخورده مساله است. جهش یک کروموزوم به معنای تغییر ژنهای آن است و وابسته به نوع کدگذاری، روشهای مختلفی دارد. برای اعمال جهش بر روی کروموزومها، یکی از ژنها انتخاب شده و با مقدار دیگری که به صورت تصادفی و موجه تولید شده، جایگزین می گردد. (شکل ۱۱).

| والد | | | |
|--------|--------|---------|--------|
| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
| ۰,۰۶۵۵ | ۰,۹۶۸۶ | -۰,۵۲۴۷ | ۰,۱۵۲۴ |

| فرزند جهش یافته | | | |
|-----------------|--------|---------|--------|
| x_1 | x_2 | x_3 | x_4 |
| ۰,۰۶۵۵ | ۰,۳۲۵۶ | -۰,۵۲۴۷ | ۰,۱۵۲۴ |

شکل ۱۱. چگونگی عملگر جهش

الگوریتم اجتماع ذرات (PSO)

این الگوریتم که از نوع الگوریتم‌های تکاملی می‌باشد و بر گرفته شده از رفتار ذرات هجومی همچون دسته پرندگان می‌باشد به این گونه که در حرکت یک دسته از پرندگان یک پرنده (سرگروه) دارای بهترین موقعیت می‌باشد و بقیه پرندگان با توجه به موقعیت خود و پرندگان مجاور سعی در بهتر کردن مکان و نزدیک شدن به سرگروه را دارند. در این حین چنانچه یکی از اعضا توانست موقعیت بهتری نسبت به سرگروه پیدا کند او به عنوان سرگروه انتخاب می‌شود. عملکرد یک الگوریتم PSO نیز به این گونه است، به این صورت که دسته‌ای از ذرات (به عنوان متغیرهای مسئله بهینه‌سازی) در محیط جستجو پخش می‌شوند. واضح است که بعضی از ذرات، موقعیت بهتری نسبت به ذرات دیگر خواهند داشت. در نتیجه بر طبق رفتار ذرات هجومی بقیه ذرات سعی می‌کنند موقعیت خود را به موقعیت ذرات برتر برسانند؛ در عین حال که موقعیت ذرات برتر نیز در حال تغییر می‌باشد. شایان ذکر است که تغییر موقعیت هر ذره بر اساس تجربه خود ذره در حرکات قبلی و تجربه ذرات همسایه صورت می‌گیرد. در واقع هر ذره از برتری یا عدم برتری خود نسبت به ذرات همسایه و همچنین نسبت به کل گروه آگاه است.

نحوه نمایش ذره

ساختار نمایش جواب در بهینه‌سازی اجتماع ذرات، مشابه نحوه نمایش الگوریتم جستجوی هارمونی پیشنهادی در زیربخش ۵-۱ می‌باشد.

چگونگی رفتار ذره‌ها

در خلال فرایند تکرار، رفتار یک ذره یک سازش در میان سه گزینه ممکن است:

- پیروی از الگوی فعلی جستجوی خود با نرخ W_0
- بازگشت به سوی بهترین موقعیت قبلی خود با نرخ C_1
- رفتن به سمت بهترین مقدار همه ذرات با نرخ C_2

