

کنترل پیش‌بین مقید متمرکز سیستم مدیریت زنجیره تامین کاملاً جفت شده از دیدگاه وابستگی اطلاعاتی رده‌ها

محمد میران بیگی^۱، علی اکبر جلالی^۲

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی کنترل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران m.miran@ut.ac.ir
^۲ دانشیار و عضو هیئت علمی، گروه کنترل، دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران drjalali@iust.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۸۸/۱۲/۱۶، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۰/۱/۱۵)

چکیده: سیستم مدیریت زنجیره تامین، یک شبکه از واحدها یا رده‌های تامین کالا و تولید و انبار و توزیع و خرده‌فروش همراه با تاخیرهای زمانی بزرگ می‌باشد. هدف سیستم کنترلی، کارکردن زنجیره تامین در نقطه کاری بهینه یعنی برآوردن تقاضا، علیرغم تنوع تقاضای مشتری است. در این پژوهش، از یک مدل سیستم مدیریت زنجیره تامین جفت شده‌ی اطلاعاتی مبتنی بر "نظریه بازی آشامیدنی"^۱ زمان پیوسته استفاده شد و به یک مدل سیستم مدیریت زنجیره تامین زمان گسسته‌ی چندطبقه- چند رده، شامل واحدهای تامین کننده و تولید کننده و انبار و توزیع کننده و خرده‌فروشی بسط داده شد. در این مدل دو نوع جریان دینامیکی در طول زنجیره تامین در نظر گرفته می‌شوند: جریان کالا از سمت تامین کننده به سوی مصرف کننده نهایی، و جریان برگشتی اطلاعات برای آگاه ساختن رده‌ها از تقاضای مشتری. با توجه به کارایی کنترل کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل در کار با این گونه سیستم‌ها که هم تاخیرهای زمانی بزرگ و هم یک ساختار دینامیکی متغیر (منتج از اغتشاش تقاضای مشتری) دارند، یک کنترل کننده پیش‌بین مقید متمرکز بکار گرفته شده است. همچنین برای بالا بردن مقاومت سیستم در مقابل تغییرات تقاضا، یک بخش توقیف حرکت به تابع هزینه اضافه شده است.

کلمات کلیدی: سیستم مدیریت زنجیره تامین، تقاضا، سیستم مدیریت زنجیره تامین جفت شده‌ی اطلاعاتی، کنترل کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل، بخش توقیف حرکت.

Centralized Constrained Predictive Control on Information Coupled Supply Chain Management System

Mohammad Miranbeigi, Ali Akbar Jalali

Abstract: Supply chain management system (SCM) is a network of suppliers and manufacturers and warehouses and distributors and retailers, with large delay times. The control system aims at operating the supply chain at the optimal point despite the influence of demand changes. In this paper, an information coupled supply chain management system model based on "Beer Game Theory"¹ was used and was developed to an supply chain management consist of supply, manufacture, warehouse, distribution, retailer units. Then a centralized constrained model predictive controller applied on that. Also a move suppression term added to cost function, which increased system robustness toward changes on demands.

Keywords: Supply Chain Management System, Demand, Information Coupled Supply Chain Management System, Model Predictive Controller, Move Suppression Term.

¹ Beer Game Theory

۱- مقدمه

توصیف می‌شوند. در برخی مدل‌ها مانند مدل مورد نظر مقاله‌ی حاضر، این جریان‌ها بین تمامی گره‌های متوالی زنجیره تامین وجود دارد و این باعث ایجاد چرخه‌هایی از وابستگی اطلاعات میان گره‌ها می‌شود. در برخی مدل‌ها نیز تنها جریان مواد بین گره‌های زنجیره دیده می‌شود و هیچ‌گونه چرخه‌ای وجود ندارد.

کنترل پیش‌بین (MPC) از جهت تشکیل مدلی صریح از سیستم به منظور محاسبات کنترلی، بررسی رفتار سیستم در یک افق زمانی آینده و در نظر گرفتن محدودیت‌های ورودی‌ها، حالت‌ها و خروجی‌های سیستم در محاسبات کنترلی، بکارگیری مدل‌های اغتشاش برای در نظر گرفتن نامعینی تقاضا و پاسخ مناسب به تغییرات تقاضا، یک روش مناسب برای کنترل این سیستم‌ها به نظر می‌رسد.

سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین غالباً توسط کنترل‌کننده‌های کلاسیک PID کنترل شده‌اند که برخی از آنها در [۱] تا [۴] دیده می‌شوند. استفاده گسترده از کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مبتنی بر مدل، غالباً به خاطر اعمال کارآمد قیدها و شدت‌های غیرخطی در سیستم‌های دینامیکی چند متغیره است [۵] و [۶]. کاپسوتیس^۱ برای اولین بار MPC را برای کنترل یک مسئله مدیریت موجودی تک محصولی بکاربرد [۷]. در این مقاله، یک بخش جریمه در مقابل انحرافات از یک مسیر مرجع موجودی در طول زمان‌های تحویل تولید در نظر گرفته شد. زافستاس^۲ نیز در حل مسئله کنترل بهینه‌ی تولید/موجودی، با استفاده از MPC، انحراف از مقادیر موجودی مطلوب را جریمه کرد [۸]. در این کار، دینامیک‌های فروش با یک معادله تراز موجودی جفت می‌شوند و مسئله کنترل بهینه به صورت یک MPC که در آن متغیرهای کنترل شامل تلاش تبلیغاتی و سطوح تولید هستند، در نظر گرفته می‌شوند. در پژوهش بعدی، MPC برای مدیریت یک شبکه توزیع - تولید چند رده‌ای - چند محصولی با زمان‌های تحویل و بدون سفارش‌های برگشتی بکار گرفته شد [۹]. وانگ و همکاران او^۳ تقاضا را به عنوان اغتشاش بار و به عنوان یک سیگنال تصادفی بدست آمده از نویز سفید یکپارچه در نظر گرفتند و یک MPC مبتنی بر تخمین برای افزایش عملکرد مقاومت سیستم در برابر تغییرپذیری تقاضا و پیش‌بینی‌های غلط، پیشنهاد کردند [۱۰]. در یک مقاله ارائه شده در سال‌های اخیر نیز یک MPC برای بهینه‌سازی سیستم‌های تولید و توزیع شامل یک مدل

امروزه در بازار رقابتی موجود، بنگاه‌های اقتصادی و تولیدی علاوه بر پرداختن به سازمان و منابع داخلی، خود را به مدیریت و نظارت بر منابع و ارکان مرتبط خارج از سازمان نیازمند یافته‌اند. علت این امر در واقع دستیابی به مزیت یا مزایای رقابتی با هدف کسب سهم بیشتری از بازار است. مدیریت زنجیره تامین پدیده‌ای است که این کار را به طریقی انجام می‌دهد که مشتریان بتوانند خدمت قابل اطمینان و سریع را با محصولات با کیفیت در حداقل هزینه دریافت کنند. در سراسر دنیا از آمریکا گرفته تا آسیا، از اروپا تا آفریقا، مقتضیات یک اقتصاد جهانی که هر روز رقابتی‌تر می‌شود، همه را واداشته تا درباره زنجیره تامین و مدیریت هرچه بهتر آن، صحبت کنند. مسئله کلیدی در یک زنجیره تامین، مدیریت و کنترل هماهنگ تمامی این فعالیت‌ها است. مفهوم کلی مدیریت زنجیره تامین برآوردن تقاضای مشتری برای دریافت خدمات کارآمدتر و مناسب‌تر و نیاز به کاهش هزینه‌های نگهداری کالاها موجود در انبار، از مواد اولیه تا تحویل محصول تمام شده به مشتری است. در کل، زنجیره‌های تامین، سیستم‌های دینامیکی پیچیده‌ای هستند که بوسیله تقاضاهای مشتری تحریک می‌شوند.

