



مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم و فناوری

RICeST

کنترل پیش‌بین سیستم مدیریت زنجیره تامین

مقدمه‌ای بر مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین
همراه با ارائه نمونه‌های کاربردی

تالیف:

پروفسور علی‌اکبر جلالی

استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

مهندس محمد میران‌بیگی

دانشجوی دکتری مهندسی کنترل دانشگاه تهران

زمستان ۱۳۹۲

سرشناسه
عنوان و نام پدیدآور: میران بیگی، محمد، ۱۳۶۲ -
کنترل پیش‌بین سیستم مدیریت زنجیره تامین: مقدمه‌ای بر مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های
مدیریت زنجیره تامین همراه با ارائه نمونه‌های کاربردی / تالیف محمد میران بیگی، علی‌اکبر
جلالی.

مشخصات نشر: شیراز: ایلاف: وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، معاونت پژوهشی، مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی
علوم و فناوری، ۱۳۹۲.

مشخصات ظاهری: ۱۶۶ص: جدول، نمودار .
شابک: ۹۷۸-۹۶۴۱۹۸-۱۳۴-۴

وضعیت فهرست نویسی: فیبا
عنوان دیگر: مقدمه‌ای بر مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین همراه با ارائه نمونه‌های
کاربردی.

موضوع: تدارکات بازرگانی -- مدیریت
موضوع: کنترل پیش‌بین
موضوع: تدارکات بازرگانی -- مدیریت
شناسه افزوده: جلالی، علی‌اکبر، ۱۳۳۳ -
شناسه افزوده: ایران. وزارت علوم، تحقیقات و فناوری. مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم و فناوری
رده بندی کنگره: ۹۱۳۹۲ ک۸۶م/۵/۳۸HHD
رده بندی دیویی: ۵/۶۵۸
شماره کتابشناسی ملی: ۳۴۲۵۴۸۰



کنترل پیش‌بین سیستم مدیریت زنجیره تامین

مهندس محمد میران بیگی / پروفیسور علی اکبر جلالی

ناظر چاپ و آماده سازی کتاب: کریم فلاح □ صفحه‌آرایی و طرح جلد: نگار چراغی شیرازی

لیتوگرافی و چاپ: پردیس و دنیا □ تیراژ: ۷۰۰ نسخه □ چاپ اول: زمستان ۱۳۹۲

ناشرین: مرکز منطقه‌ای اطلاع رسانی علوم و فناوری (RICeST) و ایلاف

مرکز منطقه‌ای اطلاع رسانی علوم و فناوری (RICeST)

روابط عمومی: ۰۷۱۱-۶۴۶۸۴۲۱ انتشارات: ۰۷۱۱-۶۴۶۸۴۵۲ نمایر: ۰۷۱۱-۶۴۶۸۳۵۲

صفحه خانگی: www.ricest.ac.ir پست الکترونیک: publication@ricest.ac.ir

توزیع کتاب: انتشارات مرکز منطقه‌ای ۰۷۱۱-۶۴۶۸۴۵۲

قیمت: ۷۵,۰۰۰ ریال

به نام خدا

نظر به اهمیت نقش اطلاع رسانی در زمینه‌های مختلف علوم و تکنولوژی، به منظور پاسخ‌گویی به نیازهای محققان و کارشناسان و ارائه تازه‌ترین اطلاعات علمی و فنی در کوتاه‌ترین زمان، مرکز منطقه‌ای اطلاع رسانی علوم و فناوری براساس تفاهم‌نامه منعقد شده میان وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و فرهنگستان علوم جهان سوم در سال ۱۳۷۰ دایر و لایحه تاسیس آن در سال ۱۳۷۵ از تصویب مجلس شورای اسلامی و شورای نگهبان گذشت. این مرکز در چهارچوب ضوابط و مقررات آموزش عالی جمهوری اسلامی ایران فعالیت می‌نماید.

مرکز منطقه‌ای اطلاع رسانی علوم و فناوری از طریق توزیع آخرین اطلاعات علمی و فنی و نیز کمک به تامین منابع علمی مورد نیاز دانشگاهها، سازمان‌ها و نهادهای تحقیقاتی و متخصصان داخلی و منطقه‌ای برای ارتقاء سطح علمی جمهوری اسلامی ایران و سایر کشورهای منطقه فعالیت می‌نماید.

کتاب «کنترل پیش‌بین سیستم مدیریت زنجیره تامین» در راستای تحقق اهداف فوق تهیه شده و مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم و فناوری افتخار دارد که هفتادویکمین اثر خود را که حاصل تلاش فکری جناب آقای مهندس محمد میران‌بیگی و پروفسور علی‌اکبر جلالی است به زیور طبع بیاراید و تقدیم جامعه علمی و فنی نماید. امید است اقداماتی از این قبیل موجبات رضایت هرچه بیشتر جامعه علمی و فنی ایران را فراهم آورده و در راستای هدف ما که نشر و اشاعه اطلاعات علمی و فنی است، موثر واقع گردد.

دکتر جعفر مه‌راد

**رئیس مرکز منطقه‌ای اطلاع رسانی علوم و فناوری
و سرپرست پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)**

اعضای شورای علمی

مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم و فناوری پایگاه استنادی علوم جهان اسلام (ISC)

دکتر جعفر مهران (رئیس شورا)

دکتر کرامت‌اله ایزدپناه - استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز

دکتر شعله ارسطوپور - استادیار علم اطلاعات و دانش‌شناسی مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی
علوم و فناوری

دکتر شاهرخ جم - دانشیار مهندسی برق دانشکده مهندسی برق و الکترونیک دانشگاه صنعتی
شیراز

دکتر عزت‌اله رئیسی - استاد علوم زمین دانشکده علوم دانشگاه شیراز

دکتر علیرضا سپاسخواه - استاد دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز

دکتر هاجر ستوده - استادیار رشته علم اطلاعات و دانش‌شناسی دانشگاه شیراز

دکتر علی‌اکبر صفوی - استاد برق و الکترونیک دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز

دکتر حمید علیزاده - استادیار علم اطلاعات و دانش‌شناسی مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم و
فناوری

دکتر محمد مهدی علیشاهی - استاد مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز

دکتر محمدرضا قانع - استادیار علم اطلاعات و دانش‌شناسی مرکز منطقه‌ای اطلاع‌رسانی علوم
و فناوری

دکتر علی‌گزنی - استادیار علم اطلاعات و دانش‌شناسی پایگاه استنادی علوم جهان اسلام

دکتر جلیل مقدسی - استاد شیمی دانشکده علوم دانشگاه شیراز

دکتر محمد نمازی - استاد حسابداری دانشکده علوم اجتماعی دانشگاه شیراز

فهرست مطالب

مقدمه	۱
فصل ۱: مدل سازی سیستم های مدیریت زنجیره تامین	۷
۱-۱- مقدمه	۸
۲-۱- مدل های معادله دیفرانسیلی زمان پیوسته	۱۱
۳-۱- مدل های معادله تفاضلی زمان گسسته	۱۵
۴-۱- سیستم های شبیه سازی رخداد گسسته	۱۷
۵-۱- روش های تحقیق در عملیاتی	۱۸
فصل ۲: کنترل سیستم های مدیریت زنجیره تامین	۲۰
۱-۱- مقدمه	۲۱
۲-۲- کنترل کلاسیک	۲۳
۳-۲- کنترل بهینه و برنامه ریزی دینامیکی	۳۰
۴-۲- کنترل پیش بین مبتنی بر مدل	۳۳
۵-۲- کنترل مقاوم	۳۶
۶-۲- برنامه ریزی دینامیکی تقریبی	۳۸
فصل سوم: اصول کنترل پیش بین مبتنی بر مدل	۴۰
۱-۳- مقدمه	۴۱
۲-۳- تعاریف اولیه	۴۱
۳-۲-۱- افق پیش بینی	۴۱
۳-۲-۲- افق کنترل	۴۲

- ۴۲ ----- ۳-۲-۳- انواع متغیرها
- ۴۳ ----- ۳-۳- کنترل پیش بین مبتنی بر مدل
- ۴۵ ----- ۴-۳- تضمین پایداری کنترل پیش بین
- ۴۵ ----- ۳-۴-۱- طرح مسئله پایداری
- ۴۶ ----- ۳-۴-۲- چند روش معمول پایداری سازی
- ۵۱ ----- ۳-۴-۳- مقایسه عملکرد روش ها
- ۵۲ ----- ۳-۵- مزایا و معایب کنترل پیش بین

فصل ۴: کنترل پیش بین برای سیستم های مدیریت زنجیره تامین ----- ۵۴

- ۵۵ ----- ۴-۱- مقدمه
- ۶۲ ----- ۴-۲- سیستم مدیریت زنجیره تامین بدون در نظر گرفتن چرخه های اطلاعاتی
- ۶۲ ----- ۴-۲-۱- مدل دینامیکی
- ۶۶ ----- ۴-۲-۲- طراحی کنترل کننده پیش بین متمرکز
- ۷۰ ----- ۴-۲-۳- روش حل مسئله بهینه سازی کنترل کننده پیش بین
- ۷۷ ----- ۴-۲-۴- طراحی کنترل کننده پیش بین غیرمتمرکز
- ۸۱ ----- ۴-۲-۵- کنترل دولایه ای موجودی
- ۸۲ ----- ۴-۳- سیستم مدیریت زنجیره تامین همراه با در نظر گرفتن چرخه های اطلاعاتی
- ۸۴ ----- ۴-۳-۱- مدل دینامیکی
- ۸۸ ----- ۴-۳-۲- طراحی کنترل کننده پیش بین متمرکز
- ۹۰ ----- ۴-۳-۳- طراحی کنترل کننده پیش بین غیرمتمرکز

فصل ۵: نمونه های کاربردی کنترل کننده پیش بین در مدیریت زنجیره ----- ۹۷

- تامین ----- ۹۷
- ۹۸ ----- ۵-۱- مقدمه

۲-۵- کنترل پیش‌بین سیستم مدیریت زنجیره تامین بدون در نظر گرفتن چرخه‌های اطلاعاتی	۹۹
۱-۲-۵- کنترل پیش‌بین متمرکز	۱۰۰
۲-۲-۵- کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز	۱۱۱
۳-۵- کنترل پیش‌بین سیستم مدیریت زنجیره تامین با در نظر گرفتن چرخه‌های اطلاعاتی	۱۱۸
۱-۳-۵- کنترل پیش‌بین متمرکز	۱۱۹
۲-۳-۵- کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز	۱۲۱
۴-۵- افق پیش‌رو	۱۳۲
جمع‌بندی و خلاصه‌ای از مطالب کتاب	۱۳۴
مراجع	۱۳۹
فهرست اشکال	۱۵۶
فهرست جداول	۱۶۰
فهرست علائم اختصاری	۱۶۱

مقدمه

زنجیره‌های تامین، سیستم‌های دینامیکی پیچیده‌ای هستند که بوسیله تقاضاهای مشتری تحریک می‌شوند. انتخاب مناسب تجهیزات، ماشین‌آلات و ناوگان حمل و نقل، یک المان کلیدی برای موفقیت چنین سیستم‌هایی است. به هر حال کارایی زنجیره‌های تامین اغلب به تصمیمات مدیریتی که اغلب بر پایه بینش و تجربه هستند، متکی است. به علت افزایش پیچیدگی سیستم‌های زنجیره تامین که متأثر از تغییرات در ویژگی‌های مشتری، یکپارچه‌سازی اقتصاد و رقابت میان شرکت‌هاست، این تصمیمات از حالت بهینه دور هستند. فاکتور مشکل‌ساز دیگر در ساختن تصمیم، مراحل مختلف در زنجیره‌های تامین است که اغلب بوسیله گروه‌های مختلفی از افراد با فلسفه‌های مدیریتی متفاوت نظارت می‌شوند. در نیم قرن اخیر، ابزارهای ریاضی متعددی در مدل‌سازی و کنترل مسئله مدیریت زنجیره تامین بکار گرفته شده‌اند. این ابزارها از تحلیل‌های تابع تبدیل سنتی تا روش‌های کنترلی پیچیده گسترده شده‌اند.

در اغلب زنجیره‌های تامین، هدف ما تنظیم متغیرهای تصمیم برای بیشینه‌کردن رضایت مشتری با کمترین هزینه عملیاتی است. زیرسیستم‌های نمونه شامل واحدهای فروشنده مواد خام، تولید و مونتاژ و توزیع و 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 می‌کند. 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 توصیف می‌شوند. در برخی مدل‌ها 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.

در کار با سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین، اثر شلاق چرمی نیز باید مورد بررسی قرار گیرد. 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.

از آنجا که مدل‌های متعددی برای نشان دادن عملکرد سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین استفاده می‌شوند، باید یک مدل مناسب در جهت اهداف کنترلی مورد نظر بدست آورد. در این راستا می‌توان مدل‌های متمرکز موجود را بکار برد. همچنین می‌توان با استفاده از ساختار فیزیکی سیستم یا بر اساس تحلیل‌های ریاضی، مدل را به زیرسیستم‌های غیرمتمرکز تفکیک کرد. همچنین می‌توان زیرسیستم‌ها را به صورت مستقیم مدل کرد.

کنترل پیش‌بین، نامی است که به شکلی از کنترل که در آن پیش‌بینی رفتار یک سیستم در فرمول‌بندی آن نقش دارد اطلاق می‌شود و زمانی که کارایی بهتری نسبت به آنچه که از کنترل غیرپیش‌بین به دست آمده است مورد نیاز باشد به آن پرداخته می‌شود. این حالت سیستم‌هایی را شامل می‌شود که رفتار آینده آنها کاملاً متفاوت از چیزی است که از رفتار فعلی آنها دریافت می‌شود. به طور مثال سیستم‌های با تأخیر زمانی، سیستم‌های مرتبه بالا، سیستم‌های با میرایی ضعیف و غیر مینیمم فاز از این نوع

سیستم‌ها هستند. در هر گام کنترلی، کنترل پیش‌بین یک دنباله حلقه باز از تنظیمات متغیرهای تصمیم را به منظور بهینه‌سازی رفتار آینده سیستم محاسبه می‌کند که در نهایت دنباله‌ای از متغیرهای ورودی مناسب در افق تعریف شده برای کنترل جهت اعمال به سیستم به دست می‌آید. اولین درایه این دنباله و در برخی موارد عملی چند درایه و یا برازشی از آن‌ها، به سیستم اعمال شده و عملیات پیش‌بینی و بهینه‌سازی در هر گام کنترلی که می‌تواند دوره نمونه‌برداری سیستم باشد، مجدداً انجام می‌پذیرد.

کنترل پیش‌بین 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.

نووعاً کنترل‌کننده‌های پیش‌بین 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 مانند نیروگاه، سیستم‌های توزیع آب، سیستم‌های ترافیک، سیستم‌های تولید و سیستم‌های اقتصادی، و سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین گاهاً ضروری است که نظریه‌های کنترلی، غیرمتمرکز یا توزیع شده باشند. بدین معنی که ورودی‌های کنترل محلی با استفاده از اندازه‌گیری‌های محلی و مدل‌های مرتبه کاهش یافته از دینامیک‌های محلی محاسبه می‌شوند. مزیت اصلی کنترل غیرمتمرکز کاهش بار محاسباتی و پیچیدگی محاسباتی است، چرا که برای سیستم‌های مقیاس بزرگ با کنترل پیش‌بین متمرکز، محاسبه آنالاین ورودی ابعاد بالا بسیار پیچیده و نامناسب، غیرعملی و غیرانعطاف‌پذیر به نظر می‌رسد. در نظریه‌های غیرمتمرکز، هدف دستیابی به تعدادی درجه هماهنگی در میان زیرسیستم‌های همسایه از نقطه نظر متغیرهای جفت شده است که مسئله کنترل پیش‌بین را با متغیرها، هزینه‌ها و محدودیت‌های مربوطه محلی بدون حل کردن یک مسئله کنترل پیش‌بین متمرکز حل می‌کند. در کنترل‌کننده‌های چندگانه در ساختار غیرمتمرکز کنترل پیش‌بین، سعی بر حل

مسئله کنترل دینامیکی است. اگرچه به طور محض ضروری نیست، اما وقتی حل‌کننده‌های مسئله بصورت چندگانه در نظر گرفته می‌شوند، مسائل گوناگون چندگانه‌ای وجود دارند. امتیاز اصلی این کار این است که بار محاسباتی می‌تواند کاهش یابد و هر کنترل‌کننده می‌تواند با دیگر کنترل‌کننده‌ها برای حاصل شدن یک حل خوب، مرتبط شده و همکاری کند.

در طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین، می‌توان چند راهکار را استفاده کرد. یک روش این است که از یک کنترل‌کننده پیش‌بین متمرکز در یک ساختار کنترلی یکپارچه استفاده شود. روش دیگر این است که از یک کنترل‌کننده پیش‌بین متمرکز (با توجه به مزایای آن) به انضمام کنترل‌کننده‌های محلی غیرمتمرکز برای دوری از ناپایداری و عملکرد دینامیکی ضعیف سیستم، در یک ساختار کنترلی دو لایه استفاده شود. در یک روش دیگر می‌توان از کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرمتمرکز محلی استفاده کرد.

اگر از روش طراحی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرمتمرکز محلی استفاده شود، غالباً نیاز به طراحی روش‌های هماهنگ‌کننده این زیرسیستم‌های محلی وجود دارد. بدین معنی که در کنترل‌کننده‌های توزیع‌شده درجه‌ای از هماهنگی می‌بایست بین زیرسیستم‌های کنترلی برای دستیابی به یک همگرایی در مقدار متغیرهای مشترک فراهم شود. در این راستا می‌توان یک روش هماهنگی را که در آن زیر سیستم‌ها در حین حل مسئله بهینه‌سازی‌شان تبادل اطلاعات می‌کنند استفاده کرد. در این روش مسئله‌های بهینه‌سازی محلی باید بطور سریع و تکراری همراه با تبادل اطلاعات، در هر زمان نمونه برداری حل شوند تا یک همگرایی کلی در حل مسئله بهینه‌سازی حاصل شود. در یک وضعیت دیگر که در آن ظرفیت شبکه برای این ارتباطات کافی نیست، زیرسیستم‌ها نمی‌توانند دائماً تبادل اطلاعات کنند و کنترل‌کننده‌های محلی تنها یکبار پس از حل هر مسئله بهینه‌سازی در ساختار آنلاین پیش‌بین، می‌توانند تبادل اطلاعات کنند که برای این وضعیت نیز از روش‌هایی همچون روشی که در آن کنترل‌کننده‌های پیش‌بین محلی از پیش‌بینی‌های کنترل‌کننده‌های همسایه در مرحله گذشته برای تخمین زدن اثرپذیری از زیر سیستم‌های همسایه استفاده می‌کنند، می‌توان بهره برد.

در این کتاب دو مدل از سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین یعنی یک مدل دینامیکی بدون در نظر گرفتن چرخه‌های اطلاعاتی و یک مدل دینامیکی با در نظر گرفتن چرخه‌های اطلاعاتی برای بکارگیری با کنترل‌کننده پیش‌بین مدنظر هستند. بدین منظور از ساختارهای کنترل‌کننده پیش‌بین متمرکز و کنترل‌کننده پیش‌بین غیر متمرکز برای رسیدن به اهداف کنترلی سیستم مدیریت زنجیره تامین یعنی دستیابی به رضایت حداکثری مشتری در ازای پرداخت کمترین هزینه‌ها استفاده می‌شود. همچنین از آنجا که سیستم مدیریت زنجیره تامین در اغلب موارد با تغییرات ناگهانی تقاضا روبروست، سعی می‌شود تا با استفاده از ساختار افق جلورونده کنترل پیش‌بین و حل آنلاین مسئله بهینه‌سازی تابعی معیار، مقاومت سیستم در برابر سرعت تغییر انتقال کمیت‌ها بین زیرسیستم‌های تحت کنترل محلی در زمان‌های نمونه برداری افزایش یابد.

در فصل‌های اول و دوم این کتاب روش‌های مدل‌سازی و کنترل بکارگرفته شده‌ی موجود در منابع، مرور می‌شوند. در فصل سوم، اصول کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مبتنی بر مدل ارائه می‌شوند. در فصل چهارم نیز، تعریف مدل‌ها و طراحی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین و چگونگی اعمال آن‌ها به سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین موردنظر مطرح می‌شوند. در بخش پایانی این کتاب، نتایج شبیه‌سازی‌ها و نهایتاً جمع‌بندی و نتیجه‌گیری و افق پیش‌روی محققان در این زمینه ارائه خواهند شد.

به طور کلی مطالعه‌ی این کتاب به دانشجویان و پژوهشگران رشته‌های مهندسی برق - کنترل، مهندسی صنایع، مهندسی شیمی و نفت، مهندسی مکانیک، و رشته‌های مدیریت و اقتصاد توصیه می‌شود. مطالب این کتاب می‌تواند تا حد قابل قبولی نیاز پژوهشگران را در زمینه‌های مطالعاتی زیر برآورده نماید:

- سیستم مدیریت زنجیره تامین
- مدل‌سازی سیستم مدیریت زنجیره تامین
- کنترل کلاسیک و کنترل مدرن سیستم مدیریت زنجیره تامین
- کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل و روش‌های پایدارسازی آن
- کنترل سیستم‌های مقیاس بزرگ

- کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز و روش های هماهنگ‌سازی کنترل‌کننده‌های محلی
- کنترل پیشرفته سیستم مدیریت زنجیره تامین
- مطالعه اثر شلاق چرمی در زنجیره تامین و کنترل آن

در پایان، از کمک و همیاری آقایان دکتر جعفر مهرداد، دکتر بهزاد مشیری، دکتر اشکان رحیمی‌کیان، دکتر محمدتقی حمیدی بهشتی و دکتر جعفر رزمی در تالیف و چاپ این کتاب تشکر می‌شود.

محمد میران‌بیگی و دکتر علی‌اکبر جلالی

شهریورماه ۱۳۹۲



فصل ۱:

مدل‌سازی سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین



۱-۱- مقدمه

از دهه ۱۹۶۰ میلادی، تعداد زیادی از پژوهشگران روی سیستم‌های تولید-توزیع- موجودی یا همان سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین^۱ (SCM) تمرکز کردند و روش‌های ریاضی مختلفی از سیستم‌های معادله دیفرانسیلی پیوسته گرفته تا مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی به کار گرفته شده‌اند. یک زنجیره تامین، یک سیستم از موسسات اقتصادی است که برای برآورده کردن تقاضای مشتری به یکدیگر متصل می‌شوند. اجزای تشکیل دهنده زنجیره تامین می‌توانند واحدهای اقتصادی مشابه یا بخشی از شرکت‌های مختلف باشند. به عبارت دیگر یک زنجیره تامین، یک شبکه از امکانات (تجهیزات) و مراکز توزیع (تامین‌کننده‌ها، کارخانجات، توزیع‌کننده‌ها و خرده‌فروش‌ها) می‌باشد که عملیات تامین مواد خام، انتقال مواد خام داخل محصولات میانی و نهایی، و توزیع محصولات نهایی به مشتریان را انجام می‌دهد [۱]. در هر صورت، 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. 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 (۱-۱) دیده می‌شود در اکثر طرح‌های اولیه، جریان کالا از یک رده به رده بعدی منتقل می‌شود تا کالا به مصرف‌کننده نهایی برسد. یک زنجیره تامین نوعاً به وسیله یک جریان رو به جلو از مواد و جریان رو به عقب از اطلاعات تعریف می‌شود.



