

مدل‌سازی و بهینه‌سازی زنجیره‌تأمین کششی تحت کنترل سیاست CONWIP

سجاد شکوهیار، سید محمد معطر حسینی و سید علی ترابی

چکیده: مدیریت زنجیره تأمین در نیمه دوم قرن گذشته توسعه فراوانی یافته و در قرن حاضر نیز این توسعه ادامه داشته است. یکی از زمینه‌هایی که امروزه مورد توجه فراوان قرار گرفته است، توسعه و انطباق روش‌های کنترل تولید و موجودی با فلسفه تولید بهنگام در سطح خطوط تولیدی و به منظور کنترل مناسب جریان مواد و محصولات در سطح زنجیره تأمین است. به همین منظور در این مقاله سعی می‌شود تا سیاست کششی- فشاری کار در جریان ثابت (CONWIP) در شرایط زنجیره‌تأمین تطبیق داده شده و مدل‌سازی می‌گردد. نرخ تقاضا، زمان تولید، راه‌اندازی و حمل‌ونقل به صورت احتمالی است. در فرآیند بهینه‌سازی نیز با توجه به ماهیت پیچیده زنجیره تأمین، از روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی استفاده خواهد شد که انعطاف‌پذیری فراوانی را به منظور حل مساله دارا می‌باشد. تابع هدف مساله به صورت مجموع هزینه‌های کار در جریان، کمبود و تأمین مواد خام در نظر گرفته شده که می‌بایست حداقل گردد. پس از حل مدل، نتایج اجرای مدل مورد بررسی و تحلیل قرار خواهند گرفت.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین، بهینه‌سازی شبیه‌سازی، تولید بهنگام، سیاست کششی کار در جریان ثابت

۱. مقدمه

یک زنجیره تأمین شامل همه تسهیلات (امکانات)، وظایف و فعالیت‌هایی می‌شود که در تولید و تحویل یک کالا یا خدمت، از تأمین‌کنندگان تا مشتریان ادامه دارد و شامل مدیریت و هماهنگی عرضه و تقاضا، تأمین مواد، تولید محصول، انبارش، کنترل موجودی و توزیع محصول به مشتری می‌گردد[۱]. در یک زنجیره تأمین، تصمیم‌گیری در خصوص سطوح موجودی و نحوه کنترل آن‌ها بر روی تک تک عناصر زنجیره تأثیرگذار است و این تأثیر به صورت افزایش کیفیت یا کاهش هزینه نمایان می‌شود. با توجه به این مطلب می‌توان تصمیم‌گیری در مورد موجودی در یک زنجیره تأمین را یکی از مهم‌ترین تصمیمات مدیریت زنجیره تأمین دانست[۱].

این مقاله در تاریخ ۸۵/۳/۸ دریافت و در تاریخ ۸۶/۷/۱ به تصویب نهایی رسیده است.

سجاد شکوهیار، کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر،
Shokuhyar@yahoo.com

دکتر سید محمد معطر حسینی، عضو هیات علمی دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه صنعتی امیرکبیر،
moattarh@aut.ac.ir

دکتر سید علی ترابی، عضو هیات علمی گروه مهندسی صنایع دانشکده فنی دانشگاه تهران،
satorabi@ut.ac.ir

با گسترش کاربرد استراتژی‌های کششی در سطح خطوط تولیدی، می‌توان با توسعه و انطباق روش‌های فوق در سطح زنجیره تأمین از مزایای تولید کششی برخوردار گردید. یکی از مناسب‌ترین سیاست‌هایی که بتواند مزایای سیاست کششی را داشته و در عین حال اجرای آن نیز ساده باشد، سیاست کششی- فشاری "کار در جریان ثابت" یا به اختصار CONWIP است. این سیاست با توجه به مزایای خود در برابر روش کنترلی کانبان ارائه گردید و توانست از یک سو با توجه به انعطاف‌پذیری خود به سهولت در سطح خطوط تولیدی اجرا گردد و از سوی دیگر مزایای روش‌های کنترل موجودی کششی را در خود حفظ نماید. در ادامه، ضمن تشریح این استراتژی ترکیبی، به توسعه و انطباق سیاست فوق در یک زنجیره تأمین پرداخته خواهد شد. تابع هدف مدل فوق حداقل نمودن هزینه‌های موجودی شامل هزینه نگهداری محصول تولیدی، هزینه کمبود، هزینه نگهداری کار در جریان و هزینه سربار است. در مدل فوق زمان‌های تولید و حمل و نقل ثابت هستند و برای هر محصول کارت خاص آن محصول اختصاص داده شده است. مرک، الینز و اسمیت (۱۹۹۹) نحوه شبیه‌سازی دو سیاست کانبان و CONWIP را بررسی نمودند[۴]. در مدل‌های شبیه‌سازی طراحی شده برای هر دو سیاست، یک فرآیند سریال با چهار ایستگاه و براساس پارامترهای مشابه در نظر گرفته

در مدل‌های فوق تابع هدف به صورت مجموع هزینه‌های موجودی طراحی شده است و مجموع هزینه‌های تولید، راه‌اندازی، حمل‌ونقل و نگهداری با استفاده از ضرایب هزینه‌ای به صورت تابع هدف در مدل حداقل شده‌اند. در مدل کمبود لحاظ نشده است. از مهمترین ویژگی‌های مدل فوق تعیین اندازه انباشته علاوه بر تعیین تعداد کارت کانبان است. همچنین در مدل‌های فوق تامین مواد نیز توسط کارت انجام می‌گیرد و این کارت در مدل‌ها بهینه می‌گردد [۸]. ریان و وراساین (۲۰۰۵) مدل چند محصولی CONWIP را با هدف حداقل نمودن حداکثر فروش از دست رفته و با اختصاص کارت مشخص به هر محصول ارائه دادند [۹]. آنها همچنین با مقایسه شبیه سازی نشان دادند که در حالت اختصاص کارت مختص هر محصول حساسیت تعداد کارت به نرخ سرویس کمتر از حالت اختصاص کارت مشترک میان محصولات مختلف است. اوایل و مارگیوز (۲۰۰۳) روش کنترلی CONWIP را در یک زنجیره تامین سریال مورد بررسی قرار دادند. نوع مساله مورد بررسی تک محصولی و تک متغیره در نظر گرفته شده است لذا با توجه به ساده‌سازی فوق و همچنین در نظر نگرفتن هزینه‌های حمل و نقل و نگهداری مساله بهینه شده است [۱۰]. با توجه به مرور ادبیات انجام شده، در این مقاله یک مدل چند محصولی با استفاده از سیاست CONWIP و در نظر گرفتن هزینه‌های حمل و نقل، نگهداری و تولید و همچنین لحاظ نمودن پارامترهای احتمالی ارائه خواهد شد و در نهایت مدل ارائه شده با استفاده از روش پیشنهادی بهینه‌سازی می‌گردد.