در اغلب زنجیره‌های تامین، هدف ما تنظیم متغیرهای تصمیم برای پیشینه‌کردن رضایت مشتری با کمترین هزینه عملیاتی است. زیرسیستم‌های نمونه شامل واحدهای فروشنده‌های مواد (تامین‌کننده) در رده تامین، واحدهای تولیدکننده در رده تولید، واحدهای ذخیره‌کننده کالا در رده انبار، واحدهای توزیع‌کننده در رده توزیع و واحدهای فروشنده در رده خرده‌فروش برای محصولات مختلف، گره‌های سیستم بوده و با یکدیگر در ارتباط هستند. در این سیستم هر گره بوسیله یک مجموعه از گره‌های بالادستی تغذیه شده و یک مجموعه از گره‌های پایین دستی را تغذیه می‌کنند. هر کدام از این گره‌ها یک سطح موجودی کالای تنظیم شده دارند که در کنترل این سیستم باید برآورده شوند و در برابر هرگونه دستور مشتری، این سطح موجودی کالا باید حفظ شود.

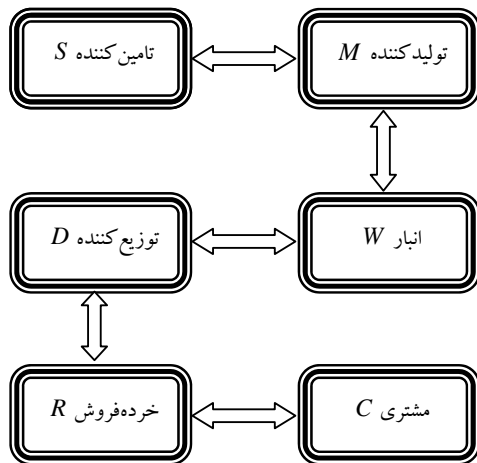
در مدل‌سازی دینامیکی سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین عموماً دو نوع جریان وجود دارد. بین رده‌های متوالی دو نوع جریان فرآیند یعنی جریان اطلاعات همانند یک سفارش نیاز کالا و جریان مواد یعنی انتقال حقیقی کالاها وجود دارند. در حقیقت زنجیره‌های تامین معمولاً بوسیله جریان مستقیم مواد اولیه و کالاها و جریان برگشتی اطلاعات

¹ Kapsiotis² Tzafestas³ Wang

همچنین پیشنهادهای برای زمینه‌های باز پژوهشی آینده در این مقوله، ارائه می‌شوند.

۲- مدل دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین و توسعه آن

یک سیستم مدیریت زنجیره تامین، شامل تامین‌کننده‌ها، کارخانجات، انبارها و توزیع‌کننده‌ها و خرده‌فروش‌ها می‌باشد که عملیات تامین مواد خام، انتقال مواد خام داخل محصولات میانی و نهایی، و توزیع محصولات نهایی به مشتریان را با توجه به تقاضای مشتری و پیش‌بینی آن، کنترل سطوح موجودی و جریان‌های اطلاعاتی انجام می‌دهد. هنگامی که بتوان یک رویه معین را به عنوان قسمتی از فرایند تولید-توزیع تمیز داد، این را یک طبقه یا یک رده در زنجیره تامین می‌نامند (که این تشخیص‌ها معمولاً بوسیله فاکتورهای جغرافیایی انجام می‌شوند). زنجیره‌های تامین معمولاً بوسیله جریان مستقیم مواد اولیه و کالاها و جریان برگشتی اطلاعات توصیف می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود، در اکثر طرح‌های اولیه، جریان کالا از یک رده به رده بعدی منتقل می‌شود تا کالا به مصرف‌کننده نهایی برسد.



شکل ۱: سیستم مدیریت زنجیره تامین

یک زنجیره تامین نوعاً به وسیله یک جریان رو به جلو از مواد و جریان رو به عقب از اطلاعات تعریف می‌شود. در این سیستم هر گره بوسیله یک مجموعه از گره‌های بالادستی تغذیه شده 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

زمان‌بندی شده ساده شده برای تابع تولید پیشنهاد شده است. روش کنترلی پیشنهادی فقط نوع قطعی تقاضا را که نیاز برای یک رویه کنترل موجودی کالا را کاهش می‌دهد، ملاحظه کرده است [۱۱] و [۱۲].

در این مقاله، یک مدل وابسته‌ی اطلاعاتی گسسته زمان مبتنی بر نظریه بازی آشامیدنی [۱۳] استفاده و به یک سیستم مدیریت زنجیره تامین ابعاد گسترده بسط داده می‌شود. براساس این نظریه، بین تمامی گره‌های رده‌های متوالی دو نوع جریان فرآیند یعنی جریان اطلاعات همانند یک سفارش نیاز کالا و جریان مواد یعنی انتقال حقیقی کالاها وجود دارند. طبق آنچه گفته شد، از آنجا که روش MPC یک روش بهینه‌سازی مقید برخط^۱ می‌باشد و یک مسئله با ورودی‌ها و خروجی‌های ابعاد بالا، به راحتی توسط آن قابل حل است، مدل ابعاد گسترده تاخیردار سیستم مدیریت زنجیره تامین حاضر به صورت مقید و با ملاحظه‌ی برخط تغییرات تقاضای مشتری در طول زمان با ساختار بهینه‌سازی پیش‌بین، کنترل می‌شود. همچنین اثر شلاق چرمی در طول شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. اثر شلاق چرمی از جمله معمول‌ترین پویایی‌های زنجیره‌های تامین است که به خاطر آن، تغییرات کوچک تقاضای محصول از سوی مشتری در جلوی زنجیره تامین، هر چه به عقب زنجیره تامین حرکت می‌کنیم به نوسانات بیشتر و بیشتر در تقاضا برای شرکت‌ها تبدیل می‌شود [۱۴]. همچنین از یک بخش توقیف حرکت برای مقابله با اثر تغییرات ناگهانی تقاضا روی بیشینه ورودی کنترلی استفاده می‌شود. یک بخش توقیف حرکت که سرعت تغییر در کمیت‌های منتقل شده از طریق زنجیره (تغییر سرعت تغییر متغیرهای کنترل) را جریمه می‌کند، مقاومت سیستم کنترلی را افزایش می‌دهد.

از اینرو در بخش دوم این مقاله یک سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی و یک مدل دینامیکی از آن توسعه داده می‌شود. در بخش سوم، صورت مسئله کنترلی تشریح شده، دلایل استفاده از روش کنترل پیش‌بین بار دیگر تبیین شده و تابعی معیار بهینه‌سازی برای مدل سیستم مدیریت زنجیره تامین موردنظر طراحی می‌شود. در بخش چهارم نیز شبیه‌سازی‌های سیستم دینامیکی مدیریت زنجیره تامین جفت‌شده‌ی اطلاعاتی مقید تحت تنوع تقاضاهای مشتری نشان داده می‌شوند و روی اثر بخش توقیف حرکت بحث می‌شود. در بخش پنجم، نتایج بکارگیری روش کنترلی مذکور و نوآوری‌های آن و

¹ Online

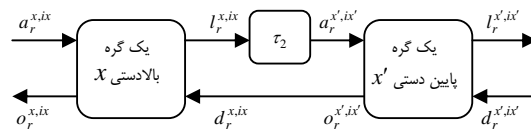
$$0 \leq (s^{x,ix}(t), o_u^{x,ix}(t), b^{x,ix}(t)) \leq s_{\max}^x \quad (2)$$

$$0 \leq o_r^{x,ix}(t) \leq o_{r\max}^{x,ix}$$

$$l_r^{x,ix}(t) = d_r^{x,ix}(t - \tau_1) + \frac{b^{x,ix}(t)}{t_b} \quad (3)$$

که در آن $s^{x,ix}(t)$ موجودی گره i رده x ، $o_u^{x,ix}(t)$ سفارش‌های انجام نشده گره i رده x و $b^{x,ix}(t)$ سفارش‌های انباشته شده گره i رده x از دوره‌های زمانی قبل، متغیرهای حالت این سیستم هستند. $s_{\max}^{x,ix}$ نیز یک مجموعه سه عضوی ثابت حداکثر برای متغیرهای حالت می‌باشد. در معادله نرخ انتقال (۳) سفارش‌ها بر مبنای ارضای تقاضای مشتری به علاوه تسویه سفارش‌های انباشته شده انجام می‌شوند. در این معادله یک تاخیر خط لوله‌ای τ_1 به عنوان زمان لازم برای پردازش سفارش و یک تاخیر مرتبه اول t_b به عنوان زمان جریان تسویه سفارش‌های برگشتی می‌باشند. بعد از جانشانی معادله (۳) در (۱) دیده می‌شود که متغیر حالت $b^{x,ix}(t)$ کنترل‌ناپذیر است، اما اگر نرخ تقاضا به یک مقدار ماندگار همگرا شود $b^{x,ix}(t)$ به صفر همگرا خواهد شد. پس $b^{x,ix}(t)$ پایدارپذیر است و می‌توان این سیستم را کنترل کرد. هدف کنترل برای هر رده میل کردن $s^{x,ix}(t)$ به موجودی مطلوب ثابت $s_d^{x,ix}$ و همگرا شدن $o_u^{x,ix}(t)$ به سفارش اجرا نشده مطلوب $o_{ud}^{x,ix}(t)$ می‌باشد که $o_{ud}^{x,ix}(t) = \tau_2 \cdot d_{rss}^{x,ix}$ (میانگین تقاضای حالت ماندگار مشتری‌هاست) است.