شکل (۱-۱): نمایی از ساختار کلی مدیریت زنجیره تامین

در گذشته قبل از وجود مدیریت زنجیره تامین، هر رده در زنجیره تامین به

صورت مستقل کار می‌کرد. مدیرها در هر رده بر اساس نیازها و اهداف خود با توجه به محدودیت‌های اعمال شده بوسیله رده‌های همسایه تصمیم‌گیری می‌کردند و هر رده تلاش می‌کرد تا کار خود را به صورت مجزا بهینه کند. در نتیجه یک دنباله از سیستم‌های بهینه‌سازی شده به صورت محلی وجود داشت و نیازی به تشکیل یک بهینه کلی نبود. در آن زمان شرکت‌ها مایل بودند تا موجودی‌های خیلی کوچک را برای کمینه کردن هزینه‌ها اداره کنند و انعطاف‌پذیری برای تغییر خطوط تولید را حفظ کنند. این ملزومات نیز تنها از طریق در نظر گرفتن زنجیره تامین به عنوان یک موسسه مستقل، برآورده می‌شوند.

ظهور کامپیوتر در دهه ۱۹۷۰ میلادی، کارخانجات را برای تحلیل و ساده‌کردن فرایندهای تولید با استفاده از "طرح‌ریزی مواد اولیه مورد نیاز" (MRP) و "طرح‌ریزی منابع تولید" (MRP2) توانا ساخت. سپس در دهه ۱۹۸۰، روش‌های مدیریت مناسب همانند ارسال به موقع کالا^۳ (JIT) ظهور کردند [۴-۲].

مدیرهای زنجیره تامین امروزی با توجه به موارد زیر عمل می‌کنند [۵]:

- شناخت و کمی کردن ویژگی‌های تقاضا مانند تغییر قیمت، زمان تحویل (مدت زمان بین دادن سفارش و دریافت کالای مربوطه که برآیندی از تاخیرهای زمانی سیستم است) و قابلیت اطمینان سرویس.
- جریان‌های اطلاعاتی میان رده‌ها چگونه استفاده می‌شوند؟
- پیش‌بینی‌های تقاضا چگونه بدست می‌آیند و چگونه سیستم تحت آن‌ها عمل می‌کند؟
- تصمیمات کجا ساخته می‌شوند؟
- سطوح موجودی برای ارضای سطوح هدف سرویس مشتری.
- چگونه باید بر اغتشاشات غلبه کرد؟

-
1. Material Requirements Planning
 2. Manufacturing Resource Planning
 3. Just in Time Shopping

مشکلات رقابت بین‌المللی و مسائل دیگر این انتخاب‌ها را سخت‌تر می‌کنند. مصرف‌کنندگان امروزی تنوع بیشتری از محصولات را نسبت به گذشته تقاضا می‌کنند و طبیعتاً چنین تقاضاهایی طول عمر کمتری هم دارند. به علاوه توازن توان در اکثر سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین به سمت خرده‌فروش منتقل می‌شود. همچنین اثر تقویت تقاضا در زنجیره تامین تحت عنوان اثر شلاق چرمی وجود دارد که اولین بار در یک مدل زمان پیوسته دیده شد که در آن انحرافات کوچک تقاضا در خرده‌فروش وقتی به سمت رده‌های بالادستی حرکت می‌کنیم، بیشتر می‌شود. نسبت‌های تقویت نوعی در یک زنجیره دو رده‌ای دو به یک، و در یک زنجیره چهار رده‌ای بیست به یک است [۶-۷].

روش‌های گوناگونی برای مدل‌سازی زنجیره‌های تامین پیشنهاد شده‌اند. مطابق [۸]، آن‌ها داخل چهار دسته دسته‌بندی می‌شوند:

- ۱- مدل‌های قطعی^۱، که در آن‌ها همه پارامترها شناخته شده‌اند.
- ۲- مدل‌های تصادفی^۲، که در آن‌ها لافل یک پارامتر ناشناخته است اما از یک توزیع احتمالی تبعیت می‌کند.
- ۳- مدل‌های نظریه بازی اقتصادی^۳
- ۴- مدل‌های مبتنی بر شبیه‌سازی، که عملکرد چند روش در یک زنجیره تامین را ارزیابی می‌کند.

اکثر این مدل‌ها، مدل‌های فضای حالت هستند. به هر حال هنگامی که محققان با دینامیک‌های زنجیره تامین روبرو هستند، مدل‌های استاتیک نارسا هستند. این خصوصیات دینامیک متاثر از نوسانات تقاضا، تاخیرهای زمانی، پیش‌بینی‌های فروش و عوامل دیگری هستند. بنابراین روشن است که در نظر گرفتن خصوصیات دینامیکی، یک امتیاز رقابتی در مدل‌سازی سیستم‌های زنجیره تامین است. پس دور از انتظار

1. Deterministic Models
 2. Stochastic Models
 3. Economic Game-theoretic Models

نیست که تحلیل و طراحی دینامیکی سیستم‌های زنجیره تامین توجه زیادی را از طرف پژوهشگران و صنعتگران به خود جلب کرده باشد.

در باب مدل‌سازی دینامیک‌های زنجیره‌های تامین نیز، چهار دسته اصلی شامل مدل‌های معادله دیفرانسیلی زمان پیوسته، مدل‌های معادله تفاضلی زمان گسسته، سیستم‌های شبیه‌سازی رخداد گسسته^۱، و روش‌های تحقیق در عملیاتی^۲ (OR) وجود دارند که در ادامه بررسی می‌شوند.

۱-۲- مدل‌های معادله دیفرانسیلی زمان پیوسته

در موارد بسیاری به دلیل ظهور اکثر ویژگی‌های موثر مسئله، زنجیره‌های تامین با استفاده از معادلات دیفرانسیل با هدف کنترل مدل می‌شوند. بنابراین یک دسته وسیع از روش‌های نظریه کنترل به کمک این مدل‌سازی پیاده می‌شوند. همچنین مدل‌های معادله دیفرانسیلی دارای مزیت توانایی ورود به حوزه فرکانس هستند. این ویژگی، یک چارچوب مشخص برای مطالعه سیستم‌هایی که در آن‌ها نوساناتی همانند تغییرات تقاضا نمایان هستند را عرضه می‌کند.

از آنجا که معادلات دیفرانسیل خروجی‌های هموار تولید می‌کنند، بنابراین آن‌ها برای مدل‌سازی همه زنجیره‌های تامین مناسب نیستند. این مدل‌سازی در یک سطح به هم پیوسته بیان می‌شود و نهادهای انفرادی (تولیدات) در نظر گرفته نمی‌شوند، بلکه با سطوح کالا و نرخ‌های جریان تعریف می‌شوند. در نتیجه، این روش‌ها برای فرایندهای تولیدی که در آن‌ها هر نهاد منحصر بفرد (محصول) اثر زیادی روی وضعیت کلی سیستم دارد، مناسب نیستند [۹].

سیمون^۳ در سال ۱۹۵۲ میلادی یکی از اولین افرادی بود که روش‌های تبدیل لاپلاس را برای تجزیه و تحلیل سیستم‌های ساده تولید - موجودی استفاده کرد. در حقیقت، او معادلات سیستم را بصورت تحلیلی حل کرد و بررسی کرد که چگونه

1. Discrete Event Simulation Systems
2. Operational Research Methods
3. Simon

ویژگی‌های حل بوسیله پارامترهای سیستم معین می‌شوند. همچنین او نشان داد که برآوردن تاخیرهای خالص با این چارچوب دشوار است. در عوض او از تاخیرهای نمایی استفاده کرد که تاخیرهای خالص را بوسیله هموارکردن سیگنال خروجی در زمان تقریب می‌زند [۱۰].

در این باب فورستر^۱ هم از تاخیرهای نمایی استفاده کرد. او یک مدل غیرخطی از یک زنجیره تامین را با استفاده از کوپلینگ تکرار شده‌ی سیستم‌های معادله دیفرانسیلی مرتبه اول ساده بسط داد که غیرخطی بودن این مدل به سبب انجام تحلیل‌های بسیار کم، مشکلی ایجاد نخواهد کرد. در عوض، مدل تنها برای اهداف شبیه‌سازی استفاده می‌شود. مدل‌های شبیه‌سازی، همان‌طور که از نامش پیداست، مدل‌های بسیار دقیقی هستند که برای تکرار کردن رفتار سیستم با یک مجموعه از شرایط اولیه استفاده می‌شوند. فورستر با بکاربردن آنالیز حساسیت مدل خود، نشان داد که یک درجه بالا از حساسیت پارامتری در تاخیرهای نمایی وجود دارد. این عیب مقاومتی با کوپلینگ تکرار شده‌ی زیرمدل‌ها تشدید می‌شود. توانایی این مدل‌ها در واریسی سناریوی "چگونه می‌شود اگر"^۲ می‌باشد، اما به علت پیچیدگی معمولاً مقبولیت کمی دارند [۷].

سال‌های بعد، کار فورستر بوسیله توئل^۳ و دیگران دنبال شد [۱۱-۱۳]. آن‌ها یک سطح تحلیل زیاد را در ضمن ملاحظه ویژگی‌های برجسته رفتار سیستم، بوسیله ساده‌سازی مدل‌های فورستر به سیستم‌های دو یا سه رده‌ای پایه‌ای‌تر ساده کردند [۱۴]. سیستم‌های بکار گرفته شده در این کارها خطی بودند و این ایجاب می‌کرد که آن‌ها تنها در یک زیرمجموعه از کل فضای حالت قابل قبول باشند. همچنین این مدل‌ها بدون سفارش برگشتی فرض می‌شوند یعنی همه سفارشات میان رده‌ها کاملاً برآورده می‌شوند. همچنین هیچ قید ظرفیتی وجود ندارد. محدودیت اصلی این مدل‌ها از فقدان ذاتی اثر هر رده روی رده بالایی خود ناشی می‌شود. برای مثال از آنجا که فرض بر این است که همه سفارش‌های داده شده به رده تولید بعد از مقداری تاخیر نمایی برآورده

1. Forrester
2. What If
3. Towill

می‌شوند، دینامیک‌های داخلی تولید تأثیری روی رفتار سیستم ندارند [۱۵]. به هر حال وقتی این مدل‌ها در ارتباط با دیگر روش‌ها برای ارزیابی عملکرد زنجیره تامین استفاده شوند، قادر به برطرف کردن عیوب هستند. در پژوهش دیگری، مدل‌های شبیه‌سازی برای نشان دادن اثر طرح‌ریزی مجدد واسطه‌های زنجیره تامین در یک شرکت صوری (مجازی) استفاده شدند [۱۶]. همچنین روش‌های مشابهی در [۱۷] به عنوان قسمتی از یک روش کلی‌نگر برای طراحی یک زنجیره تامین صنعت فولاد استفاده شدند. توپل نیز در ادامه تحقیقاتش، سیستم‌های خبره را برای پارامتریزه کردن یک مدل نوع فورستر استفاده کرد [۱۸-۱۹].

اکثر نتایج مهم کار توپل در بررسی تقویت تقاضا بود [۱۳-۱۲] و [۱۵]. در یک سری از مقالات مشابه، مدل‌های مشابهی برای نشان دادن علل تقویت تقاضا استفاده شدند و علاج‌هایی برای رفع این پدیده پیشنهاد کردند. همچنین در این مقالات، مدل شبیه‌سازی به کمک جستجو در پاسخ پله سیستم، برای کمی کردن این اصلاحات استفاده شد. در حقیقت از مدل‌های شبیه‌سازی برای ارزیابی اثر روش‌های زنجیره تامین گوناگون روی تقویت تقاضا استفاده کردند [۲۰-۲۲]. روش‌های زنجیره تامین به صورت زیر پیشنهاد شده‌اند:

- تنظیم دقیق قانون تصمیم رده
- کاهش دادن تاخیرهای زمانی
- حذف توزیع کننده از زنجیره
- اصلاح طراحی هر رده با استفاده از اطلاعات خط انتقال^۱ به صورت مجزا (از هیچ حالت اضافی استفاده نمی‌کند)
- انتگرال‌گیری از جریان اطلاعات به واسطه سیستم، و تقسیم سفارش‌ها به تقاضای واقعی و سفارش‌های پوشیده (این روند برای ذخیره‌سازی دوباره موجودی استفاده می‌شود).

در نتیجه، معیار مدل شبیه‌سازی پی بردن به روش‌هایی است که در هموارکردن تغییرات الگوی تقاضا موثرترند [۲۳]. برای نمونه مشاهده می‌شود که روش JIT (ارسال به موقع کالا: کالا در زمان نیاز در اختیار واحد سفارش دهنده قرار بگیرد تا هزینه انبارداری کاهش یابد) در کاهش تاخیرهای زمانی و روش حذف رده (روش سوم) و روش پنجم، در هموارکردن تغییرات الگوی تقاضا موثرترند. در همه این مقالات با وجود استفاده از نظریه کنترل، مدل‌ها تنها برای اهداف شبیه‌سازی استفاده می‌شوند. اما تولید در پژوهشی، زنجیره تامین را به عنوان یک سری از تقویت‌کننده‌ها در نظر گرفت که متمایل به روش‌های حوزه فرکانس کلاسیک هستند و در آن هر رده به صورت مجزا تنظیم می‌شود [۱۵] و [۲۴]. اما به هر حال وقتی فقط یک زیرمجموعه از فضای حالت در دسترس است، صحت استفاده از روش‌های حوزه فرکانس که با کل فضای حالت درگیر هستند، باید بررسی شود. در ادامه افراد دیگری قیده‌های ظرفیت را نیز به این مدل‌ها اضافه کردند [۲۵]. در نتیجه مدل‌های شبیه‌سازی کم و بیش روی تفکر زنجیره تامین موثرند. با دانستنی‌های ما، هیچ آنالیز حساسیتی روی این مدل‌ها انجام نمی‌شود. یک نقصان این روش هم این است که هیچ فرصتی برای آنالیز مبتنی بر هزینه فراهم نمی‌آورد و تنها با دینامیک‌ها مرتبط است. در نهایت در همه این کارها به نوعی زنجیره تامین را با مجموعه معادلات زیر توصیف می‌کنند:

$$\begin{cases} \frac{d i(t)}{dt} = p_a(t) - d(t) \\ \frac{d p_a(t)}{dt} = \alpha(p_d(t) - p_a(t)) \end{cases} \quad (1-1)$$

در این معادلات $p_d(t)$ ، نرخ تولید مطلوب و $p_a(t)$ ، نرخ تولید واقعی و α ، نسبت ثابت معین با توجه به ویژگی‌های زنجیره تامین و $d(t)$ ، تقاضا و $i(t)$ ، سطح موجودی است. با تخصیص یک سطح موجودی مطلوب معین، این معادلات بازچینی شده و ورودی‌های کنترلی برای داشتن نرخ تولید مطلوب و مشتق‌های آن انتخاب می‌شوند.

۱-۳- مدل‌های معادله تفاضلی زمان گسسته

این مدل‌ها با مدل‌های معادله دیفرانسیلی زمان پیوسته رابطه نزدیکی دارند. در واقع همه‌ی معادلات استفاده شده برای توصیف سیستم، یک منشا زمان پیوسته دارند و از اینرو این روش‌ها تعدادی امتیازات مشابه دارند. برای نمونه، دینامیک‌های سیستم به صورت واضح آشکار می‌شوند. همین‌طور تعدادی محدودیت مشابه هم، همانند ناتوانی در رسیدگی به مسائل ترتیب‌گذاری و دسته‌ای، و دشواری ترکیب هزینه‌های انتقال در مدل دارند.

اما این سوال مطرح می‌شود که اگر روش‌های تحلیل زمان گسسته با روش‌های زمان پیوسته مشابه است، چرا از روش زمان گسسته استفاده می‌شود؟ جواب این است که چون دینامیک‌های زنجیره تامین اساساً گسسته هستند، مدل‌های زمان گسسته یک امتیاز ذاتی نسبت به مدل‌های زمان پیوسته دارند. همچنین مدل‌های زمان گسسته، نظریه کنترل کلاسیک را داخل یک چارچوب گسسته وارد می‌کنند که اعمال تاخیرهای زمانی را آسان می‌کند. بنابراین این مدل‌ها دو ویژگی مهم مدل‌های رخداد گسسته و مدل‌های زمان پیوسته را با هم ترکیب می‌کنند.

در پژوهش‌های گذشته با گسسته‌سازی سیستم‌های زمان پیوسته، از طراحی فیدبک حالت ساده برای ساختن کنترل‌کننده‌های ثابت تکه‌ای در سیستم‌های تولید- موجودی استفاده شد [۲۶-۲۷]. روش‌های مشابهی نیز روی سیستم‌های سری شده بزرگتر که به زنجیره‌های تامین نزدیک‌ترند، به کار گرفته شدند [۲۸]. یکی از عیوب این روش‌ها، نبود امکان محدود کردن سیگنال‌های کنترل بود. اما در مقالات بعدی، قیود روی دامنه سیگنال کنترل به عنوان قیود ظرفیت به کار گرفته شدند [۲۹]. هموارسازی نمایی گسسته نیز در [۳۰]، در امتداد با گراف‌های جریان سیگنال برای ارائه سیستم استفاده شد. سپس روش‌های تبدیل z هم برای رسیدگی به تقویت تقاضا استفاده شدند. المغربی^۱ نیز سیستم‌های گسسته ساده را با تقاضای تصادفی با استفاده از روش‌های تبدیل z تحلیل کرد [۳۱].

روش‌های قبلی همه منحصراً روی دینامیک‌های سیستم تمرکز داشتند و در به حساب آوردن هزینه‌های روش‌های کنترل ناتوان بودند. برای وارد کردن هزینه‌های روش‌های کنترل، از روش‌های کنترل بهینه همانند روش‌های MPC استفاده شد، که در فصل بعد به آن‌ها اشاره می‌شود. معادلات دینامیکی زنجیره‌های تامین با هدف بهینه‌سازی یک مسئله کنترلی غالباً به صورت زیر داده می‌شوند [۳۲]:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) - u_1(k - \theta_1) - d(t) \\ x_2(k+1) = x_2(k) - u_2(k - \theta_2) - u_1(k) \\ x_3(k+1) = x_3(k) - u_3(k - \theta_2) - u_2(k) \end{cases} \quad (۲-۱)$$

که در اینجا $d(k)$ ، تقاضا در زمان k و $x_i(k)$ ، سطح موجودی در رده i و $u_i(k - \theta_i)$ ، سفارش رده i ام تاخیردار شده به وسیله θ_i می‌باشند، و هزینه‌های سفارش و موجودی به صورت مربعی فرض می‌شوند. در مجموع، سه حالت بررسی می‌شود که هر حالت با یک میزان متفاوت از توانایی در زنجیره تامین متناسب است:

- کارخانه عملیات خودش را بهینه کند و روش حاصله را روی رده‌های دیگر اجرا کند.

- هزینه عملیاتی سیستم با فرض همکاری کامل میان رده‌ها بهینه شود.
- هر رده به صورت محلی با استفاده از تابعی معیار خود در یک روش غیرمتمرکز بهینه‌سازی شود.

مدل‌های نظریه بازی اقتصادی هم عموماً به صورت گسسته مدل می‌شوند. برای اولین بار کریستی و گروت^۱، یک چارچوب نظریه بازی اقتصادی را برای مدل‌سازی روابط خریدار - فروشنده در یک زنجیره تامین بسط دادند. این کار بر مبنای یک ماتریس رابطه^۲ زنجیره تامین است که برای شناسایی شرایط مربوط به فرایند و تولید (که در محدوده‌های فرض شده هستند) برای روابط مطلوب استفاده می‌شود.

1. Christy & Grout
2. Relationship Matrix

ریسک‌های فرض شده بوسیله فروشنده و خریدار داخل ماتریس قرار می‌گیرند و بنابراین چهار دسته ریسک بوجود می‌آید. برای همه این انواع ریسک، روش‌های مناسبی در مدل کردن روابط خریدار-فروشنده ابداع شده است [۳۳-۳۵].

۱-۴- سیستم‌های شبیه‌سازی رخداد گسسته

سیستم‌های دینامیکی رخداد گسسته شامل شغل‌ها و منابع هستند. در حقیقت شغل‌ها که برای اکثر کاربردها نهادهای فیزیکی مستقلی هستند، از منبعی به منبع دیگر نقل مکان می‌کنند. برای نمونه در یک مدل از زنجیره تامین، شغل‌ها مواد اولیه هستند که به سمت ماشین‌ها و مراکز ذخیره موجودی که هر دو جزو منابع هستند، می‌روند. در آنجا ویژگی‌های مواد اولیه تغییر پیدا کرده و به صورت محصولات نهایی به دست خرده فروش می‌رسند. سیستم‌های دینامیکی رخداد گسسته به خاطر نقصان روش‌های معادله دیفرانسیلی برای حل برخی مسائل بوجود آمد. به عنوان مثال، معادلات دیفرانسیل بر رفتار یک سری از صف‌ها در یک سوپرمارکت نظارت می‌کنند. مدل‌سازی پدیده‌ای چون معاوضه صف (هنگامی که مشتری به صف‌های کوتاه‌تر پی می‌برد) و سرعت سرویس متغیر (در اینجا وقتی مشتری‌های بیشتری وجود دارند، سریع‌تر است)، این معادلات را نامفهوم می‌سازند. در نتیجه بکارگیری مجازی هرگونه ابزار نظری غیرممکن می‌شود. اما چنین قواعدی به سادگی می‌توانند داخل مدل سیستم‌های دینامیکی رخداد گسسته وارد شوند. به علاوه، فاکتورهای تصادفی نیز هیچ‌گونه مشکلی برای این مدل‌ها بوجود نمی‌آورند. در حقیقت ساختار سیستم‌های دینامیکی رخداد گسسته، ذاتاً برای کاربرد با تحلیل شبیه‌سازی مونت کارلو^۱ که پاسخ‌های قاطعی برای اکثر نیازهای مدل‌سازی فراهم می‌آورد، مناسب است. ویژگی این مدل‌ها، توانایی آن‌ها در بکارگیری با طبیعت گسسته‌ی فرایندهای مبتنی بر پیشامد (رخداد) در حال حفظ کردن چارچوب زمان پیوسته است. اما مشکل سیستم‌های دینامیکی رخداد گسسته، فقدان یک زبان توصیفی مجمل برای فرمولاسیون آن‌هاست

1. Monte Carlo


که به خاطر نداشتن یک چارچوب نظری پذیرفته شده، با اصولی شبیه به قواعد حاکم بر حساب دیفرانسیل و انتگرال بیان می‌شوند. این مشکل مانع استفاده گسترده‌تر سیستم‌های شبیه‌سازی دینامیکی رخداد گسسته شده است. در نتیجه این سیستم‌ها اصولاً با شبیه‌سازی و روش‌های "جعبه سیاه"^۱ مرتبط است. اما به هر حال روش‌هایی همچون مدل‌های اتوماسیون/ زنجیره مارکوف^۲ (مثل شبکه‌های پتری^۳)، مدل‌های جبری حداقل- حداکثر^۴، مدل‌های صف‌بندی^۵ و مدل‌های فرایند شبه مارکوف تعمیم‌یافته^۶ برای توسعه عمومی سیستم‌های شبیه‌سازی دینامیکی رخداد گسسته وجود دارند. مدل‌های زنجیره مارکوف قصد دارند تا وضعیت سیستم در زمان گسسته را در نظر بگیرند. آن‌ها از نظر محاسباتی برای سیستم‌های واقعی سنگین هستند. مدل‌های صف‌بندی ساده خیلی شبیه به زنجیره‌های مارکوف هستند. فرایندهای شبه مارکو تعمیم یافته نیز، یک تلاش برای قانون‌دار کردن توصیف سیستم‌های دینامیکی رخداد گسسته به وسیله تعریف مسیرهای حالت متشابه با سیستم‌های پیوسته هستند. روش‌های جبری نیز تنها قابل کاربرد با سیستم‌های قطعی^۷ (که این سیستم‌ها نیز در مدل‌سازی سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین زیاد استفاده نمی‌شوند) هستند [۳۶-۳۸].