۳. تعریف فرضیات و شرایط مساله

یکی از مهمترین حوزه‌های قابل بررسی در زنجیره‌های تامین، تعیین روش مورد استفاده در کنترل موجودی قطعات و محصولات است. Alper (۲۰۰۳) با بیان ویژگی‌های اصلی یک زنجیره، در خصوص انتخاب استراتژی مناسب زنجیره‌تأمین و ویژگی‌هایی که یک زنجیره به منظور پیاده‌سازی آن باید داشته باشد جدول ذیل را طرح می‌نماید. [۱۱] (جدول ۱).

جدول ۱. ابعاد مختلف استراتژی‌های کنترل زنجیره تامین [۱۱]

مشخصات زنجیره تامین	استراتژی Push	استراتژی Pull
هدف زنجیره	حداقل نمودن هزینه	حداکثر نمودن سطح سرویس
پیچیدگی	زیاد	کم
تمرکز اصلی در کنترل زنجیره	تخصیص صحیح منابع	قدرت پاسخگویی و عکس‌العمل نسبت به تغییرات
فاصله زمانی سفارش تا تحویل کالا به مشتری	بلند مدت	کوتاه مدت
فرآیندهای در حال انجام در زنجیره	اجرای برنامه‌ریزی پیش بینی شده برای زنجیره	پاسخگویی به تقاضا

زنجیره‌هایی به کار می‌رود که هدف زنجیره کاهش هزینه است و در مقابل استراتژی کشتی به سطح سرویس و توانایی پاسخ‌گویی زنجیره به تقاضای مشتری اهمیت می‌دهد.

شده است اما مدل‌های فوق بهینه‌سازی نگردیده اند. ریان و چوبینه (۲۰۰۰) یک روش ابتکاری را برای تخصیص تعداد کارت در یک فرآیند کارگاهی چند محصولی توسعه دادند. تابع هدف در نظر گرفته شده حداقل نمودن سطح کار در جریان با محدودیت ارضای سطحی از سرویس برای محصولات مختلف است. بدین منظور آنها برای هر یک از محصولات یک نوع کارت در نظر گرفتند و مجموع تعداد کارت‌ها را به عنوان مجموع کار در جریان حداقل نمودند. همچنین به منظور پاسخگویی به سطحی از سرویس با تعریف نسبتی از سفارشات که به محض ورود پاسخ داده نمی‌شوند و در نظر گرفتن حد پایینی برای این نسبت و اعمال آن به صورت محدودیت در مدل مساله حل گردیده است. [۵]

زانگ و چن (۲۰۰۱) به منظور بررسی و بهینه سازی سیاست CONWIP، یک مدل ریاضی غیر خطی عدد صحیح را ارائه نمودند [۶]. مدل آنها توالی کارها و حجم تولیدی را برای یک دوره بهینه می‌نماید. تابع هدف در نظر گرفته شده در مدل فوق حداقل نمودن هزینه راه‌اندازی در ایستگاه گلوگاه است با این فرض که در فرآیند در نظر گرفته شده یک گلوگاه وجود دارد. در این مدل هزینه‌های کمبود و هزینه نگهداری لحاظ نشده است. ریان و چوبینه (۲۰۰۳) یک مدل غیر خطی ریاضی را برای تعیین کار در جریان هر یک از محصولات در یک فرآیند کارگاهی با استفاده از تخصیص یک کارت مشخص برای هر محصول توسعه دادند. روش ارائه شده در مقاله فوق مانند مقاله Ryan و Chobinehl (۲۰۰۰)، به صورت دو مرحله‌ای است. آنها ابتدا با طراحی یک مدل ریاضی غیر خطی حداقل سطح کار در جریان را به صورتی مشخص نمودند که فاصله محصول تولیدی با حداکثر نرخ تولید حداقل باشد. در ادامه با توجه به این حدود، این تعداد کارت را به صورتی به محصولات مختلف تخصیص دادند که این تعداد کارت محصول تولیدی کل را حداکثر نماید [۷]. سارکر و وانگ (۲۰۰۵) به توسعه مدل کانبان در زنجیره‌تأمین در سه حالت تک مرحله‌ای، چند مرحله‌ای و زنجیره‌تأمین مونتاژی پرداختند و سپس برای هر یک از موارد فوق یک مدل ریاضی MINLP توسعه داده و از روش شاخه و حد مدل فوق را حل نمودند.

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود برای استفاده یک استراتژی کنترل موجودی در زنجیره‌تأمین می‌بایست شرایط لازمه آن سیاست در زنجیره محیا باشد. به عنوان نمونه استراتژی فشاری اغلب در

همانطور که در شکل ۱ مشخص است تعداد محصول در حال تولید یا همان کار در جریان توسط تعداد کارت در مدل کنترل شده و ثابت می ماند.

سیستم کنترلی CONWIP با توجه به نوع طراحی آن، دارای هر دو منطق کششی و فشاری می باشد. در سیستم CONWIP تقاضا به صورت کششی در زنجیره اعمال می گردد و در طی مراحل تولیدی محصول مورد تقاضا به صورت فشاری تولید می گردد [۲]. با توجه به توضیحات فوق در ادامه فرضیات اصلی در نظر گرفته شده در مدل سازی و نحوه بهینه نمودن مدل طراحی شده بیان خواهد شد:

۱. مدل طراحی شده به صورت چند محصولی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲. در مساله مورد بررسی برای هر نوع محصول کارت CONWIP مخصوص به آن محصول در نظر گرفته شده است.

۳. مدل به صورتی طراحی شده است که نوع تقاضا، اندازه تقاضا و نرخ تقاضا براساس توابع احتمالی در مدل قابل اعمال باشد.

۴. در مدل طراحی شده کمبود در نظر گرفته شده است و تقاضاهایی که پس از ورود نتوان آنها را پاسخ گفت با کمبود مواجه می شوند و تا زمان پاسخ گویی در صف انتظار باقی می ماندند و به صورت عقب افتاده پاسخ داده می شوند.

۵. با توجه به توضیحات داده شده در خصوص وجود پیچیدگی های تولیدی، برای تولید هر نوع محصول، زمان های تولید خاص آن محصول در نظر گرفته شده است که این زمان ها می تواند به صورت احتمالی و با پیروی از یک تابع توزیع خاص باشد.

۶. با ورود تقاضا با توجه به اندازه انباشته در نظر گرفته شده، کارت سفارش تولید صادر می گردد. همچنین برای سفارش مواد خام نیز همان اندازه انباشته در نظر گرفته شده برای تولید در نظر گرفته شده است.

۷. با توجه به سفارش تولید براساس اندازه انباشته، در صورتی که نوع محصول تولیدی پس از تولید هر انباشته تغییر نماید زمان و هزینه راه اندازی برای تولید انباشته محصول بعدی لحاظ می شود.