دو گره مجاور از دوره نیز به صورت شکل ۳ مدل می‌شوند و روابط موجود میان پارامترهای دینامیکی آن‌ها نیز مطابق دسته روابط ۴ می‌باشد. گره بالادستی x و گره پایین دستی x' در نظر گرفته شده‌اند.



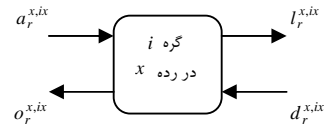
شکل ۳: مدل دو گره مجاور از سیستم مدیریت زنجیره تامین

$$a_r^{x',ix'}(t) = l_r^{x,ix}(t - \tau_2), d_r^{x',ix'}(t) = o_r^{x,ix}(t) \quad (4)$$

τ_2 در این روابط نماینده تاخیر در انتقال کالا از گره بالادستی به گره پایین دستی است. به دلیل ابعاد بزرگ مسئله مورد نظر این مقاله، نمودار بلوکی شکل ۳ به صورت ساده شده‌ی شکل ۴ نمایش داده

برآورده شوند و در برابر هرگونه دستور مشتری، این سطح موجودی کالا باید حفظ شود [۱۴]. این سطح موجودی کالا تحت عنوان سطح موجودی ایمنی شناخته می‌شود به این معنی که برای برآوردن هر میزان تقاضای ناگهانی مشتری باید این سطح از موجودی در گره‌های زنجیره تامین به خصوص انبارها برقرار باشد. البته به سبب هزینه‌های نگهداری موجودی، در پژوهش‌های جاری به دنبال روش‌هایی هستند که نیازی به انباشت زیاد کالا در گره‌های زنجیره ندارند و در نهایت درصدد رساندن سطوح موجودی کالا به مقدار صفر و برآوردن آتی تقاضای مشتری هستند.

در این مقاله از یک مدل زمان پیوسته سیستم مدیریت زنجیره تامین مبتنی بر نظریه بازی آشامیدنی در [۱۳] استفاده شده است. بر اساس این مدل دونوع جریان در دینامیک مدل باید لحاظ شود: جریان کالا و جریان اطلاعات. طبق این مدل‌سازی مدل یک گره از سیستم مدیریت زنجیره تامین در ساختار وابستگی اطلاعاتی گره‌ها (رده‌ها) به صورت شکل ۲ نشان داده می‌شود.



شکل ۲: مدل یک گره از سیستم مدیریت زنجیره تامین در ساختار وابستگی اطلاعاتی گره‌ها (رده‌ها)

گره‌های تغذیه شونده، گره‌های پایین دستی برای گره‌های تغذیه کننده هستند و گره‌های تغذیه کننده نیز به همین ترتیب، نسبت به گره‌های تغذیه شونده، بالادستی به شمار می‌آیند. در این شکل، اگر $x \in \{S, M, W, D, R\}$ باشد $a_r^{x,ix}$ نماینده نرخ اکتساب گره i رده x ، تعداد کالاهایی که در روز از رده بالادستی کسب می‌شوند و $o_r^{x,ix}$ نرخ سفارش گره i رده x ، $l_r^{x,ix}$ نرخ انتقال گره i رده x ، تعداد کالاهایی که در روز به رده پایین دستی انتقال داده می‌شوند و $d_r^{x,ix}$ نرخ انتقال گره i رده x ، تعداد کالاهایی که در روز به وسیله رده پایین دستی سفارش داده می‌شوند، می‌باشند. در نهایت مدل دینامیکی زمان پیوسته و قیده‌ای حالت این سیستم مدیریت زنجیره تامین برای مقادیر $t \geq 0$ به صورت زیر در می‌آید:

$$\begin{cases} \dot{s}^{x,ix}(t) = a_r^{x,ix}(t) - l_r^{x,ix}(t) \\ \dot{o}_u^{x,ix}(t) = o_r^{x,i}(t) - a_r^{x,ix}(t) \\ \dot{b}^{x,ix}(t) = d_r^{x,ix}(t) - l_r^{x,ix}(t) \end{cases} \quad (1)$$

¹ Pipeline delay

حال اگر روابط ۴ و ۵ در روابط ۲ و ۳ جانشانی شوند، روابط زیر برای مدل دینامیکی ساده شده‌ی سیستم مدیریت زنجیره تامین حاصل می‌شوند.

$$\dot{s}^{S,iS}(t) = o_r^{S,iS}(t - \tau_2) - \sum_{iM} o_r^{M,iM}(t - \tau_1) - \frac{b^{S,iS}(t)}{t_b} \quad (۶)$$

$$\dot{o}_u^{S,iS}(t) = o_r^{S,iS}(t) - o_r^{S,iS}(t - \tau_2)$$

$$\dot{b}^{S,iS}(t) = \sum_{iM} o_r^{M,iM}(t - \tau_2) - \sum_{iM} o_r^{M,iM}(t - \tau_1) - \frac{b^{S,iS}(t)}{t_b}$$

$$\dot{s}^{M,iM}(t) = o_r^{M,iM}(t - \tau_1 - \tau_2) - \sum_{iW} o_r^{W,iW}(t - \tau_1) + \sum_{iS} \frac{b^{S,iS}(t - \tau_2)}{t_b} - \frac{b^{M,iM}(t)}{t_b} \quad (۷)$$

$$\dot{o}_u^{M,iM}(t) = o_r^{M,iM}(t) - o_r^{M,iM}(t - \tau_1 - \tau_2) - \sum_{iS} \frac{b^{S,iS}(t - \tau_2)}{t_b}$$

$$\dot{b}^{M,iM}(t) = \sum_{iW} o_r^{W,iW}(t) - \sum_{iW} o_r^{W,iW}(t - \tau_1) - \frac{b^{M,iM}(t)}{t_b}$$

$$\dot{s}^{W,iW}(t) = o_r^{W,iW}(t - \tau_1 - \tau_2) - \sum_{iD} o_r^{D,iD}(t - \tau_1) + \sum_{iM} \frac{b^{M,iM}(t - \tau_2)}{t_b} - \frac{b^{W,iW}(t)}{t_b} \quad (۸)$$

$$\dot{o}_u^{W,iW}(t) = o_r^{W,iW}(t) - o_r^{W,iW}(t - \tau_1 - \tau_2) - \sum_{iM} \frac{b^{M,iM}(t - \tau_2)}{t_b}$$

$$\dot{b}^{W,iW}(t) = \sum_{iD} o_r^{D,iD}(t) - \sum_{iD} o_r^{D,iD}(t - \tau_1) - \frac{b^{W,iW}(t)}{t_b}$$

$$\dot{s}^{D,iD}(t) = o_r^{D,iD}(t - \tau_1 - \tau_2) - \sum_{iR} o_r^{R,iR}(t - \tau_1) + \sum_{iW} \frac{b^{W,iW}(t - \tau_2)}{t_b} - \frac{b^{D,iD}(t)}{t_b} \quad (۹)$$

$$\dot{o}_u^{D,iD}(t) = o_r^{D,iD}(t) - o_r^{D,iD}(t - \tau_1 - \tau_2) - \sum_{iW} \frac{b^{W,iW}(t - \tau_2)}{t_b}$$

$$\dot{b}^{D,iD}(t) = \sum_{iR} o_r^{R,iR}(t) - \sum_{iR} o_r^{R,iR}(t - \tau_1) - \frac{b^{D,iD}(t)}{t_b}$$

