فصلنامه اقتصاد و تجارت نوین، شماره‌های ۳۱ و ۳۲، زمستان ۱۳۹۱ و بهار ۱۳۹۲، صفحات ۱۴۵- ۱۶۳

کنترل پیشرفته لجستیک (پشتیبانی) سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین با هدف رضایت‌مندی مشتری

محمد میران بیگی *

دانشجوی دکتری مهندسی کنترل، قطب کنترل و پردازش هوشمند، دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران

بهزاد مشیری **

استاد مهندسی کنترل، قطب کنترل و پردازش هوشمند، دانشکدهٔ مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۶/۲۰

چکیده

در این مقاله، لجستیک(پشتیبانی) یک زنجیرهٔ تأمین شامل واحدهای تولید، انبار، توزیع و خرده‌فروشی با روش کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل به صورت متمرکز و سپس به روش پیش‌بینی غیرمتمرکز تحت تغییرات تقاضا، بهینه‌سازی و با پیش‌بینی متمرکز در عملکرد مقایسه شده است. کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل به عنوان یک ابزار کنترلی پیشرفته شامل دو بخش شناسایی مدل و بهینه‌سازی تابع هزینه در هر زمان نمونه برداری است. ساختار برخط کنترل پیش‌بینی، بهینه‌سازی مؤثر را در جهت حفظ موجودی ایمنی با کمترین هزینه عملیاتی ممکن می‌سازد. در نتیجه معیار رضایت‌مندی مشتری به خوبی برآورده می‌شود. مدل مورد استفاده در این مقاله، یک مدل تفاضلی یک‌طرفه از سمت تولید کننده به سمت خرده‌فروشی و دارای تأخیرهای انتقال است. با توجه به اینکه متغیرهای حالت سیستم همیشه در دسترس نیستند و سیستم دارای نامعینی است، از یک فیلتر کالمن نیز به عنوان تخمین‌زنندهٔ حالت استفاده شده است. در نهایت، کارایی روشهای به‌کارگرفته شده به کمک شبیه‌سازیها تحلیل می‌شود. در این شبیه‌سازیها، نگاه روبه جلو در ساختار برخط نیز بررسی می‌شود.

---

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: miranbeigi@ut.ac.ir

** پست الکترونیکی: moshiri@ut.ac.ir

واژه‌های کلیدی: پشتیبانی زنجیرهٔ تأمین، کنترل پیش‌بینی، تقاضا، رضایت‌مندی مشتری.

طبقه‌بندی JEL: M11, C61, L23, L90, R41.

۱. مقدمه

به دلیل رقابتی شدن تجارت و اقتصاد در دنیای امروز، شرکتها و کارخانجات مدرن باید به فکر کسب مزیت رقابتی بالاتر نسبت به یکدیگر باشند. یکی از راههای کسب این مزیت رقابتی به‌کارگیری سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین[۱] کارامد است. در یک سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین، همه جریانهای کالا و خدمات و اطلاعات مربوط به آنها در یک بسته شامل واحدهای تأمین مواد یا قطعات اولیه، تولید یا کارخانه، انبار، توزیع، خرده فروشی و درنهایت مشتری نهایی تحت نظارت قرار دارند. در گذشته به دلیل وسیع نبودن حوزهٔ تجارت و کوچک بودن صنایع، تصمیمات مدیریتی در زنجیرهٔ تأمین قائل به شخص مدیر بودند. اما امروزه به دلیل وجود پیچیدگی‌های مدیریتی در دنیایی که رقبا هرلحظه منتظر لغزش شما هستند تا مشتریهای بالفعل صنعت مشترک را از آن خود کنند، جای هیچ‌گونه اشتباه در تصمیمات وجود ندارد و مدیریت تولید و توزیع باید سامانه محور[۲] باشد و تحت مدلی از سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین کنترل شود. در سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین، هدف حفظ موجودی (ایمنی) با کمترین هزینهٔ عملیاتی دنبال می‌شود. در این باره، حالت بسیار ایده‌آل زمانی رخ می‌دهد که تحویل کالا یا خدمات به مشتری نهایی کاملاً به موقع باشد و در لحظه اتفاق بیفتد. در این صورت زمان تحویل کالا به مشتری صفر شده و رضایت‌مندی صددرصد حاصل می‌شود. اما در کل آنچه مهم است، کاهش و حفظ موجودی با کمترین میزان انتقال کالا (لجستیک) بین واحدها و بالاترین میزان عملکرد (رضایت‌مندی مشتری) مدنظر است. همچنین لجستیک در زنجیرهٔ تأمین نباید نسبت به نوسانات شدید تقاضا دارای تغییرات شدیدی شود و باید تا حدی هموار بماند.

در این مقاله از یک مدل تفاضلی زمان گسسته از سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین استفاده می‌شود که در آن تأخیرهای انتقال و سفارشهای برگشتی و فسخ شده در نظر گرفته شده است. مسئلهٔ لجستیک کارامد و حفظ موجودی برخط[۳] کالا با توجه به تغییرات مداوم تقاضا همیشه یک چالش سیستم‌های مدیریت زنجیرهٔ تأمین در کنار کاهش اثر شلاق چرمی[۴] است. در اینجا

---

[1] Supply Chain Management System
[2] Systematic
[3] Online
[4] Bullwhip Effect

از یک روش کنترل پیشرفته تحت عنوان کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل[1] استفاده می‌شود که ساختاری برخط دارد و تصمیمات در لحظه‌های زمانی نمونه‌برداری بروز می‌شوند. تحت این ساختار می‌توان اثرهای تغییر دایمی پارامترها و همچنین اثر بد شلاق چرمی تاحدی در اختیار گرفت. همچنین تحت چارچوب کنترل پیش‌بینی قیدها وارد مسئله شده و بهینه‌سازی تحت قیودی همچون ظرفیت انبارها انجام می‌شود. به دلیل مقیاس بزرگ بودن زنجیرهٔ تأمین، در این مقاله دو روش کنترلی متمرکز و غیرمتمرکز در کنار هم استفاده و مقایسه می‌شوند. همچنین به دلیل وجود نامعینی‌ها و امکان در دسترس نبودن پارامترها، از تخمین زننده فیلتر کالمن[2] استفاده می‌شود.

در بخش بعدی این مقاله به مرور ادبیات موضوع مقاله در باب کنترل سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین پرداخته می‌شود. در بخش سوم، روش کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل، روش بکارگیری و مزایای آن به تفصیل تشریح می‌شوند. بخش چهارم، به مدل سیستم توزیع لجستیکی همان سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین می‌پردازد. در بخش پنجم، لزوم به‌کارگیری کنترل پیش‌بینی برای سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین، تخمین‌زن فیلتر کالمن و همچنین کاربردهای متمرکز و غیرمتمرکز آن مطرح می‌شوند. بخش ششم نیز نتایج شبیه‌سازیهای تحت کنترل متمرکز و غیرمتمرکز و نگاه رو به جلو[3] و تحت مقادیر متنوع تقاضا (مدل تقاضا) را در بر می‌گیرد. و در نهایت، در بارهٔ به‌کارگیری روشهای مذکور و مزایای حاصل در کارایی مدیریت زنجیرهٔ تأمین، نتیجه‌گیری صورت می‌گیرد.