۸. در مدل طراحی شده مواد اولیه مورد نیاز کارخانه ابتدایی، براساس تقاضای تولید سفارش داده می شود و مواد اولیه به صورت نامحدود در دسترس نیست و سفارش مواد خام با استفاده از کارت سفارش مواد خام در نظر گرفته شده است.

۹. زمان و هزینه حمل و نقل محصولات نیمه ساخته و نهایی در مدل لحاظ شده است.

۱۰. تامین مواد خام مورد نیاز کارخانجات براساس یک هزینه متغیر به ازای هر واحد ماده خام سفارش شده محاسبه می شود.

۱۱. هزینه نگهداری به صورت مجموع دو نوع هزینه محاسبه می گردد. بخش اول شامل محاسبه هزینه نگهداری متناسب با زمان نگهداری هر محصول است و بخش دوم شامل محاسبه هزینه ثابت نگهداری براساس حداکثر موجودی نگهداری شده است.

حال با توجه به این موضوع که استراتژی کنترلی CONWIP از هر دو منطق کششی و فشاری برخوردار است لذا می بایست در تعیین هدف زنجیره، ترکیبی از کاهش هزینه و افزایش سطح سرویس را در نظر گرفت. همچنین این استراتژی در زنجیره هایی قابل پیاده سازی است که با افق میان مدت و نه صرفاً برنامه ریزی کوتاه مدت به تقاضاها پاسخ می دهند. همچنین به منظور پیاده سازی سیاست فوق در زنجیره تامین می بایست شرایط زیر محیا گردد تا بتوان از مزایای برشمرده شده سیاست فوق برخوردار گردید [۱۰]:

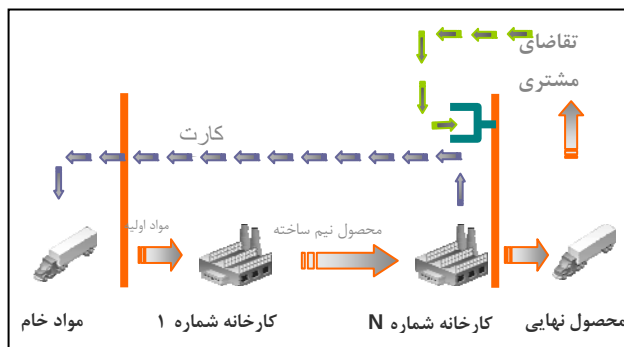
۱- یک زنجیره تامین شامل چندین شرکت با اهداف متفاوت و حتی متناقض می باشد. در نتیجه برای ارائه یک استراتژی کلان در کل زنجیره لازم است مسئولیت کنترل تولید در اختیار یکی از اعضای زنجیره قرار گیرد.

۲- در این سیاست کنترل به صورت متمرکز و کلان انجام می گردد لذا موسسات می بایست اطلاعات کنترل موجودی خود را در اختیار بخش کنترل کننده قرار دهند.

۳- همواره داشتن سطح موجودی (WIP) پایین نمی تواند به نفع هر یک از شرکت های موجود در زنجیره باشد به همین منظور لازم است ساختار زنجیره به صورتی طراحی گردد که سود و زیان موسسات به صورت مشترک تخصیص یابد و سرمایه گذاری انجام شده به صورت مشترک باشد.

۴- پیاده سازی این سیستم نیازمند سرمایه گذاری در زمینه سیستم های انتقال الکترونیکی داده (EDI) است چرا که اطلاعات تقاضا همواره می بایست در اختیار اولین عضو زنجیره قرار گیرد.

۵- با توجه به این موضوع که در این سیاست دستور تقاضا به ابتدای زنجیره داده می شود لذا پیاده سازی استراتژی فوق در زنجیره هایی امکان پذیر است که فرآیند اصلی توسط کارخانه ابتدایی انجام پذیرد و سایر کارخانجات فرآیندهای تکمیلی تولید را انجام دهند. با توجه به شرایط مطرح شده، در ادامه به مدل سازی سیاست فوق در یک زنجیره تامین سریال پرداخته خواهد شد. زنجیره تامین سریال ساده ترین ساختار زنجیره می باشد که جهت تولید محصولات مورد استفاده قرار می گیرد. در این زنجیره محصول یا محصولات با عبور از کارخانجات مختلف به محصول نهایی تبدیل شده و به مشتری ارسال می گردد (شکل ۱).



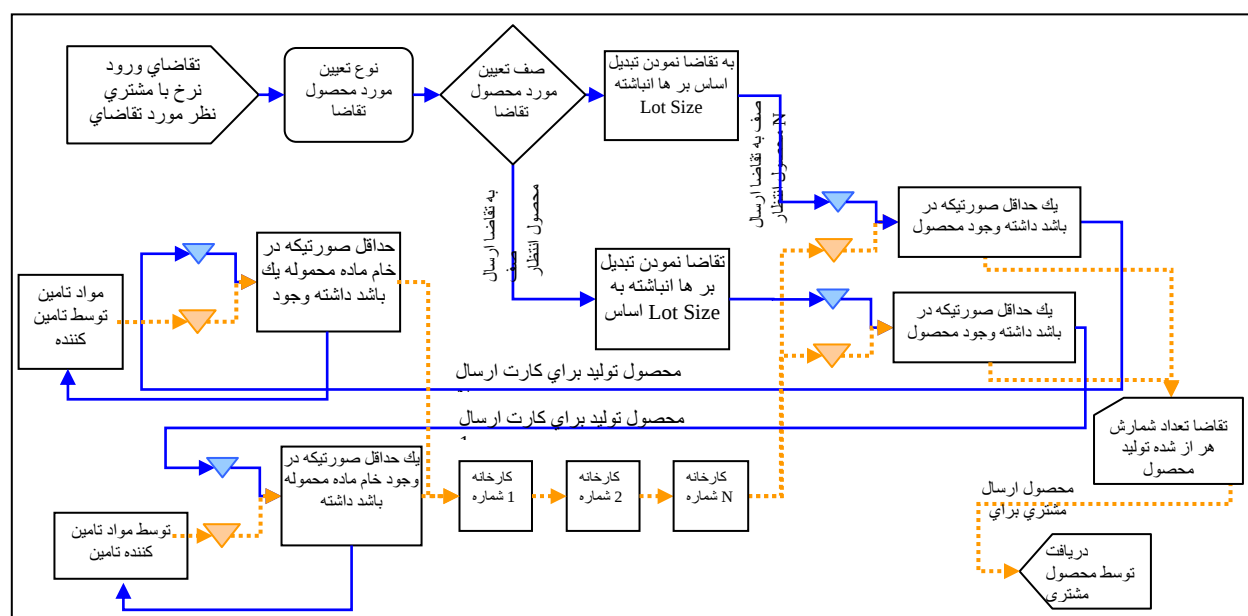
شکل ۱. نمایش کنترل زنجیره تامین سریال توسط سیاست CONWIP

۱۲. در مدل حاضر از رویه پاسخگویی FCFS به منظور تولید محصولات در کارخانجات استفاده شده است. نحوه پاسخگویی به تقاضاهای مشتریان نیز با استفاده از همین قاعده است.