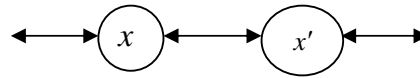
$$\dot{s}^{R,iR}(t) = o_r^{R,iR}(t - \tau_1 - \tau_2) - d_r^{R,iR}(t - \tau_1) + \sum_{iD} \frac{b^{D,iD}(t - \tau_2)}{t_b} - \frac{b^{R,iR}(t)}{t_b} \quad (۱۰)$$

$$\dot{o}_u^{R,iR}(t) = o_r^{R,iR}(t) - o_r^{R,iR}(t - \tau_1 - \tau_2) - \sum_{iD} \frac{b^{D,iD}(t - \tau_2)}{t_b}$$

$$\dot{b}^{R,iR}(t) = d_r^{R,iR}(t) - d_r^{R,iR}(t - \tau_1) - \frac{b^{R,iR}(t)}{t_b}$$

این روابط تمامی گره‌های شکل ۵ را در رده‌های مختلف مدل می‌کنند. در این معادلات به ازای هر گره از $x \in \{S, M, W, D, R\}$ متغیر حالت $s^{x,iX}(t)$ و $o_u^{x,iX}(t)$ و $b^{x,iX}(t)$ یک متغیر کنترل $o_r^{x,iX}(t)$ و برای هر گره خرده‌فروش، یک ورودی اغتشاش اندازه‌گیری شده $d_r^{R,iR}(t)$ در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس این معادلات دیده می‌شود که یک وابستگی اطلاعاتی رده‌های مجاور را کاملاً جفت می‌کند. به طور مثال رابطه (۶) برای تامین‌کننده‌ها به $o_r^{M,iM}(t - \tau_1)$ تولیدکننده‌ها و رابطه (۷) برای تولیدکننده‌ها به $b^{S,iS}(t - \tau_2)$ تامین‌کننده‌ها نیاز دارند. این روند وابستگی برای تمامی گره‌های مجاور دیده می‌شود. در قسمت بعد

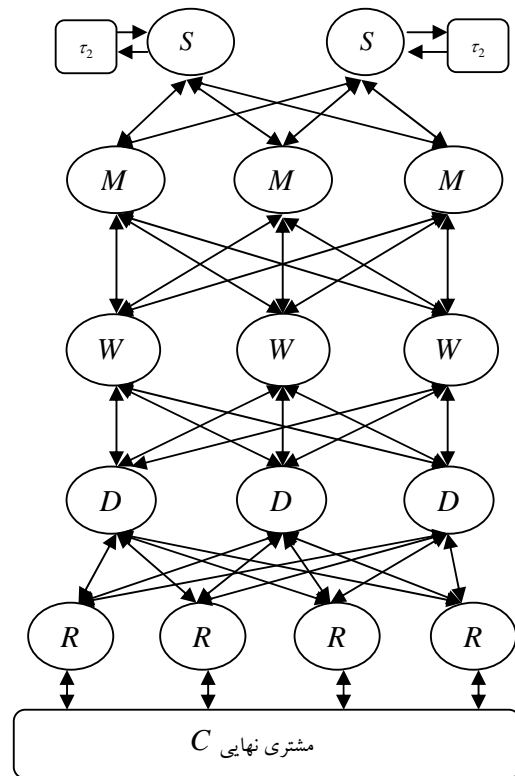
می‌شود. در این شکل پیکان دوطرفه نمایانگر جریان تاخیردار انتقال کالا و برگشت اطلاعات از سوی مشتری است.



شکل ۴: مدل جایگزین شکل ۳

سیستم مدیریت زنجیره تامین مدنظر، تک محصولی بوده و دارای ۲ گره تامین، ۳ گره تولید، ۳ گره انبار، ۳ گره توزیع و ۴ گره خرده‌فروش در ۵ رده است. این سیستم در شکل ۵ به صورت عمودی و از بالا به پایین نشان داده شده است. تنها یک استثنا در ابتدای زنجیره وجود دارد که جریان اطلاعات آمده از تامین‌کننده از طریق تولید به کالا تبدیل می‌شود و سپس جریان به تامین‌کننده بر می‌گردد. برای سادگی این تبدیل نیز با یک تاخیر و رابطه‌ی مدل می‌شود.

$$a_r^{S,iS}(t) = o_r^{S,iS}(t - \tau_2) \quad (۵)$$



شکل ۵: سیستم مدیریت زنجیره تامین ۵ رده‌ای مدنظر

بنابراین زنجیره تامین به وسیله تقاضای مشتری یعنی تعداد دستگاه‌ها و کالاهای فروخته‌شده در روز تحریک می‌شود و سپس یک سری جریان‌های اطلاعات و کالا در سیستم به راه می‌افتند.

$W_{ou}^{x,ix}$ مربوط به هزینه‌های سفارش‌های برآورده نشده و $W_u^{x,ix}$ مربوط به هزینه‌های کنترل و سفارش دادن، هستند. همچنین $s_d^{x,ix}$ سطح موجودی مطلوب ثابت و $o_{ud}^{x,ix}$ سفارش اجراشده مطلوب در رده X می‌باشند. همچنین چون متغیرهای $b^{x,ix}(t_k)$ کنترل‌ناپذیرند، در مسئله بهینه‌سازی وارد نمی‌شوند. همان گونه که ذکر شد، اعمال یک بخش توقیف حرکت که سرعت تغییر متغیرهای ورودی کنترلی را جریمه می‌کند، مقاومت سیستم کنترلی را در برابر تغییرات تقاضا، اثر شلاق چرمی و نامعینی‌های سیستم افزایش می‌دهد. از اینرو یک بخش توقیف حرکت نیز به این تابعی معیار اضافه شده است که در آن فاکتور $W_{ou}^{x,ix}$ مربوط به هزینه‌های بخش توقیف حرکت استفاده در رده X است.

۴- مطالعه موردی و نتایج شبیه‌سازی

از آنجا که مدل‌سازی حاضر بر اساس فیزیک یک مسئله مدیریت زنجیره تامین واقعی همراه با اطلاعات تقاضا در همه‌ی رده‌هاست و برخلاف مدل‌سازی‌های تجربی یک مدل مبتنی بر اصول اساسی سیستم به شمار می‌آید، روابط ۶ الی ۱۰ هر سیستم مدیریت زنجیره تامین با هر تعداد رده و هر تعداد گره را دربر می‌گیرند. در مورد مطالعه‌ی این مقاله، سیستم مدیریت زنجیره تامین شکل ۵ در نظر گرفته شده است. در این مورد سعی بر اینست که مدل حاضر به یک زنجیره تامین با ابعاد واقعی نزدیک شود و همچنین انتقال کالا بین همه‌ی گره‌ها در نظر گرفته شده است. در طول این زنجیره تنها یک نوع کالا پخش می‌شود. مدل‌های دینامیکی که مدل‌های دینامیکی زمان پیوسته هستند با استفاده از امکانات نرم‌افزار مطلب^۱ با زمان نمونه‌برداری کنترل‌کننده پیش‌بین به مدل‌های زمان گسسته تبدیل می‌شوند. تاخیرهای زمانی موجود نیز با تقریب زنده مرتبه چهار پیدا^۲ تقریب زده شده و جایگزین می‌شوند. نرخ‌های داده‌شده در این مسئله بر حسب روز هستند و زمان نمونه‌برداری (واحد زمان) مدل سیستم و کنترل‌کننده پیش‌بین برابر با ۰.۲ روز (۴.۸ ساعت) است. مقادیر نقاط تنظیم موجودی، ظرفیت‌های ذخیره ماکزیمم در هر گره و فاکتورهای وزنی نیز در جدول ۱ آمده‌اند.

به تشریح مسئله کنترلی و دلایل استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین برای حل این مسئله پرداخته شده و در نهایت، کنترل‌کننده پیش‌بین مقتضی طراحی می‌شود.