۱-۵- روش‌های تحقیق در عملیاتی


نظریه تحقیق در عملیات (OR) از یک مجموعه از روش‌های ریاضی همچون برنامه‌ریزی خطی و روش صف، زنجیره‌های مارکوف و برنامه‌ریزی پویا تشکیل شده است. این روش‌ها در صنعت کاربرد بسیاری دارند. روش‌های OR غالباً روش‌های تحلیلی قطعی و تصادفی هستند. در [۳۹] سودمندی روش‌های OR در حل مسئله دیده می‌شود. در این مقاله روش‌های ابتکاری برای انجام بهینه‌سازی مقید روی یک تابع

1. Black Box
2. Markov Chain/Automaton Models
3. Petri Nets
4. Min-Max Algebraic Models
5. Queuing Models
6. Generalized Semi-Markov Process Models
7. Deterministic Systems

هزینه، روش‌های بهینه را معین می‌کنند. یک روش مشابه نیز با بکارگیری یک مدل استاتیکی تحلیلی قطعی بر سطوح موجودی و زمان‌های تحویل انجام شده است. در این کار سطوح پایه موجودی مطلوب با استفاده از روش‌های جبری ساده در حضور تغییر ویژگی‌های تقاضا تعیین شده و یک توازن میان هزینه‌های موجودی و سفارش‌های برگشتی ایجاد شده است [۴۰]. البته این روش‌ها بار محاسباتی زیادی دارند و به این دلیل که در این روش‌ها شبیه‌سازی وجود ندارد، معمولاً باید یک ساختار هزینه، جزبه‌جز شناخته شود. در پژوهش دیگری، مدل‌های مبتنی بر هزینه بسط داده شدند و روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی برای بهینه‌سازی یک شبکه تولید-توزیع استفاده شدند [۴۱]. همچنین، یک ارائه درختی از یک زنجیره تامین ارائه شده و در آن از برنامه‌ریزی پویا برای محاسبه سطوح موجودی استفاده شده است [۴۲]. به هر حال پژوهش‌های زیادی در زمینه استفاده از روش‌های OR در حل مسائل سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین و روش‌های بهینه‌سازی OR انجام شده است که مطالعه و بررسی آن‌ها به خواننده واگذار می‌شود [۴۳-۴۴] و [۴۱].



فصل ۲:
کنترل سیستم‌های
مدیریت زنجیره تامین



همانطور که اشاره شد، زنجیره‌های تامین سیستم‌های دینامیکی پیچیده‌ای هستند که بوسیله تقاضاهای مشتری تحریک می‌شوند. کارایی زنجیره‌های تامین اغلب به تصمیمات مدیریتی که اغلب بر پایه بینش و تجربه هستند، متکی است. به علت افزایش پیچیدگی سیستم‌های زنجیره تامین که متأثر از تغییرات در ویژگی‌های مشتری، یکپارچه‌سازی اقتصاد و رقابت میان شرکت‌هاست، این تصمیمات از حالت بهینه دور هستند. فاکتور مشکل‌ساز دیگر در ساختن تصمیم، مراحل مختلف در زنجیره‌های تامین است که اغلب بوسیله گروه‌های مختلفی از افراد با فلسفه‌های مدیریتی متفاوت نظارت می‌شوند. از اوایل دهه ۱۹۵۰ میلادی مشخص شد که یک چارچوب محکم برای تحلیل دینامیک‌های زنجیره تامین و در نظر گرفتن تصمیم‌های مناسب، می‌تواند عملکرد سیستم‌ها را بهبود ببخشد. در نیم قرن اخیر، ابزارهای ریاضی متعددی در کنترل مسئله مدیریت زنجیره تامین بکار گرفته شده‌اند. این ابزارها از تحلیل‌های تابع تبدیل سنتی تا روش‌های کنترلی پیچیده گسترده شده‌اند که هدف این فصل نیز ارائه یک تاریخچه و بازخوانی این تلاش‌هاست.

در سال‌های اخیر بنگاه‌های اقتصادی تمایل رو به رشدی برای مدیریت زنجیره تامین از خود نشان داده‌اند. این به علت رشد هزینه تولید و انتقال، یکپارچه‌سازی بازار و تقاضای مشتری برای محصولات متنوع دارای طول عمرهای کوتاه می‌باشد که همگی عوامل افزایش رقابت میان شرکت‌ها هستند. مدیریت زنجیره تامین کارآمد، می‌تواند به یک هزینه تولید و انتقال و هزینه موجودی پایین‌تر منجر شود و سرویس مشتری را از طریق همه مراحل که در زنجیره تامین وجود دارند، بهبود ببخشد [۴۵]. نظریه کنترل ابزارهای ریاضی کافی برای تحلیل، طراحی و شبیه‌سازی سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین بر مبنای مدل‌های دینامیکی را فراهم می‌آورد. به ویژه، نظریه کنترل برای مطالعه و یافتن راه‌حلی برطرف کردن اثر بد پدیده شلاق چرمی به کار می‌رود [۳۸]. در کاربردهای کنترل کلاسیک در سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین، تحلیل‌ها به

سیستم‌های خطی مربوط می‌شوند و توابع تبدیل لاپلاس و تبدیل Z برای مدل کردن دینامیک‌های سیستم‌های خطی پیوسته و گسسته شکل می‌گیرند. در این راستا ابزارهای تحلیل استاندارد همانند نقشه‌های بود^۱ و نقشه‌های نایکوئیست^۲ و معیار پایداری راث و هریتز^۳، و بررسی پاسخ‌های گذرا، برای تحلیل و ارزیابی طراحی‌ها استفاده می‌شوند [۴۶]. در کاربردهای نظریه کنترل پیشرفته^۴، دینامیک‌های سیستم در حوزه زمان زمان آزموده می‌شوند و بوسیله مدل‌های فضای حالت توصیف می‌شوند. در کل، روش‌های کنترل پیشرفته، روش‌های کنترل بهینه با هدف بهینه‌سازی تابعی معیار عملکرد سیستم است. برنامه‌ریزی دینامیکی^۵ و معادلات هامیلتون-ژاکوبی-بلمن^۶ (HJB)، در کنترل بهینه مرسوم هستند [۴۷-۴۸]. موضوع مهم دیگر در نظریه کنترل پیشرفته، حضور نامعینی‌هاست که روند تصمیم‌سازی موثر راجع به تولید، توزیع و ذخیره محصولات را پیچیده می‌کند. نامعینی‌ها، پیش‌بینی تقاضای آینده، تخمین زمان تحویل، تخمین احتمالات خطا و مواردی از این قبیل را دچار چالش می‌کنند. اکثر مشکلات زنجیره تامین، مشکلات کنترل بهینه تصادفی هستند. بنابراین در مجموع، تعدادی از مقالات که شبکه‌های زنجیره تامین را از دیدگاه نظری سیستم در نظر می‌گیرند، بر مبنای کنترل بهینه و برنامه‌ریزی دینامیکی هستند.

به علت مشکل ابعادی، بسیاری از مدل‌های مبتنی بر کنترل بهینه و برنامه‌ریزی دینامیکی نمی‌توانند به صورت تحلیلی حل شوند. در نتیجه باید به انواعی از تقریب متوسل شد. کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل متمرکز^۷ و مفهوم افق دورشونده، یک روش مناسب برای برطرف کردن قابلیت برهم‌کنش در طراحی کنترل فیدبک حلقه بسته بهینه است. ایده‌ی اصلی، حل آنلاین یک مسئله کنترل بهینه حلقه باز افق محدود با توجه به حالت جاری به عنوان شرایط اولیه برای مسئله است. در این راستا، مسئله در هر لحظه

-
1. Bode Plots
 2. Nyquist Plots
 3. Routh and Hurwitz Stability Criteria
 4. Advanced Control Theory
 5. Dynamic Programming
 6. Hamilton-Jacobi-Bellman
 7. Centralized MPC

زمانی گسسته، فرموله و حل می‌شود [۴۹].

روش دیگر مقابله با نامعینی‌ها، مدل‌کردن آن‌ها به عنوان یک کمیت نامعین محدود شده‌ی قطعی، است. در این باب، هیچ اطلاعاتی راجع به اطلاعات احتمالی اغتشاشات لازم نیست. برای نمونه، تقاضای آینده در یک حد بالا و یک حد پایین، بدون نیاز به تعریف درست‌نمایی رخدادن هر پیشامد داخل این محدوده، محدود می‌شود. معمولاً در کنترل سیستم‌هایی که در آن‌ها، اغتشاشات به عنوان کمیت‌های نامعین محدود شده توصیف شده‌اند، از روش‌های مقاوم استفاده می‌شود. به ویژه کنترل بهینه مقاوم، یک کنترل‌کننده فیدبک را که بدترین حالت مقدار یک تابعی معیار هزینه روی همه تحقیق‌های ممکن پارامترهای نامعین را کمینه می‌کند، جستجو می‌کند. به علاوه، باید قیود مرتبط با کار سیستم برای هر مقدار ممکن پارامترهای نامعین برآورده شوند [۵۰]. همچنین روش‌های دیگری نیز برای رفع مشکل ابعادی در برنامه‌ریزی دینامیکی و فقدان یک مدل دقیق برای سیستم تصادفی تحت بررسی وجود دارند. این روش‌ها معمولاً بر اساس برخی از انواع تقریب تابعی معیار (هرینه) مرکب با شبیه‌سازی‌ها هستند و از روش‌های یادگیری^۱، برنامه‌ریزی دینامیکی عصبی^۲ یا تقریب برنامه‌ریزی دینامیکی بهره می‌برند [۵۱].

در ادامه، به بررسی پژوهش‌هایی که قبلاً بر روی بکارگیری روش‌های کنترل کلاسیک، روش‌های کنترل بهینه، روش‌های کنترل پیش‌بین، کنترل مقاوم و تقریب‌زدن برنامه‌ریزی دینامیکی انجام شده است، در بخش‌های جداگانه‌ای پرداخته می‌شود.

۲-۲- کنترل کلاسیک

همان‌گونه که در بخش ۱-۲ هم بیان شد، استفاده از روش‌های کنترل کلاسیک در مسئله مدیریت زنجیره تامین به دهه ۱۹۵۰ میلادی بر می‌گردد که سیمون^۳، روش زمان

1. Learning Techniques
2. Neuro-dynamic Programming
3. Simon

پیوسته سرومکانیسم^۱ را برای تنظیم نرخ تولید در یک سیستم ساده‌ی تک محصولی بکار گرفت [۱۰]. بعدها این ایده به وسیله‌ی وسیان^۲ به مدل‌های زمان گسسته که در آن چارچوب کنترل موجودی بر پایه تبدیل Z بود، بسط داده شد [۵۲]. در اواخر دهه ۱۹۵۰ میلادی، پیشرفت چشم‌گیری تحت عنوان دینامیک‌های صنعتی^۳ در کنترل سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین به وجود آمد [۵۴-۵۳]. این روش که روی دینامیک‌های سیستم تمرکز می‌کند، نظریه فیدبک را به کار می‌گیرد و سیستم‌های دینامیکی همچون سیستم‌های تولید-موجودی را تحلیل کرده و بهبود می‌بخشد. حیطه عمل این روش در حوزه وسیعی از سیستم‌های پیچیده همانند سیستم‌های اجتماعی، برنامه‌ریزی تولید، مدیریت عمومی، مدل‌سازی پزشکی و بیولوژیکی، توسعه تئوریک، علوم اجتماعی و طبیعی، دینامیک‌های اقتصادی خرد و کلان^۴، مسائل آموزشی، انرژی و محیط زیست، تصمیم‌سازی دینامیکی، طراحی استراتژیک و مواردی از این دست می‌باشد [۵۵]. در این راستا، کتاب نوشته شده توسط استرمان^۵، یک منبع اطلاعاتی خوب در مورد دینامیک‌های سیستم و کاربردهای گوناگون آن می‌باشد و همچنین شامل بخش‌های ویژه‌ای در باب مسئله مدیریت زنجیره تامین است. کار فورستر^۶، ابزاری قوی برای مدل کردن و شبیه‌سازی پدیده‌های دینامیکی پیچیده شامل قوانین کنترل غیرخطی ارائه داد. اما به هر حال روش دینامیک‌های صنعتی به علت نداشتن پشتیبانی تحلیلی کافی و ارائه ندادن راهکارهای مناسبی برای بهبود عملکرد سیستم به مهندسين، مورد نقد است [۵۸-۵۶].

بنابراین توپیل^۷، سیستم کنترل تولید مبتنی بر سفارش و موجودی (IOBPCS) را در یک شکل بلوک دیاگرامی متشکل از توابع تبدیل زیرسیستم‌های زنجیره تامین ارائه کرد که در آن سیستم با یک سطح تولید مجموع سروکار دارد [۵۸]. خانواده‌ی مدل‌های

1. Servomechanism
2. Vassian
3. Industrial Dynamics
4. Micro- and Macro-economic Dynamics
5. Sterman
6. Forrester
7. Towill

JOBPCS، مبنای کار بسیاری از کارهای بعدی بودند. زمان تحویل یکی از خصوصیات سیستم است که باید کنترل شود. اگرچه طراح سیستم کنترلی نمی‌تواند زمان تحویل را دستکاری کند، اما باید به بهترین نحو آن را مدل کند. یک مدل دو پارامتری خوب از زمان تحویل در ساختار زمان پیوسته توسط ویکنر در این راستا ارائه شد که قابل تعمیم به شکل زمان گسسته هم می‌باشد. در IOBPCS هدف، نزدیک کردن موجودی واقعی کالا به مقدار مطلوب و بهینه‌سازی سیستم، با توجه به دو معیار عملکردی: بازیابی سطوح موجودی، و کاهش تأثیرات نوسان نرخ تقاضا روی نرخ سفارش، می‌باشد. اثر شلاق چرمی هم تحت عنوان تقویت اثر تغییرات تصادفی کوچک در فروش مراکز فروشگاهی در هر رده از زنجیره تامین، به وسیله دینامیک‌های صنعتی و تحت عنوان "قانون دینامیک‌های صنعتی"^۱ بیان شد [۵۹] و [۵۵]. همچنین به صورت کلی پس از آن، استفاده از اصول مهندسی کنترل در رفع مشکلات زنجیره تامین به وسیله مدل‌سازی دینامیک‌های صنعتی زنجیره‌های تامین و مهندسی مجدد روش‌های موجود توسط توپیل ارائه شد [۶۰].

در کل، دو معیار عملکردی با یکدیگر ناسازگار هستند و طراح کنترل سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین برای هر زنجیره تامین خاص، در جستجوی برقراری بهترین توازن میان سطح موجودی و نرخ سفارش است. در واقع برای برآورده کردن این دو معیار به بهترین نحو ممکن نیاز به یک نوع سازش است. اگر نرخ سفارش ثابت باشد، از آنجا که سطوح موجودی از هر گونه تغییر تقاضا تبعیت می‌کنند، انحرافات زیادی از موجودی مطلوب مشاهده می‌شود. این رویه، هزینه‌های موجودی زیادی به بار می‌آورد. از سوی دیگر سطح موجودی ثابت منجر به برنامه‌ریزی تولید بسیار متغیر و در نهایت هزینه‌های تولید زیاد می‌شود [۶۱].

معیارهای کنترلی استاندارد برای کمی کردن عملکرد روش‌های کنترلی مختلف با توجه به معیارهای عملکرد استفاده می‌شوند. در رابطه با معیار عملکرد اول، رفتار دینامیکی سیستم، هنگامی که یک ورودی پله به عنوان نرخ تقاضا در نظر گرفته

می‌شود، مطالعه شده است، بدین صورت که پاسخ موجودی با توجه به خصوصیاتِ چون زمان نشست^۱، زمان خیز^۲ و حداکثر بالازدگی^۳ ارزیابی می‌شود. در رابطه با معیار عملکرد دوم، نوعاً پاسخ فرکانسی برای ارزیابی عملکرد استفاده می‌شود. پاسخ‌های فرکانسی اطلاعات ارزشمندی در خصوص سیستم می‌دهند. مثلاً در پاسخ‌های فرکانسی خصوصیت پهنای باند نویز به آسانی محاسبه می‌شود و برای کمی کردن تقویت نویز در سیستم (اثر شلاق چرمی) مورد استفاده قرار می‌گیرد. دیزنی و تویل^۴ نشان دادند که خصوصیت پهنای باند نویز تقسیم بر عدد π با اندازه‌ی نسبت تغییر (واریانی نرخ سفارش‌دهی به واریانس نرخ تقاضا)، که توسط چن و همکاران او^۵ در [۶۲] به عنوان معیار اندازه‌گیری اثر شلاق چرمی تعریف شده است، برابر می‌باشد [۶۳].

با توجه به جدول (۱-۲)، مدل‌های خانواده‌ی IOBPCS از سه تابع تبدیل اصلی موجودی، تقاضا و خط انتقال، و یک بهره تنظیم موجودی برای از بین بردن اختلاف میان موجودی مطلوب و واقعی، تشکیل شده‌اند که آن‌ها را از یکدیگر متمایز می‌کند. اما عموماً تابع تبدیل موجودی برای همه این مدل‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شود [۶۴]. اگر مدلی شامل یک نوع از توابع تبدیل نباشد، به جای آن تابع تبدیل در مدل کلی، صفر در نظر گرفته می‌شود.

با بکارگیری تابع تبدیل تقاضا در یک مسیر روبه‌جلو^۶ می‌توان به خطای حالت ماندگار صفر میان سطح موجودی واقعی و سطح موجودی مطلوب دست یافت. تابع تبدیل موجودی نیز با تاثیر بر نرخ سفارش، کسری موجودی را جبران می‌کند. در نتیجه دینامیک‌های سیستم و به خصوص زمان تحویل در محاسبه تابع تبدیل موجودی باید در نظر گرفته شوند. در نهایت، هدف تابع تبدیل خط انتقال نیز کاهش اختلاف میان کالاهای در حال ساخت^۷ (WIP) واقعی و کالاهای در حال ساخت مطلوب می‌باشد.

-
1. Settling Time
 2. Rise Time
 3. Overshoot
 4. Disney & Towill
 5. Chen et al
 6. Feed forward
 7. Work in Process

تابع تبدیل خط انتقال در مقایسه با تابع تبدیل موجودی در افزایش یا کاهش نرخ سفارش، بویژه در مقابله با تغییر ناگهانی تقاضای بازار سریع‌تر عمل می‌کند. در مجموع، حلقه کنترلی WIP، زمان خیز را کاهش و میزان درصد بالازدگی در نرخ سفارش و زمان دستیابی به حالت ماندگار را افزایش می‌دهد [۶۵].

جدول (۱-۲) خانواده‌ی مدل‌های IOBPCS

مدل	بهره تنظیم موجودی	توابع تبدیل تشکیل دهنده
سیستم کنترل تولید مبتنی بر موجودی (IBPCS)	ثابت	موجودی
سیستم کنترل تولید مبتنی بر سفارش و موجودی (IOBPCS)	ثابت	موجودی - تقاضا
سیستم کنترل تولید مبتنی بر سفارش و موجودی متغیر (VIOBPCS)	مضربی از میانگین تقاضای بازار	موجودی - تقاضا
سیستم کنترل تولید مبتنی بر سفارش و موجودی و خط انتقال خودکار (APIOBPCS)	ثابت	موجودی - تقاضا - خط انتقال
سیستم کنترل تولید مبتنی بر سفارش و موجودی متغیر و خط انتقال خودکار (APVIOBPCS)	مضربی از میانگین تقاضای بازار	موجودی - تقاضا - خط انتقال

همان‌طور که ذکر شد، اولین بار توپیل از مدل‌های IOBPCS در یک ساختار زمان پیوسته استفاده کرد [۵۸]. پس از آن آگرل و ویکنر^۱ از یک روش تصمیم‌سازی چند معیاره (MCDM) استفاده کردند [۶۶]. در این روش سرعت پاسخ و همواری

1. Agrell & Wikner

معیارهای بهینگی هستند. تنها تفاوت VIOBPCS در مقایسه با IOBPCS، استفاده از یک مضرب از میانگین نرخ‌های فروش به جای سطح موجودی مطلوب ثابت است. این دو روش به وسیله ابزارهای تحلیل فرکانسی با یکدیگر مقایسه شدند و در نتیجه نشان داده شد که مدل IOBPCS دارای بهره کمتر و شیفت فازی بیشتری است. این بدین معنی است که مدل IOBPCS، نیاز به ظرفیت تولید کمتری دارد، اما در پاسخ‌های زمانی کندتر این دو مدل تقریباً مشابه هم عمل می‌کنند.

مدل APIOBPCS از یک نقطه تنظیم موجودی ثابت بهره می‌برد و شامل تمامی توابع تبدیل موجودی، تقاضا و خط انتقال است [۶۷]. دیزنی و همکاران او^۱ از پارامترهای تنظیم (طراحی) موجود در این مدل برای دستیابی به مقاومت در برابر زمان‌های تحویل تولید و صحت اطلاعات خط انتقال بهره گرفت [۶۸].