۱۳. در بخش تامین مواد خام، برای هر نوع محصول یک تامین کننده در نظر گرفته شده است که وظیفه تامین مواد اولیه آن نوع محصول را دارد و کنترل سطح موجودی مواد خام برای هر نوع محصول به صورت مجزا است و توسط کارت کنترل می‌گردد.

۱۴. با توجه به توضیحات فوق در ادامه ابتدا ضمن تشریح مدل مفهومی مساله، نحوه پیاده‌سازی مدل فوق در نرم افزار شبیه‌سازی Arena بیان خواهد شد. همچنین به منظور بهینه‌سازی مساله، الگوریتم بهینه‌سازی و احزای آن نیز توضیح داده می‌شوند.

در مدل طراحی شده به منظور شروع فرآیند تولید در ابتدا محصول به تعداد مورد نظر تولید گردیده و در صف انتظار تقاضا قرار می‌گیرد. با ورود تقاضا، محصول مورد نظر با توجه به اندازه انباشته تولید در نظر گرفته شده تحویل داده می‌شود و با ارسال کارت تولید (سفارش تولید) به ابتدای زنجیره، فرآیند تولید محصول آغاز می‌گردد. در صورتیکه محصول مورد تقاضا وجود نداشته باشد تقاضای مورد نظر، منتظر تولید محصول باقی می‌ماند و در واقع تقاضای فوق با کمبود مواجه می‌گردد و این امر تا تولید محصول ادامه می‌یابد. به این ترتیب همواره سطح کار در جریان در طول زنجیره ثابت باقی می‌ماند (شکل ۲).



شکل ۲. مدل طراحی شده مساله مورد بررسی

تقاضا وجود نداشته باشد تا زمان تولید حداقل یک محموله از محصول مورد نظر، مشتری منتظر می ماند و پس از وقوع این امر کارت محصول مورد نظر جدا شده و به ابتدای زنجیره باز می گردد و محصول مورد نظر تحویل مشتری می گردد.

به منظور اجرای این منطق، لازم است همواره دو صف برای کارت و محصول در نظر گرفته شود. در صورتی که حداقل یک کارت و یک محصول وجود داشته باشد آن دو را از صف خارج نموده و با توجه به شکل ۲ در مسیرهای مشخص شده ارسال نماید.

در مدل طراحی شده به منظور تفکیک نوع محصولات، در کارخانجات مختلف می‌باید از صف‌های مجزا برای محصولات استفاده گردد. همچنین در فرآیند تعیین وجود و یا عدم وجود محصولات مورد تقاضا باید تقاضاها در صف‌های مجزا مشخص گردند که این مورد در هنگام پیاده‌سازی مدل در نرم افزار Arena توضیح داده خواهد شد.

با ورود درخواست تولید به کارخانه ابتدایی و برداشت مواد خام از انبار مواد اولیه، کارت برداشت (سفارش مواد خام) به تامین کننده مواد خام داده می‌شود و اندازه انباشته سفارش شده مواد خام برابر اندازه انباشته تولید در نظر گرفته می‌شود.

در حالت چند محصولی، همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود برای هر محصول صف خاص آن محصول در نظر گرفته شده است. همچنین در طول فرآیند تولید از قاعده توالی FCFS استفاده می‌گردد. به منظور کنترل کار در جریان، در صورتی که محصول مورد

پس از مدل سازی مساله، مدل طراحی شده در نرم افزار ARENA پیاده سازی گردید. با توجه به توضیحات داده شده در خصوص پیاده سازی سیاست CONWIP در زنجیره تامین سریال، مشخص

جدول ۲. مقایسه مدل طراحی شده با مقاله مرک و الکینز

تعداد کارت الگوی تقاضا		تعداد کارت			
		۱۱		۳۰	
Expo(54)	تعداد تولید	1598	1598	1605	1605
	Avg. WS1	.33512	.32848	.34076	.33368
	Avg. WS2	.50287	.49166	.51149	.49950
	Avg. WS3	.99497	.99128	.99940	.99546
	Avg. WS4	.63703	.64812	.64032	.65039
Expo(108)	تعداد تولید	876	876	876	876
	Avg. WS1	.18432	.18558	.18432	.18558
	Avg. WS2	.27484	.27729	.27484	.27729
	Avg. WS3	.54895	.56019	.54895	.56019
	Avg. WS4	.35833	.36778	.35833	.36778

در جدول فوق ستون‌های خاکستری رنگ مربوط به مقاله مرک و الکینز است و ستون‌های به رنگ روشن نتایج حاصله از مدل تحقیق حاضر است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج تقریباً با یکدیگر مشابه بوده و تفاوت‌ها به دلیل تصادفی بودن زمان‌های تولید و حمل و نقل بر اساس توابع احتمالی تعریف شده است. لذا براساس نتایج فوق، می‌توان صحت مدل طراحی شده را بر اساس مدل مقاله فوق تایید نمود.

۷. الگوریتم بهینه‌سازی مدل شبیه سازی

با توجه به ویژگی‌های مدل طراحی شده، به منظور بهینه‌سازی مدل، از ابزار بهینه‌سازی شبیه‌سازی استفاده گردیده است. این ابزار با گسترش نرم‌افزارهای شبیه‌سازی، توسعه چشمگیری یافته است. در این مقاله با توجه به استفاده از نرم‌افزار Arena برای مدل‌سازی مساله، از نرم‌افزار OptQuest که برای برای بهینه‌سازی مسائل طراحی شده با نرم‌افزار Arena است، استفاده خواهد شد. اجزای این نرم‌افزار در شکل ۳ نمایش داده شده است. در نرم‌افزار فوق با ایجاد ارتباط با مدل شبیه‌سازی و استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری سعی می‌گردد که تابع هدف تعیین شده برای مساله بهبود داده شود. پس از دریافت خروجی (Y_i)، توسط نرم‌افزار OptQuest، خروجی و متغیرهای ورودی (X_i) مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. این ارزیابی اغلب توسط یک الگوریتم بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. سپس بر اساس ارزیابی انجام گرفته پارامترهای جدید (X'_i) به عنوان ورودی به مدل شبیه‌سازی وارد می‌گردد و این چرخه تا وقوع شرط توقف ادامه می‌یابد [۱۲]. براساس توضیحات داده شده در مورد روش حل مدل، در ادامه اجزای الگوریتم حل مدل توضیح داده می‌شود.