۲. ادبیات موضوع

در سه دههٔ اخیر پژوهشهای متعددی در باب مدلسازی و کنترل سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین، بهبود عملکرد و هماهنگی کارامد واحدهای آنکه بررسی تفصیلی این مطالعات از سوی ساریمویس و همکاران[4] (۲۰۰۴) و میران‌بیگی و جلالی (۱۳۹۰) انجام شده است. کنترل کلاسیک برای این سیستم توسط تویل و همکاران[5] (۱۹۹۷)، ویندال و همکاران[6] (۲۰۰۰)، دژونکیر و همکاران[7] (۲۰۰۴) و گراباشتروم و همکاران[8] (۲۰۰۶) طراحی شده است. با توجه به تغییرپذیری مدام تقاضا

---

[1] Model Predictive Control (MPC)
[2] Kalman Filter
[3] Look a head
[4] Sarimveis et al.
[5] Towil et al.
[6] Wiendahl et al.
[7] Dejonckheere et al.
[8] Grubbstrom et al.

تقاضا در اکثر زنجیره‌های تأمین و مزایای کنترلهای تطبیقی همانند کنترل پیش‌بینی در به‌روز شدن همراه با تنوع تقاضای زنجیره و اعمال کارامد قیدها، کنترل‌کننده‌های کلاسیک خالص ناکارامد هستند و از کنترل کننده‌های پیشرفته استفاده می‌شود. کاپسیوتیس و همکاران (۱۹۹۲) اولین بار کنترل کنندهٔ پیش‌بینی مبتنی بر مدل را در مورد یک زنجیرهٔ تک محصولی به‌کار گرفتند. زافستاس و همکاران[۱] (۱۹۹۷)، انحراف از نقطه تنظیم مقادیر موجودی را توسط یک تابع هزینه و در حل یک مسئله کنترل کمینه کردند. وانگ و همکاران[۲] (۲۰۰۵) نیز با کمک تخمین حالت، عملکرد مقاومتی سیستم را افزایش دادند. چوپرا[۳] (۲۰۰۴) و سابرامانیان و همکاران[۴] (۲۰۱۲) در پژوهشهای جداگانه‌ای از جدول زمان بندی بهره[۵] استفاده کردند.

یانگ و همکاران[۶] (۲۰۱۱) مسئلهٔ هماهنگی و کنترل را با محور به‌روزرسانی پیش‌بینی‌ها و اندازه زمان تحویل ارائه دادند. گارسیا و همکاران[۷] (۲۰۱۲) از روش کنترل مدل داخلی تطبیقی استفاده کردند. همچنین چونگ لی[۸] (۲۰۱۲) مسئله چالشی اثر شلاق چرمی را به کمک اطلاعات اطلاعات مقید کنترل کرد. به دلیل ماهیت مقیاس بزرگ سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین، به‌کارگیری روشهای کنترل غیرمتمرکز نتایج بهتری را از لحاظ کارایی عملی و کاهش ریسک (خطر) خطا حاصل می‌کنند. البته در برخی پژوهشها همچون کار سفرلیس و همکاران[۹] در سال ۲۰۰۴، از کنترل‌کننده‌های خطی غیرمتمرکز در یک سطح پایین از ساختار متمرکز کنترل استفاده شده است که خود پیچیدگی محاسباتی را بالا می‌برد و همچنین خاصیت برخط محلی ندارد.

همان‌گونه که مشخص است مدلهای به‌کارگرفته شده در این پژوهشها تعمیم یافته نیستند و نیاز به یک مدل کلی برای در نظرگرفتن تمامی تأخیرهای موجود، سفارشهای برگشتی و تنوع محصولات احساس می‌شود. بدین منظور در کار پیش‌رو از یک مدل جامع در این زمینه‌ها استفاده می‌شود. در اکثر روشهای یاد شده، اساس کنترل بر حفظ موجودی به کمک مقادیر در دسترس متغیرهاست، اما در روشی که ما به‌کار خواهیم برد، کمینه کردن مقادیر لجستیکی جریان یافته میان گره‌های زنجیرهٔ تأمین و مقاوم کردن آن در ساختار غیرمتمرکز در کنار تخمین متغیرها، مهمترین چالش

---

[1] Tzafestas et al.
[2] Wang et al.
[3] Chopra
[4] Subramanian et al.
[5] Gain Scheduling
[6] Yang et al.
[7] Garcia et al.
[8] Chong Li
[9] Seferlis et al.

است. همچنین اثر نگاه رو به جلو در پیش‌بینی‌های محلی و نهایی بررسی می‌شود.

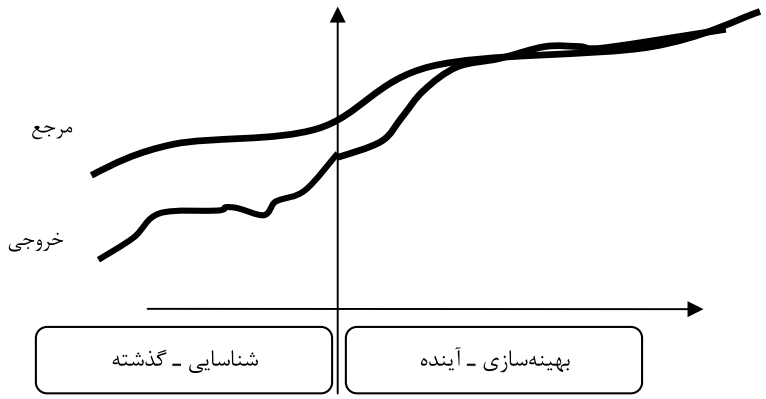
۳. روش تحقیق

۳- ۱. کنترل پیش‌بینی مبتنی بر مدل

کنترل پیش‌بینی از جهت کارایی در حل سیستم‌های چندمتغیره، بررسی رفتار سیستم در افق زمانی آینده و در نظرگرفتن محدودیتهای ورودیها، حالتها و خروجیهای سیستم در محاسبات کنترلی، به‌کارگیری مدلهای اغتشاش برای درنظرگرفتن نامعینی تقاضا و پاسخ مناسب به تغییرات تقاضا، یک روش مناسب برای کنترل سیستم‌های مدیریت زنجیرهٔ تأمین به نظر می‌رسد.

بر این اساس در این کنترل کننده‌ها فقط اولین اِلمان دنباله کنترلی در هر لحظه کنترلی به‌کار گرفته می‌شود و این رویه برای تمام لحظات کنترلی نمونه‌برداری تکرار می‌شود. روش به‌کارگیری کنترل پیش‌بینی و کاربردهای آن به خوبی از سوی کاماچو و بوردونس[1] (۲۰۰۴) و آگاچی و همکاران[2] (۲۰۰۶) تحلیل شده است. طبق نمودار ۱، روش کنترل پیش‌بینی شامل دو دو بخش شناسایی رفتار و مدل سیستم گذشته و بهینه‌سازی مقید روی این مدل است.