ریدالز و بنت^۲ نیز ساختار زمان پیوسته از این مدل را بسط دادند که در آن به جای پیش‌بینی هموار نمایی استاندارد، یک روش پیش‌بینی میانگین متحرک استفاده شد و پیش‌بین اسمیت برای تضمین پایداری بکار گرفته شد [۶۹-۷۰]. پس از آن، تضمین پایداری با استفاده از تقریب پید^۳ (Pade)، بهبود یافت [۷۱]. در ادامه این تحقیقات، ژو و همکاران او^۴، یک سیستم مرکب از تولید و باز تولید را در نظر گرفت و مدل کرد. قسمت بازتولید محصولات، پیشنهادات مفید پژوهشگران و صنعتگران را در جهت منافع شرکت، دریافت و به سیستم کلی وارد می‌کند [۷۲]. لالوانی و همکاران او^۵، ارائه‌های فضای حالت زمان گسسته برای مدل‌های متعددی در خانواده IOBPCS تعریف کردند [۵۹]. همچنین وایت^۶ نشان داد که کنترل‌کننده‌های موجودی تناسبی-مشتق‌گیر-انتگرال‌گیر (PID) سطح موجودی را تا ۸۰ درصد و در نتیجه هزینه‌های موجودی را کاهش دهند [۷۳].

با فرض صحت تخمین زمان تحویل، هر دو مدل‌های APIOBPCS و

-
1. Disney et al
 2. Riddalss & Bennet
 3. Pade Approximation
 4. Zhou et al
 5. Lalwani et al
 6. White

APVIOBPCS منجر به نتایج موفقیت آمیزی می‌شوند. اما در صورت دقیق نبودن این تخمین، سطح مبدا^۱ صفر حاصل نمی‌شود. به هر حال این فرض در بسیاری از موقعیت‌ها غیرواقعی است. عوامل نامعینی بسیاری در عدم دقت تخمین زمان تحویل موثرند، بویژه زمانی که مدل، دینامیک‌ها را در یک مرکز تولید توصیف می‌کند. برای نمونه، این نامعینی‌ها شامل کمبود مواد اولیه و ناهماهنگی در فرایند تصمیم‌سازی انسانی می‌باشند. برای رفع الزام این فرض از مدل APIOBPCS باید از یک حلقه فیدبک زمان پیوسته اضافی استفاده کرد [۷۴-۷۵]. این حلقه‌ی زمان تحویل، غیر خطی و متغیر با زمان بوده و تخمین‌های بروزی از زمان تحویل جاری می‌دهند.

برنس و سیوازیان^۲، یک زنجیره تامین چند رده‌ای که هر رده از یک قانون تصمیم زمان گسسته نوعی برای برآوردن سفارش‌ها استفاده می‌کند را در نظر گرفتند. این روش کنترل دارای دو بخش تنظیم موجودی و تدارک مجدد می‌باشد. بخش اول برای از بین بردن کسری از اختلاف میان موجودی واقعی و مطلوب استفاده می‌شود، در حالی که بخش دوم برابر با سفارش‌هایی است که در طول دوره‌های زمانی یکسان، دریافت می‌شود [۳۰].

ویکتر و همکاران^۳ او نیز یک سیستم تولید فورستر ساده شده‌ی سه رده‌ای را به صورت بلوک دیاگرامی برای آزمودن روش‌های گوناگون در پاسخ به تقاضای پله‌ای مشتری برای بهبود دادن عملکرد دینامیکی کلی به کار گرفتند. این روش‌ها شامل تنظیم قوانین رده‌ای موجود، کاهش تاخیرهای زمانی، حذف کردن یک رده از زنجیره، تغییر قوانین هر رده با توجه به اطلاعات خط انتقال و در دسترس قراردادن تقاضای بازار واقعی برای همه رده‌های زنجیره تامین هستند [۱۲]. مشخص شد که روش آخر، بیشترین تاثیر را روی پاسخ دینامیکی سیستم دارد و این خود بیانگر اهمیت جریان اطلاعات در طول زنجیره تامین است.

1. Offset
2. Burns & Sivazlian
3. Wikner et al

دیزنی و توویل^۱، یک سیستم زنجیره تامین مدیریت موجودی توسط فروشنده (VMI) شامل یک تولیدکننده و یک توزیع‌کننده را بکار گرفتند. در سیستم‌های VMI همه نقاط تامین در زنجیره برای برآوردن نقاط تنظیم مطلوب، به انبار موجودی دسترسی دارند. مدل APIOBPCS برای مدل کردن دینامیک‌های زمان گسسته بخش تولید و تاخیر خالص، برای مدل کردن تاخیر تولید استفاده شدند [۷۶].

در [۷۷-۷۸] یک روش زمان پیوسته دیگر برای مدل‌سازی و کنترل دینامیک‌های سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین استفاده شد. در این پژوهش اجزای تشکیل دهنده زنجیره تامین شامل مراکز تولید چند محصولی، شبکه توزیع چند رده‌ای - چند محصولی و مصرف‌کنندگان نهایی هستند. همچنین رفتار دینامیکی زنجیره تامین با مدل کردن جداگانه‌ی جریان مواد (کالا) و اطلاعات بررسی می‌شود. آزمون‌هایی برای بهبود عملکرد رفتار دینامیکی زنجیره تامین در یک حالت بهینه همراه با تضمین پایداری نیز، مورد مطالعه قرار گرفتند. لین^۲ هم یک روش بلوک دیاگرامی زمان گسسته را برای کنترل تناسبی (P) و کنترل تناسبی - انتگرال‌گیر (PI) یک زنجیره تامین تک طبقه (یعنی تنها یک شاخه یا کانال بین رده‌های زنجیره تامین وجود دارد) با در نظر گرفتن اثر شلاق چرمی به کار گرفت [۷۹].

۲-۳- کنترل بهینه و برنامه‌ریزی دینامیکی

به سبب طبیعت نامعین و دینامیکی سیستم‌های تولید-موجودی، این مسایل می‌توانند با استفاده از برنامه‌ریزی دینامیکی حل شوند. برنامه‌ریزی دینامیکی یک روش استاندارد برای به دست آوردن یک قانون کنترل فیدبک حالت بهینه برای مسایل کنترل بهینه تصادفی است [۴۶]. ساده‌ترین کاربرد برنامه‌ریزی دینامیکی در مدیریت موجودی یک سیستم تک رده‌ای - تک محصولی در [۸۰] آمده است. در این روش هدف انتخاب سفارش بهینه محصول در مقابل تقاضای نامعین مشتری همراه با کمینه کردن هزینه‌های

1. Disney & Towill
2. Lin

مربوطه‌ی سیستم است. اولین بار کلارک و اسکارف^۱، با استفاده از یک مسئله کنترل بهینه افق محدود زمان گسسته نشان دادند که قانون فیدبک بهینه در یک سیستم چند رده‌ای، مبتنی بر موجودی هر رده است و حجم‌های موجودی در دوره‌های گوناگون، مستقل و به طور یکسان توزیع شده‌اند [۸۰]. کارهای دیگری نیز در ادامه انجام شدند که می‌توان آن‌ها را پایه تئوری زنجیره تامین مدرن نامید [۸۱-۸۲].

پژوهشگران سعی کردند تا در تحقیقات خود با بکارگیری جزئیات بیشتری از زنجیره‌های تامین در مسائل کنترل بهینه، این مسائل را به نمونه‌های واقعی زنجیره‌های تامین نزدیک‌تر کنند. هاسمن و پترسون^۲، یک سیستم تک رده‌ای-چند محصولی با ظرفیت محدود و تقاضای نهایی را در نظر گرفتند که در آن پیش‌بینی کل فروش از یک مدل استاندارد تبعیت می‌کند [۸۳]. زیپکین^۳، مدل استفاده شده در [۸۰] را به نوع افق نامحدود بسط داد [۸۴]. از سوی دیگر برخی از محققان، جدا از مدل‌های استاتیک تقاضا، در صدد شناخت دینامیک‌های فرآیند تقاضا و ادغام آن با مدل‌های موجودی محصول برآمدند [۸۵-۸۹].

دانگ و لی^۴، تقریب‌هایی را برای القای بخش هزینه‌ی پایه‌گذاری شده در [۸۰] به منظور ارائه یک ساختار حل ساده تقریبی از مسئله موجودی چند رده‌ای بکار گرفتند [۹۰]. آن‌ها این روش را در مورد فرایندهای تقاضای زمان وابسته^۵ و با استفاده از مدل شرط‌بندی ارزیابی پیش‌بینی (MMFE) برای مدل کردن فرایند پیش‌بینی بسط دادند [۹۱-۹۲].

برای بهره‌برداری کردن از اطلاعات پیشرفته در مورد تقاضای مشتری که برخی شرکت‌ها توانایی دستیابی به آن‌ها را دارند، مدل‌های برنامه‌ریزی دینامیکی با احتساب این جریان اطلاعات اضافی در پژوهش‌های متعددی توسعه پیدا کردند [۹۳-۹۹]. همچنین این مطالعات، کاهش بیشتر هزینه‌ها را با وارد کردن بروز رسانی‌های پیش‌بینی

-
1. Clark & Scarf
 2. Hausman & Peterson
 3. Zipkin
 4. Dong & Lee
 5. Time Correlated

در مدل‌های دینامیکی تصادفی، مدنظر قرار دادند. بنابراین در این راستا گالگو و اوزر^۱، روش‌های تجدید تدارکات بهینه را برای سیستم‌های موجودی نامحدود تک رده‌ای و چند رده‌ای با اطلاعات تقاضای پیشرفته بکار بردند [۹۴-۹۳]. بعد از این کار، این روش‌های بهینه برای یک سیستم موجودی محدود هم در [۹۵] انجام شد. در پژوهشی نیز یک مدل از بروز رسانی‌های پیش‌بینی بسط داده شد که به صورت مفهومی شبیه به لایه‌های پایز هستند و هر قدر زمان می‌گذرد، برای هر دوره تقاضا اطلاعات بیشتری آشکار می‌شود [۹۶].

میزان اشتراک اطلاعات بین خرده فروش و تولید کننده در یک زنجیره تامین دو رده‌ای با ظرفیت تولید محدود روی یک افق نامحدود در [۱۰۰] انجام شد. در این کار، سه روش، هر کدام با سطوح متفاوتی از بهینگی و اشتراک اطلاعات آزموده شدند. بدین صورت که از برنامه‌ریزی عددی برای بدست آوردن نتایج عددی استفاده شد و نتیجه آزمایش‌های محاسباتی، کارایی اشتراک اطلاعات مخصوصاً هنگامی که کارخانه ظرفیت بالایی دارد را نشان داد.

از آنجا که برنامه‌ریزی تولید سیستم کارخانه دارای ماشین‌آلات نامطمئن همواره یکی از مشکلات سیستم‌های کنترل تولید است، برای حل این چالش مطالعات متعددی در مورد فرموله کردن کنترل این گونه از سیستم‌های تولید و حل مسائل کنترل بهینه HJB مربوطه، همراه با ماشین‌آلات کاملاً نرم^۲ و غیرنرم انجام شد. پیش فرض کاملاً نرم بودن ماشین‌آلات بدین معناست که آن‌ها در هنگام تعویض تولید یک محصول با تولید یک محصول دیگر در یک خط تولید، هزینه‌های راه‌اندازی یا زمان‌های راه‌اندازی مجدد ندارند [۱۰۶-۱۰۱].

نامعینی تقاضا یکی دیگر از عوامل موثر در کنترل سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین است. فنگ و یان^۳، یک مسئله کنترل تولید-موجودی بهینه را همراه با تقاضای مارکوفی^۴ در نظر گرفتند. در این روش ظرفیت تولید و زمان پردازش در هر بخش،

-
1. Gallego & Ozer
 2. Flexible
 3. Feng & Yan
 4. Markovian Demand

متغیرهای تصادفی هستند [۱۰۷].

بوکاس و لیو^۱، یک مسئله تولید-موجودی را در نظر گرفتند که در آن، تعداد محصولات قابل عرضه با گذشت زمان کاهش می‌یابد (همانند سیستم‌های تولید محصولات الکترونیکی به علت سرعت پیشرفت تکنولوژی و غیرقابل استفاده شدن محصولات تولید شده با تکنولوژی‌های قدیمی‌تر) و نشان دادند که مسئله بهینه‌سازی HJB آن، محذب می‌شود [۱۰۸]. برخی از دانشمندان نیز از نوعی سیستم کنترل سلسله مراتبی^۲ مرکب از یک مسئله کنترل بهینه HJB تصادفی و یک مسئله کنترل بهینه HJB قطعی محدود شده، استفاده کردند [۱۱۱-۱۰۹].

۲-۴- کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

استفاده گسترده از کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مبتنی بر مدل^۳ (MPC)، غالباً به خاطر اعمال کارآمد قیدها و شدت‌های غیرخطی در سیستم‌های دینامیکی چند متغیره است. همان گونه که در فصل بعد یعنی معرفی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین هم ذکر شده است، در این کنترل‌کننده‌ها فقط اولین المان دنباله کنترلی در هر لحظه کنترلی به کار گرفته می‌شود و این رویه برای تمام لحظات کنترلی نمونه برداری تکرار می‌شود [۱۱۴-۱۱۲]. تفاوت اصلی این روش نسبت به برنامه‌ریزی دینامیکی تصادفی و کنترل بهینه در این است که ورودی کنترلی به عنوان یک تابع صریح از بردار حالت محاسبه نمی‌شود. از این رو MPC در کنترل سیستم‌های پیچیده که حل آفلاین معادلات برنامه‌ریزی پویا از نظر محاسباتی مشکل است (به دلیل وجود مشکل ابعادی)، مرسوم‌تر است. به هر حال زمانی که طبیعت مسئله، کنترل بهینه تصادفی است به علت طبیعت حلقه باز روش می‌توان فقط راه حل‌های زیربهینه را استفاده کرد [۱۱۵].

اولین بکارگیری MPC به یک مسئله مدیریت موجودی برای یک مکان موجودی واحد، انجام شد [۱۱۶]. در این پژوهش یک بخش جریمه در مقابل انحرافات از یک

1. Boukas & Liu
2. Hierarchical Control
3. Model Predictive Control

مسیر مرجع موجودی در طول زمان‌های تحویل تولید در نظر گرفته شد. زافستاس و همکاران او^۱ در [۱۱۷]، یک مسئله طرح‌ریزی تولید تعمیم یافته را که شامل هر دو تصمیمات بازاریابی و تولید - موجودی می‌باشد، در نظر گرفتند. آن‌ها یک الگوی اقتصادسنجی خطی را در مورد فروش به صورت یک تابع از تلاش تبلیغاتی برای تقریب‌زدن یک "فرایند ولف ویدال غیرخطی"^۲ در نظر گرفتند. 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 می‌شود. تابعی معیار، انحرافات از فروش‌های مطلوب و سطوح موجودی را جریمه می‌کند.

در پژوهش بعدی، MPC برای مدیریت یک شبکه توزیع - تولید چند رده‌ای - چند محصولی با زمان‌های تحویل و بدون سفارش‌های برگشتی بکار گرفته شد. مسئله کنترل بهینه نیز به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی صحیح مرکب مقیاس بزرگ (MILP) به سبب وجود تصمیمات ناپیوسته در مدل و ساختار تقاضا به صورت قطعی در نظر گرفته شد. در این کار، این روش در یک زنجیره تامین مرکب تولیدکننده سه محصول و شامل سه مرکز تولید، سه انبار، چهار مرکز توزیع و ۱۰ خرده‌فروش که ۲۰ مشتری را سرویس می‌دهند، امتحان شد. آن‌ها یک روش متمرکز را با دو روش غیرمتمرکز مقایسه کردند. روش غیرمتمرکز اول فقط توزیع را بهینه کرده و از قواعد تجربی برای طرح‌ریزی تولید - توزیع استفاده می‌کند. روش غیرمتمرکز دوم، تولید کارخانه را بهینه می‌کند در حالی که شبکه توزیع از قواعد تجربی تبعیت می‌کند. در نهایت شبیه‌سازی‌ها گواهی دادند که روش متمرکز عملکرد بهتری دارد [۱۱۸]. در [۱۱۹] یک چارچوب MPC خطی برای مسائل مدیریت زنجیره تامین صنایع نیمه هادی بسط داده شد. در این پژوهش، با آزمایشاتی نشان داده شد که MPC می‌تواند عدم قطعیت منتج از عدم تطابق مدل (زمان‌های تحویل) و خطاهای پیش‌بینی تقاضا را

1. Tzafestas et al

2. Nonlinear Vidale- wolfe Process

تا حد زیادی در نظر بگیرد. در اینجا سطوح موجودی به عنوان متغیرهای حالت برای هر گره، نرخ‌های تولید و سفارش به عنوان متغیرهای دستکاری شونده و تقاضاها به عنوان اغتشاش هستند. هدف MPC نزدیک کردن سطوح موجودی به مقادیر هدف تا حد ممکن، در حال برآوردن محدودیت‌ها با توجه به ظرفیت‌های انتقال و تولید است. شبیه‌سازی‌ها نشان داد که بخش توقیف حرکت (یعنی بخشی که در تابعی معیار انحرافات بزرگ متغیرهای کنترلی میان دو لحظه زمانی پی در پی را جریمه می‌کند) برای بر طرف کردن سفارش‌های برگشتی مفید است. به اثبات رسیده است که با اثر بخش توقیف حرکت در MPC، حساسیت کنترل‌کننده نسبت به بی‌دقتی‌های پیش‌بینی کاهش می‌یابد، اگرچه معمولاً در ازای آن عملکرد مسیریابی نقطه تنظیم کاهش می‌یابد. در [۱۲۰-۱۲۱] اهمیت بخش توقیف حرکت در برابر عدم قطعیت مدل و پیش‌بینی‌های تقاضای غلط، با شبیه‌سازی‌هایی نشان داده شده است. وانگ و همکاران او^۱، تقاضا را به عنوان اغتشاش بار و به عنوان یک سیگنال تصادفی بدست آمده از نویز سفید یکپارچه در نظر گرفتند. آن‌ها یک MPC مبتنی بر تخمین برای افزایش عملکرد مقاومت سیستم در برابر تغییرپذیری تقاضا و پیش‌بینی‌های غلط، پیشنهاد کردند. آن‌ها با فرض فقدان هرگونه اطلاعات در مورد اغتشاشات، یک فیلتر کالمن که در آن بهره فیلتر یک پارامتر تنظیمی بر مبنای نسبت سیگنال به نویز است را برای تخمین متغیرهای حالت بکار گرفتند، و از طریق شبیه‌سازی‌ها دریافتند که وقتی یک خطای بزرگتر میان میانگین تقاضاهای واقعی و پیش‌بینی وجود دارد، افزایش بهره فیلتر، کنترل‌کننده را برای اصلاح بقدر کافی سریع خطا مهیا می‌کند [۱۲۲]. در ادامه‌ی این پژوهش‌ها، لین و همکاران او^۲ با استفاده از مدل ارائه شده در [۷۹]، یک سیستم کنترل حداقل واریانس^۳ (MVC) ارائه کردند که در آن دو نقطه تنظیم، یکی برای حفظ موجودی واقعی و دیگری برای سطح کالاهای در حال ساخت، به صورت جدا از هم اعمال می‌شوند. سیستم کنترل در اینجا در حقیقت یک MPC است که در آن تابعی معیار

-
1. Wang et al
 2. Lin et al
 3. Minimum Variance Control

شامل انحرافات موجودی پیش‌بینی شده و سطوح کالاهای در حال ساخت از نقاط تنظیم مطلوب روی دو افق عموماً متفاوت استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که این سیستم بهتر از بقیه روش‌های مرسوم مثل PI و مدل APVIOBPCS در نگهداری از سطوح موجودی بدون در نظر گرفتن اثر شلاق چرمی عمل می‌کند. ایلدیریم و همکاران وی^۱، یک طرح‌ریزی دینامیکی را با اعمال محدودیت‌های سطح سرویس و به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی تصادفی چند دوره‌ای در نظر گرفتند. بویژه برای برآوردن تقاضاهای مشتری تصادفی در هر دوره، کارخانه باید تصمیماتی از قبیل این که چه مقدار، کجا و چه وقت تولید کند را بگیرد. در نهایت به دلیل وجود مشکل ابعادی، یک ساختار MPC زمان گسسته به صورت افق جلورونده^۲ (RHC) به کار گرفته شد [۱۲۳].

۲-۵- کنترل مقاوم

در غالب مقالات تاکنون ارائه شده، عدم قطعیت‌های تقاضای مشتری و خطاهای ماشین‌آلات و زمان‌های تحویل، بوسیله توزیع‌های احتمال و فرایندهای تصادفی بیان می‌شوند. به هر حال در عمل ممکن است توانایی شناسایی توزیع‌های احتمال یا توصیف تصادفی وجود نداشته باشد. اما از سوی دیگر بر اساس اطلاعات تجربی می‌توان محدوده دامنه پارامترهای نامعین را شناخت. راه حل مقابله با این مشکلات، بکارگیری نظریه کنترل مقاوم است [۱۲۴]. در این چارچوب، نامعینی‌ها ناشناخته اما محدود شده هستند و قیدها نیز بوسیله ویژگی‌های عملکردی مشخص می‌شوند. نامعینی‌ها نیز دو دسته‌اند: اغتشاشات خارجی همانند تقاضای مشتری، و نامعینی‌ها در عدم تطابق مدل - پلنت به علت خطاهای مدل‌سازی. نظریه کنترل مقاوم برای انواع مختلفی از سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین بکار گرفته شده است [۱۲۵].

بالانچینی و کوورکر^۳ یک مسئله تولید - توزیع را به صورت معادله تفاضلی

1. Yildirim et al
2. Receding Horizon Control
3. Balanchini & Coworker

گسسته مدل و با استفاده از کنترل فیدبک حالت مدل کردند. در اینجا هدف نگه‌داشتن سطوح موجودی در داخل یک محدوده از تقاضاهای قابل قبول با استفاده از دو شرط لازم و کافی (برای اثبات امکان‌پذیری چنین کنترل‌کننده‌ای) است. این شرایط، چیرگی جریان کنترل‌شده بر جریان کنترل‌نشده و به قدر کافی بزرگ بودن ظرفیت‌های موجودی هستند [۱۲۶-۱۲۷]. این روش در [۱۲۸-۱۲۹] هم توسعه پیدا کرد. در [۱۲۷] بدترین حالت حداقل سطوح موجودی که حالت ماندگار هدف سیستم تولید - موجودی دینامیکی است، با یک روش کنترل بهینه مبتنی بر مدل برنامه‌ریزی خطی حل شد. در [۱۳۰]، زمان‌های تحویل نیز به این مدل اضافه شدند. بالانچینی و همکاران او^۱ نیز، یک تابعی معیار وابسته به سطوح موجودی را در یک مسئله حداقل - حداکثر^۲ (که هدف کنترلی آن، کمینه کردن هزینه بدترین حالت روی مقادیر قابل قبول تقاضای مشتری است) در نظر گرفتند. در [۱۳۱] از روش مقاوم‌سازی H-infinity و نظریه بازی دینامیکی برای مقاوم‌سازی کنترل سیستم مدیریت زنجیره تامین استفاده شد. در [۱۳۲] نیز یک سیستم تولید - موجودی همراه با تاخیر و زمان پردازش نامعین در کنترل بررسی و از شرایط نامساوی ماتریسی خطی^۳ (LMI) برای برآوردن محدودیت‌های ورودی در کنترل‌کننده فیدبک استفاده شد. در پژوهشی دیگر نیز، سیستم مدیریت زنجیره تامین بازی توزیع‌نشین به صورت شبکه‌ای از گره‌های تامین که جریان مواد و اطلاعات بین آن‌ها ردوبدل می‌شود، مدل شدند [۱۳۳]. این سیستم به صورت یک مدل فضای حالت با اغتشاشات نامعین محدود شده (تقاضای مشتری) و در نهایت به صورت یک مسئله کنترل بهینه مقید مقاوم نوشته شد، که باید در آن هزینه بدترین حالت کمینه شود. این مسئله به روش برنامه‌ریزی چند پارامتری هم حل شده است [۱۳۴].