۳- روش تحقیق و طراحی کنترل‌کننده

پیش‌بین مقید

با توجه به مدل‌سازی قسمت قبل، سیستم مدیریت زنجیره تامین مدنظر مقاله، یک سیستم چند ورودی-چند خروجی ابعاد بالا همراه با اغتشاش تقاضای مشتری است که (در صورت تغییر) دینامیک مسئله را در هر لحظه از زمان دچار تغییر می‌کند. همچنین یک سری محدودیت‌های ورودی و خروجی همانند نامنفی بودن تعداد واحد کالا و حداکثر ظرفیت موجودی هر گره زنجیره وجود دارند. کنترل پیش‌بین از جهت در نظر گرفتن محدودیت‌های ورودی‌ها، حالت‌ها و خروجی‌های سیستم در محاسبات کنترلی، و پاسخ مناسب به تغییرات تقاضا، یک روش مناسب برای کنترل این سیستم‌ها به نظر می‌رسد [۱۵]. بطور کلی اهداف اصلی روش کنترل زنجیره تامین بدین صورت می‌باشد: بیشینه کردن رضایت مشتری و، حداقل کردن هزینه‌های عملیاتی زنجیره تامین [۱۶]. در ادامه باید این معادلات (۶ الی ۱۰) بر اساس زمان نمونه‌برداری کنترل‌کننده پیش‌بین (روز) استفاده شده به صورت زمان گسسته بازنویسی شوند. پس در حالت کلی با یک تابعی معیار کاملاً مربعی و با توجه به محدودیت‌های رابطه ۲ و دینامیک‌های روابط ۶ الی ۱۰ به صورت زمان گسسته، مسئله‌ی زیر حاصل می‌شود.

(۱۱)

$$J_{total} = \sum_{x \in \{S, M, W, D, R\}} \sum_{ix} \left(\sum_{j=1}^p (W_s^{x,ix} [s^{x,ix}(t_{k+j}) - s_d^{x,ix}]^2 + W_{ou}^{x,ix} [o_u^{x,ix}(t_{k+j}) - o_{ud}^{x,ix}]^2) + \sum_{j=0}^{c-1} (W_u^{x,ix} [o_r^{x,ix}(t_{k+j})]^2 + W_{ou}^{x,ix} [o_r^{x,ix}(t_{k+j}) - o_r^{x,ix}(t_{k+j-1})]^2) \right),$$

$$\text{subject to } \begin{cases} \text{Equations 6 to 10} \\ 0 \leq (s^{x,ix}(t_k), o_u^{x,ix}(t_k), b^{x,ix}(t_k)) \leq s_{\max}^{x,ix} \\ 0 \leq o_r^{x,ix}(t_k) \leq o_{r\max}^{x,ix} \end{cases}$$

در اینجا نقاط تنظیم موجودی کالا پارامترهای زمان ثابت هستند و t_k به عنوان نمونه‌های زمان گسسته، فاکتورهای وزنی ثابت نامنفی $W_s^{x,ix}$ مربوط به هزینه‌های ذخیره موجودی کالا و وسایل موجودی کالا،

¹ Matlab² Pade

جدول ۱ - داده‌های زنجیره تامین

خرده فروش	توزیع کننده	انبار	تولید کننده	تامین کننده	رده داده
۲۵۰	۲۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۴۰۰	بیشینه موجودی مجاز
۱۵۰	۱۵۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۵۰	بیشینه سفارش برآورده‌نشده مجاز
۸۰					بیشینه سفارش انباشته‌شده مجاز
۸۰	۱۰۰	۱۸۰	۲۵۰	۳۲۰	نقطه تنظیم موجودی محصول
مقدار حالت ماندگار تقاضا + مقدار اولیه سفارش برآورده‌نشده					نقطه تنظیم سفارش برآورده‌نشده
[۰.۸, ۰.۱, ۰.۱, ۰.۱]					$W_{ou}^{s,i,x}, W_u^{s,i,x}, W_{\delta u}^{s,i,x}$
۸۰	۱۰۰	۱۸۰	۲۵۰	۳۲۰	سطح موجودی اولیه
۳۰					مقدار اولیه سفارش برآورده‌نشده
۳۰					مقدار اولیه سفارش انباشته‌شده

به شکل ۵ نرخ سفارش برای هر رده پایین دستی برابر با نرخ تقاضای رده بالادستی است. تغییرات تقاضای محصول از سوی مشتری در جلوی زنجیره تامین، هر چه به عقب زنجیره تامین حرکت می‌کنیم به نوسانات بیشتر و بیشتر در تقاضا برای رده‌ها تبدیل می‌شود (اثر شلاق چرمی).

در ادامه برای بررسی بهتر اثر تغییرات تقاضای مشتری، از یک نرخ تقاضای مشتری پالسی با دامنه‌های متفاوتی از واحد کالا در دوره‌های زمانی مختلف استفاده می‌شود. شکل‌های ۸ و ۹، انحراف از سطوح موجودی در کل زنجیره و ورودی‌های سیستم را بدون استفاده از بخش توقیف حرکت و شکل‌های ۱۰ و ۱۱، انحراف از این سطوح موجودی و ورودی‌های سیستم را همراه با استفاده از بخش توقیف حرکت نشان می‌دهند. با توجه به شکل ورودی رده‌های مختلف دیده می‌شود که از رده‌های پایین دستی به سمت رده‌های بالادستی میزان بیشینه ورودی کنترلی بیشتر می‌شود، اما در نهایت همگی به مقدار حالت ماندگار خواهند رسید (اثر شلاق چرمی). در این شبیه‌سازی‌ها به وضوح، استفاده از بخش توقیف حرکت، اثر شلاق چرمی و اثر بد نامعینی‌های سیستم را کاهش می‌دهد و همچنین با پیک و ورودی کمتری روبرو خواهیم بود.

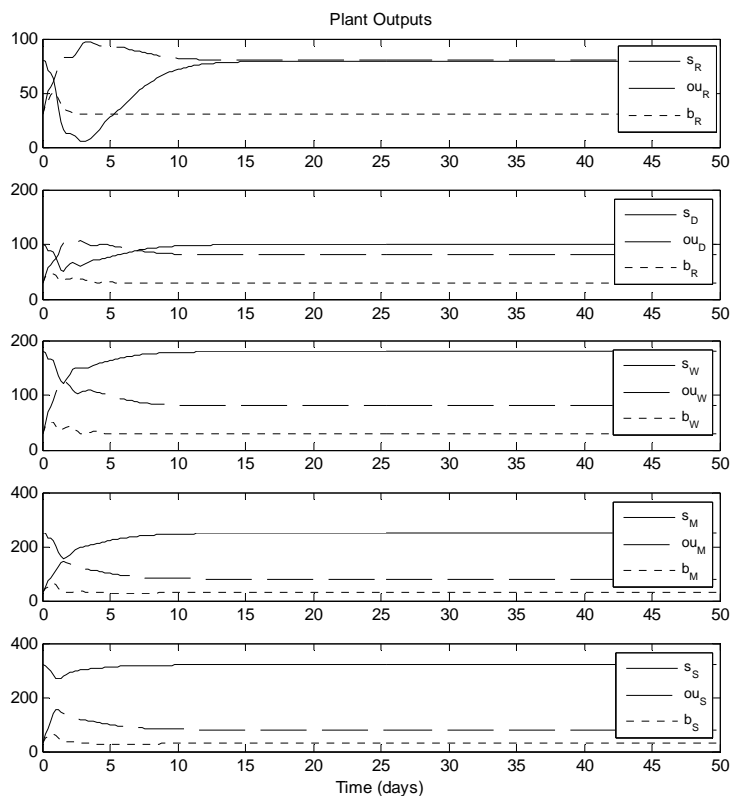
در نهایت برای درک بهتر عملکرد مناسب روش کنترلی روی سیستم مدیریت زنجیره تامین، نرخ تقاضای مشتری به صورت تصادفی بین ۱ تا ۱۰۰ واحد کالا در نظر گرفته می‌شود. در این بخش نیز کنترل کننده یکبار بدون بخش توقیف حرکت و یکبار همراه با این بخش در نظر گرفته می‌شود. با توجه به شکل‌های ۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱، قبل از شبیه‌سازی‌های این بخش به نظر می‌رسد استفاده از بخش توقیف حرکت در برابر تغییرات ناگهانی تقاضا و دستیابی به یک مقاومت نسبی در برابر این تغییرات ضروری است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳، انحراف از سطوح موجودی در کل زنجیره و ورودی‌های سیستم را بدون استفاده از بخش توقیف حرکت و شکل‌های ۱۴ و ۱۵، انحراف از این سطوح موجودی و ورودی‌های سیستم را همراه با استفاده از بخش توقیف حرکت نشان می‌دهند. همانطور که انتظار می‌رفت، جریمه نکردن تغییرات ورودی منجر به نوسانات شدید در نمودار خروجی‌ها و ورودی‌های سیستم می‌شود. اما با استفاده از بخش توقیف حرکت، سطوح موجودی در حوالی نقاط تنظیم موجودی، کنترل می‌شوند. همچنین اثر بد شلاق چرمی در طول زنجیره به شدت کاهش می‌یابد.