۷-۱. تعریف متغیرها، پارامترها و تابع هدف مساله

با توجه به فرضیات مساله، علاوه بر بهینه نمودن تعداد محموله‌های در جریان، بهینه‌سازی همزمان اندازه انباشته نیز در نظر گرفته شده است. همچنین، تعداد کارت در جریان که سطح موجودی مواد اولیه را

می‌گردد که مهم‌ترین بخش در این سیاست، نحوه کنترل کارت و در اختیار قراردادن کارت در میان کارخانجات مختلف است.

به همین منظور لازم است در مدل طراحی شده از یک ماژول جهت مدیریت کارت استفاده شود. برای این منظور با توجه به امکانات نرم‌افزار Arena از ماژول MACH در انتهای فرآیند تولید و برای هر محصول استفاده شده است.

نحوه عملکرد به این صورت است که در ابتدای اجرای مدل با استفاده از ماژول CREAT به تعداد تعریف شده محصول تولید می‌گردد و در یکی از دو صف ماژول MACH قرار می‌گیرد. این تعداد محصول منتظر ورود تقاضا در صف دیگر ماژول می‌ماند و با ورود اولین تقاضا یک کارت به ابتدای فرآیند منتقل می‌گردد و جهت ادامه فرآیند به اولین کارخانه فرستاده می‌شود.

در نتیجه در طول فرآیند تولید همواره تعداد کارت ثابتی در مدل وجود خواهد داشت. حال در صورتی که تقاضا وارد شود و محصول در صف انتظار ماژول MACH وجود نداشته باشد تقاضا با کمبود مواجه می‌شود و منتظر تولید می‌ماند. همچنین به منظور شبیه‌سازی فرآیند تولید در هر کارخانه از یک ماژول PROCESS استفاده شده است که زمان‌های تولید محصولات در ماژول فوق وارد شده است.

۶. اعتبار سنجی مدل طراحی شده

به منظور اعتبار سنجی مدل طراحی شده، از مقاله‌ای که توسط مرک و الکینز (۲۰۰۱) در کنفرانس زمستانی شبیه‌سازی منتشر شده است استفاده گردید [۴]. در این مقاله ضمن بررسی ویژگی‌های سیاست‌های کنترلی کانبان و CONWIP، هر دو نوع سیاست مدل‌سازی گردیده و در انتها نتایج هر یک از مدل‌ها ارائه شده است. مدل مقاله فوق بسیاری از فرضیات ارائه شده در مدل طراحی شده در این تحقیق را در خود ندارد.

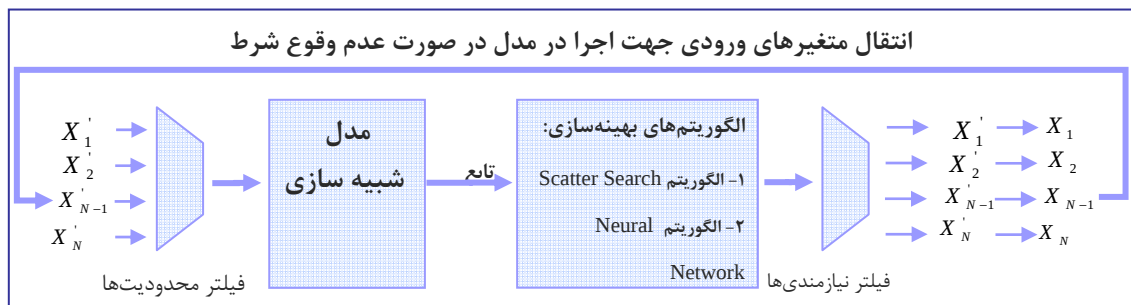
لذا فرضیات مدل طراحی شده حاضر به صورتی تغییر داده می‌شود که بتوان شرایطی مانند مدل مقاله مورد بررسی ایجاد نمود. بدین منظور زمان‌های حمل و نقل میان کارخانجات، زمان‌های راه‌اندازی و تامین مواد اولیه در مدل صفر در نظر گرفته شد. همچنین اندازه انباشته برابر یک در نظر گرفته شد و مدل در حالت تک محصولی مقایسه گردید که علت این امر به دلیل تخصیص کارت مشترک به محصولات در مدل Marek و Elkins است. در این مقاله کد Siman مدل ارائه شده است که می‌توان براساس آن مدل را در نرم‌افزار Arena اجرا نمود.

با توجه به این موضوع مدل در نرم‌افزار Arena پیاده‌سازی گردید و نتایج آن توسط مثال‌های مختلف اجرا گردید و در حالات فوق با مدل طراحی شده در این تحقیق مقایسه گردید. در جدول ۲ نتایج بدست آمده از مدل طراحی شده و مدل مرک و الکینز که هر یک ده بار اجرا گردیده، نمایش داده شده است.

$C_time_backlog_ti$: هزینه انتظار تقاضا برای هر محموله نوع i
 $C_time_order_Ti$: هزینه انتظار هر واحد زمانی سفارش تولید برای هر محموله نوع i
 $time_pros(i,j)$: زمان تولید هر واحد محموله نوع i در کارخانه j
 $time_Setup(i,j)$: زمان راه اندازی هر محموله نوع i در کارخانه j
 $time_R[i,1]$: زمان تامین هر واحد محصول نوع i
 $time_trans(i,j)$: زمان حمل هر محموله بازه حمل i از کارخانه j
 $Cmax_time_final_product_ti$: هزینه ثابت نگهداری متناسب با حداکثر موجودی نهایی نوع i
 $time_Ri$: مدت زمان نگهداری محموله‌های از نوع i به علت نبود کارت تولید در کارخانه i
 $NQ_Q_Fj_pi$: تعداد محموله نوع i نگهداری شده در انبار محصول نیمه ساخته و مواد اولیه کارخانه j
 $NQ_Release\ Kart\ and\ Product\ i$: تعداد محموله محصول نهایی نوع i نگهداری شده در کارخانه i
 $NQ_Release\ Kart\ and\ Raw\ i$: تعداد محموله مواد خام نوع i نگهداری شده در کارخانه اول به دلیل نبود سفارش تولید
 $Rawi$: تعداد محموله‌های حمل شده ماده خام نوع i
 $time_backlog_ti$: مدت زمان انتظار تقاضای محموله‌های نوع i
 $time_order_Ti$: مدت زمان انتظار محموله‌های ماده خام نوع i برای شروع تولید

در مدل مشخص می‌نمایند نیز بهینه‌سازی گردیده است. براساس توضیحات فوق متغیرها و پارامترهای مساله به صورت ذیل تعریف شده‌اند.