-
1. Balanchini et al
 2. Min-max Problem
 3. Linear Matrix Inequality Conditions

۲-۶- برنامه‌ریزی دینامیکی تقریبی


برنامه‌ریزی دینامیکی، یک چارچوب کارآمد برای تحلیل مسائل کنترل بهینه سیستم‌های تولید - توزیع - موجودی است. برای استفاده از برنامه‌ریزی دینامیک به صورت یک ابزار عملی برای تصمیم‌سازی دینامیکی در سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین، باید یک راه‌حل برای مشکل ابعادی یافت. این، هدف اصلی روش‌های تقریب زدن برنامه‌ریزی دینامیکی است [۱۳۵].

در [۱۳۶]، یک سیستم موجودی - چند خرده‌فروش با تقاضاهای تصادفی و تاخیرهای انتقال مطالعه شد. هدف این کار کمینه کردن هزینه‌های انتقال و کمبود ذخیره‌ی افق نامحدود بود. اگر یک سفارش مشتری توسط خرده‌فروش کاملاً برآورده نشود، او یک تحویل ویژه را که تحویل مستقیم از انبار به مشتری است درخواست می‌کند. این مسئله بوسیله یک برنامه‌ریزی دینامیکی مدل و با سه نوع گوناگون سیستم امتحان شد: یک سیستم با یک انبار و یک خرده‌فروش و سه متغیر حالت، یک سیستم با یک انبار و ۱۰ خرده‌فروش و ۳۳ متغیر حالت، و یک سیستم با تعداد مشابه انبار و خرده‌فروش و ۴۶ متغیر حالت. زیاد شدن متغیرهای حالت به علت افزایش تاخیرهای انتقال می‌باشد. محققان از این روش دریافتند که یادگیری تفاضلی موقتی آنلاین همراه با تقریب خطی تابع هزینه از یادگیری تفاضلی موقتی با تکرار روش تقریبی مناسب‌تر است.


پاترینوس و ساریمویس^۱، یک نوع دیگر از تکرار روش جفت‌شده با ارزیابی روش حداقل مربعات^۲ را توسعه دادند. آن‌ها از یک شبکه تابع پایه ستاره‌ای به عنوان تقریبی از تابع هزینه استفاده کردند. در نهایت نیز شبیه‌سازی‌ها عملکرد بهتری را نسبت به روش قبلی از خود نشان دادند [۱۳۷-۱۳۸]. در [۱۴۱-۱۳۹] یک چارچوب برنامه‌ریزی دینامیکی خوب برای سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین ارائه شد و در آن ترکیبی از برنامه‌ریزی دینامیکی، برنامه‌ریزی ریاضی، شبیه‌سازی و تقریب تصادفی، و

1. Patrinos & Sarimveis
2. Least Squares Policy

معمولاً تقریب‌های خطی از تابع هزینه بکار گرفته شدند [۱۴۲-۱۴۳]. در [۱۴۱] و [۱۴۴]، این روش با یک روش کنترل پیش‌بین مقایسه و نشان داده شد که عملکرد آن بهتر است. در [۱۴۵]، یک سیستم موجودی چند خرده‌فروشی در نظر گرفته شد که در آن هر خرده‌فروش اطلاعات محدودی را برای برقراری هماهنگی با دیگر خرده‌فروش‌ها برای آن‌ها می‌فرستد [۱۴۶]. هدف این روش، برقراری یک ارتباط هماهنگ برای کمینه کردن تابع هزینه یا همان تابعی معیار با استفاده از یک برنامه‌ریزی دینامیکی عصبی و استفاده از نوع دیگری از تکرار روش تقریب با تابع خطی (با استفاده از شبیه‌سازی‌های شبه مونت کارلو) است [۱۴۷].



فصل ۳:
اصول کنترل پیش‌بین
مبتنی بر مدل



۳-۱- مقدمه

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل برپایه دو فاز شناسایی سیستم و پیش‌بینی خروجی، امروزه به طور وسیعی در صنایع مختلف به خصوص فرآیندهای تاخیردار استفاده می‌شود. از دهه ۱۹۶۰ تا ۲۰۰۰ میلادی، پایه‌ریزی اصول کنترل پیش‌بین به مرور انجام شد و استفاده از آن در صنعت افزایش پیدا کرد تا جایی که در سال ۱۹۹۶ بیش از ۲۲۰۰ مورد پیاده‌سازی عملی آن گزارش شد. در ابتدا این کنترل‌کننده‌ها به صورت خطی استفاده می‌شدند اما با توجه به تعدد نقاط کاری در سیستم‌های غیرخطی طبیعی و تغییرات مداوم دینامیکی، علاقه پژوهشگران و صنعتگران به طراحی و پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل غیرخطی^۱ (NMPC) نیز افزایش یافت [۱۴۸-۱۵۳]. تکنولوژی MPC امروزه در تنوع وسیعی از محیط‌های مختلف صنعتی مانند انواع صنایع فرآیندی چون صنایع غذایی [۱۵۴]، صنایع متالورژی، خودروسازی، صنایع چوب و کاغذ و صنایع سیمان به کار می‌رود. علاوه بر این کاربردهای دیگری همچون بکارگیری در محیط‌های کلینیکی، کنترل روبات، کروز کنترل، کنترل راکتور و برج خشک‌کن و مهندسی معدن و مدیریت منابع دیده‌شده است [۱۶۰-۱۵۵]. به جهت اهمیت این کنترل‌کننده‌ها بعد از بیان تاریخچه مختصر فوق به معرفی اصول و تعاریف اولیه این کنترل‌کننده‌ها و پایدارسازی به عنوان بزرگترین چالش طراحی آن‌ها پرداخته می‌شود.

۳-۲- تعاریف اولیه

ابتدا به برخی تعاریف مهم می‌پردازیم و در ادامه اصول MPC و مفاهیم آن را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

۳-۲-۱- افق پیش‌بینی^۲

افق پیش‌بینی یک بازه زمانی است که خروجی آینده سیستم در آن بازه پیش‌بینی

1. Nonlinear Model Predictive Control
2 Prediction Horizon

می‌شود. از آنجا که می‌خواهیم خروجی‌های آینده سیستم را پیش‌بینی کنیم، این افق معمولاً افق پیش‌رو یا افق جلو رونده^۱ نامیده می‌شود که به سه دسته تعریف می‌شود:

افق کوتاه^۲: در این حالت تنها خروجی در یک گام جلوتر پیش‌بینی می‌شود.

افق دور شونده^۳: در این حالت بازه‌ای متناهی مانند $[N_1, N_2]$ برای پیش‌بینی خروجی مدنظر است. N_1 می‌تواند از چند گام جلوتر شروع شده و N_2 را می‌توان تا اندازه مطلوب بزرگ انتخاب کرد اما متناهی خواهد بود.

افق نامتناهی^۴: چنانچه N_2 را به سمت بی‌نهایت میل دهیم این افق حاصل می‌شود. از آنجا که افق کوتاه یک گام جلوتر را پیش‌بینی می‌کند، انتخاب این افق از نظر مسائل پایداری و مقاوم بودن مشکل‌ساز می‌شود. به همین جهت معمولاً از افق دورشونده استفاده می‌شود که برای حل مسائل پایداری و مباحث مقاوم‌سازی حداکثر افق را تا حدی که برای محاسبات مشکلی ایجاد نشود، زیاد در نظر می‌گیرند.

۳-۲-۲-۲-۲ افق کنترل^۵

افق کنترل بازه زمانی است که محاسبات دنباله ورودی کنترل برای آن بازه صورت می‌گیرد N_{ii} . افق کنترل یکی از پارامترهای مهم طراحی است. به عنوان یک قاعده، فرآیند پیچیده‌تر N_{ii} بزرگتری را ایجاب می‌کند. برای سیستم‌هایی که ناپایدار و یا به مرز پایداری نزدیکند، لازم است N_{ii} به گونه‌ای انتخاب شود که حداقل برابر تعداد قطب‌های ناپایدار یا دارای میرایی ضعیف باشد. برای فرآیندهای ساده‌تر، غالباً $N_{ii} = 1$ انتخاب می‌شود.

۳-۲-۳-۳-۳ انواع متغیرها

در کنترل پیش‌بین سه نوع متغیر وجود دارد. متغیرهای کنترل‌شونده^۱ (CV) که

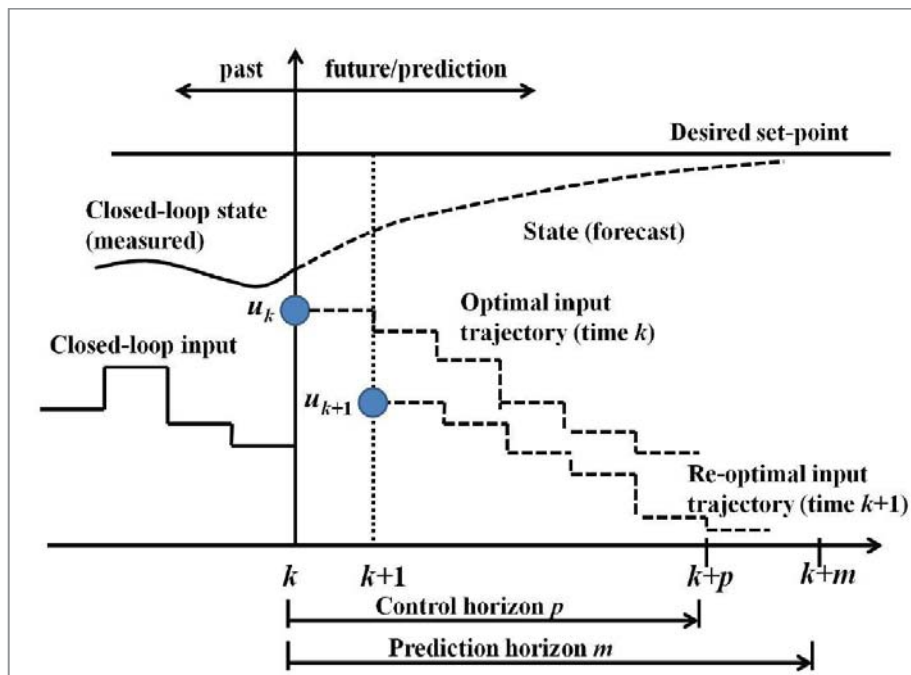
-
1. Moving Horizon
 2. Short Horizon
 3. Receding Horizon
 4. Infinite Horizon
 5. Control Horizon

MPC تلاش برای حفظ آن‌ها در حوزه محدودیت‌ها یا در نقاط تنظیم دارد. این متغیرها در واقع خروجی‌هایی هستند که عمل کنترل آنها مورد نظر می‌باشد. متغیر دستکاری‌شونده^۲ (MV) که MPC می‌تواند آن‌ها را برای حفظ همه متغیرهای کنترل‌شونده در محدوده مناسب و همچنین جهت رسیدن به اهداف بهینه‌سازی تنظیم نماید. این متغیرها، متغیرهای ورودی هستند که عمل کنترل توسط آن‌ها انجام می‌پذیرد. متغیرهای اغتشاشی^۳ (DV) در عملیات کنترل اخلال ایجاد می‌کنند. این متغیرها غالباً تحت کنترل نیستند، اما برخی از آن‌ها قابل اندازه‌گیری می‌باشند [۱۶۱-۱۶۲].

۳-۳- کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل

عبارت MPC یک طبقه یا کلاس از روش‌های کنترل کامپیوتری که رفتار آینده یک سیستم در یک افق مشخص را از طریق به کارگیری مدلی صریح و واضح از فرآیند، کنترل می‌کند. در هر گام کنترلی، روش MPC یک دنباله حلقه باز از تنظیمات متغیرهای دستکاری‌شونده (MV) را به منظور بهینه‌سازی رفتار آینده سیستم (CV) محاسبه می‌کند که در نهایت دنباله‌ای از متغیرهای ورودی مناسب در افق تعریف شده برای کنترل جهت اعمال به سیستم به دست می‌آید. اولین درایه این دنباله و در برخی موارد عملی چند درایه و یا برازشی از آن‌ها، به سیستم اعمال شده و عملیات پیش‌بینی و بهینه‌سازی در هر گام کنترلی که می‌تواند دوره نمونه‌برداری سیستم باشد، مجدداً انجام می‌پذیرد [۱۵۳]. برای تشریح بیشتر موضوع شکل (۳-۱) را در نظر بگیرید.

-
1. Controlled Variable
 2. Manipulated Variable
 3. Disturbance Variable



شکل (۱-۳) روند پیش‌بینی در کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل با تعیین ورودی مناسب

همان طور که در شکل بالا مشخص است، هدف MPC دنبال کردن مسیر مرجع تعریف شده برای سیستم توسط خروجی‌ها در افق پیش‌بینی دورشونده تعریف شده برای آن می‌باشد. به همین منظور به کمک اطلاعات مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های قبلی سیستم، خروجی‌های آینده پیش‌بینی شده و به کمک این اطلاعات جدید و نیز با توجه به مسیر مرجع، اغتشاشات و استراتژی کنترلی در نهایت دنباله‌ای از ورودی‌های مناسب در یک افق تعریف شده کنترل برای عملکرد صحیح سیستم محاسبه می‌شود. در صورتی که اغتشاشات بسیار کم و عدم تطابق مدل و پلنت نداشته باشیم، و مسئله بهینه‌سازی به صورت افق نامحدود حل شود، می‌توان دنباله ورودی به دست آمده در زمان حال را برای زمان‌های بعدی نیز به کارگرفت [۱۵۱]. اما این یک حالت ایده‌آل است و در حالت کلی دنباله ورودی به دست آمده باید تنها تا زمان در دسترس قرارگرفتن اندازه‌گیری‌های بعدی به سیستم اعمال گردد.

۳-۴- تضمین پایداری در کنترل پیش‌بین

در این بخش به صورت مختصر در مورد روش‌های تضمین پایداری یا به عبارتی روش‌های پایداری‌سازی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین توضیح داده می‌شود. پایداری یک فاکتور اساسی برای موفقیت هر طرح کنترلی مبتنی بر مدل می‌باشد. از جمله مشکلات روش‌های پایداری‌سازی حلقه‌بسته کنترل پیش‌بین، در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی پارامترها و متغیرهای مختلف سیستم و به کارگیری یک افق مناسب برای بهینه‌سازی است. برخی از این روش‌ها ویژگی پیاده‌سازی آسان، برخی ویژگی بارمحاسباتی کمتر نسبت به بقیه روش‌ها و برخی هم ویژگی مقاوم بودن در برابر تغییر پارامترهای عملکرد را دارا هستند.

روش‌های پایداری کنترل پیش‌بین، هم با فرض زمان پیوسته بودن و هم با فرض گسسته زمان بودن مدل توصیف‌کننده سیستم وجود دارند. از آن جایی که مدل سیستم معمولاً با استفاده از معادلات اصول اولیه به دست می‌آید، ارائه زمان پیوسته به واقعیت نزدیک‌تر است. اما توسعه پیچیده‌تری از قانون کنترل را در جایی که اصولاً نیاز به حل یک مسئله بهینه‌سازی تابعی داریم، موجب می‌شود. برعکس، یک ارائه زمان گسسته از سیستم، از نظر محاسباتی ساده‌تر است، اما نیاز به گسسته‌سازی معادلات مدل داریم. در این بخش، برخی روش‌های معمول پایداری‌سازی کنترل پیش‌بین سیستم‌های زمان پیوسته مورد بررسی و مقایسه در عملکرد قرار می‌گیرند.

۳-۴-۱- طرح مسئله پایداری

در سال‌های اخیر روش‌های متعددی برای برقراری پایداری نامی (با در دسترس بودن یک مدل دقیق از سیستم) پیشنهاد شده‌است. در اکثر موارد سیستم‌های دینامیکی زمان پیوسته تحت کنترل به صورت

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad (۱-۳)$$

توصیف می‌شوند که در آن $f(\cdot, \cdot)$ یک تابع از متغیرهای ورودی و کنترل با

محدودیت‌هایی روی آنها و تحت شرایط اولیه $x(t_0) = x_0$ می‌باشد، و بطور کلی پایداری نقطه تنظیم مرجع مدنظر است. مقادیر مرجع متغیرهای کنترل و دستکاری شونده، مقادیر حالت ماندگارشان هستند که بدون از دست دادن کلیات، می‌توان فرض کرد که مبدأ، نقطه حالت ماندگار سیستم مورد توجه یعنی $x_s = 0, u_s = 0$ است و در نهایت هر مسیر پیش‌بینی شده ممکن به مبدأ می‌رود. در اکثر روش‌های معمول، پایداری در یک افق پیش‌بینی محدود با تعریف یک مسئله کنترل بهینه حلقه باز افق محدود مشتمل بر یک تابعی معیار، یک ناحیه نهایی و هزینه نهایی متناظر با آن و یک قانون کنترل کمکی پایدارساز محلی تضمین می‌شود.

□ مسئله کنترل بهینه حلقه باز افق محدود

X_f ، ناحیه نهایی، یک مجموعه از \mathcal{R}^n شامل مبدأ، N_c افق کنترل و N_p افق پیش‌بینی، قانون کنترل کمکی پایدارساز $u = v_f(x)$ (که از افق کنترل تا افق پیش‌بینی اعمال می‌شود)، که به دو ماتریس معین مثبت Q, R و تابع هزینه نهایی $F(\cdot)$ که $F(\cdot): \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ مفروض می‌باشند و تابعی معیار

$$J_{FH} = \int_t^{t+N_p} \left\{ \|x(\tau)\|_Q^2 + \|u(\tau)\|_R^2 \right\} d\tau + F(\cdot) \quad (2-3)$$

باید نسبت ورودی در افق پیش‌بینی، کمینه شود و محدودیت‌های حالت و ورودی روی افق پیش‌بینی در نظر گرفته شده و محدودیت حالت نهایی نیز $x(t+N_p) \in X_f$ می‌باشد.

۳-۴-۲- چند روش معمول پایدارسازی

استفاده از جریمه نهایی و یا محدودیت‌ها، توابع لیاپانوف یا مجموعه‌های ثابت، روش‌هایی هستند که به طور گسترده‌ای برای تضمین پایداری حلقه بسته سیستم تحت کنترل، به کار گرفته شده‌اند. در سال‌های اخیر، این مسئله از زوایای مختلفی مدنظر

قرار گرفته و مطالعات متعددی در مورد آن صورت گرفته است که همیشه تحلیل مسئله تنظیم‌کننده (رساندن حالت به صفر) مدنظر بوده است، که در زیر چند نمونه از طرح‌های پیشنهادی اصلی آورده شده است [۱۶۷].

- روش افق نامحدود:

یک راه کار بسیار آسان برای دستیابی به پایداری تضمین شده، استفاده از یک تابعی معیار افق نامحدود است که در آن افق‌های پیش‌بینی و کنترل به بینهایت افزایش داده شده و یک تقریب از مسئله کنترل بهینه افق نامحدود خواهیم داشت. در این نمونه، تابعی معیار از یک تابع لیاپانوف که پایداری نامی را تضمین می‌کند، تشکیل شده است و اصل بهینگی بلمن اشاره بر این دارد که ورودی حلقه باز و مسیره‌های حالت بدست آمده از حل مسئله بهینه‌سازی برابر با مسیره‌های حلقه بسته سیستم غیرخطی می‌باشند.

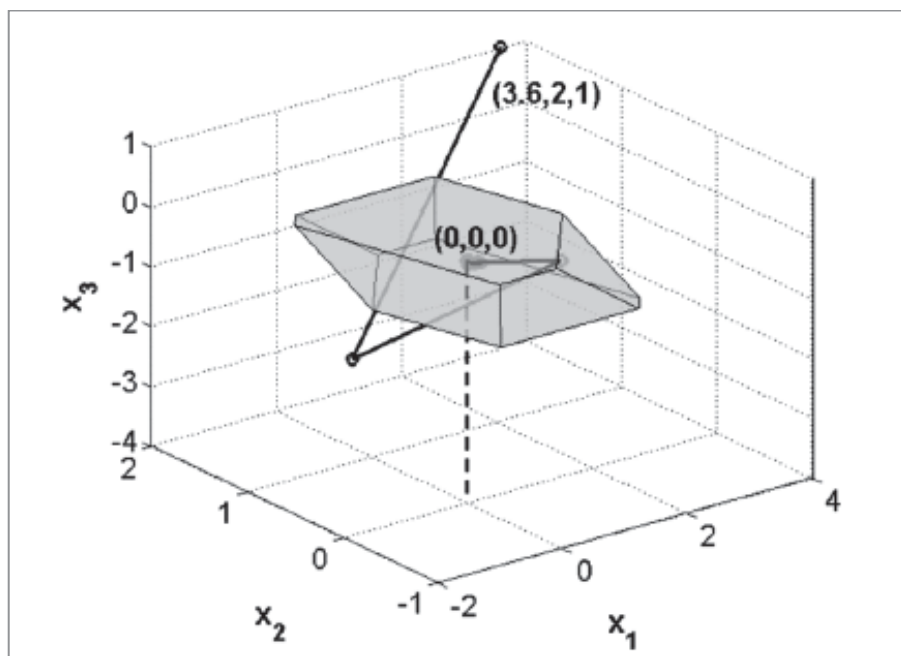
- محدودیت تساوی نهایی:

در این روش یک محدودیت حالت به محدودیت‌های حالت و ورودی عملی در حل تابعی معیار اضافه می‌شود. بوسیله این محدودیت، حالت در انتهای افق صفر می‌شود و از اینرو عمل کنترل نیز صفر می‌شود، در نتیجه اگر اغتشاشی وجود نداشته باشد، سیستم در مبدأ می‌ماند. در شکل (۲-۳) یک نمونه از پیاده‌سازی این روش روی یک سیستم مدل شده به وسیله فضای حالت سه بعدی نشان داده شده است (با سه گام کنترلی). نکته قابل توجه اینکه این روش هزینه محاسباتی زیادی دربردارد و همچنین یک ناحیه کاری محدود بوجود می‌آورد که این روش را برای پیاده‌سازی در عمل بسیار دشوار می‌کنند.