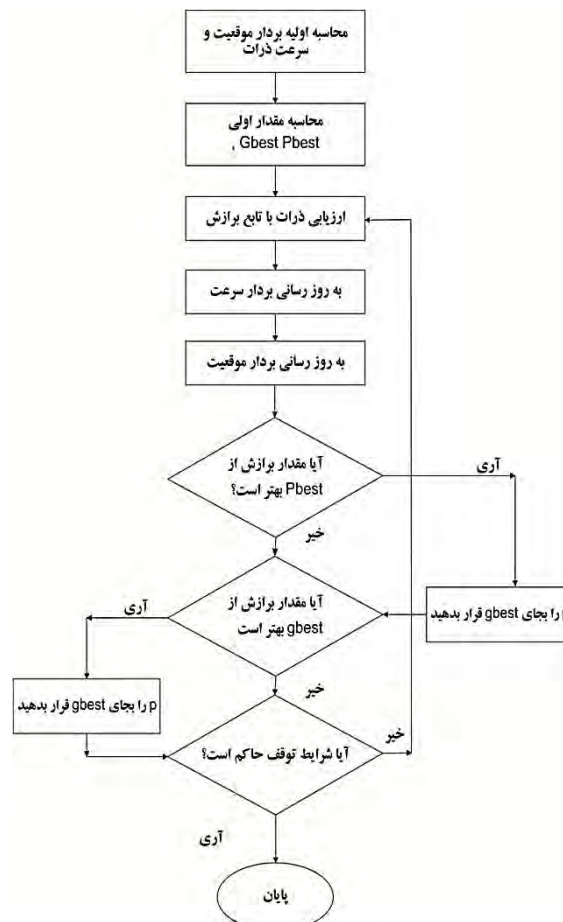
بر این اساس در هر گام، هر ذره با استفاده از دو بهترین مقدار به روز می شود. اولین مورد، بهترین موقعیتی است که تا کنون ذره موفق به رسیدن به آن شده است. موقعیت مذکور با نام بهترین جواب موضعی^۱ شناخته و نگهداری می شود. بهترین مقدار دیگری که مورد استفاده قرار می گیرد، بهترین موقعیتی است، که تا کنون توسط جمعیت ذرات بدست آمده است. این موقعیت با نام بهترین جواب کلی^۲ نمایش داده می شود. پس از یافتن بهترین مقادیر، سرعت و مکان هر ذره با استفاده از معادلات زیر به روز می شود.

$$\vec{V}_{k+1} = W_0 \vec{V}_k + \vec{c}_1 \vec{r}_1 (\vec{p}_1 - \vec{x}_k) + \vec{c}_2 \vec{r}_2 (\vec{p}_2 - \vec{x}_k) \quad (10)$$

$$\vec{x}_{k+1} = \vec{x}_k + \vec{V}_{k+1} \quad (11)$$

که در آن \vec{v} جهت کنونی عنصر، W_0 ضریب اینرسی، c_1 و c_2 به ترتیب ضریب بهترین تجربه شخصی و گروهی، p_1 و p_2 به ترتیب بهترین جواب موضعی و بهترین جواب کلی می باشند. ر اساس تحقیقات انجام شده مقداری بین ۰٫۴ و ۰٫۷ برای W_0 مناسب است. تحقیقات اخیر نشان می دهد که انتخاب مقدار بزرگتر برای پارامتر c_1 نسبت به پارامتر c_2 مناسب تر است، اما بایستی همواره شرط $c_1 + c_2 \leq 4$ رعایت شود. برای تصادفی سازی نیز از ضرایب r_1 و r_2 که مقادیری بین صفر و یک هستند به ترتیب برای بهترین جواب موضعی و بهترین جواب کلی استفاده می شود. اندیس های k نشان دهنده تکرار الگوریتم و \vec{x}_k نیز مکان عنصرها را در تکرار k را نشان می دهد.

-
1. Personal Best
 2. Global Best



شکل ۱۲. فلوجارت الگوریتم PSO

نتایج محاسباتی

به منظور مقایسه کارایی الگوریتم جستجوی هارمونی، ما مثالهای عددی تصادفی تولید شده را که بر روی یک کامپیوتر شخصی اجرا کرده و با نتایج بدست آمده از الگوریتمهای فراابتکاری ژنتیک (GA) و الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات (PSO) مقایسه می کنیم. این مثالهای عددی به طور تصادفی تولید شده و برای یک زنجیره تامین سه سطحی متشکل از ۴ خرده فروش و ۱ تولیدکننده و ۳ تامین کننده می باشند. برای انتخاب نحوه تولید نمونه مسائل تصادفی چارچوب پیشنهادی که در مقاله شاکلا و همکاران [۱۸] به آن اشاره شد، به کار

گرفته شده است. پارامترهای مرتبط با تمامی الگوریتمها از طریق رو تاگویی تنظیم شده است که مقادیر بهینه آنها در جدول ۶ ذکر شده است. همچنین تمامی محاسبات توسط یک PC با چهار گیگابایت RAM و پردازش گر (Core i5, 2 duo 2.2 GHz) انجام شده است.