نمودار ۱. رفتار سیستم در کنترل پیش‌بینی



به نوعی کنترل‌کننده‌های پیش‌بینی در مدل متمرکز پیاده‌سازی می‌شوند. در این حالت سیستم کلی مدل شده و همه ورودیهای کنترلی در یک مسئله بهینه‌سازی محاسبه می‌شوند. در کاربردهای مقیاس بزرگ گاهی ضروری است که نظریه‌های کنترلی غیرمتمرکز یا توزیع شده باشند، بدین معنا که ورودیهای کنترل محلی با استفاده از اندازه‌گیریهای محلی و مدلهای مرتبه

---

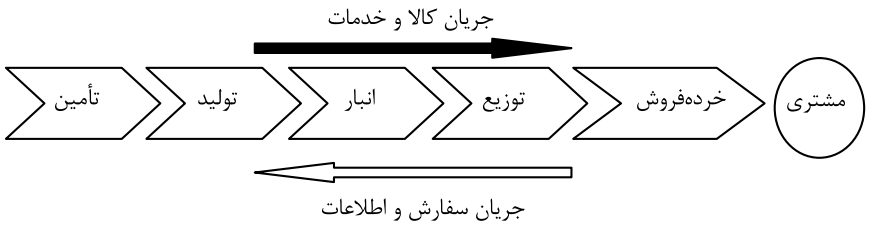
[1] Camacho and Bordons
[2] Agachi et al.

کاهش یافته از دینامیک‌های محلی محاسبه می‌شوند. مزیت اصلی کنترل غیرمتمرکز کاهش بار محاسباتی و پیچیدگی محاسباتی است، چرا که برای سیستم‌های مقیاس بزرگ زنجیرهٔ تأمین با کنترل پیش‌بینی متمرکز، محاسبهٔ برخط ورودی ابعاد بالا بسیار پیچیده و نامناسب، غیرعملی و غیرانعطاف‌پذیر به نظر می‌رسد. از آنجا که در یک سیستم مدیریت زنجیره تأمین، سرعت تغییر برای میزان انتقال داده شده محصول از طریق کانالهای مرتبط بین گره‌ها یک چالش به شمار می‌آید و درصدد کم‌کردن آن هستیم، می‌توان از روشهایی همچون استفاده از یک جریمه مرتبط در تابعی معیار، و یا دیگر روشهای مقاوم‌سازی، مقاومت سیستم را در این زمینه بالابرد که این خود باعث کند شدن سیستم می‌شود.

۳-۲. مدل سیستم توزیع (زنجیرهٔ تأمین)

بر مبنای پژوهش سفرلیس و همکاران[1] در سال ۲۰۰۴، در اینجا یک مدل تفاضلی زمان گسسته از یک سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین تک محصولی مطابق شکل ۱ ارائه شده است.

شکل ۱. سیستم زنجیرهٔ تأمین



در این سیستم هر بخش اعم از تأمین‌کننده و تولیدکننده و انبار و توزیع کننده و خرده فروش شامل چندین گره است که هر گره به‌وسیلهٔ یک مجموعه از گره‌های بالادستی تغذیه می‌شوند و یک مجموعه از گره‌های پایین دستی را تغذیه می‌کنند. هر کدام از این گره‌ها یک سطح موجودی کالای تنظیم‌شده دارند که در کنترل این سیستم باید برآورده شوند و در برابر هرگونه دستور مشتری، این سطح موجودی کالا باید حفظ شود.

در این مقاله پویاییهای مراکز تأمین‌کننده درنظر گرفته نمی‌شود و مراکز تولید P، مخازن W، مراکز توزیع D، خرده فروش‌های R، گره‌های سیستم را تشکیل می‌دهند. برای هر گره k، یک مجموعه از گره‌های بالادستی (قبلی) به‌وسیلهٔ k' مشخص می‌شوند که می‌تواند گره k را تأمین کند. همچنین یک دسته از گره‌های پایین دستی (بعدی) با k'' که می‌تواند

[1] Seferlis et al.

به‌وسیلهٔ k تأمین شود، مشخص می‌شوند. همه جفتهای $(k^{'},k)$ و یا $(k,k^{"})$، مسیرهای مجاز داخل زنجیره را تشکیل می‌دهند. بر این اساس دو دسته رابطهٔ زیر مدل فضای حالت سیستم را ایجاد می‌کنند:

$$y_k(t)=y_k(t-1)+\sum_{k'}x_{k',k}(t-1-L_{k',k})-\sum_{k"}x_{k,k"}(t-1),\quad \forall k\in\{W,D\},\quad t\in T, \tag{۱}$$

$$\begin{aligned} &y_k(t)=y_k(t-1)+\sum_{k'}x_{k',k}(t-1-L_{k',k})-d_k(t-1),\\ &BO_k(t)=BO_k(t-1)+R_k(t-1)-d_k(t-1)-LO_k(t-1),\\ &\forall k\in\{R\},\quad t\in T \end{aligned} \tag{۲}$$

y_k موجودی کالا در گره k $x_{k,k'}$ میزان محصول منتقل شده از طریق کانال $(k^{'},k)$، $L_{k',k}$ زمان تأخیر انتقال برای کانال $(k^{'},k)$، $BO_k(t)$ سفارش برگشتی، $d_k(t)$ تحویل واقعی محصول، $R_k(t)$ تقاضا در گره خرده‌فروش kام و دوره زمانی t و $LO_k(t)$ مقدار فسخ شده سفارشهای برگشتی است.

۳-۳. روشهای کنترل پیش‌بینی متمرکز و کنترل پیش‌بینی غیرمتمرکز متوالی

بر این اساس که تقاضای سیستم می‌تواند دائماً در حال تغییر باشد و از این رو به تصمیمات برخط نیاز دارد و مزایای روش کنترل پیش‌بینی در تصمیم‌سازی مقید برخط و کاهش پیچیدگی محاسباتی برای سیستم‌های چندمتغیره، در این مقاله از روش کنترل پیش‌بینی برای نیل به اهداف اصلی کنترل زنجیره تأمین یعنی بالا بردن رضایت‌مندی مشتری در عین کاهش هزینه‌های انبار و لجستیک استفاده می‌شود. در نتیجه از تابعی معیار مربعی متمرکز

$$\begin{aligned} J_{Centralized}=&\sum_{t}^{t+T_h}\sum_{k\in\{W,D,R\}}\left\{w_{y,k}(y_k(t)-y_{s,k}(t))^2\right\}\\ &+\left\{w_{x,k',k}(x_{k',k}(t))^2\right\}\\ &+\left\{w_{\Delta x,k',k}(x_{k',k}(t)-x_{k',k}(t-1))^2\right\}\\ &+\sum_{t}^{t+T_h}\sum_{k\in\{R\}}\left\{w_{BO,k}(BO_k(t))^2\right\}. \end{aligned} \tag{۳}$$

که در آن T_h بیانگر افقهای پیش‌بینی و کنترل (افق غلتان)، $y_{s,k}(t)$ بیانگر نقاط تنظیم موجودی، $w_{y,k}$ بیانگر وزنهای موجودی در هر محصول واحد، $w_{x,k',k}$ بیانگر وزن هزینهٔ انتقال