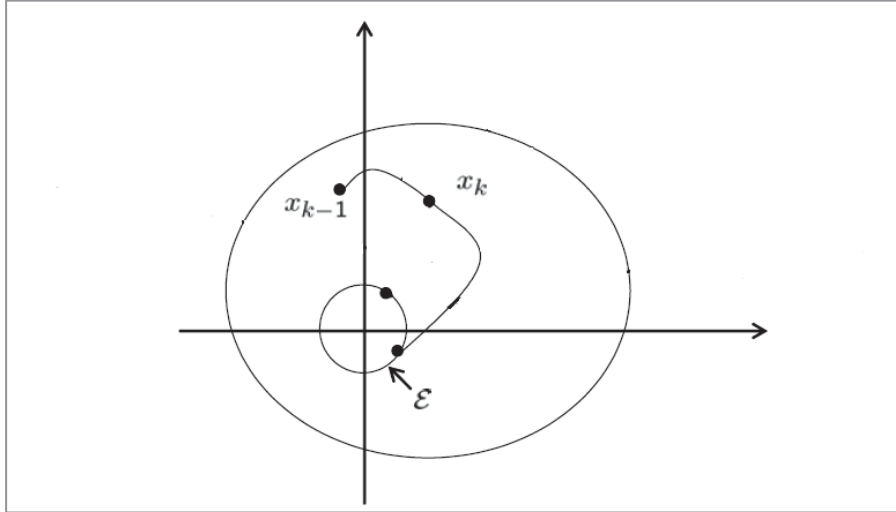
- کنترل مُد دوگان:

این روش که برای سیستم‌های غیرخطی زمان پیوسته مقید طراحی شده است، از

یک روش کنترل دورشونده با افق پیش‌بین متغیر بهره برده و در یک ناحیه پیرامون حالت نهایی سیستم با استفاده از یک کنترل‌کننده فیدبک حالت خطی محلی مستقل و از پیش محاسبه شده، پایداری نامی مبدأ را به صورت قابل قبولی تضمین می‌کند. در این روش، افق پیش‌بینی به عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته می‌شود. همانطور که در شکل (۳-۳) دیده می‌شود، به محض اینکه حالت وارد ناحیه نهایی $\varepsilon(X_f)$ مفروض می‌شود، یک کنترل‌کننده فیدبک خطی محلی که قبلاً محاسبه شده (آفلاین) است، وارد عمل شده و از آنجا که ناحیه نهایی شامل مبدأ می‌باشد، حالت نهایی سیستم را به صفر می‌رساند. به طور کلی این روش عمل کنترل را با سوئیچ بین یک کنترل‌کننده افق جلورونده که در یک زمان محدود، حالت سیستم را به ناحیه نهایی می‌رساند و یک کنترل‌کننده پایدارساز محلی، وابسته به اینکه حالت‌ها در خارج یا داخل ناحیه نهایی باشند، انجام می‌دهد.



شکل (۳-۲) محدودیت تساوی نهایی در یک فضای سه بعدی از معادلات حالت



شکل (۳-۳) دیاگرام حالت سیستم در کنترل مُد دوگان

به عبارت دیگر اگر در زمان k ، $x(k) \in \varepsilon$ باشد، از همان ابتدا تنها کنترل‌کننده فیدبک خطی به کار گرفته می‌شود. مشکل اصلی در این نظریه، پیچیدگی محاسبه ناحیه نهایی و به طور کلی غیرهمگرا بودن (غیرمحدب) مسئله بهینه‌سازی حاصله است. این مسئله باعث پیچیدگی هر چه بیشتر مسئله بهینه‌سازی شده و همچنین بهینگی حل آن تضمین نخواهد شد. به هر حال در اینجا، وقتی مسئله بهینه‌سازی امکان‌پذیر بوده و نیازی به برقراری بهینگی این نوع کنترل‌کننده نباشد، پایداری تضمین نخواهد شد. انواع افق معین این روش نیز برای سیستم‌های زمان گسسته مقید غیرخطی ارائه شده است.

- روش‌های محدودیت نهایی و هزینه نهایی:

اکثر روش‌های پایدارسازی کنترل پیش‌بین در این دسته می‌گنجند، به قسمی که بوسیله کنترل‌کننده پایدارساز و هزینه نهایی و ناحیه نهایی، کنترل حلقه باز افق محدود تا انتهای افق پیش‌بینی N_p مسیر حالت را به سمت ناحیه نهایی تعریف شده می‌برد و در ناحیه نهایی، مبدأ بطور مجانبی پایدار می‌شود. در ادامه، سه نوع از این روش‌ها ارائه می‌شوند:

الف) روش افق شبه نامحدود: در این روش، افق پیش‌بینی بوسیله وارد کردن یک بخش هزینه نهایی در تابعی معیار، تقریباً به بینهایت بسط داده می‌شود. بخش هزینه نهایی به کمک یک ماتریس هزینه لیاپانوف Q_p ، در تابعی معیار

$$J_{FH} = \left\{ \int_t^{t+N_p} (\|x(\tau)\|_{Q_p}^2 + \|u(\tau)\|_R^2) d\tau \right\} + (\|x(t+N_p)\|_{Q_p}^2) \quad (3-3)$$

کران بالای هزینه لازم برای هدایت سیستم از یک حالت در ناحیه نهایی به مبدأ می‌باشد و تابع هزینه افق محدود بدست آمده، نوع افق نامحدود تابع هزینه و در نتیجه سیستم حلقه بسته افق نامحدود را با پایداری تضمین شده، مستقل از انتخاب پارامترهای عملکرد سیستم تقریب می‌زند.

ب) هزینه‌گذاری حلقه بسته افق نامحدود (CL): این روش از یک قانون کنترل پایدارساز کلی به عنوان یک هزینه نهایی استفاده می‌کند (این کنترل‌کننده نیز مثل روش افق شبه نامحدود به سیستم اعمال نمی‌شود و تنها برای شبیه‌سازی هزینه نهایی از آن استفاده می‌شود) و برای کم کردن پیچیدگی محاسباتی روش افق شبه نامحدود، از یک ناحیه نهایی تقریبی بر اساس محدود بودن تابع هزینه نهایی بصورت

$$F(x(t)) = \int_t^{\infty} \left\{ \|\varphi_f(\cdot)\|_{Q_p}^2 + \|v_f(\varphi_f(\cdot))\|_R^2 \right\} d\tau \quad (4-3)$$

که در آن φ_f حل سیستم خطی یا غیرخطی با قانون کنترل پایدارساز عمومی یعنی $\dot{x}(t) = f(x(t), v_f(x(t)))$ است، بهره می‌برد.

ج) هزینه‌گذاری با افق‌های ورودی و خروجی (CL-2H): در CL به علت انتگرالگیری نامحدود، محاسبه دقیقی از هزینه نهایی حاصل نخواهد شد، که برای بهبود

این روش در CL-2H افق کنترل را کوچکتر از افق پیش‌بینی در نظر گرفته و پس از اتمام افق کنترل، کنترل کمکی را تا اتمام افق پیش‌بین مستقیماً به سیستم اعمال می‌کنند تا مسیر حالت قبل از رسیدن به ناحیه نهایی به مبدأ نزدیک و بازه انتگرالگیری موثر کاهش بیابد.

۳-۴-۳- مقایسه عملکرد روش‌ها

در این بخش طبق جدول (۳-۱) به مقایسه اجمالی و کلی روش‌های مرسوم پایدارسازی حلقه بسته MPC می‌پردازیم. همانگونه که اشاره کردیم، اکثر این روش‌ها از یک ناحیه نهایی (یا به عبارتی ناحیه جذب پایداری)، قانون کنترل کمکی پایدارساز و هزینه متناسب با آن استفاده می‌کنند. در روش افق نامحدود از تابعی معیار به عنوان تابع لیاپانوف استفاده می‌شود. اما به هر حال از آنجا که یک مجموعه نامحدود از متغیرهای تصمیم در هر زمان نمونه برداری باید محاسبه شوند، این روش مستقیماً قابل پیاده‌سازی نیست. روش محدودیت تساوی نهایی از تابع لیاپانوف برای پایداری استفاده نمی‌کند، بلکه یک محدودیت تساوی نهایی را در تعداد نامحدودی از تکرار در مسئله بهینه‌سازی وارد می‌کند و یک هزینه محاسباتی زیاد را تحمیل می‌کند. اما در عین حال از لحاظ مفهومی، یک روش حل ساده است.

برای افزایش ناحیه کاری و دستیابی به یک قید با محدودیت کمتر، در روش کنترل مُد دوگان، از یک کنترل‌کننده فیدبک خطی پایدارساز در یک ناحیه نهایی تعریف شده آزاد حول مبدأ (با شرط برقرارشدن پایداری توسط فیدبک خطی در این ناحیه)، بهره می‌گیرد. در روش افق شبه نامحدود، بخش هزینه نهایی به عنوان یک تابع لیاپانوف، یک کران بالا از هزینه لازم برای هدایت سیستم غیرخطی از یک حالت در ناحیه نهایی به مبدأ می‌باشد و تابع هزینه افق محدود بدست آمده، نوع افق نامحدود تابع هزینه و در نتیجه سیستم حلقه بسته افق نامحدود را با پایداری تضمین شده، مستقل از انتخاب پارامترهای عملکرد سیستم تقریب می‌زند. همچنین سائز ناحیه

جذب تنها از منظر نیاز به امکان‌پذیری مسئله بهینه‌سازی محدود می‌شود و از دیگر جهات بیشینه است. اما به هر حال این روش از لحاظ محاسباتی پیچیده است. در روش‌هایی همانند افق شبه نامحدود ناحیه نهایی باید به صورت آفلاین دقیقاً محاسبه شود. روش CL برای غلبه بر این مشکل ارائه شد که محاسبه دقیقی از ناحیه نهایی لازم نیست و ناحیه نهایی تنها با یک هزینه نهایی باند شده معین می‌شود. روش CL-2H برای محاسبه افق انتگرال‌گیری محدود که پایداری حلقه بسته را هم حفظ می‌کند، ارائه شد که در آن حالت را قبل از انتهای افق پیش‌بینی، با اعمال یک قانون کنترل پایدارساز خطی، به مبدأ نزدیک می‌کنیم. مشکل این روش نیز در نظرنگرفتن تقریب‌های لازم برای بهینه‌سازی عددی است که یک مشکل عمومی برای تمامی روش‌های پایدارسازی MPC زمان پیوسته است و ممکن است منجر به ناپایداری شود.

۳-۵- مزایا و معایب کنترل پیش‌بین

کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل دارای مزیت‌های بسیاری از جمله در نظرگرفتن محدودیت‌ها به شکلی موثر و در حین اجرای فرآیند، مناسب برای سیستم‌های با مرجع از پیش تعیین شده همانند کنترل ربات، محدوده وسیع کاری از فرآیندهای پیچیده تا ساده (سیستم‌های غیرخطی، دارای تأخیر زمانی، ناپایدار، چندمتغیره و نامینیمم فاز)، سادگی بکارگیری و استفاده (قابلیت تنظیم آسان پارامترها)، استفاده در حوزه زمان، و روشی باز برای پیشرفت‌های آینده است.

روش کنترل پیش‌بین معایبی هم دارد که مهمترین آن‌ها، به دست آوردن یک مدل مناسب جهت پیش‌بینی خروجی‌های آینده و همچنین یافتن عدم قطعیت‌های آن‌ها می‌باشد. عیب دیگر این روش وجود محاسبات پیچیده و زمان‌بر در مواقعی است که دینامیک فرآیند در حال تغییر و یا غیرخطی باشد.

جدول (۳-۱) مقایسه اجمالی روش‌های پایدارسازی حلقه‌بسته MPC

مشکل	ویژگی	قانون کنترل کمکی	ناحیه نهایی	تابع هزینه نهایی	افق پیش‌بینی	مقایسه روش‌ها
نیاز به محاسبه دنباله نامحدود ورودی در هر زمان نمونه‌برداری	پایداری و مقاوم بودن خودکار	-	-	-	نامحدود	افق نامحدود
نیاز به تعداد تکرار زیاد در روش حل	سادگی روش حل	$v_f(x) \equiv 0$	$\{0\}$	صفر	محدود	محدودیت تساوی نهایی
سوئیچ بین دو کنترل‌کننده و پیچیدگی محاسبه ناحیه نهایی (جذب)	سادگی روش حل و افزایش ناحیه کاری	فیدبک حالت خطی محلی	آزاد حول مبدأ	صفر	محدود	کنترل مُد دوگان
پیچیدگی محاسباتی	مستقل از انتخاب پارامترهای عملکرد	فیدبک حالت خطی محلی ساختگی	مبتنی بر تابع هزینه کراندار	کراندار مبتنی بر معادله لیاپانوف	تقریبی از افق نامحدود	افق شبه نامحدود
فقدان یک محاسبه دقیق از هزینه نهایی	لزوم نداشتن محاسبه دقیق ناحیه نهایی	فیدبک حالت کلی ساختگی	تابع هزینه کراندار	تابع لیاپانوف و کراندار	تقریبی از افق نامحدود	CL
فقدان تقریب‌ها در بهینه‌سازی عددی	کاهش بار محاسباتی آنلاین	فیدبک حالت ساختگی واقعی	تابع هزینه کراندار	تابع لیاپانوف و کراندار	تقریبی از افق نامحدود	CL - 2H

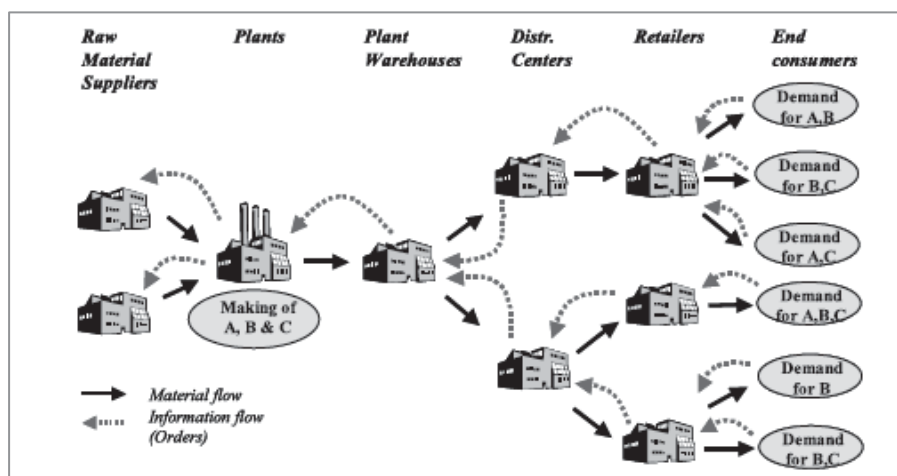
فصل ٤:
کنترل پیش‌بین سیستم
مدیریت زنجیره تامین

همان‌گونه که ذکر شد، سیستم مدیریت زنجیره تامین بصورت برهم‌کنش و دینامیک‌های یک شبکه تقاضا با زیرسیستم‌های نمونه‌ای مربوط به مراحل شامل فروشنده‌های مواد خام، تولید (کارخانه) و سیستم‌های مونتاژ و مراکز توزیع، تعریف می‌شود. طراحی عملیاتی و کنترل مستقیم شبکه دراصل بوسیله روش‌های گوناگونی چون مدل‌های تحلیلی قطعی، مدل‌های تحلیلی تصادفی و مدل‌های شبیه‌سازی جفت شده با معیارهای بهینه‌سازی مطلوب و اندازه‌گیری‌های عملکرد شبکه، مشخص می‌شود. معمولاً ارزش (هزینه) شبکه عملیاتی، سطح موجودی میانگین و سطح سرویس مشتری (ارضای نرخ سفارش‌های مشتری) اندازه‌گیری‌های عملکرد بکاربرده شده هستند. اما به طور کلی در سیستم‌های مدیریت زنجیره‌های تامین هدف تنظیم متغیرهای تصمیم برای بیشینه‌کردن رضایت مشتری با کمترین هزینه عملیاتی است.

استفاده گسترده از کنترل‌کننده‌های پیش‌بین مبتنی بر مدل، غالباً به خاطر اعمال کارآمد قیدها و شدت‌های غیرخطی در سیستم‌های دینامیکی چند متغیره است. در این کنترل‌کننده‌ها فقط اولین المان دنباله کنترلی در هر لحظه کنترلی به کار گرفته می‌شود و این رویه برای تمام لحظات کنترلی نمونه برداری تکرار می‌شود. از آنجا که مدل‌های متعددی برای نشان دادن عملکرد سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین استفاده می‌شوند، باید یک مدل مناسب در جهت اهداف کنترلی مورد نظر بدست آورد. در مدل‌سازی دینامیکی سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین عموماً بین رده‌های (گره‌های) متوالی دو نوع جریان فرآیند یعنی جریان اطلاعات همانند یک سفارش نیاز کالا و جریان مواد یعنی انتقال حقیقی کالاها وجود دارند.

مطابق شکل (۴-۱)، زیرسیستم‌های نمونه سیستم مدیریت زنجیره تامین شامل واحدهای فروشنده‌های مواد خام، تولید و مونتاژ و توزیع و خرده‌فروش برای محصولات مختلف A, B, C، گره‌های سیستم بوده و با یکدیگر در ارتباط هستند [۸]. در این شکل فلش‌های ممتد بیانگر جریان کالا (مواد) از رده بالادستی به رده پایین

دستی و فلش‌های منقطع بازگشتی بیانگر جریان اطلاعات یا سفارش‌های داده شده از سوی رده پایین دستی به رده بالادستی 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.



شکل (۱-۴) نمونه‌ای از ساختار کامل سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین

در مدل‌های ساده دینامیکی تنها جریان مواد بین گره‌های زنجیره دیده می‌شود و جریان اطلاعات تنها بین گره خرده‌فروش و مشتری برقرار است و هیچ‌گونه چرخه وابستگی اطلاعاتی میان گره‌ها وجود ندارد. در مدل‌های دیگری چون مدل دینامیکی مبتنی بر نظریه بازی آشامیدنی^۱، ساختار کامل نشان داده شده در شکل (۱-۴) برقرار است و مابین تمامی اعضای متوالی زنجیره تامین، هر دو جریان مواد و جریان اطلاعات وجود دارند و یک نوع وابستگی میان متغیرهای دینامیکی هر دو رده متوالی به وجود می‌آید [۴۶].

معمولاً کنترل‌کننده‌های پیش‌بین، متمرکز پیاده‌سازی می‌شوند. در این حالت سیستم کلی مدل شده و همه ورودی‌های کنترلی در یک مسئله بهینه‌سازی محاسبه می‌شوند. در کاربردهای مقیاس بزرگ سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین، ضروری است که نظریه‌های کنترلی غیرمتمرکز باشند، یعنی ورودی‌های کنترل محلی با استفاده از اندازه‌گیری‌های محلی و مدل‌های مرتبه کاهش یافته از دینامیک‌های محلی محاسبه شوند [۱۶۸]. به منظور شناخت بیشتر MPC غیرمتمرکز، یک سری از پژوهش‌هایی که روی روش‌های کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز کار کرده‌اند، بررسی می‌شوند.

در کنترل‌کننده‌های چندگانه در ساختار غیرمتمرکز MPC، سعی بر حل مسئله کنترل دینامیکی است. چند نویسنده استفاده از MPC را به عنوان قسمتی از ساختار کنترلی غیرمتمرکز در نظر گرفته‌اند. چند نمونه‌ی این‌ها، کنترل‌کننده MPC واحدی را به عنوان جایگزینی از کنترل‌کننده‌های PID غیرمتمرکز بکار گرفتند [۱۶۹]، یا کنترل‌کننده‌های MPC چندگانه بصورت دستی به عنوان جایگزینی از کنترل‌کننده‌های PID غیرمتمرکز استفاده می‌شوند [۱۷۰]، یا MPC به عنوان لایه نظارتی در یک وضعیت سری شده، استفاده می‌شود [۱۷۱]. ساختارهای کنترلی مورد بحث نوعاً در ساختارهای کنترلی خاص استفاده شده‌اند. ساختارهای دیگری زیرسیستم‌های چندگانه‌ای را که به یکدیگر بستگی دارند و MPC را مطابق با عملکرد سیستم بهینه بکار می‌گیرند، در نظر گرفته‌اند [۱۷۲]. در اکثر مقالات به علت اینکه روش‌های موصوف در دسته آخر، کلی‌ترند و به کاربرد خاصی بستگی ندارند، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در مورد روش‌های مدل‌سازی و تفکیک زیرسیستم‌ها، جداسازی خالص غیرمتمرکز تنها وقتی ممکن است که دو زیر سیستم کاملاً از یکدیگر مستقل هستند یا وقتی که آن‌ها مستقل از همدیگر فرض می‌شوند. در برخی کارها یک سیستم دینامیکی خطی بصورت تحلیلی به مجموعه‌ای معادل از زیر سیستم‌ها با ورودی‌های جفت‌شده تفکیک می‌شود [۱۷۳-۱۷۴]. ساواداگو^۱ یک سیستم آبی را در بخش‌های مختلفی به عنوان زیرسیستم کنترل کرد که در هر مدل زیرسیستم، کنترل‌ها و حالت‌های یک