$PQ[i,1]$: اندازه انباشته محصول نوع i
 $CONWIP_Cart_Prod$: کارت تولید محصول نوع i
 $CONWIP_Cart_supp$: کارت سفارش مواد خام محصول نوع i
 $sjtiC$: تعداد محموله‌های راه‌اندازی شده نوع i در کارخانه j
 C_sjti : هزینه راه اندازی هر محموله نوع i در کارخانه j
 $pitj$: تعداد محصولات نوع i تولیدی توسط کارخانه j
 C_pitj : هزینه تولید هر واحد محصول نوع i در کارخانه j
 ti_Rj : تعداد محموله نوع i با اندازه انباشته در بازه j
 C_ti_Rj : هزینه حمل هر محموله نوع i با اندازه انباشته در بازه j
 CV_ti_R4 : هزینه حمل هر واحد محصول نوع i با اندازه انباشته در بازه 4
 $Time_fj_ti$: مدت زمان نگهداری محموله‌های نوع i در کارخانه j
 $C_time_fj_ti$: هزینه نگهداری هر واحد محصول نوع i در کارخانه j
 $Cmax_time_fj_ti$: هزینه ثابت نگهداری متناسب با حداکثر موجودی نوع i در کارخانه j
 $time_final_product_ti$: مدت زمان نگهداری محموله‌های محصول نهایی نوع i
 $C_time_final_product_ti$: هزینه نگهداری هر واحد محصول نهایی نوع i
 C_Rawi : هزینه تامین و حمل و نقل هر واحد ماده خام نوع i



شکل ۳. نمایش اجزای نرم افزار OptQuest

تابع فوق دارای سه جز اصلی است که می‌باید حداقل گردد. این تابع به صورت یک خروجی به نرم‌افزار بهینه‌سازی ارسال می‌گردد بدین منظور، اجزای تابع هدف در داخل ماژول Experssion طراحی شده و در نهایت یک مقدار با عنوان "Objective Function" از نوع Output در ماژول Statistics برای استفاده در نرم‌افزار OptQuest تعریف می‌گردد که نشان دهنده مقدار کل تابع هدف است. همچنین به منظور سهولت در نمایش ضرایب هزینه‌ای مورد استفاده در تابع هدف، یک متغیر برای هر ضریب تعریف گردیده که در ساخت تابع هدف استفاده شده است. با توجه به متغیرها و

با توجه به بررسی مساله چهار محصولی، چهار متغیر برای اندازه انباشته، چهار متغیر برای کارت تولید و چهار متغیر برای کارت تامین مواد خام استفاده می‌شود. به منظور ارزیابی نتایج شبیه‌سازی می‌بایست از یک تابع سنجش یا Fitness استفاده نمود. تابع فوق وظیفه نمایش کارایی پاسخ بدست آمده را در هر مرحله دارد. در مساله مورد بررسی با توجه به تحقیقات به عمل آمده تابع هزینه‌ای با اجزا زیر در نظر گرفته شده است.

تابع هدف = مجموع هزینه‌های کار در جریان + مجموع هزینه‌های تامین مواد خام + مجموع هزینه‌های کمبود محصول

استراتژی حل تک مرحله ای و دو مرحله ای اشاره کرد. در استراتژی حل تک مرحله ای، از یک الگوریتم بهینه سازی جهت حل استفاده می گردد.

در استراتژی حل دو مرحله ای، ابتدا حل از یک الگوریتم بهینه سازی جهت یافتن یک پاسخ عمومی و با جستجوی فضای وسیعی از پاسخ ها استفاده می گردد. به این مرحله که فاز نخست بهینه سازی است، اکتشاف گفته می شود.

در فاز دوم، از یک الگوریتم بهینه سازی استفاده می شود که مقدار اولیه آن، همان مقدار بهینه فاز نخست می باشد. به این فاز استخراج گفته می شود [۱۳]. در مساله مورد بررسی، از استراتژی دو مرحله ای استفاده شده است. در مرحله اول محدوده وسیعی از جواب ها در بازه ای باز از متغیرها بررسی می شود.

در مرحله دوم بهترین مقدار مرحله اول به عنوان پاسخ اولیه در این مرحله در نظر گرفته می شود و با محدود نمودن بازه متغیرها و افزایش تعداد تکرارها در هر بار شبیه سازی، سعی می شود پاسخ بهتری با دقت بیشتر بدست آید. به عبارت دیگر در مرحله دوم جستجوی محلی بیشتری در اطراف پاسخ مرحله اول انجام می گردد.

۷-۳. تعیین پارامترهای اجرای مدل بهینه سازی

با توجه به پیشنهاد نرم افزار OptQuest برای تعیین تعداد متغیرهای مسائل بزرگ در تعیین پارامترهای اجرای بهینه سازی از رویه های زیر در مورد مساله مورد بررسی در نظر گرفته شده است [۱۴]:

۱- در مساله مورد بررسی متغیرها اعداد صحیح هستند و لذا دقت مقایسات نیز باید در حد تشخیص تفاوت اعداد صحیح باشد. لذا مقدار پیش فرض نرم افزار در دقت محاسبات که برابر 0.0001 است در نظر گرفته می شود.

۲- با توجه به ۱۲ متغیر مساله مورد بررسی در مرحله اول ۱۰۰۰ بار شبیه سازی انجام می گردد.

۳- براساس رویه پیشنهادی نرم افزار برای مدل های بزرگ رویه زیر انتخاب می گردد [۱۴]:

۱-۳. تعداد ۱۰۰۰ بار شبیه سازی و در هر بار یک بار تکرار انجام گردید. هدف از این مرحله بدست آوردن یک پاسخ اولیه مناسب و همچنین اصلاح حدود متغیرها است.

۲-۳. براساس خروجی مرحله قبل اصلاحات زیر در مدل ایجاد گردید:

۱-۲-۳. بهترین پاسخ بدست آمده برای متغیرها به عنوان مقادیر پیشنهادی متغیرها در نظر گرفته شد.

۲-۳. تعداد تکرار در هر بار شبیه سازی به ۱۰ بار افزایش یافت.

۳-۲-۳. براساس تغییرات متغیرها در پاسخ هایی با حداکثر ۵۰٪ اختلاف با بهترین مقدار حدود پایین و بالای متغیرها اصلاح گردید.

پارامترهای تعریف شده تابع هدف مساله به صورت زیر نمایش داده خواهد شد.