باید توجه داشت که در تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده، محدودیت‌های ورودی و خروجی در نظر گرفته شده‌اند. حداقل ورودی‌ها و خروجی‌ها، صفر در نظر گرفته شده و حداکثر آن‌ها در

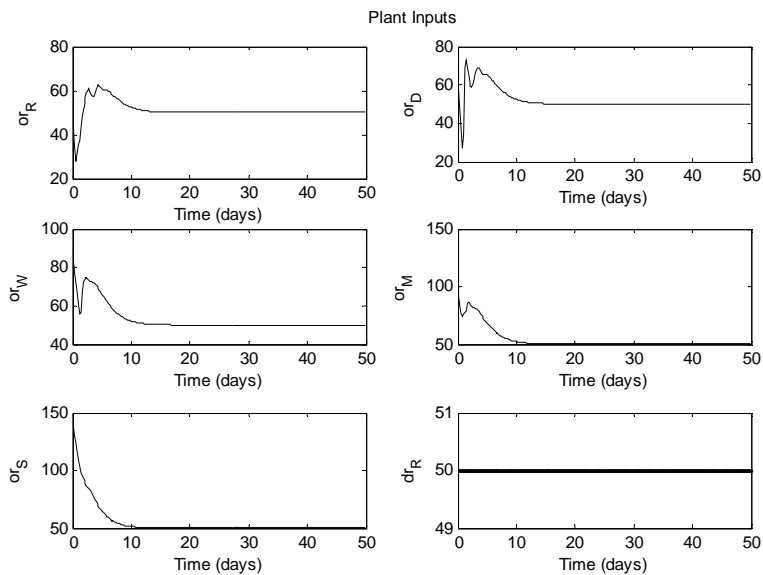
افق پیش‌بینی برابر با ۲۰ واحد زمانی (۴ روز) و افق کنترل برابر با ۸ واحد زمانی (۱.۶ روز) در نظر گرفته می‌شوند. تمامی متغیرهای حالت به عنوان خروجی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین هم در نظر گرفته می‌شوند. در نهایت ۴۵ متغیر خروجی و ۳۸ متغیر ورودی و ۴ متغیر اغتشاشی اندازه‌گیری شده در این مدل وجود دارد. مقادیر حالت‌ماندگار سفارش‌های انباشته شده به علت پایدار بودن در نقطه تعادل صفر و شکل نمایی، خود به خود پس از حالت گذار صفر می‌شوند. تاخیرهای زمانی t_b و t_1 و t_2 ، نیز به ترتیب معادل ۰.۵ و ۱ و ۱ واحد زمانی در نظر گرفته می‌شوند. پاسخ دینامیکی زنجیره برای یک مقدار ثابت ۵۰ واحد کالا در تقاضای مشتری محاسبه شد. شکل‌های ۶ و ۷، انحراف از سطوح موجودی (خروجی‌های سیستم) برای رده‌های مختلف زنجیره و ورودی‌های سیستم (ورودی‌های کنترلی و اغتشاش اندازه‌گیری شده‌ی تقاضا) را در ۵۰ روز بدون استفاده از بخش توقیف حرکت نشان می‌دهند. از آنجا که مقدار تقاضای مشتری ثابت است، پاسخ همراه با توقیف حرکت برای تقاضای ثابت خیلی متفاوت از شکل‌های ۶ و ۷ نمی‌شود (ضمناً با اعمال بخش توقیف حرکت، پیچیدگی محاسباتی بالاتر می‌رود).

اثر شلاق چرمی بوضوح در این شکل‌ها قابل مشاهده است. با توجه

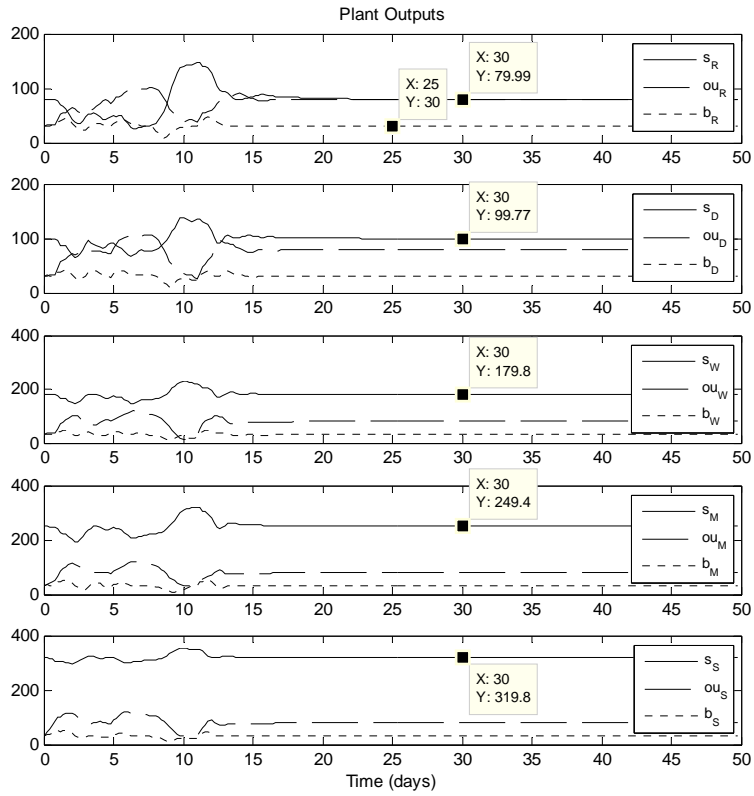
جدول ۱ تعیین شده‌اند.



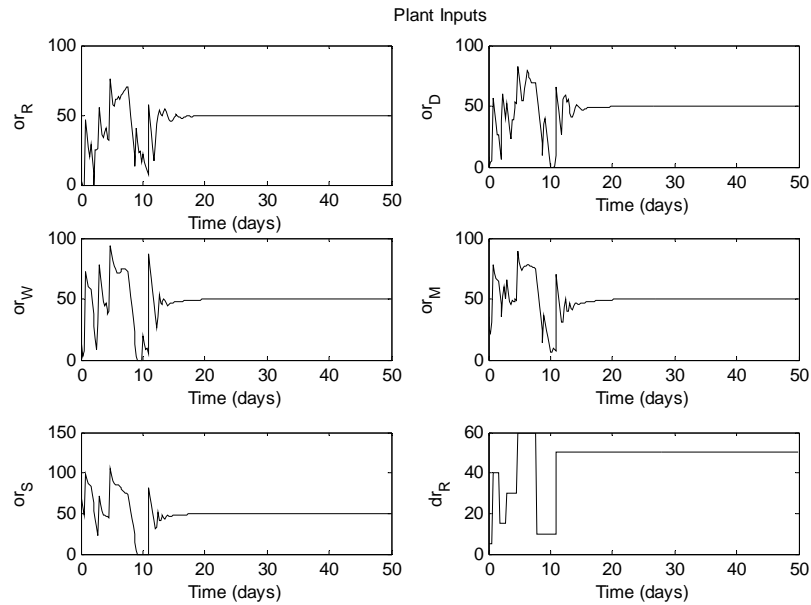
شکل ۶- خروجی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین در برابر نرخ تقاضای ثابت ۵۰ واحد کالا در روز