در هر محصول واحد برای کانال $(k^{'},k)$، $w_{BO,k}$ بیانگر وزن جریمه اعمال شده روی تقاضاهای برآورده نشده، وزنهای $w_{\Delta x,k^{'},k}$ نیز بیانگر وزن بخش جریمه نرخ ورودی است، استفاده می‌شود. خط‌مشی جریمه نرخ ورودی، حذف‌کردن عملهای کنترلی تند و ناگهانی است و از شبکه در برابر اشباع و نوسانانهای نامطلوب محافظت می‌کند. در سیستم‌های مدیریت زنجیره تأمین مقیاس بزرگ، از جهات بسیاری مثل بار محاسباتی زیاد و پیچیدگی محاسباتی به‌کارگیری کنترل‌کننده‌های متمرکز، مشکلات تعمیر و نگه‌داری آنها به دلیل ابعاد بالا و خطر بالا از خطا به علت طبیعت متمرکز آنها، غالباً ضروری است که نظریه‌های کنترلی غیرمتمرکز یا توزیع شده باشند. درنتیجه بار محاسباتی کاهش می‌یابد. و هر کنترل‌کننده با دیگر کنترل‌کننده‌ها برای حاصل شدن یک حل خوب، مرتبط شده و همکاری می‌کند و تخمینهای محلی غیرمتمرکز نیز ساده‌تر و دقیق‌تر هستند. رابطه ۴، سه کنترل‌کنندهٔ محلی را برای پیاده‌سازی غیرمتمرکز روی واحدهای انبار و توزیع و خرده‌فروشی به‌صورت زیر معرفی می‌کند:

$$
\begin{aligned}
&J^{m}_{Decentrali\ zed} = (J_{Centralize\ d} \mid k \in m, \quad m \in \{W, D, R\}) \\
&(Desc. \quad k \in W : local \quad controller \quad of \quad W : J^{W}_{Decentrali\ zed} \\
&\qquad\quad k \in D : local \quad controller \quad of \quad D : J^{D}_{Decentrali\ zed} \\
&\qquad\quad k \in R : local \quad controller \quad of \quad R : J^{R}_{Decentrali\ zed})
\end{aligned}
\tag{۴}
$$

در نتیجه مسئلهٔ کنترل پیش‌بینی متمرکز به صورت دسته رابطه ۵ و مسئله کنترل پیش‌بینی غیرمتمرکز به صورت دسته رابطه ۶ نوشته می‌شوند.

$$
\begin{aligned}
&\underset{x_{k^{'},k}}{MIN}: J_{Centralized}(y_k, BO_k, x_{k^{'},k}) \\
&where: y_k(t) = y_k(t-1) + \sum_{k^{'}} x_{k^{'},k}(t-1-L_{k^{'},k}) - \sum_{k^{''}} x_{k,k^{''}}(t-1), \forall k \in \{W, D\} \\
&\begin{cases} y_k(t) = y_k(t-1) + \sum_{k^{'}} x_{k^{'},k}(t-1-L_{k^{'},k}) - d_k(t-1), \\ BO_k(t) = BO_k(t-1) + R_k(t-1) - d_k(t-1) - LO_k(t-1) \end{cases} \quad \forall k \in \{R\}, \\
&subject\ \ to: \begin{Bmatrix} 0 \le y_k \le y_{k\max}, \forall k \in \{W, D, R\} \\ 0 \le BO_k \le BO_{k\max}, \forall k \in \{R\} \\ 0 \le x_{k^{'},k} \le x_{k^{'},k\max}, \forall k \in \{W, D, R\} \end{Bmatrix}.
\end{aligned}
\tag{۵}
$$

هدف از طراحی این کنترل‌کننده‌ها، پاسخ مناسب سیستم به تغییرات تقاضای مشتری و به عبارتی تنظیم سطوح موجودی رده‌ها و کاهش سفارشهای برآورده نشده و برگشتی رده‌ها است. بر این اساس، ابتدا میانگین اولین درایه کنترل پیش‌بینی گره‌های خرده‌فروش به عنوان

اغتشاش اندازه‌گیری‌شده به گره‌های توزیع فرستاده می‌شود و در زمانهای نمونه‌برداری بعدی، این روند برای گره‌های توزیع و انبار تکرار می‌شود.

(۶)

$$\underset{x_{k',k}}{MIN}: J^{m}_{Decentralized} = (J_{Centralized} \mid k \in m, \quad m \in \{W, D, R\})$$

$$where: y_k(t) = y_k(t-1) + \sum_{k'} x_{k',k}(t-1-L_{k',k}) - \sum_{k''} x_{k,k''}(t-1), \qquad \forall k \in \{W, D\}, \qquad t \in T,$$

$$\begin{cases} y_k(t) = y_k(t-1) + \sum_{k'} x_{k',k}(t-1-L_{k',k}) - d_k(t-1), \\ BO_k(t) = BO_k(t-1) + R_k(t-1) - d_k(t-1) - LO_k(t-1) \end{cases} \qquad \forall k \in \{R\}, \qquad t \in T,$$

$$subject \ \ to: \begin{Bmatrix} 0 \le y_k \le y_{k\max}, \forall k \in \{W, D, R\} \\ 0 \le BO_k \le BO_{k\max}, \forall k \in \{R\} \\ 0 \le x_{k',k} \le x_{k',k\max}, \forall k \in \{W, D, R\} \end{Bmatrix}.$$

همچنین با فرض اینکه همهٔ متغیرهای حالت سیستم دینامیکی (میزان موجودی هر گره و میزان سفارشهای برگشتی) در تمام زمانها در دسترس نیستند و در سیستم نامعینی وجود دارد، می‌توان از یک فیلتر کالمن مرتبه کامل به شکل زیر استفاده کرد:

(۷)

$$\hat{y}_k(t) = E(y_k(t)) = \hat{y}_k(t-1) + \sum_{k'} x_{k',k}(t-1-L_{k',k}) - \sum_{k''} x_{k,k''}(t-1) + \omega(t-1) + \upsilon(t-1),$$

$$\forall k \in \{W, D\}, \qquad t \in T,$$

$$\hat{y}_k(t) = E(\hat{y}_k(t)) = \hat{y}_k(t-1) + \sum_{k'} x_{k',k}(t-1-L_{k',k}) - d_k(t-1) + \omega(t-1) + \upsilon(t-1),$$

$$\hat{BO}_k(t) = E(BO_k(t)) = \hat{BO}_k(t-1) + R_k(t-1) - d_k(t-1) - LO_k(t-1) + \omega(t-1) + \upsilon(t-1),$$

$$\forall k \in \{R\}, \qquad t \in T,$$

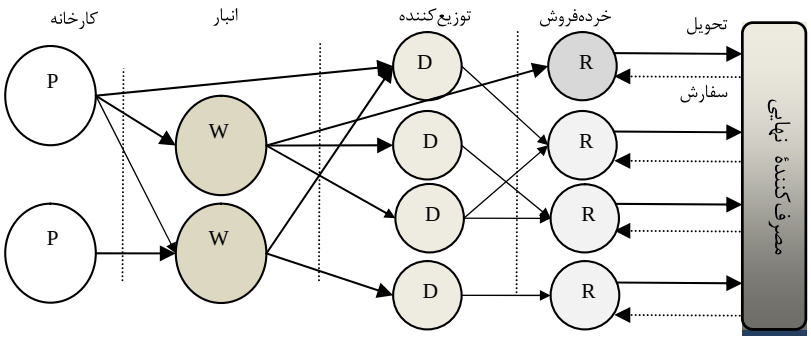
E بیانگر امید ریاضی ω بیانگر دنبالهٔ نویز اندازه‌گیری و υ بیانگر دنبالهٔ نویز فرآیند، نویزهای سفید با میانگین صفر و کواریانس معین هستند.