جدول ۶. سطوح بهینه عوامل قابل کنترل الگوریتمها

| روش حل | پارامترها | تشریح پارامترها | سطح بهینه |
|--------|-------------|-----------------------------|-----------|
| HS | $nPop$ | تعداد حافظه هارمونی اولیه | ۸۰ |
| | $Phmcr$ | نرخ مراجعه به حافظه هارمونی | ۰,۸۵ |
| | Ppa | نرخ عملگر تنظیم کوک | ۰,۳ |
| | $Outloop$ | تعداد تکرار الگوریتم | ۲۵۰ |
| | $In. loop$ | تعداد تکرار داخلی الگوریتم | ۱۰۰ |
| GA | $Popsiz$ | جمعیت اولیه | ۱۵۰ |
| | P_c | نرخ تقاطع | ۰,۸ |
| | P_m | نرخ جهش | ۰,۱۵ |
| | $Iteration$ | تعداد تکرار | ۵۰۰ |
| PSO | N | جمعیت اولیه | ۹۰ |
| | C_1 | ضریب بهترین تجربه شخصی | ۱ |
| | C_2 | ضریب بهترین تجربه گروهی | ۱,۵ |
| | $Iteration$ | تعداد تکرار | ۳۰۰ |
| | W_0 | ضریب اینرسی | ۰,۴ |

نتایج نشان می‌دهد که در اکثر مسائل الگوریتم پیشنهادی به جواب‌های بهتری دست پیدا کرده است (شکل ۱۳). همچنین دو الگوریتم GA و PSO عملکرد مشابهی دارند. برای مقایسه آماری نتایج بدست آمده از سایر الگوریتم‌های آنالیز واریانس میانگین درصد انحراف نسبی الگوریتم‌ها استفاده می‌شود. در ابتدا بررسی می‌شود که آیا میانگین‌های درصد انحراف نسبی الگوریتم‌ها با هم متفاوت است یا خیر (فرض صفر و یک)

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

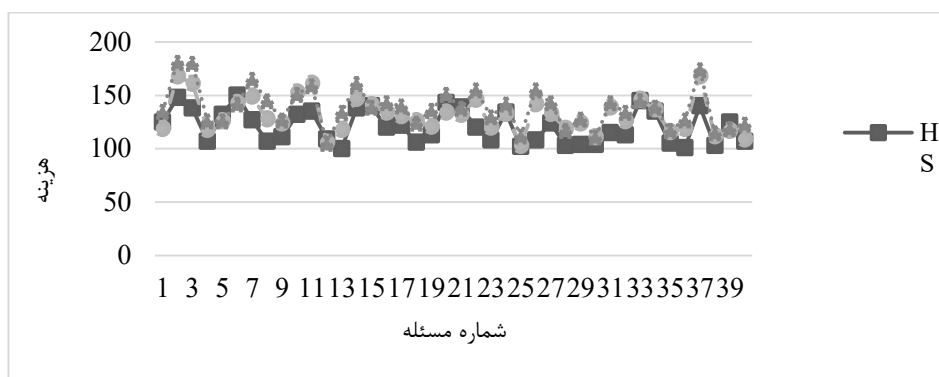
$$H_1 : \mu_i \neq \mu_j \quad i, j = 1, 2, 3 \text{ and } i \neq j$$

که μ_1 میانگین درصد انحراف نسبی الگوریتم HS است. نتایج بدست آمده از آنالیز واریانس در جدول ۷ آمده است.