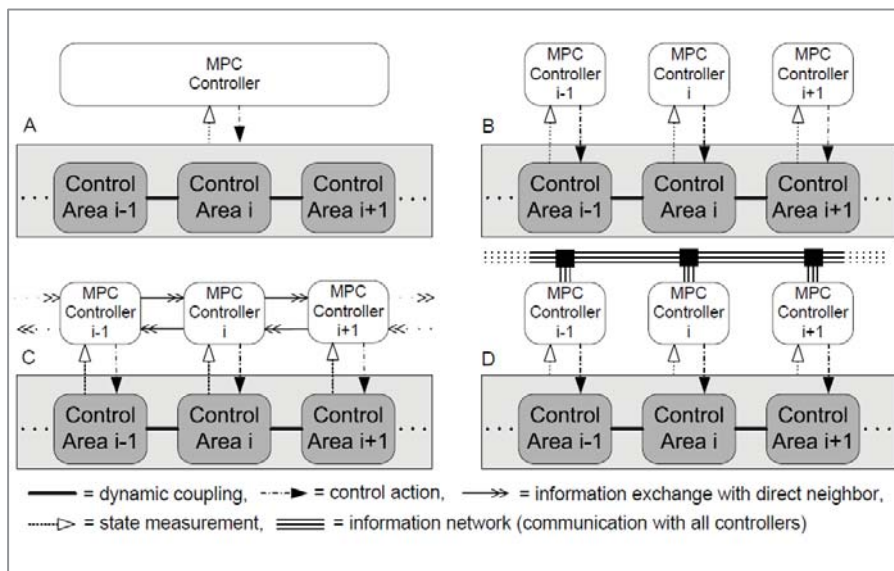
1. Sawadogo

زیرسیستم همسایه به حساب آورده می‌شود [۱۷۵]. همچنین یک چارچوب پیوسته امکان‌پذیر برای پایدارسازی آرایش چندحامل ارائه شد. در این مسئله دینامیک‌های زیرسیستم تجزیه می‌شوند، اما حالت‌ها در تابع هزینه به طور جدانشدنی جفت می‌شوند [۱۷۶]. پایداری از طریق استفاده از یک محدودیت سازگاری برقرار می‌شود. باگلیتو^۱ نیز مسیریابی بهینه‌ای از پیام‌ها در یک شبکه سوئیچینگ ارائه کرد [۱۷۲]. گره‌ها در شبکه به عنوان زیرسیستم‌ها با ارتباطاتی به زیرسیستم‌های مجاورشان دیده می‌شوند. بویژه بوسیله مدل‌سازی دوباره سیستم، محدودیت‌ها آزاد می‌شوند. تا اینجا مقالات از مدل سیستم متمرکز استفاده کرده‌اند. اما زیرسیستم‌ها را به صورت مستقیم نیز می‌توان مدل‌سازی کرد. در برخی کارها نیز، زیرسیستم بدون در نظر گرفتن یک مدل برای کل سیستم طراحی و معادلات سازگاری میان زیرسیستم‌ها معرفی شد که باید ارضا شوند [۱۷۷]. در این کار نظریه غیرمتمرکز بر مبنای یک فرمولاسیون لاگرانژی می‌باشد و معادلات موازنه جریان دوگان‌سازی می‌شوند. در این فرمولاسیون، ضرب‌کننده‌های لاگرانژی متناسب متغیرهای جفت‌شده هستند. در نمونه‌های نوینی نیز، یک روش تفکیک مبتنی بر دوگان مرکز مبدایی^۲ برای تفکیک سیستم کلی به زیرسیستم‌هایی که بطور دینامیکی جفت هستند اما از لحاظ هزینه و محدودیت‌ها جدا از هم هستند، ارائه شدند [۱۷۸]. در این مقاله نشان داده می‌شود که مسئله کنترل پیش‌بین متمرکز می‌تواند از نو به عنوان یک مسئله محدب جداپذیر شکل بگیرد. در این روش هماهنگی میان کنترل‌کننده‌های محلی نیز با استفاده از ضرب‌کننده‌های لاگرانژی متناظر با دینامیک‌های جفت شده حاصل می‌شود. در مقالات مرور شده، هر زیر مسئله کنترلی، یک کنترل‌کننده خاص را برای حل مسئله محلی‌اش بکار می‌گیرد. اکثر طراحی‌ها آفلاین بوده و تغییرات آنلایین نداریم [۱۷۹]. در [۱۷۷] فرض شد که برای حل زیرمسئله‌ها اطلاعات کافی هستند و همچنین فرض بر کفایت مجموعه‌های عملی کنترل‌کننده‌هاست. اما نظریه مشابهی در [۱۷۲] ارائه شد که اگر کنترل‌کننده اطلاعات

1. Baglietto

2. Proximal center

خاص مورد نیازش را در دست نداشته باشد، می‌تواند آن‌ها را از طریق ارتباطات بدست آورد و یا وسایلی برای پیش‌بینی اطلاعات دارد. در [۱۸۰]، یک کنترل‌کننده پیش بین غیرمتمرکز برای شبکه‌های انتقال همانند شبکه‌های ترافیک جاده‌ای، شبکه‌های توزیع قدرت و شبکه‌های توزیع آب در نظر گرفته شده است که کنترل این شبکه‌ها اغلب از روی یک نقطه واحد بوسیله یک عامل کنترلی هوشمند واحد ممکن نیست، در عوض کنترل باید با استفاده از عوامل هوشمند چندگانه انجام شود. در [۱۸۱] نیز یک کنترل شبکه شده مبتنی بر یک مدل شبه نامتمرکز برای سیستم‌های فرآیندی ارائه شد که که پایداری حلقه بسته را نیز در حین کمینه‌کردن هزینه‌های ارتباطی و استعمال شبکه تضمین می‌کند. در پژوهش دیگری نیز یک کنترل‌کننده پیش‌بین غیرمتمرکز بر مبنای بهینه‌سازی همسایگی برای فرآیندهای مقیاس بزرگ که به صورت سریالی متصل هستند، بکار رفت و بهینگی مبتنی بر تکرار را همراه تضمین پایداری را برای سیستم‌های نامقید بدست آمد [۱۸۲]. از آنجا که در کنترل‌کننده‌های توزیع شده، درجه‌ای از هماهنگی می‌بایست بین زیرسیستم‌های کنترلی برای دستیابی به یک همگرایی در مقدار متغیرهای مشترک فراهم شود، کامپونوگارا^۱ یک روش هماهنگی را که در آن زیر سیستم‌ها در حین حل مسئله بهینه‌سازی‌شان تبادل اطلاعات می‌کنند بیان کرد. در این روش زیرسیستم‌ها با تکرار حل مسائل بهینه‌سازی بروز شده از طریق ارتباطات، هماهنگ می‌شوند. اگر ظرفیت شبکه برای این ارتباطات کافی نباشد، زیرسیستم‌ها نمی‌توانند دائماً تبادل اطلاعات کنند و پایداری روش قبل نیز در اینجا برقرار نخواهد بود. بدین منظور یک قید پایداری در حین هماهنگی با یک تاخیر تک مرحله‌ای برای سیستم‌های انتقال قدرت بدست آمد [۱۸۳].



شکل (۴-۲) ساختارهای کنترل پیش‌بین متمرکز و غیرمتمرکز در یک نگاه

به طور کلی مزیت اصلی کنترل غیرمتمرکز کاهش بار محاسباتی و پیچیدگی محاسباتی است، چرا که برای سیستم‌های مقیاس بزرگ با کنترل پیش‌بین متمرکز، محاسبه آنلاین ورودی ابعاد بالا بسیار پیچیده و نامناسب، غیرعملی و غیرانعطاف‌پذیر به نظر می‌رسد. در شکل (۴-۲)، ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین متمرکز (A)، و نظریه‌های کنترلی غیرمتمرکز در دو دسته نشان داده شده‌است: در یک نظریه ارتباط میان زیرسیستم‌های محلی برقرار است و هیچ ارتباطی میان کنترل‌کننده‌های محلی وجود ندارد (B)، و در یک نظریه دیگر علاوه بر ارتباط میان زیرسیستم‌های محلی، کنترل‌کننده‌های محلی نیز با یکدیگر مرتبط هستند (C و D). در بکارگیری مدل‌های غیرمتمرکز می‌توان سه روش زیر را به کاربرد که مدل‌سازی‌های بکارگرفته شده در این کتاب به روش سوم هستند:

- ۱- هر دینامیک زیرسیستم مستقل است و متغیرهای کنترلی و حالت‌های محلی در تابعی معیار به یکدیگر وابسته می‌شوند.
- ۲- هر دینامیک زیرسیستم و تابعی معیار به یکدیگر وابسته نیستند و متغیرهای

حالت و کنترل زیرسیستم‌ها فقط به وسیله محدودیت متصل می‌شوند.

۳- دینامیک‌های زیرسیستم از هم مستقل نیستند که در این روش هم جفت‌شدن متغیرها می‌تواند تنها بین متغیرهای حالت محلی یا تنها بین ورودی‌های کنترلی و یا بین ورودی‌های حالت و کنترل زیرسیستم‌ها برقرار باشد.

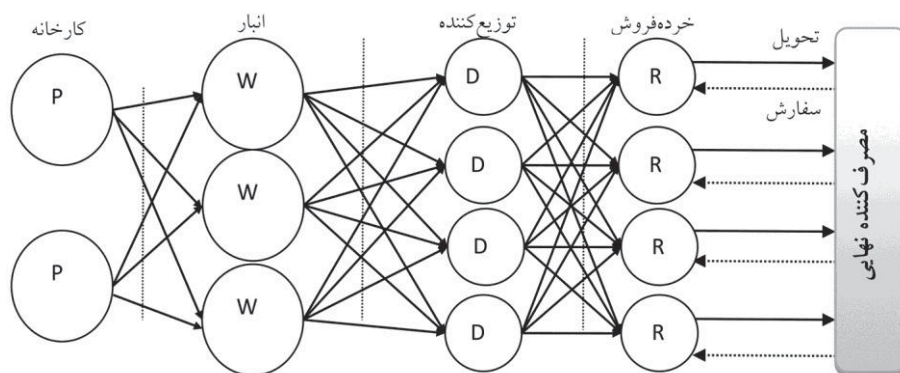
در نظریه‌های غیرمتمرکز، هدف دستیابی به تعدادی درجه هماهنگی در میان زیرسیستم‌های همسایه از نقطه نظر متغیرهای جفت شده است که مسئله کنترل پیش‌بین را با متغیرها، هزینه‌ها و محدودیت‌های مربوطه محلی، اما بدون حل کردن یک مسئله کنترل پیش‌بین متمرکز حل می‌کند. اگر از روش طراحی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرمتمرکز محلی استفاده شود، غالباً نیاز به طراحی روش‌های هماهنگ‌کننده این زیرسیستم‌های محلی نیز می‌باشد. بدین معنی که در کنترل‌کننده‌های توزیع شده درجه‌ای از هماهنگی می‌بایست بین زیرسیستم‌های کنترلی برای دستیابی به یک همگرایی در مقدار متغیرهای مشترک فراهم شود.

در این فصل ابتدا یک مدل دینامیکی تفصیلی تفاضلی گسسته از سیستم مدیریت زنجیره تامین بدون در نظر گرفتن وابستگی اطلاعاتی میان رده‌های متوالی تعریف می‌شود. در ادامه، کنترل‌کننده‌های پیش‌بین متمرکز و غیرمتمرکز همراه با تابعی‌های معیار مربوطه مناسبی برای برآوردن اهداف کنترلی سیستم مدیریت زنجیره تامین طراحی شده و چگونگی حل مسئله بهینه‌سازی آن‌ها مطرح می‌شوند. پس از آن نیز یک مدل دینامیکی از سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی مبتنی بر نظریه بازی آشامیدنی تعریف شده و کنترل‌کننده‌های پیش‌بین متمرکز و غیرمتمرکز برای تنظیم سطوح موجودی رده‌ها و سفارش‌های برآورده نشده رده‌ها طراحی می‌شوند. در نوع غیرمتمرکز این روش باید یک هماهنگی مناسب میان حل مسئله‌های بهینه محلی رده‌های غیرمتمرکز برقرار شود. در این باب نیز روش هماهنگ‌کننده‌ی این کنترل‌کننده‌های پیش‌بین محلی، طراحی می‌شود. به هر حال 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.

۲-۴- سیستم مدیریت زنجیره تامین بدون در نظر گرفتن چرخه‌های اطلاعاتی

همان‌گونه که در قسمت‌های قبل ذکر شد، سیستم مدیریت زنجیره تامین می‌تواند بدون در نظر گرفتن جریان سفارش از رده پایین دستی به بالا دستی مدل شود. در این قسمت این نوع از سیستم مدیریت زنجیره تامین مدنظر قرار گرفته و برای آن کنترل‌کننده پیش‌بین به صورت متمرکز و غیرمتمرکز طراحی می‌شود. نمونه‌ای از این نوع سیستم مدیریت زنجیره تامین در شکل (۳-۴) دیده می‌شود که تنها سفارش توسط خرده‌فروش از مصرف‌کننده نهایی گرفته می‌شود و میزان سفارش‌های برگشتی فقط در گره خرده‌فروش مدنظر است.



شکل (۳-۴) نمونه‌ای از زنجیره تامین بدون چرخه اطلاعاتی

۲-۴-۱- مدل دینامیکی

در اینجا برای مدل کردن سیستم مدیریت زنجیره تامین نشان داده شده در شکل (۳-۴) از مدل‌های تفصیلی تفاضلی زمان گسسته که با طبیعت زمان گسسته زنجیره‌های تامین که سازگار است، استفاده می‌شوند. بر همین اساس، مراکز تولید (کارخانه‌ها) P ، مخازن W ، مراکز توزیع D ، خرده‌فروش‌های R ، گره‌های سیستم را تشکیل می‌دهند.

DP مجموعه محصولات مطلوب در زنجیره تامین است. این محصولات در کارخانه‌های P با استفاده از منابع متنوعی می‌توانند تولید شوند. کارخانه‌ها خطوط تولید مستقلی را برای محصولات توزیع شده در نظر می‌گیرند. سپس محصولات به انبارها منتقل و در آنجا ذخیره می‌شوند. محصولات به محض تقاضای مشتری به مراکز توزیع D یا خرده فروش‌های R فرستاده می‌شوند. خرده‌فروش‌ها سفارش‌های زمان متغیری را از مشتری‌های مختلف برای محصولات مختلف دریافت می‌کنند. برآوردن تقاضای مشتری هدف اصلی در مکانیزم زنجیره تامین است. تقاضای برآورده نشده به عنوان سفارش برگشتی برای دوره‌های زمانی بعدی ضبط می‌شوند. فرض می‌شود که تصمیمات داخل دوره‌های زمانی (T) فاصله‌دار مساوی (همانند ساعت‌ها، روزها یا هفته‌ها) اتخاذ می‌شوند. مدت دوره زمانی پایه به خصوصیات دینامیکی شبکه بستگی دارد. در نتیجه فرکانس‌های بالاتر از مقیاس زمانی انتخاب شده، ناچیز در نظر گرفته شده و بوسیله شبکه کاملاً ضعیف می‌شوند. برای هر گره k ، یک مجموعه از گره‌های بالادستی (قبلی) بوسیله k' مشخص می‌شوند که می‌تواند گره k را تامین کند. همچنین یک دسته از گره‌های پایین دستی (بعدی) بوسیله k'' که می‌تواند بوسیله k تامین شود، مشخص می‌شود. همه جفت‌های (k', k) و یا (k, k'') معتبر، مسیرهای مجاز داخل زنجیره را تشکیل می‌دهند. همه متغیرها در شبکه زنجیره تامین همچون موجودی کالا و بارهای انتقال، متغیرهای پیوسته فرض می‌شوند [۳۸] و [۴۶].

یک تعادل کالا پیرامون هر گره شبکه، سطح موجودی کالا در گره را در لحظه‌های زمانی جاری و یک مرحله زمانی قبل از آن وارد می‌کند. این معادله برای گره‌های مخزن یا مراکز توزیع بصورت

$$y_{i,k}(t) = y_{i,k}(t-1) + \sum_{k'} x_{i,k',k}(t-1 - L_{k',k}) - \sum_{k''} x_{i,k,k''}(t-1), \quad (1-4)$$

$$\forall k \in \{W, D\}, \quad t \in T, \quad i \in DP$$

می‌باشد که در اینجا $y_{i,k}$ ، موجودی کالای محصول ذخیره شده i در گره k ، $x_{i,k,k'}$ میزان محصول i منتقل شده از طریق کانال (k', k) ، $L_{k',k}$ زمان تاخیر انتقال برای

کانال (k', k) می‌یاشند. فرض می‌شود که تاخیر یک مضرب صحیح از دوره زمانی پایه است. همچنین برای اینکه تحویل واقعی محصول واقع شود، تعادل موجودی کالا برای گره‌های خرده‌فروش بصورت علی‌الحساب اصلاح می‌شود که با $d_{i,k}(t)$ نشان داده می‌شود

$$y_{i,k}(t) = y_{i,k}(t-1) + \sum_{k'} x_{i,k',k}(t-1 - L_{k',k}) - d_{i,k}(t-1), \quad (2-4)$$

$$\forall k \in \{R\}, \quad t \in T, \quad i \in DP.$$

میزان تقاضای برآورده نشده به عنوان سفارش‌های برگشتی برای هر محصول و دوره زمانی ثبت می‌شوند. از اینرو معادله تعادل برای سفارش‌های برگشتی بصورت زیر در خواهد آمد

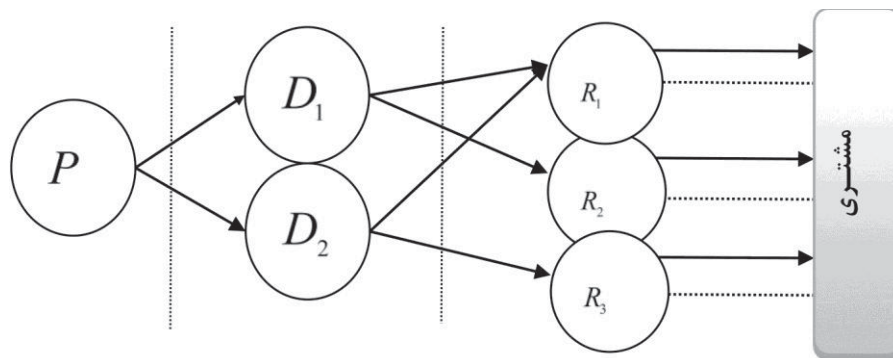
$$BO_{i,k}(t) = BO_{i,k}(t-1) + R_{i,k}(t-1) - d_{i,k}(t-1) - LO_{i,k}(t-1), \quad (3-4)$$

$$\forall k \in \{R\}, \quad t \in T, \quad i \in DP.$$

که $R_{i,k}(t)$ به تقاضا برای محصول i ام در گره خرده‌فروش k ام و دوره زمانی t اشاره دارد. $LO_{i,k}(t)$ به مقدار فسخ شده‌ی سفارش‌های برگشتی (به علت اینکه شبکه موفق به ارضای آنها در یک حد زمانی معقول نشده است) اشاره دارد. نکته اینکه، این مدل نیازی به معادله تعادلی دیگری غیر از گره‌های خرده‌فروش نهایی برای سفارش‌های مشتری ندارد. در این مدل، متغیرهای حالت سطوح موجودی محصول در گره‌های ذخیره $(y_{i,k})$ و سفارش‌های برگشتی $(BO_{i,k})$ در گره‌های دریافت‌کننده سفارش هستند. متغیرهای دستکاری‌شونده (تصمیم یا کنترل) کمیت‌های تولیدی منتقل شده از طریق کانال‌های مجاز شبکه (x) و مقادیر تحویل داده شده به مشتری‌ها $(d_{i,k})$ هستند. تقاضای محصول $(R_{i,k})$ و مقدار فسخ شده‌ی سفارش‌های برگشتی $(LO_{i,k})$ نیز ورودی‌های اندازه‌گیری شده این سیستم هستند.

در هر گره توانا به حمل کردن موجودی W (و D و R) قیدهای ظرفیت موجودی با یک سطح موجودی مجاز حداکثر داده می‌شوند. به همین ترتیب قیدهای

ظرفیت انتقال برای هر کانال انتقال مجاز داخل زنجیره تامین با یک ظرفیت انتقال مجاز حداکثر در نظر گرفته می‌شوند. همچنین فرض می‌شود که هر کارخانه، خطوط تولید مستقل برای هر محصول یا مجموعه محصول نصب می‌کند. از اینرو تولید همزمان محصولات در دوره زمانی مفروض حاصل می‌شود و خطوط تولید منحصر بفرد منابع مشترک خود را به اشتراک می‌گذارند. برای نمونه یک سیستم مدیریت زنجیره تامین سه رده‌ای دو محصولی دارای یک مرکز تولید، دو مرکز توزیع و سه خرده فروش مطابق شکل (۴-۴) در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۴-۴) یک نمونه زنجیره تامین سه رده‌ای

مجموعه معادلات تفاضلی گسسته برای این نمونه از سیستم مدیریت زنجیره تامین بدون تاخیر انتقال و سفارش‌های برگشتی فسخ شده برای $t \in T$ و $i = \{1,2\} \in DP$ به صورت رابطه (۴-۴) در می‌آید که شامل ۱۶ متغیر حالت و خروجی، و ۲۴ متغیر ورودی می‌باشد.

سیستم مدیریت زنجیره تامین شامل یک سری از تصمیمات اتخاذ شده در هر دوره زمانی برای دستیابی به نیازهای مشتری است. عملکرد زنجیره تامین چند بعدی است و به طور مستقیم یا غیرمستقیم به وسیله یک سری عوامل همچون کیفیت سرویس و هزینه‌های عملیاتی تحت تاثیر قرار می‌گیرد.

جریان محصولات در طول کانال‌های مجاز متصل به رده‌های متوالی همراه با

هزینه‌های انتقال مرتبط، موجودی محصولات در گره‌های زنجیره همراه با هزینه‌های موجودی و ذخیره‌سازی، به علاوه‌ی برآوردن تقاضای مشتری از فاکتورهای اساسی هستند که در طراحی روش کنترلی باید مدنظر قرار گیرند.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 y_{1,D1}(t) = y_{1,D1}(t-1) + x_{1,P,D1}(t-1) - x_{1,D1,R1}(t-1) - x_{1,D1,R2}(t-1) \\
 y_{1,D2}(t) = y_{1,D2}(t-1) + x_{1,P,D2}(t-1) - x_{1,D2,R1}(t-1) - x_{1,D2,R3}(t-1) \\
 y_{2,D1}(t) = y_{2,D1}(t-1) + x_{2,P,D1}(t-1) - x_{2,D1,R1}(t-1) - x_{2,D1,R2}(t-1) \\
 y_{2,D2}(t) = y_{2,D2}(t-1) + x_{2,P,D2}(t-1) - x_{2,D2,R1}(t-1) - x_{2,D2,R3}(t-1) \\
 y_{1,R1}(t) = y_{1,R1}(t-1) + x_{1,D1,R1}(t-1) + x_{1,D2,R1}(t-1) - d_{1,R1}(t-1) \\
 y_{1,R2}(t) = y_{1,R2}(t-1) + x_{1,D1,R2}(t-1) - d_{1,R2}(t-1) \\
 y_{1,R3}(t) = y_{1,R3}(t-1) + x_{1,D2,R3}(t-1) - d_{1,R3}(t-1) \\
 y_{2,R1}(t) = y_{2,R1}(t-1) + x_{2,D1,R1}(t-1) + x_{2,D2,R1}(t-1) - d_{2,R1}(t-1) \\
 y_{2,R2}(t) = y_{2,R2}(t-1) + x_{2,D1,R2}(t-1) - d_{2,R2}(t-1) \\
 y_{2,R3}(t) = y_{2,R3}(t-1) + x_{2,D2,R3}(t-1) - d_{2,R3}(t-1) \\
 BO_{1,R1}(t) = BO_{1,R1}(t-1) + R_{1,R1}(t-1) - d_{1,R1}(t-1) \\
 BO_{1,R2}(t) = BO_{1,R2}(t-1) + R_{1,R2}(t-1) - d_{1,R2}(t-1) \\
 BO_{1,R3}(t) = BO_{1,R3}(t-1) + R_{1,R3}(t-1) - d_{1,R3}(t-1) \\
 BO_{2,R1}(t) = BO_{2,R1}(t-1) + R_{2,R1}(t-1) - d_{2,R1}(t-1) \\
 BO_{2,R2}(t) = BO_{2,R2}(t-1) + R_{2,R2}(t-1) - d_{2,R2}(t-1) \\
 BO_{2,R3}(t) = BO_{2,R3}(t-1) + R_{2,R3}(t-1) - d_{2,R3}(t-1)
 \end{array} \right. \quad (۴-۴)$$

۴-۲-۲- طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین متمرکز

هدف سیستم کنترلی در اینجا، عمل کردن زنجیره تامین در نقطه بهینه با وجود اثر نامعینی تقاضاست. سیستم کنترل به امکانات داخلی برای شناختن روش عملیاتی بهینه از طریق معیارهای عملکرد هزینه هدفدار و توصیفی، و مکانیزم‌هایی برای کم کردن

اثرات مضر تغییرپذیری تقاضا، نیازمند است. اما بطور کلی اهداف اصلی روش کنترل برای شبکه زنجیره تامین بدین صورت می‌باشد: بیشینه کردن رضایت مشتری و، حداقل کردن هزینه‌های عملیاتی زنجیره تامین.