۴. نتایج شبیه‌سازی

در این مقاله برخلاف مطالعات گذشته از طرفی، یک زنجیرهٔ تأمین جامع شامل سفارشهای برگشتی و فسخ شده و زمانهای تأخیر در نظر گرفته می‌شود و از سوی دیگر، ارتباطات بین واحدهای زنجیره، ناکامل (تمام واحدهای زنجیره در تناظر یک به یک با هم نبوده و ممکن است واحدهای همسایه با هم مرتبط نشوند) هستند. همچنین تمام متغیرهای حالت توسط فیلتر کالمن تخمین زده می‌شوند. یک سیستم زنجیره تأمین چهار رده‌ای مقیاس بزرگ مطابق

شکل زیر برای شبیه‌سازی استفاده شده است که در آن تنها سفارش توسط خرده‌فروش از مصرف‌کننده نهایی گرفته می‌شود و میزان سفارشهای برگشتی فقط در گره خرده‌فروش مدنظر است. افق کنترل و افق پیش‌بینی را برابر هم و معادل ۲۰ واحد زمانی و طول هر دوره زمانی را برابر یک فرض می‌شود. مطابق شکل ۲، زنجیره تأمین مدنظر شامل دو گره تولید، دو گره ذخیره، چهار مرکز توزیع، چهار گره خرده‌فروش است. نقاط تنظیم موجودی، ظرفیتهای ذخیرهٔ حداکثر در هر گره و مقدار حداکثر مقادیر لجستیکی و مقدار حداکثر سفارش برگشتی و اطلاعات هزینهٔ انتقال برای هر کانال تأمین‌کننده در جدول ۱ آمده‌اند.

شکل ۲. سیستم زنجیرهٔ تأمین چهار رده‌ای

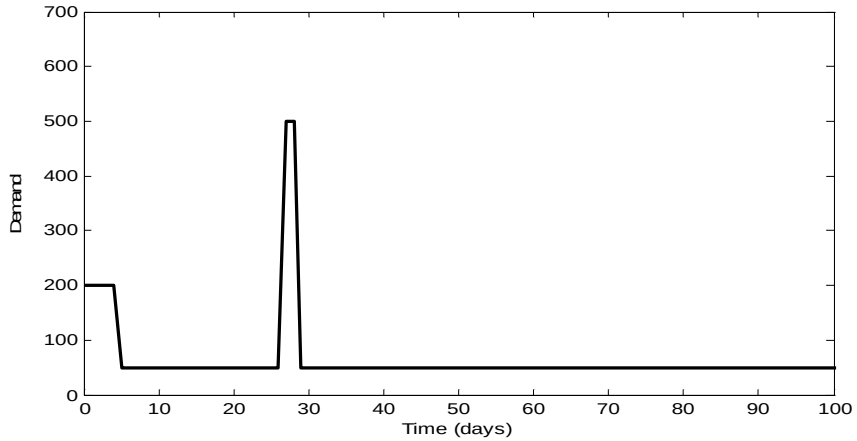


جدول ۱. داده‌های زنجیرهٔ تأمین

	مخزن	مرکز توزیع	خرده فروش
موجودی حداکثر	۱۳۰۰۰	۸۰۰۰	۸۰۰۰
نقطه تنظیم	۵۰۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰
لجستیک حداکثر (ورودی)	۱۰۰۰۰	۷۰۰۰	۵۰۰۰
سفارش برگشتی حداکثر	—	—	۲۰۰
هزینهٔ انتقال	تولید به انبار ۰/۲	انبار به توزیع ۰/۲	توزیع به خرده‌فروش ۰/۰۵
وزنهای موجودی	۰/۲	۰/۲	۰/۲
وزنهای سفارش برگشتی	—	—	۱
تأخیرها	۵	۳	۲

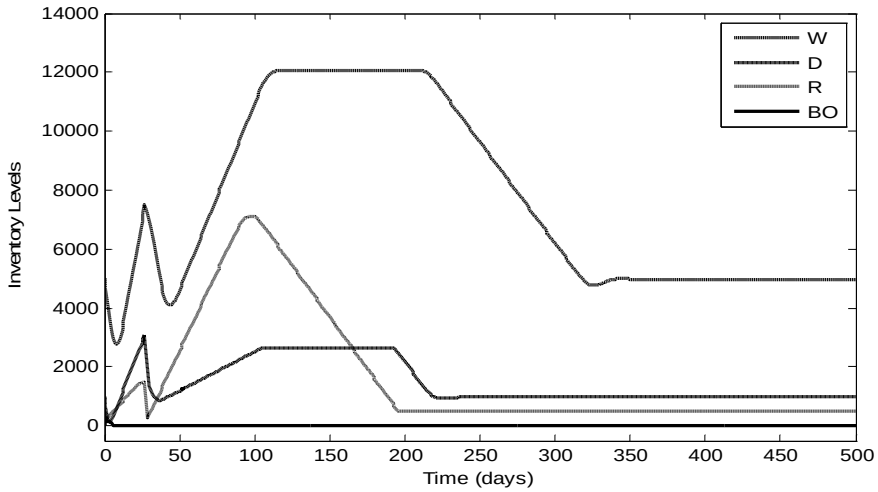
$LO_k(t)$ برابر با مقدار ۲۰ واحد، مقادیر اولیهٔ موجودی معادل نقطهٔ تنظیم نهایی موجودی در هر گره و تقاضا نیز مطابق نمودار ۲ در نظر گرفته می‌شوند.

نمودار ۲. تقاضای متغیر



در ابتدا اثر نگاه رو به جلو به کمک شبیه‌سازیهای نمودارهای ۳ و ۴ با ساختار متمرکز کنترل پیش‌بینی و بدون استفاده از جریمه نرخ ورودی بررسی می‌شود.

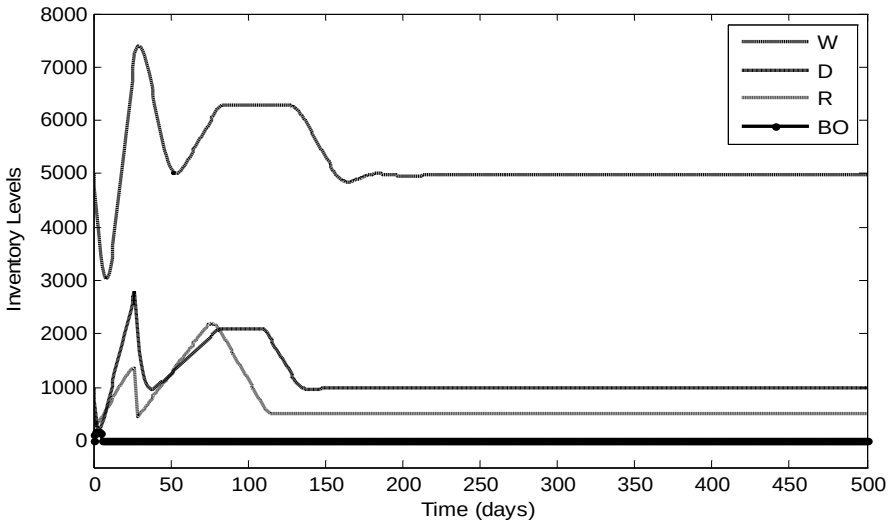
نمودار ۳. کنترل پیش‌بینی متمرکز سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین بدون نگاه رو به جلو در مقابل تقاضای متغیر



با روش نگاه روبه جلو، در هر زمان نمونه‌برداری، مقادیر مرجع و اغتشاش‌های اندازه‌گیری پیش‌بینی شده برای تمام طول افق (یا برابر با پیش‌بینی مقدار آنها تا چند گام جلوتر) در نظرگرفته می‌شوند و به سبب وجود پیش‌بینی مناسب از تقاضای مشتری، سطوح موجودی کالا و سفارش کالا، پاسخ سیستم بهبود یافته و اثر بخش هزینهٔ نرخ مقادیر لجستیکی تکمیل خواهد شد.