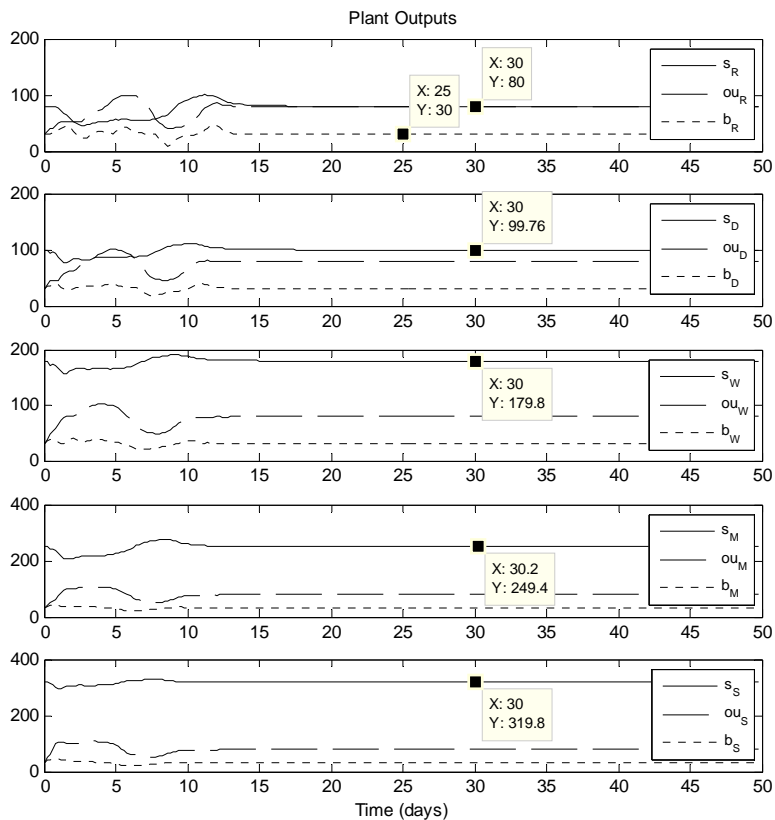
شکل ۷- ورودی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین در برابر نرخ تقاضای ثابت ۵۰ واحد کالا در روز



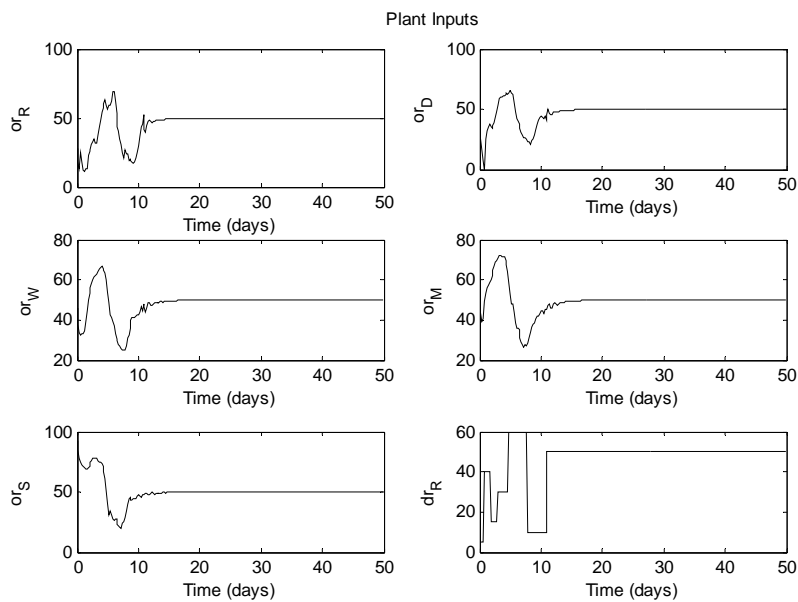
شکل ۸- خروجی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین در برابر نرخ تقاضای پالسی بدون توقف حرکت



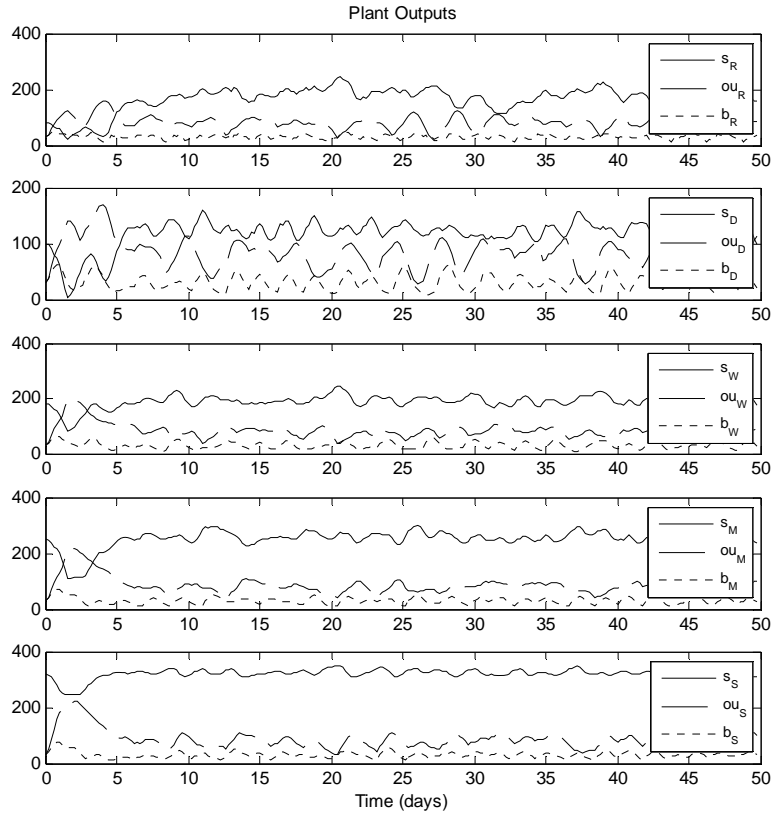
شکل ۹- ورودی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین در برابر نرخ تقاضای پالسی بدون توقف حرکت



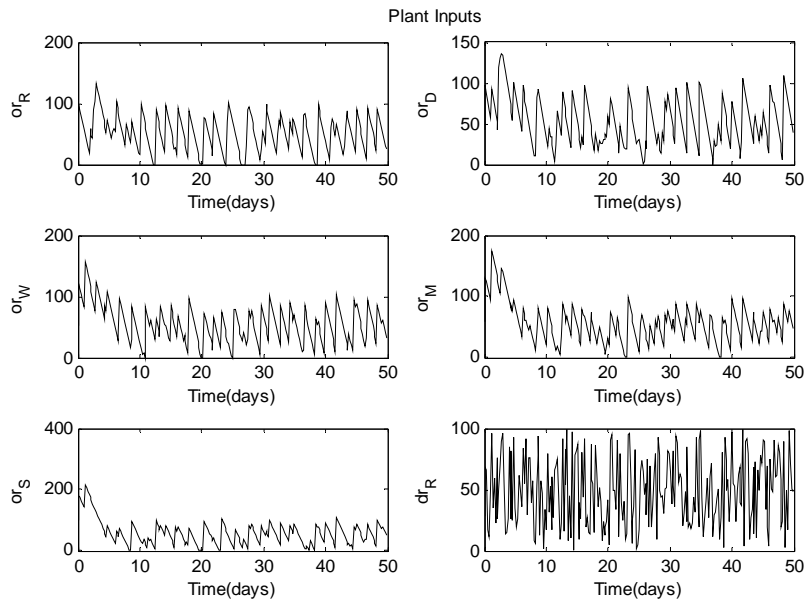
شکل ۱۰- خروجی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین در برابر نرخ تقاضای پالسی همراه با توقیف حرکت