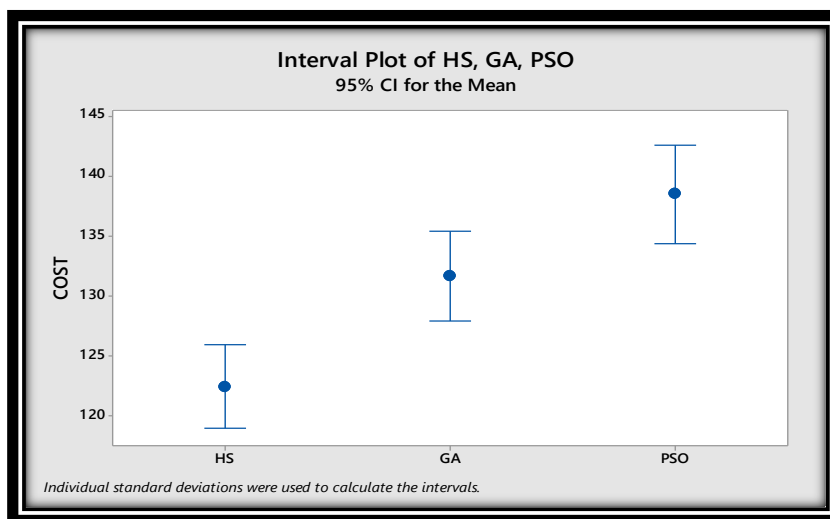
جدول ۷. آنالیز واریانس الگوریتم‌ها

| Source | DF | SS | MS | F | P-value |
|-----------|-----|---------|--------|------|---------|
| Algorithm | ۴ | ۲,۲۷۷ | ۰,۵۶۹۴ | ۷,۴۷ | ۰ |
| Error | ۲۳۵ | ۱۷,۹۲۱۳ | ۰,۰۷۶۳ | | |
| Total | ۲۳۹ | ۲۰,۱۹۹ | | | |

بر طبق اماره F و P-value به این نتیجه می‌رسیم که حداقل یک الگوریتم با سایرین متفاوت است که این، استفاده از فواصل اطمینان را ضروری می‌سازد. نتایج بدست آمده از فواصل اطمینانرا نشان دهد. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم HS با فاصله اطمینان ۹۵٪ توکی بهتر از سایر الگوریتم‌ها عمل می‌کند. الگوریتم GA در مقایسه با الگوریتم PSO عملکرد بهتری دارد اما از نظر آماری این دو الگوریتم تفاوت معناداری با هم ندارند (شکل ۱۴).



شکل ۱۳. نمودار گرافیکی نتایج بدست آمده از الگوریتمها



شکل ۱۴. فواصل اطمینان ۹۵ درصدی برای مقایسه الگوریتمها

نتیجه گیری

در این مقاله یک رویکرد نوین را برای بررسی مسئله زنجیره تامین پیشنهاد دادیم. رویکرد پیشنهادی توانست تا با بهره گیری از شبیه سازی مهم ترین فاکتورهای موثر بر زنجیره تامین را در نظر بگیرد شرایط احتمالی سیستم را در برآورد هزینه های زنجیره لحاظ کند. نتایج حاصل از شبیه سازی به کار گرفته شد تا یک رابطه آماری بین متغیرهای تصمیم و متغیر پاسخ (هزینه) تخمین زده شود. آزمایش های آماری نشان داد که این رابطه از توانایی خوبی برای پیش بینی

مقادیر تابع هدف برخوردار است. به منظور بهینه سازی الگوریتم یک الگوریتم فراابتکاری جدید پیشنهاد داده شد و کارایی آن در برابر الگوریتم‌های GA و PSO مقایسه شد. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد الگوریتم جستجوی هارمونی پیشنهادی می‌تواند با جواب‌های با کیفیت بهتری دست پیدا کند. یکی از کاربردی‌ترین پیشنهادات جهت انجام پژوهش‌ها را می‌توان حل سایر مسائل بهینه‌سازی از طریق روش پیشنهادی باشد. همچنین می‌توان کاربردی بودن رویکرد پیشنهادی را از طریق بهینه‌سازی یک زنجیره تامین واقعی مورد بررسی قرار داد. از طرف دیگر می‌توان مدل‌های رگرسیونی توسعه داده شده را با استفاده از سایر الگوریتم‌های فراابتکاری حل کرد و کارایی آنها را با هم مقایسه کرد.

مراجع

Chopra, S., & Meindl, P. (2001). *Supply chain management: Strategy, planning and operation*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.

Sahin, F., & Robinson, E. (2002). Flow coordination and information sharing in supply chains: Review, implications and directions for future research. *Decision Sciences*, 33, 505–536.

Gavirneni, S., Kapuscinski, R., & Tayur, S. (1999). Value of information in capacitated supply chains. *Management Science*, 45(1).

Strader, T. J., Lin, F. R., & Shaw, M. (1999). The impact of information sharing on order fulfillment in divergent differentiation supply chains. *Journal of Global Information Management*, Harrisburg, 7(1).

Hewitt, F. (1999). Information technology mediated business process management—Lessons from the supply chain. *International Journal of Technology Management*, Geneva, 17(1–2).