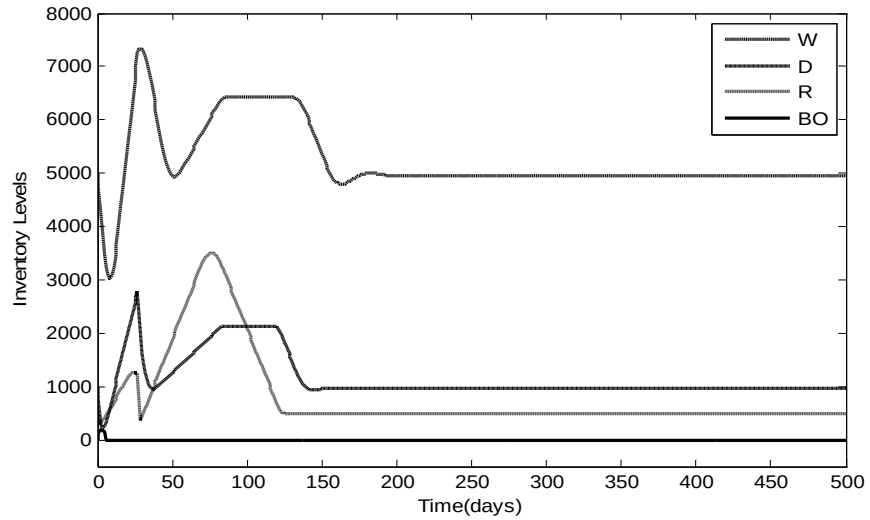
نمودارهای ۴ و ۵ نتیجه شبیه‌سازی با روشهای کنترل پیش‌بینی متمرکز و غیرمتمرکز را نشان می‌دهند که در آنها از نگاه رو به جلو هم استفاده شده است.

نمودار ۴. کنترل پیش‌بینی متمرکز سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین همراه با نگاه رو به جلو در مقابل تقاضای متغیر

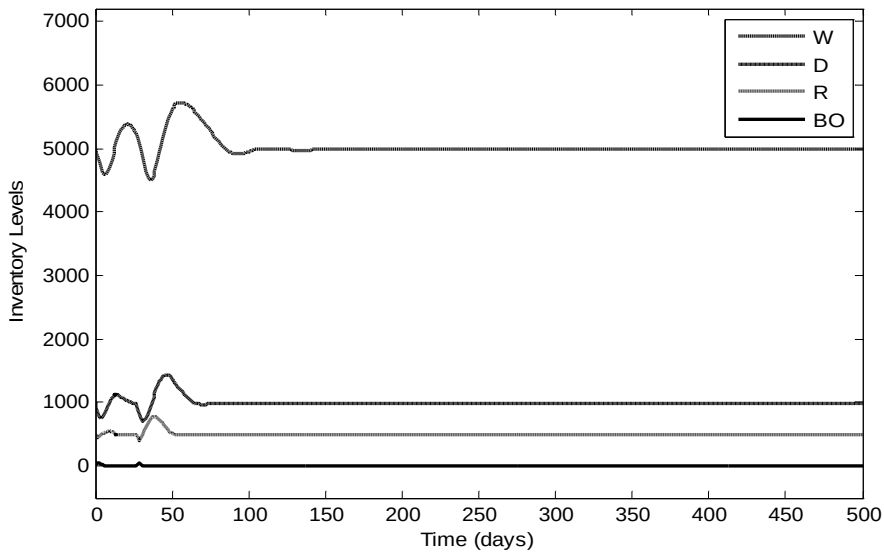


همچنین در نمودار ۶ نیز بهبود پاسخ کنترل پیش‌بینی غیرمتمرکز به کمک جریمه‌کردن نرخ لجستیک در مقابل ارتباطات غیرمتمرکز و تغییرات تقاضا مشهود است.

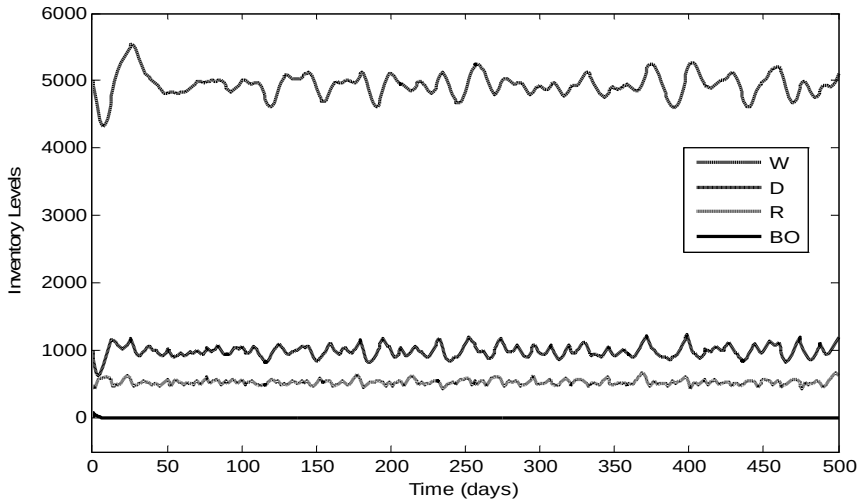
نمودار ۵. کنترل پیش‌بینی غیرمتمرکز سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین با نگاه رو به جلو در مقابل تقاضای متغیر



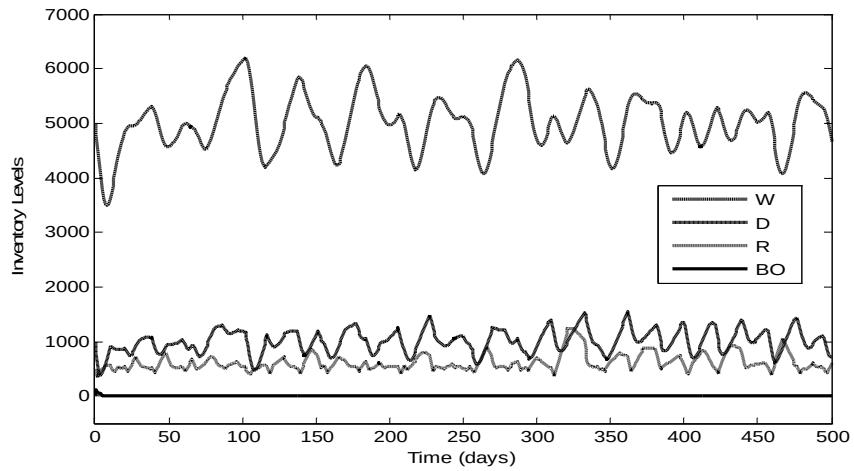
نمودار ۶. کنترل پیش‌بینی غیرمتمرکز سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین با نگاه رو به جلو در مقابل تقاضای متغیر و همراه با جریمه‌کردن نرخ لجستیکی



نمودار ۷. کنترل پیش‌بینی غیرمتمرکز سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین با نگاه رو به جلو در مقابل تقاضای تصادفی و همراه با جریمه‌کردن نرخ لجستیکی



نمودار ۸. کنترل پیش‌بینی غیرمتمرکز سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین با نگاه رو به جلو در مقابل تقاضای تصادفی و بدون جریمه‌کردن نرخ لجستیکی



به‌طور کلی مزیت اصلی کنترل پیش‌بین اعمال قیدها در حین حل یک مسئله بهینه‌سازی و مزیت اصلی کنترل غیرمتمرکز کاهش بار محاسباتی و پیچیدگی محاسباتی است، چرا که بـرای سیستم‌های مقیاس بزرگ با کنترل پیش‌بینی متمرکز، محاسبهٔ برخط ورودی ابعـاد بـالا بسـیار پیچیده و نامناسب، غیرعملی و غیرانعطاف‌پذیر به نظر می‌رسد. برای برطرف کردن کندی پاسخ

نیز می‌توان از کنترل‌کننده‌های کمکی مثل کنترل‌کننده‌های فیدبک خطی تناسبی ـ انتگرالی ـ مشتقی[1] استفاده کرد.