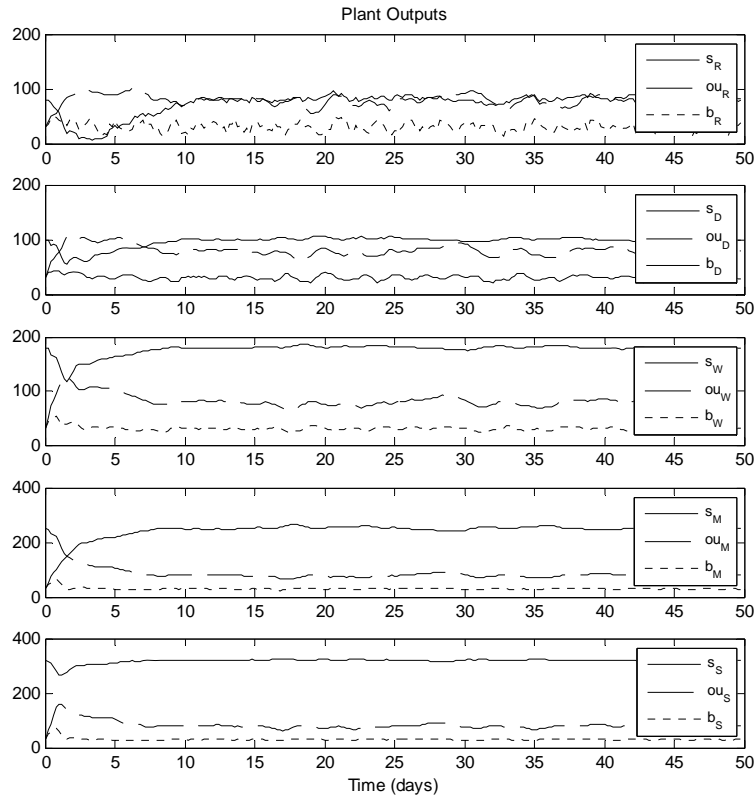
شکل ۱۱- ورودی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین در برابر نرخ تقاضای پالسی همراه با توقیف حرکت



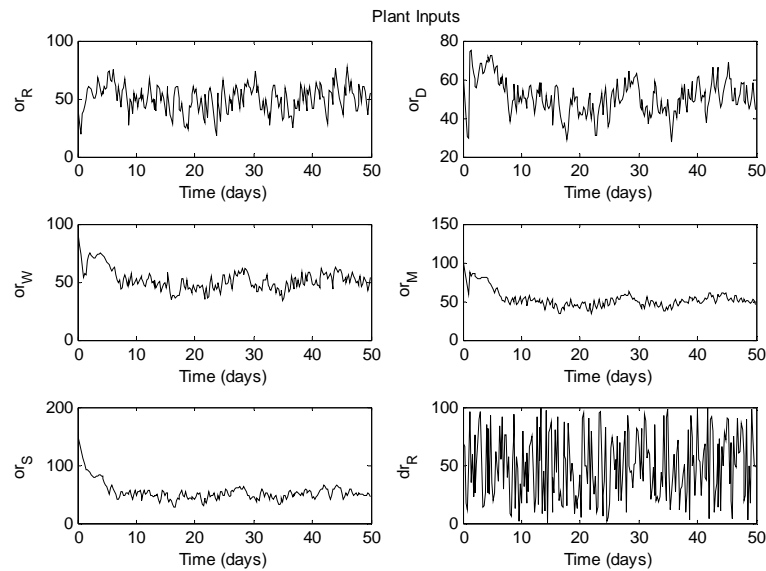
شکل ۱۲ - خروجی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین در برابر نرخ تقاضای تصادفی بدون توقیف حرکت



شکل ۱۳ - خروجی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین در برابر نرخ تقاضای تصادفی بدون توقیف حرکت



شکل ۱۴ - خروجی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین در برابر نرخ تقاضای تصادفی همراه با توقیف حرکت



شکل ۱۵ - ورودی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین در برابر نرخ تقاضای تصادفی همراه با توقیف حرکت

- [4]. R. Grubbstrom, T. Huynh, "multi-stage capacity constrained production inventory systems in discrete-time with non-zero lead times using MRP theory," *International Journal of Production Economics*, vol. 101, pp. 53–62, 2006.
- [5]. S. Keerthi, E. Gilbert, "Optimal, infinite-horizon feedback laws for a general class of constrained discrete-time systems: Stability and moving-horizon approximations," *Journal of Optimization Theory and Application*, vol. 57, pp. 265–93, 1998.
- [6]. P. S. Agachi, Z. K. Nagy, M. V. Cristea, A. Imre-Lucaci, *Model Based Control*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2009.
- [7]. G. Kapsiotis, S. Tzafestas, "Decision making for inventory/production planning using model-based predictive control," *Parallel and distributed computing in engineering systems*. Amsterdam: Elsevier, pp. 551–556, 1992.
- [8]. S. Tzafestas, G. Kapsiotis, "Model-based predictive control for generalized production planning problems," *Computers in Industry*, vol. 34, pp. 201–210, 1997.
- [9]. P. Lopez, B. Ydstie Grossmann, "A model predictive control strategy for supply chain management," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 27, pp. 1201–18, 2003.
- [10]. W. Wang, R. Rivera, "A novel model predictive control algorithm for supply chain management in semiconductor manufacturing," *Proceedings of the American control conference*, vol. 1, pp. 208–213, 2005.
- [11]. I. Yildirim, B. Tan, F. Karaesmen, "A multiperiod stochastic production planning and sourcing problem with service level constraints," *OR Spektrum*, vol. 27, pp. 471–89, 2005.
- [12]. S. Chopra, P. Meindl, *Supply Chain Management Strategy, Planning and Operations*, Pearson Prentice Hall Press, New Jersey, pp. 58–79, 2004.
- [13]. W. Dunbar, S. Desa, "Model predictive control for dynamic supply chain management," *Proceedings of the International Workshop on Assessment and Future Directions of NMPC*, Freudenstadt-Lauterbad, Germany, August, 2005.
- [14]. H. Sarimveis, P. Patrinos, D. Tarantilis, T. Kiranoudis, "Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review," *Computers & Operations Research*, vol. 35, pp. 3530 – 3561, 2008.
- [15]. E. F. Camacho, C. Bordons, *Model Predictive Control*. Springer, 2004.
- [16]. J. D. Stermann, *Business Dynamics Systems Thinking and Modeling in A Complex World*, McGraw Hill Press, pp. 113–128, New York, 2000.

۸- نتیجه گیری

روش کنترل پیش‌بین از جهت در نظر گرفتن محدودیت‌های ورودی‌ها، حالت‌ها و خروجی‌های سیستم در محاسبات کنترلی، و پاسخ مناسب به تغییرات تقاضا، یک روش مناسب برای کنترل سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین است. شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله، این امر را با هدف کنترلی حفظ سطوح موجودی برای پیشینه کردن رضایت مشتری با کمترین هزینه عملیاتی به خوبی نشان می‌دهند. در این مقاله یک سیستم مدیریت زنجیره تامین جفت شده‌ی اطلاعاتی، برای مدل کردن یک زنجیره تامین واقعی به ابعاد وسیعی در رده‌ها و گره‌ها گسترش داده شد. بدین ترتیب این سیستم پنج رده‌ای و کنترل پیش‌بین روی آن قابل تعمیم به هر مدل از زنجیره تامین است. این سیستم یکبار همراه با تقاضای ثابت مشتری و بار دیگر با نرخ تقاضای متغیر پالسی و در نهایت با نرخ تقاضای متغیر تصادفی در نظر گرفته شد، تا کارایی اعمال کنترل پیش‌بین روی این سیستم‌ها نشان داده شود. همچنین در این مقاله اثر شلاق چرمی و همچنین اثر اعمال بخش توقیف حرکت بررسی شد. جریمه نکردن تغییرات ورودی منجر به نوسانات شدید در نمودار خروجی‌ها و ورودی‌های سیستم می‌شود. اما با استفاده از بخش توقیف حرکت، سطوح موجودی در حوالی نقاط تنظیم موجودی، کنترل می‌شوند. همچنین اثر بد شلاق چرمی در طول زنجیره به شدت کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1]. H. Wiendahl, J. Breithaupt, "Automatic production control applying control theory," *International Journal of Production Economics*, vol. 63, pp. 33–46, 2000.
- [2]. J. Dejonckheere, SM. Disney, M. R. Lambrecht, D. R. Towill, "The impact of information enrichment on the bullwhip effect in supply chains: a control engineering perspective," *European Journal of Operational Research*, vol. 153, pp. 727–50, 2009.
- [3]. D. R. Towill, G. N. Evans, P. Cheema, "Analysis and design of an adaptive minimum reasonable inventory control system," *Production Planning & Control*, vol. 8, pp. 545–557, 1997.