Shunk, D. L., Kim, J. I., & Nam, H. Y. (2003). The application of an integrated enterprise modeling methodology—FIDO—to supply chain integration modeling. *Computers and Industrial Engineering*, 45(1), 167–193.

Spekman, R. E. (1988). Strategic supplier selection: Understanding long-term buyer relationships. *Business Horizons* (July–August), 80–81.

Tompkins, J. A. (1998). Time to rise above supply chain management. *Transportation and Distribution*, 39(10).

Kwak, T. C., Kim, J. S., & Chiung, M. (2006). Supplier–buyer models for the bargaining process over a long-term replenishment contract. *Computers and Industrial Engineering*, 51(2), 219–228.

[10] Zhang, D. Z., Anosike, A. I., Ming, K. L., & Akanle, O. M. (2006). An agent-based approach for remanufacturing and supply chain integration. *Computers and Industrial Engineering*, 51(2), 343–360.

[11] Altiparmak, F., Gen, M., Lin, L., & Paksoy, T. (2006). A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computers and Industrial Engineering*, 51(1), 196–215.

[12] Cohen, M. A., & Lee, H. L. (1988). Strategic analysis of integrated production distribution system: Models and methods. *Operations Research*, 36(2), 216–228.

[13] Arntzen, B. C., Brown, G. G., Harrison, T. P., & Trafton, L. L. (1995). Global supply chain management at digital equipment corporation. *Interface*, 25(1), 69–93.

[14] Hariharan, R., & Zipkin, P. (1995). Customer-order information, lead times, and inventories. *Management Science*, 41(1), 1599–1607.

Zheng, Y., & Zipkin, P. (1990). A queuing model to analyze the value of centralized inventory information. *Operations Research*, 38(2), 296–300.

[16] Vanhoutum, G., Inderfurth, K., & Zijm, W. (1996). Material coordination in stochastic multi-echelon systems. *European Journal of Operational Research*, 95, 1–23.

[17] Montgomery, D. C. (2001). *Design and analysis of experiments*. New York: Wiley.

[18] Sanjay Kumar Shukla, M. K. Tiwari, Hung-Da Wan, Ravi Shankar: (2010), Optimization of the supply chain network: Simulation, Taguchi, and Psychoclonal algorithm embedded approach. *Computers & Industrial Engineering*, 58(1): 29-39.

[19] Z.W. Geem, J-H. Kim, G.V. Loganathan, A new heuristic optimization algorithm: harmony search, *Simulation*, 76 (2001) 60–68.

[20] Bhaskaran, S. (1998). Simulation analysis of manufacturing supply chain. *Decision Sciences*, 29(3), 633–657.

- [21] Beamon, B. M., & Chen, V. C. P. (2001). Performance analysis of conjoined supply chains. *International Journal of Production Research*, 39(14), 3195–3218.
- [22] Alderson, W. (1950). *Marketing efficiency and the principal of postponement cost*. Profit outlook, September 1950.
- [23] Swaminathan, J. M., & Tayue, S. R. (1998). Managing broader product line through delayed differentiation using vanilla boxes. *Management Science*, (December), 161-172.
- [24] Gaonkar, R., & Viswanadham, N. (2001). Collaboration and information sharing in global contract manufacturing networks. *IEEE/ASME on Mechatronics*, 6, 366-367.
- [25] Gavirneni, S. (1997). *Inventories in supply chains under cooperation*. Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, September.
- [26] Towill, D. R., Naim, M. M., & Wikner, J. (1992). Industrial dynamics simulation models in the design of supply chains. *International Journal of Distribution and Logistics Management*, 22, 3–13.
- [27] Lee, H., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1994). Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect. *Management Sciences*, 43(4), 546–558.
- [28] Zhao, X., & Xie, J. (2002). Forecasting errors and value of information sharing in a supply chain. *International Journal of Production Research*, 40(2), 311-335.
- [29] Chung, C. S., & Lin, C. H. M. (1988). An O(T²) algorithm for the NI/G/NI/ND capacitated lot size problem. *Management Science*, 34, 420–426.
- [30] Dengiz, B., & Akbay, K. S. (2000). Computer simulation of a PCB production line: Metamodelling approach. *International Journal of Production Economics*, 63, 195-205.