از منظر پایداری نیز چون در حل مسائل این مقاله، افق پیش‌بینی به اندازهٔ کافی بزرگ درنظر گرفته می‌شود، پایداری لیاپانوف وجود دارد. یعنی اگر اغتشاش ورودی صفر باشد و ورودیها هم صفر باشند، در امتداد افق با هر شرایط اولیه‌ای به نقطهٔ تعادل مرجع خواهیم رسید. به طور کلی از شبیه‌سازی مشخص می‌شود کنترل پیش‌بینی متمرکز دارای بار محاسباتی بیشتری نسبت به نوع غیرمتمرکز است، اما دارای سرعت بیشتر و انحرافات کمتری در پاسخ مطلوب است. دلیل آن هم این است که در کنترل پیش‌بینی غیرمتمرکز تنها اولین آرایه کنترلی حاصل از ردهٔ پایین دستی به عنوان اغتشاش ورودی به ردهٔ بالادستی ارسال می‌شود، حال آنکه در نوع متمرکز از تمام آرایه‌های ورودی برای هر رده استفاده می‌شود. بر اساس همین دلیل اثر جریمه تغییرات ورودی کنترلی در نوع غیرمتمرکز نمود بیشتری دارد، چون این اثر در نوسانات شدید تقاضا اجازه نمی‌دهد ورودی تغییرات شدید داشته باشد. در واقع، اثر این بخش در نوع کنترلی متمرکز روی پایین آوردن هزینهٔ عملیاتی است (چون تغییرات ورودی کم می‌شود، هزینه کلی تابعی معیار نیز کم می‌شود). همچنین خطای انتقال اطلاعات بین رده‌ها با تأخیر انتقال که نامعینی مدل سیستم به شمار می‌رود، در این نوع کنترلی بسیار کمتر است. همچنین تقویت انحرافات برای گره‌های بالادستی به دلیل تعدد بیشتر گره‌های پایین دستی است که به‌وسیلهٔ گره‌های بالادستی به خدمت گرفته می‌شوند. همچنین نشان داده شد، با اینکه کنترل پیش‌بینی متمرکز در مقابل افزایش تأخیر انتقال پاسخ مناسبتری دارد، از نظر عملیاتی مشکل و دارای بار محاسباتی بیشتری است.

اما از باب اعتبارسنجی مدل، مدل مسئله، یک مدل مرسوم در زنجیرهٔ تأمین از نوع کششی (زنجیرهٔ تأمینی که بر اساس تقاضای مشتری در آن جریان کالا به راه می‌افتد) و تقریباً شهودی بوده و براساس ارتباطات ساده ورودی کالا و تقاضا و خروجی کالای تحویل داده شده کار می‌کند و جریانات موجود در آن برای هر زنجیرهٔ تأمین کالا و خدمات که از این مدل پیروی می‌کنند، به خوبی دیده می‌شوند. زنجیرهٔ تأمین شبیه‌سازی شده در این مقاله نیز در چارچوب این مدل قرار دارد و از نوع کششی است و تنها در گره‌های خرده‌فروش آن جریان اطلاعات دیده می‌شود. برای اعتبارسنجی و صحت مدل به‌کارگرفته شده، معادلات حالت مدل را بررسی می‌کنیم. طبق رابطهٔ ۱، برای گره‌های انبار و توزیع کننده، موجودی کالا در هر لحظه از زمان برابر با مجموع موجودی کالا در لحظه زمانی قبل و مقدار کالاهای وارد شده به گره (از طرف

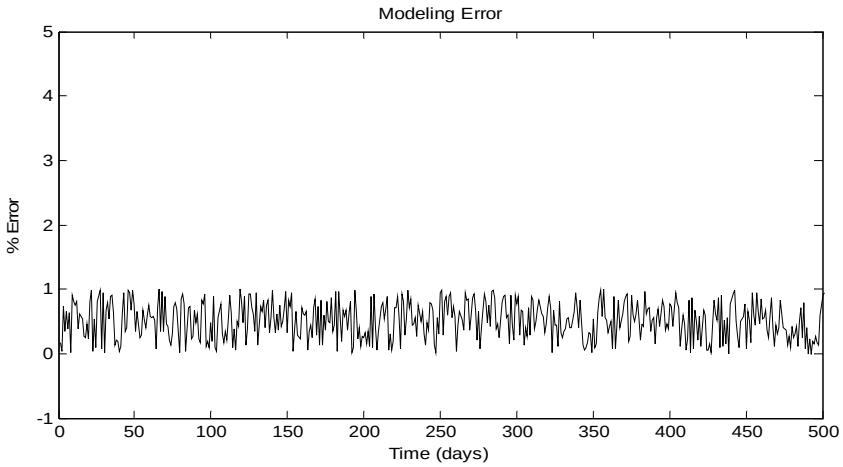
---

[1] Proportional-Integral-Derivative (PID)

تولیدکننده یا انبار یا دیگر کانال‌های بالادستی) منهای مقدار کالاهای خارج شده از گره است. همچنین به سبب زمان صرف شده برای رسیدن کالا از گره مبدا به مقصد یک تأخیر لجستیکی نیز در نظرگرفته می‌شود، در حالی که خروج کالا از هر گره آنی اتفاق می‌افتد. پس این نوع ورود و خروج در هر نوع زنجیرهٔ تأمین معمولی کششی وجود دارد و به‌راحتی می‌توان از روی آن مدل رابطهٔ ۱ را نوشت. اما طبق رابطهٔ ۲، برای گره‌های خرده فروش دو نوع معادله وجود دارد. یک معادله همچون رابطهٔ ۱ مربوط به ورود و خروج معمولی کالا و معادلهٔ دیگر بر اساس جریان اطلاعاتی سفارشهای برگشتی است. در معادلهٔ اول رابطهٔ ۲ موجودی کالا در هر لحظه از زمان برابر با مجموع موجودی کالای حاضر و مقدار کالاهای وارد شده به گره (از طرف توزیع‌کننده) منهای مقدار کالاهای خارج شده از گره (کالاهای تحویل داده شده) است. در این رابطه نیز تأخیر کانالهای بین توزیع‌کننده (یا دیگر کانالهای بالادستی) و خرده‌فروش دیده می‌شود. در معادلهٔ دوم رابطهٔ ۲ نیز سفارشهای برگشتی در هر لحظه برابر با مجموع سفارشهای برگشتی مراحل زمانی قبلی و تقاضای موجود منهای مجموع مقادیر کالاهای تحویل داده شده و سفارشهای فسخ شده است. پس همان‌گونه که بحث شد مدل به‌کارگرفته شده در مقاله، یک مدل کاملاً مبتنی بر مشاهدات واقعی از یک زنجیرهٔ تأمین کششی است و این مدل چیزی جز یک تحلیل از ورود و خروج کالاها به واحدهای زنجیرهٔ تأمین و در نهایت، تحویل کالا مقتضی به مشتری نهایی نیست و پیچیدگی خاصی ندارد. اما چنانچه داده‌های واقعی و مدل به‌کارگیری‌شده انطباق کامل نداشته باشند، نامعینی در داده‌های اندازه‌گیری شده از مدل واقعی وجود دارد یا اینکه این نامعینی ناشی از تأخیرهای اضافی یا دیگر عوامل غیرقابل پیش‌بینی است.