Total cost =

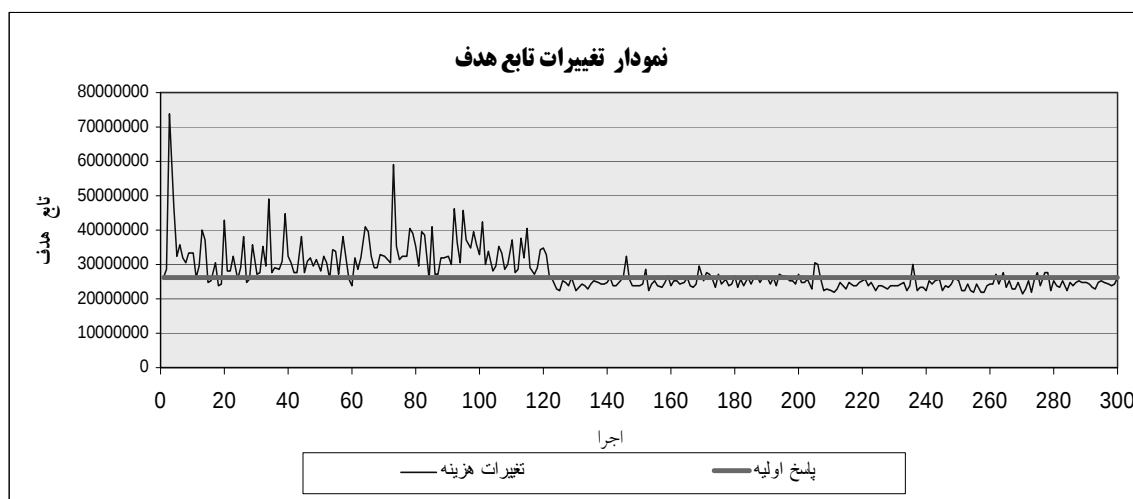
$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^4 \text{time_backlog_ti} * C_time_backlog_ti * pq(i,1) + \\ & \sum_{i=1}^4 \text{time_order_Ti} * C_time_order_Ti * pq(i,1) + \\ & \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 NQ(s_{jti}) * C_s_{jti} + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 NQ(p_{ij}) * C_p_{ij} * pq(i,1) \\ & + \sum_{i=1}^4 NQ(R_{awi}) * C_R_{awi} + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \text{time_fj_ti} * C_time_fj_ti * pq(i,1) + \\ & \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 NQ(s_{jti}) * C_s_{jti} + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 NQ(p_{ij}) * C_p_{ij} * pq(i,1) \\ & + \sum_{i=1}^4 NQ(R_{awi}) * C_R_{awi} + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \text{time_fj_ti} * C_time_fj_ti * pq(i,1) + \\ & \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \text{time_fj_ti} * C_time_fj_ti * pq(i,1) + \\ & \sum_{i=1}^4 \text{time_Ri} * C_time_f1_ti * pq(i,1) + \\ & \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \text{time_fj_ti} * C_time_fj_ti * pq(i,1) + \\ & \sum_{i=1}^4 \text{time_Ri} * C_time_f1_ti * pq(i,1) + \\ & \sum_{i=1}^4 (D_{max}(NQ_Release\ Kart\ and\ Product\ i)) * \\ & (C_{max_time_final\ product_ti}) * PQ(i,1) + \\ & \sum_{i=1}^4 \text{time_final\ product_ti} * C_time_final\ product_ti * pq(i,1) \\ & + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^3 NQ(t_{i_Rj}) * C_t_{i_Rj} + NQ(t_{i_R4}) * \\ & (C_t_{i_R4} + CV_t_{i_R4} * PQ(i,1)) + \\ & \sum_{i=1}^4 D_{max}(NQ_Release\ Kart\ and\ Raw\ i) * \\ & (C_{max_time_f1_ti}) * PQ(i,1) \end{aligned}$$

۷-۲. تعیین استراتژی حل مساله

در مسائل بهینه سازی توسط الگوریتم های فراابتکاری، یکی از مهمترین مسائل بدست آوردن پاسخ عمومی و عدم اتفاق بهینه محلی است. به همین منظور از استراتژی های مختلفی برای حل مسائل استفاده می گردد. از متداول ترین استراتژی های حل، می توان به

۸. اجرای مدل بهینه‌سازی

براساس استراتژی تعیین شده در بخش پیشین مدل در دو مرحله اجرا گردید. نتایج اجرای مدل در مرحله دوم با ۳۰۰ بار اجرا مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به صورت نمودار ۱ بدست آمد.



نمودار ۱. نمایش رابطه هزینه با تعداد اجرای مدل

PQ_2	60	76.14	34.16	45%
PQ_3	50	48.45	9.69	20%
PQ_4	30	38.25	12.3	32%

براساس جدول ۳ مشاهده می‌شود که در بازه مشخص شده، میانگین تابع هدف برابر $2.41E+07$ و انحراف معیار آن برابر $1.05E+06$ است. با توجه به بازه مشخص شده ۲۵۱ پاسخ بدست آمده در محدوده بررسی قرار می‌گیرد که معادل ۸۳٪ از پاسخ‌های بررسی شده است. همچنین براساس نتایج جدول ۳ مقادیر میانگین متغیرها در اغلب موارد نزدیک به مقدار متغیر در بهترین پاسخ است که این امر نشان دهنده جستجوی پاسخ‌ها در اطراف بهترین پاسخ بدست آمده است. براساس جدول ۳ در بازه‌های تعیین شده برای متغیرها، ضریب تغییر پذیری (انحراف معیار مقادیر بررسی شده نسبت به میانگین این مقادیر) مشابه است که این امر به معنی متناسب بودن بازه تعیین شده برای متغیرها است. به منظور بررسی اثر تغییر متغیرها بر روی بهترین پاسخ بدست آمده مقدار تابع هدف برای هر یک از متغیرهای حالت بهترین مقدار با ۲۰٪ افزایش و کاهش در مقدار متغیرها، محاسبه گردید. براین اساس نمودار ۲ که نشان دهنده میزان تغییر تابع هدف با ۲۰٪ تغییر متغیرها در بهترین حالت است رسم شده است.

با توجه به نمودار ۲، با تغییر ۲۰٪ در مقدار متغیرها، در تمامی موارد مقدار تابع هدف کمتر از ۲۰٪ نسبت به بهترین مقدار تغییر می‌نماید که این امر نشان دهنده توانمندی تابع هدف نسبت به تغییر هر یک از متغیرهای تعریف شده است.

۵-۳-۵. تحلیل حساسیت نتایج

در بخش پیشین با محدود نمودن بازه متغیرها و همچنین تعیین مقدار متغیرها در شروع حل، سعی شد تا پاسخ‌هایی بهتر بدست آید. در این بخش نتایج بدست آمده از اجرای مدل با تنظیمات فوق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بدین منظور، ابتدا می‌بایست میزان درصد اختلاف پاسخ اجراهایی که مورد تحلیل حساسیت قرار می‌گیرند با بهترین جواب مشخص شود. در مساله مورد بررسی میزان اختلاف ۵۰٪ در نظر گرفته می‌شود که این به معنی در نظر گرفتن اجراهایی است که پاسخ تابع هدف آنها حداکثر ۵۰٪ با بهترین جواب پیدا شده تفاوت دارد. براساس درصد مشخص شده نتایج شبیه‌سازی به شرح جدول ۳ است:

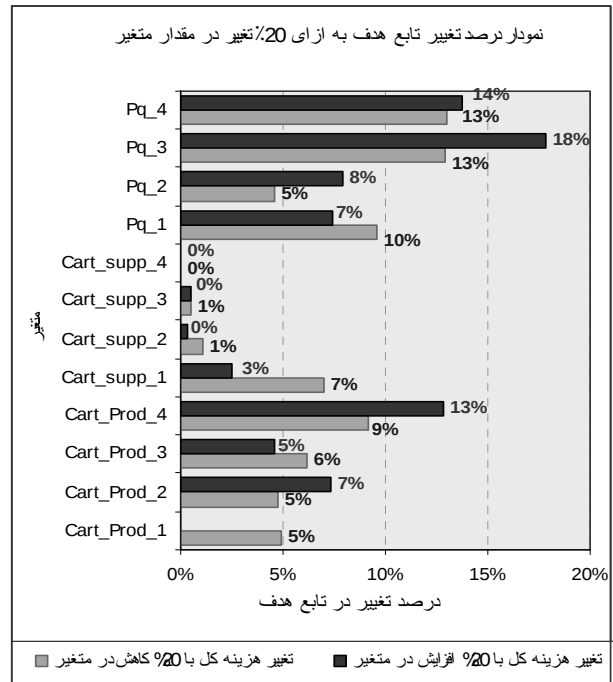
جدول ۳. تحلیل نتایج بهینه‌سازی مساله مورد بررسی

نام متغیر / تابع هدف	بهترین پاسخ	متوسط	انحراف معیار	ضریب تغییرپذیری
obj	2.16E+0	2.41E+0	1.05E+0	-
cart_prod	12	14.23	6.01	42%
cart_prod	4	4	1.54	39%
cart_prod	9	10.7	5	47%
cart_prod	6	7.25	2.91	40%
cart_supp	10	8.29	3.25	39%
cart_supp	4	4.06	1.91	47%
cart_supp	10	9.75	4.84	50%
cart_supp	2	2.24	0.74	33%
PQ_1	40	45.06	21.58	48%

- بررسی انواع ساختارهای زنجیره تامین مانند مونتاژی و انطباق شرایط CONWIP با ساختارهای فوق

مراجع

- [1] Strader, T.J., Lin, F., & Shaw, M.J., "Simulation of Order Fulfillment in Divergent Assembly Supply Chains". Journal of Artificial Societies and Social Simulation, Vol. 1, No. 2, 1998. <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/1/2/5.html>.
- [2] Spearman, M.L., Woodruff, D.L., & Hopp, W.J., "Conwip, a Pull Alternative to Kanban". INT.J.PROD.RES., Vol. 28, NO.5, 1990, PP. 879-894.
- [3] Herer, Y.T., & Masin, M., "Mathematical Programming Formulation of CONWIP Based Production Lines; and Relationships to MRP". International Journal of Production Research, Vol. 35, NO.4, 1997, PP. 1067-1076.
- [4] Marek, R.P., Elkins, D.A., & Smith, D.R., "Practical Introduction to Simulation Optimization", Winter Simulation Conference, 1999, PP. 921-929.
- [5] Ryan, S.M., Baynat, B., & Choobineh, F.F., "Determining Inventory Levels in a CONWIP Controlled Job Shop". IIE Transactions, Vol. 32, 2000, PP. 105-114.
- [6] Zhang, W., & Chen, M.Y., "A Mathematical Programming Model For Production Planning Using CONWIP", int. j. prod. res., Vol. 39, No. 12, 2001, PP. 2723-2734.
- [7] Ryan, S.M., & Choobineh, F.F., "Total WIP and WIP Mix For a CONWIP Controlled Job Shop". IIE Transactions, Vol. 35, 2003, PP. 405-418.
- [8] Wang, S., & Sarker, B.R., "An Assembly-Type Supply Chain System Controlled by Kanbans Under a Just-in-Time Delivery Policy", European Journal of Operational Research, Vol. 162, 2005, Issue 1, PP. 153-172.
- [9] Ryan, S.M., & Vorasayan, J., "Allocating Work in Process in a Multiple-Product CONWIP System With Lost Sales", Int. j. prod. res., Vol. 43, No. 2, 2005, PP. 223-246.
- [10] Ovalle, O.R., & Marquez, A.C., "Exploring the Utilization of a CONWIP System For Supply Chain Management A Comparison With Fully Integrated Supply Chains", Int. J. Production Economics, 2003, PP. 195-215.
- [11] Alper Sen, "Supply Chain Integration", 2003, <http://www.ie.bilkent.edu.tr/~ie572/Notes/Integration.ppt>.
- [12] Carson, Y., & Maria, A., "Simulation Optimization: Methods and Applications", Winter Simulation Conference, 1997, PP. 1693-1698.
- [13] Bowden, R.O., & Hall, J.D., "Simulation Optimization Research and Development", Winter Simulation Conference, 1998, PP. 1693-1698.
- [14] OptQuest for Arena User's Guide, Publication Number: ARENAO-UM001C-EN P, 2004, <http://www.rockwellsoftware.com/assistance/arenasimulation/Documentation/Doc/ArenaOptQuestUser's Guide.pdf>.



نمودار ۲. درصد تغییر تابع هدف به ازای ۲۰٪ تغییر در مقدار متغیر

۱۰. جمع بندی و پیشنهاد تحقیقات آتی

یکی از زمینه‌هایی که امروزه مورد توجه فراوان قرار گرفته است، توسعه و انطباق روش‌های کنترل تولید و موجودی با فلسفه تولید بهنگام در سطح خطوط تولیدی و به منظور کنترل مناسب جریان مواد و محصولات در سطح زنجیره تامین است. به همین منظور در این مقاله با توجه به شرایط زنجیره تامین و همچنین فرضیات سیاست CONWIP، شرایط و نیازمندی‌های پیاده‌سازی این استراتژی در زنجیره‌تأمین بررسی شده است. سپس مدل شبیه‌سازی مساله در حالت چند محصولی طراحی گردیده و با استفاده از روش بهینه‌سازی شبیه‌سازی، مدل بهینه شده است. در انتها محوره‌های ذیل به منظور استفاده در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد:

- بهینه‌سازی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار OptQuest انجام شده است. به همین منظور لازم است برای ارزیابی پاسخ بدست آمده از دو جهت کیفیت پاسخ و زمان حل، مدل طراحی شده با سایر الگوریتم‌های فراابتکاری و یا سایر نرم‌افزارهای بهینه‌سازی حل و مقایسه گردد. به همین علت کد مدل شبیه‌سازی در ضمیمه آورده شده است که براساس آن می‌توان مدل شبیه‌سازی مساله حاضر را طراحی نمود.
- در این تحقیق سیاست CONWIP ساده مدل‌سازی گردید. در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌گردد ضمن بررسی سایر سیاست‌های کنترلی CONWIP مانند سیاست "کشش از گلوگاه" در زنجیره‌تأمین، نتایج حاصله با مدل حاضر مقایسه گردد.