برای نمونهٔ شبیه‌سازی شده این مقاله، به طور واقع‌گرایانه‌ای، درصد این مقدار نامعینی مفروض از یک نویز تصادفی با توزیع یکنواخت و میانگین صفر پیروی می‌کند (خطای مدلسازی). بر این اساس، نمودار ۹ درصد خطای مدلسازی در زمانهای مختلف را نشان می‌دهد. درنتیجه با درنظر گرفتن نامعینی‌های اطلاعات نیز مدل این مقاله از اعتبار کافی برخوردار است. از طرف دیگر، استفاده از بخش توقیف ورودیها، اثر این نامعینی را کاهش می‌دهد و تقریباً اثر خطای مدلسازی در نتیجهٔ نهایی مدیریت زنجیرهٔ تأمین به صفر می‌رسد. با تمام این اوصاف، به‌طور کلی دغدغه این مقاله، بهبود کارایی سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین با یک مدل نامی تحت تئوری (نظریهٔ) کنترل پیشرفته موجودی در جهت افزایش رضایت مشتری بوده است، هر چند نوسانات و نامعینی‌های سیستم پیچیده باشند و چالش اصلی این مقاله مدلسازی سیستم مدیریت زنجیرهٔ تأمین نیست.

نمودار ۹. درصد خطای مدلسازی



۵. نتیجه‌گیری

به چند دلیل روش کنترل پیش‌بینی، یک روش کنترلی سازگار با سیستم مدیریت زنجیره تأمین به نظر می‌رسد: ۱. پیش‌بینی تقاضا و مقادیر کالایی که باید برای برآورده‌کردن این تقاضا بین گره‌های زنجیره تأمین حمل و نقل شود، فاکتورهای اساسی در کنترل سیستم‌های مدیریت زنجیره تأمین هستند (روند پیش‌بینی)، ۲. سیستم‌های مدیریت زنجیره تأمین غالباً دارای تأخیرهای زمانی انتقال هستند، ۳. به دلیل اعمال قیدهای ظرفیت در حل مسئله بهینه‌سازی. با توجه به مشکل عملیاتی کنترل پیش‌بینی متمرکز در کاربرد با سیستم‌های مقیاس بزرگ، در می‌یابیم که زیاد شدن طبقه‌ها و رده‌ها و تأخیر انتقال در زنجیره تأمین و همچنین اعمال بخش توقیف حرکت، زمان نشست و نوسان و پیک انحراف را بالا می‌برند. افزایش تأخیر انتقال هم به‌دلیل انباشتگی تقاضا، این تأثیرات منفی را تشدید می‌کند. همچنین نشان داده شد که استفاده از بخش توقیف حرکت و نگاه روبه جلو در هنگام تصادفی بودن تقاضا، مقاومت سیستم کنترلی را در برابر تغییرات تقاضا بالا می‌برد و هزینه عملیاتی را پایین می‌آورد. به طور کلی مدلهای به‌کارگرفته شده در پژوهشهای قبلی عمومی نیستند و کنترل کارامد مستلزم وجود یک مدل کامل است. بدین منظور در کار پیشرو از یک مدل جامع در این زمینه‌ها استفاده شد. در اکثر روشهای قبلی، اساس کنترل بر حفظ موجودی به کمک مقادیر در دسترس متغیرهاست، اما در روش حاضر، کمینه کردن مقادیر لجستیکی جریان یافته میان گره‌های زنجیرهٔ تأمین و مقاوم کردن آن در یک ساختار غیرمتمرکز در کنار تخمین متغیرها انجام شد.

مآخذ

Agachi, P. S., Nagy, Z. K., & Cristea, M. V. (2006). *Model based* control: *Case studies in process engineering*, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim..

Camacho, E. F., & Bordons, C. (2004). *Model predictive control*, Springer.

Chopra, S., & Meindl, P. (2004). Supply chain management strategy, planning and operations, Pearson Hall Press, New Jersey, 58-79.

Dejonckheere, J., Disney, S. M., Lambrecht, R., & Towill, D. R. (2004). The impact of information enrichment on the bullwhip effect in supply chains: A control engineering perspective, *European Journal of Operational Research*, 153, 727–750.

Garcia, C., Ibeas, A., Herrera, J., &Vilanova, R. (2012). Inventory control for the supply chain: An adaptive control approach based on the identification of the lead-time, *Omega*, 40, 314–327.

Grubbstrom, R., & Huynh, T. (2006). Multi-stage capacity constrained production inventory systems in discrete-time with non-zero lead times using MRP theory, *International Journal of Production Economics*, 101, 53–62.

Kapsiotis, G., & Tzafestas, S. (1992). Decision making for inventory/production planning using model-based predictive control, *Parallel and distributed computing in engineering systems*. Amsterdam: Elsevier, 551–556.

Chong Li. (2012). Controlling the bullwhip effect in a supply chain system. with constrained information flows, *Applied Mathematical Modeling*, In press.

Miranbeigi, M., & Jalali, A. (2011). Supply chain management systems -advanced control :MPC on SCM, *Book chapter of supply chain management - applications and simulations*, chapter. 2, Intech.

Sarimveis, H., Patrinos, P., Tarantilis, D., & Kiranoudis, T. (2008) Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review, C*omputers and Operations Research*, 35, 3530- 3561.

Seferlis, P., & Giannelos, N. (2004). A two layered optimization based control sterategy for multi echelon supply chain network, *Computers and Chemical Engineering*, 28, 799–809.

Subramanian, K., Rawlings, J., Maravelias, C., Flores-Cerrillo, J., & Megan, L. (2012). Integration of control theory and scheduling methods for supply chain management, *Computers and Chemical Engineering*, In press.

Towill, D. R., Evans, G. N., & Cheema, P. (1997). Analysis and design of an adaptive minimum reasonable inventory control system, *Production Planning and Control*, 8, 545–557.

Tzafestas, S., & Kapsiotis, G. (1997). Model-based predictive control for generalized production planning problems, *Computers in Industry*, 34, 201–210.

Wang, W., & Rivera, R. (2005). A novel model predictive control algorithm for supply chain management in semiconductor manufacturing, *Proceedings of the American control conference*, 1, 208–213.

Wiendahl, H., & Breithaupt, J. (2000). Automatic production control applying control theory, *International Journal of Production Economics*, 63, 33–46.

Yang, D., Choi, T., Xiao, T., & Cheng, T. (2011). Coordinating a two-supplier and one-retailer supply chain with forecast updating, *Automatics*, 47, 1317–1329.