اولین هدف به علت اینکه تقاضای برآورده نشده (BO) اثر زیادی بر روی اعتبار شرکت و متعاقباً روی تقاضای آینده و درآمدهای کلی دارد، می‌تواند با کاهش تقاضاهای برآورده نشده روی یک دوره زمانی انجام شود. هدف دوم نیز می‌تواند با حداقل سازی هزینه‌های عملیاتی شامل هزینه‌های موجودی و هزینه‌های انتقال به دست آید. در ضمن هزینه‌های موجودی هم شامل هزینه‌های ذخیره‌سازی و هزینه‌های وسایل ذخیره موجودی کالا هستند.

بر اساس این حقیقت که عمل‌های کنترلی حال و گذشته در پاسخ آینده سیستم موثرند، یک افق زمانی پیش‌بینی غلتان (افق دورشونده) در ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین انتخاب می‌شود. سطوح هدف موجودی کالا (همانند نقاط تنظیم موجودی کالا) پارامترهای زمان ثابت هستند. عمل‌های کنترلی که یک تابعی معیار متحد را با اهداف کنترلی طرح‌ریزی شده کمینه می‌کنند، روی افق غلتان محاسبه می‌شوند. در هر دوره زمانی اولین عمل کنترلی در دنباله محاسبه شده و پیاده می‌شود.

پس رفتار آینده زنجیره تامین تحت افق زمانی معین با استفاده از مدل تفاضلی زمان گسسته‌ی بیان شده با روابط (۴-۱) تا (۴-۳) پیش‌بینی می‌شود. براین اساس متغیرهای سطح موجودی و سفارش‌های برگشتی به عنوان متغیرهای حالت و خروجی، متغیرهای انتقال و کالای تحویل شده به مشتری به عنوان متغیرهای کنترل و متغیرهای سفارش فسخ شده و تقاضا به عنوان اغتشاش‌های اندازه‌گیری شده‌ی این مدل در نظر گرفته می‌شوند [۱۲۰].

با اهداف کنترلی مذکور ساختار ریاضی تابعی معیار مربعی با در نظر گرفتن همزمان هزینه‌های سفارش‌های برگشتی، هزینه‌های انتقال و هزینه‌های موجودی کالا، بصورت زیر تعریف می‌شود

$$\begin{aligned}
 J_{total} = & \sum_{j=1}^p \sum_{k \in \{W, D, R\}} \sum_{i \in DP} \{w_{y,i,k} (y_{i,k}(t+j) - y_{s,i,k})^2\} \\
 & + \sum_{j=0}^{c-1} \sum_{k \in \{W, D, R\}} \sum_{i \in DP} \{w_{x,i,k',k} (x_{i,k',k}(t+j))^2\} \\
 & + \sum_{j=1}^p \sum_{k \in \{R\}} \sum_{i \in DP} \{w_{BO,i,k} (BO_{i,k}(t+j))^2\} \\
 & + \sum_{j=0}^{c-1} \sum_{k \in \{W, D, R\}} \sum_{i \in DP} \{w_{\Delta x,i,k',k} (x_{i,k',k}(t+j) - x_{i,k',k}(t+j-1))^2\}
 \end{aligned} \tag{۵-۴}$$

در آن نقاط ثابت تنظیم موجودی، فاکتورهای وزنی $w_{y,i,k}$ هزینه‌های ذخیره موجودی کالا و وسایل موجودی کالا در هر محصول واحد را نشان می‌دهند، $w_{x,i,k',k}$ صورت حساب هزینه انتقال در هر محصول واحد برای کانال (k', k) را بیان می‌کند. $w_{BO,i,k}$ هم، جریمه اعمال شده روی تقاضاهای برآورده نشده (که بر مبنای سطح سرویس مبتنی بر اختیار شرکت و تقاضای آینده، تخمین زده می‌شود) می‌باشد. وزن‌های $w_{\Delta x,i,k',k}$ نیز متناظر با جریمه روی سرعت تغییر برای میزان انتقال داده شده محصول i ام از طریق کانال (k', k) است. p افق پیش‌بینی و c افق کنترل است.

در این تابعی معیار کاملاً مربعی چهار قسمتی، بخش اول مربوط به دنبال کردن سطح موجودی مطلوب در هر گره است. بخش دوم در جهت حداقل کردن مقادیر کالای انتقال داده شده در کانال‌های مجاز انتقال کالا (مقادیر کنترل) برای برآوردن سطح‌های موجودی مطلوب به کار گرفته می‌شود. بخش سوم نیز برای جبران سفارش‌های برگشتی همه محصولات در گره‌های دریافت کننده سفارش (خرده‌فروش) استفاده می‌شود. در نهایت بخش چهارم تحت عنوان بخش توقیف حرکت انحرافات متغیرهای تصمیم از مقادیر متناظر در دوره‌های زمانی قبلی را جریمه می‌کند. این بخش معادل یک جریمه روی نرخ تغییر در متغیرهای دستکاری شونده است. بنابراین این خط‌مشی توقیف حرکت به سمت حذف کردن عمل‌های کنترلی مهاجم و تند و ناگهانی

میل می‌کند و متعاقباً از شبکه در برابر اشباع و تغییرپذیری زیاد نامطلوب (که به وسیله تغییرات تقاضای ناگهانی ایجاد می‌شود) محافظت می‌کند. در مجموع معمولاً عملیات حمل و نقل برای ادامه یافتن یک سطح تاحدی معین در مقابل نوسان و تغییرات پی در پی، از یک دوره زمانی تا دوره زمانی دیگر طرح می‌شود. اما به هر حال بخش توقیف حرکت با اثر روی عملکرد کنترلی منجر به یک پاسخ دینامیکی کند می‌شود.

فاکتورهای وزنی نفوذ میان متغیرهای کنترل شده یا خروجی‌ها و متغیرهای دستکاری شونده یا کنترل را منعکس می‌کنند و می‌توانند با یک دقت خوب مبتنی بر توانایی‌های زنجیره تامین موجود انتخاب شوند. همچنین این تابعی معیار فرض ضمنی یک حاشیه سود ثابت برای هر محصول را در نظر می‌گیرد و در آن هزینه‌های تولید و میزان درآمد معیار نیستند.

یک تابع معیار خطی ساده شده‌ی جایگزین که بخش توقیف حرکت را حذف می‌کند و همچنین یک جریمه خطی را روی سفارش‌های برگشتی محصول ثبت شده (ضبط شده) در نظر می‌گیرد بصورت رابطه زیر است.

$$\begin{aligned}
 J_{total} = & \sum_{j=1}^p \sum_{k \in \{W,D,R\}} \sum_{i \in DP} \{w_{y,i,k} (y_{i,k}(t+j) - y_{s,i,k})\} \\
 & + \sum_{j=0}^{c-1} \sum_{k \in \{W,D,R\}} \sum_{i \in DP} \{w_{x,i,k,k} (x_{i,k,k}(t+j))\} \\
 & + \sum_{j=1}^p \sum_{k \in \{R\}} \sum_{i \in DP} \{w_{BO,i,k} (BO_{i,k}(t+j))\}
 \end{aligned} \tag{۶-۴}$$

این تابعی معیار از منظر میزان بار محاسباتی برای سیستم‌های مقیاس بزرگ مناسب‌تر است. اما به هر حال تابعی معیار رابطه (۴-۵) مسئله کنترل کامل‌تری را حل می‌کند، به گونه‌ای که صراحتاً هر دو فاکتورهای مرتبط اقتصادی و خصوصیات عملکرد دینامیکی (همانند بخش توقیف حرکت برای متغیرهای دستکاری شونده) را در نظر می‌گیرد [۱۱۸].

کنترل‌کننده پیش‌بین باید یک تعداد شناخته شده از سفارش‌ها در دوره زمانی اول از افق زمانی معین و یک سطح تقاضای پیش‌بینی شده برای دوره‌های زمانی بعدی را برآورده کند (شرایط اولیه). سپس بعد از حل مسئله بهینه‌سازی تابعی معیار، عمل‌های کنترلی برای کل محدوده افق زمانی محاسبه می‌شوند. در این مسئله، تقاضای مشتری به عنوان اغتشاش ورودی اندازه‌گیری شده و در راستای عکس جریان محصول انتقال داده شده بین رده‌ها وارد سیستم شده و منتشر می‌شود. در ادامه روش حل مسئله‌های بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین با اعمال قیدها و بدون اعمال قیدها شرح داده می‌شود.

۴-۲-۳- روش حل مسئله بهینه‌سازی کنترل‌کننده پیش‌بین

۴-۲-۳-۱- مسئله کنترل پیش‌بین

مسئله کنترل پیش‌بین با تابع هزینه زیر تعریف می‌شود

$$J = \sum_{j=1}^p \|\hat{y}(t+j) - r(t+j)\|_Q^2 + \sum_{j=0}^{c-1} \|u(t+j)\|_R^2 + \sum_{j=0}^{c-1} \|\Delta u(t+j)\|_M^2 \quad (7-4)$$

که در این رابطه $\hat{y}(t+j)$ خروجی پیش‌بینی شده در j گام جلوتر در لحظه t ، $r(t+j)$ دنباله مرجع سیستم و $\Delta u(t+j)$ دنباله‌ای تغییرات ورودی‌های محاسبه شونده لحظه t نسبت به لحظه قبل در گام j ام به صورت

$$\Delta u(t+j) = u(t+j) - u(t+j-1)$$

خواهد بود. پارامترهای c و p نیز به ترتیب افق کنترل و افق پیش‌بینی، و ماتریس‌های Q و R و M ماتریس‌های وزنی معین می‌باشند.

ساختار کلی معادلات پیش‌بین در فضای حالت نیز با n متغیر حالت و l خروجی و m ورودی و n_d متغیر اغتشاشی و نویزهای فرآیند و اندازه‌گیری به صورت

معادلات زیر برقرار است

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Ax(t) + Bu(t) + Nd(t) + v(t) \\ y(t) &= Cx(t) + w(t) \end{aligned} \quad (۸-۴)$$

که در آن $x(t)$ بردار n تایی متغیرهای حالت سیستم، $y(t)$ بردار l تایی خروجی، $u(t)$ بردار m تایی ورودی کنترلی، $d(t)$ بردار n_d تایی متغیر اغتشاشی قابل اندازه‌گیری هستند. ماتریس‌های A و C و B و N به ترتیب ماتریس‌های سیستم، ماتریس خروجی، ماتریس ورودی کنترل و ماتریس ورودی اغتشاش می‌باشند. $v(t)$ و $w(t)$ نویزهای سفید با میانگین صفر اندازه‌گیری و فرآیند با ابعاد برابر با حالت و ورودی سیستم هستند. با انجام یک سری محاسبات بازگشتی می‌توان خروجی سیستم را در لحظه $t + j$ به صورت زیر درآورد

$$\begin{aligned} y(t+j) &= \\ & CA^j x(t) + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{j-i-1} Bu(t+i) + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{j-i-1} Nd(t+i) \\ & + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{j-i-1} v(t+i) + w(t+j). \end{aligned} \quad (۹-۴)$$

با استفاده از تابع امید ریاضی و با توجه به اینکه میانگین نویزهای فرآیند و اندازه‌گیری صفر هستند، خروجی پیش‌بینی شده در لحظه t تا j گام جلوتر به صورت رابطه زیر به دست می‌آید

$$\hat{y}(t+j) = CA^j E[x(t)] + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{j-i-1} Bu(t+i) + \sum_{i=0}^{j-1} CA^{j-i-1} Nd(t+i) \quad (۱۰-۴)$$

و

$$\hat{Y} = \begin{bmatrix} \hat{y}(t+1) \\ \hat{y}(t+2) \\ \vdots \\ \hat{y}(t+p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} CAE[x(t)] + CBu(t+i) + CNd(t+i) \\ CA^2 E[x(t)] + \sum_{i=0}^1 CA^{1-i} Bu(t+i) + \sum_{i=0}^1 CA^{1-i} Nd(t+i) \\ \vdots \\ CA^p E[x(t)] + \sum_{i=0}^{p-1} CA^{1-i} Bu(t+i) + \sum_{i=0}^{p-1} CA^{1-i} Nd(t+i) \end{bmatrix}_{(p \times 1)}$$

خواهد بود. توجه شود که در فاصله زمانی بین افق کنترل و افق پیش‌بینی، مقادیر ورودی ثابت و برابر با آخرین مقدار ورودی محاسبه شده در افق کنترل می‌باشد. رابطه (۱۱-۴) را می‌توان به صورت بسته زیر هم نوشت

$$\hat{Y} = F\hat{x}(t) + GU + HD \quad (۱۲-۴)$$

که در این رابطه $\hat{x}(t) = E[x(t)]$ بردار تخمین حالت‌های سیستم است که به کمک یک فیلتر کالمن به دست می‌آید و عبارت‌های GU و HD در آن پاسخ‌های اجباری و $F\hat{x}(t)$ پاسخ آزاد است. ماتریس F به صورت

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^p \end{bmatrix} \quad (۱۳-۴)$$

بیان می‌شود و ماتریس‌های بلوکی پایین مثلثی H و G هم به ترتیب با عناصر غیر صفر $H_{ij} = CA^{i-j}N$ و $G_{ij} = CA^{i-j}B$ نوشته می‌شوند. بردارهای D و U هم به صورت

$$U = \begin{bmatrix} u(t) \\ u(t+1) \\ \vdots \\ u(t+p-1) \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} d(t) \\ d(t+1) \\ \vdots \\ d(t+p-1) \end{bmatrix} \quad (۱۴-۴)$$

تعریف می‌شوند.

۴-۲-۳-۲- تخمین حالت مبتنی بر فیلتر کالمن

در بسیاری از کاربردهای واقعی اندازه‌گیری تمامی متغیرهای حالت امکان‌پذیر و یا از نظر اقتصادی و نگهداری مقرون به صرفه نیست. برای مثال ممکن است که به علت

تعداد زیاد متغیرهای حالت اندازه‌گیری تمامی آن‌ها دشوار باشد. در برخی شرایط هم ممکن است به علت نویز فراوان محیطی، اندازه‌گیری‌های انجام شده برای فیدبک مناسب نباشند [۱۵۰].

همان‌طور که در رابطه (۸-۴) دیده می‌شود، غالباً سیستم دارای نویز فرآیند و اندازه‌گیری است. هدف فیلتر کالمن، تخمین متغیرهای حالت سیستم بر اساس اندازه‌گیری‌های همراه با نویز و ورودی‌های تصادفی است و سپس استفاده از این حالت‌های تخمین زده شده در روش کنترلی است.

بر اساس رابطه (۸-۴)، فرض می‌شود $w(t)$ و $v(t)$ بردارهایی هم بعد با بردارهای حالت و ورودی با آرایه‌های یکسان هستند. این آرایه‌های مساوی نویزهای (سفید با میانگین صفر) اندازه‌گیری و فرآیند هستند که به ترتیب دارای کواریانس Γ_w و Γ_v هستند. بردار حالت اولیه x_0 نیز از متغیرهای تصادفی با میانگین صفر و کواریانس P_0 تشکیل شده است. همچنین فرض می‌شود که نویزهای فرآیند و اندازه‌گیری با هم و با x_0 ناهمبسته هستند. با فرض گوسی بودن دنباله نویزهای فرآیند و اندازه‌گیری روابط تخمینی زیر از حالت‌های سیستم حاکم می‌شوند

$$\begin{aligned}\hat{x}(t+1) &= A\hat{x}(t) + K(t)[y(t) - C\hat{x}(t)] + Bu(t) \\ \hat{x}(t_0) &= x_0\end{aligned}\quad (15-4)$$

که $K(t)$ بهره فیلتر کالمن است که با رابطه زیر داده می‌شود

$$K(t) = A\Sigma(t)C^T [C\Sigma(t)C^T + R]^{-1} \quad (16-4)$$

و ماتریس کواریانس خطای تخمین $\Sigma(t)$ از رابطه تفاضلی ریکاتی به صورت

$$\Sigma(t+1) = A\Sigma(t)A^T + Q - K(t)[C\Sigma(t)C^T + R]K(t)^T, \quad \Sigma(t_0) = \Sigma_0 \quad (17-4)$$

می‌باشد که با جایگذاری رابطه (۱۶-۴) به

(۱۸-۴)

$$\Sigma(t+1) = A\Sigma(t)A^T + Q - A\Sigma(t)C^T [C\Sigma(t)C^T + R]^{-1} C\Sigma(t)A^T, \quad \Sigma(t_0) = \Sigma_0$$

تبدیل می‌شود. در نهایت در حالت ماندگار بهره فیلتر کالمن و ماتریس کواریانس خطای تخمین به یک مقدار ثابت میل خواهند نمود.

۴-۲-۳-۳- حل مسئله بهینه‌سازی

برای محاسبه ورودی کنترلی بهینه باید تابعی معیار (۷-۴) را با معادلات مدل (۸-۴) در نظر گرفت. در تابعی معیار تنها خروجی‌های پیش‌بینی شده روی افق پیش‌بینی و محاسبه دنباله ورودی روی افق کنترلی مدنظر قرار می‌گیرند. بر این اساس بخشی از رابطه (۱۲-۴) به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود

$$\hat{Y}_p = F_p \hat{x}(t) + G_c U_c + H_p D_p \quad (19-4)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \hat{Y}_p &= [\hat{y}(t+1)^T \quad \dots \quad \hat{y}(t+p)^T] \\ U_c &= [u(t)^T \quad \dots \quad u(t+c-1)^T] \\ D_p &= [d(t)^T \quad \dots \quad d(t+p-1)^T] \end{aligned}$$

و H_p و G_c و F_p به ترتیب زیرماتریس‌های متناظر H و G و F بر حسب افق‌های پیش‌بینی و کنترل هستند. به طور مثال G_c برابر با $(G)_{l \times p, c}$ می‌باشد. در نهایت دنباله ورودی کنترلی، c بردار m تایی است که از حل تابعی معیار مذکور به دست می‌آید. لازم به ذکر است که مقدار ورودی و اغتشاش قابل اندازه‌گیری در محاسبات پیش‌بینی خروجی در انتهای افق کنترلی ثابت و برابر با آخرین مقدار آن در نظر گرفته می‌شود. با جایگذاری رابطه (۱۲-۴) در تابعی معیار (۷-۴)، می‌توان تابعی معیار را بدین صورت بازنویسی کرد.

$$J = (F_p \hat{x}(t) + G_c U_c + H_p D_p - r)^T Q (F_p \hat{x}(t) + G_c U_c + H_p D_p - r) \quad (20-ع) \\ + U_c^T R U_c + (\Delta U_c)^T M (\Delta U_c)$$

که

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t+1) \\ \vdots \\ \Delta u(t+p-1) \end{bmatrix}, \quad r = [r(t+1) \quad r(t+2) \quad \dots \quad r(t+p)]^T$$

می‌باشد. اگر ماتریس‌های وزنی به صورت ماتریس‌های قطری

$$Q = \text{diag}(Q \quad Q \quad \dots \quad Q)_p, R = \text{diag}(R \quad R \quad \dots \quad R)_c, M = \text{diag}(M \quad M \quad \dots \quad M)_c$$

باشند، آنگاه رابطه ساده شده‌ای از تابعی معیار به صورت

$$J = \sum_{j=1}^p Q(\hat{y}(t+j) - r(t+j))^2 + \sum_{j=0}^{c-1} R(u(t+j))^2 + \sum_{j=0}^{c-1} M(\Delta u(t+j))^2 \quad (21-ع)$$

وجود خواهد داشت. در نهایت با حل $\frac{\partial J}{\partial u} = 0$ روی رابطه (21-ع) و با فرض عدم محدودیت (قید)، دنباله ورودی زیر به دست می‌آید

$$U_c = (G_c^T Q G_c + R + M)^{-1} (G_c^T Q (r - F_p \hat{x}(t) - H_p D_p) + M u(t-1)) \quad (22-ع)$$

اما به هر حال در عمل همواره فرآیندها دارای محدودیت‌هایی بر روی متغیرهای خود می‌باشند. از جمله مهمترین محدودیت‌ها می‌توان به حد بیشینه یا کمینه سطوح ظرفیت موجودی در گره‌های زنجیره تامین اشاره کرد. روش‌های کنترل پیش‌بین به شکلی مناسب این محدودیت‌ها را در قالب حل مسأله بهینه‌سازی گنجانده‌اند. برای حل مسئله بهینه‌سازی مربعی لازم است که تابع هدف و محدودیت‌ها به صورت توابعی از متغیرهای ورودی تعریف شوند. در مسئله بدون محدودیت، بعد از تبدیل تابعی

معیار به شکل

$$J(u) = \frac{1}{2} u^T \theta u + bu \quad (23-4)$$

و با یک مشتق‌گیری ساده روی این رابطه خطی به صورت

$$u = -\theta^{-1}b \quad (24-4)$$

پاسخ بهینه به دست می‌آید. اما در مسئله بهینه‌سازی مقید، فرض می‌شود که محدودیت‌های زیر روی متغیرهای سیستم برقرار باشد

$$\begin{aligned} Y_{\min} &\leq \hat{Y}_p \leq Y_{\max} \\ U_{\min} &\leq U_c \leq U_{\max} \\ \Delta U_{\min} &\leq \Delta U_c \leq \Delta U_{\max} \end{aligned} \quad (25-4)$$

که Y_{\min} ، Y_{\max} ، U_{\min} ، U_{\max} ، ΔU_{\min} و ΔU_{\max} به ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه متغیرهای خروجی و ورودی و نمو ورودی هستند. در اینجا نیز لازم است که تمامی محدودیت‌ها بر حسب متغیر ورودی کنترلی نشان داده شوند. بر این اساس رابطه ماتریسی زیر شکل می‌گیرد

$$\begin{bmatrix} G_c \\ -G_c \\ I \\ -I \\ I \\ -I \end{bmatrix} U_c \leq \begin{bmatrix} Y_{\max} - F_p \hat{x}(t) - H_p D_p \\ -Y_{\min} + F_p \hat{x}(t) + H_p D_p \\ U_{\max} \\ -U_{\min} \\ \Delta U_{\max} + U_c(t-1) \\ -\Delta U_{\min} - U_c(t-1) \end{bmatrix} \quad (26-4)$$

که در آن $U_c(t-1)$ اطلاعات یک گام عقب‌تر از $U_c(t)$ (یعنی اطلاعات حاصل از مرحله بهینه‌سازی قبلی) است. در نهایت مسئله بهینه‌سازی مقید مذکور به صورت زیر در می‌آید

$$J(u) = \frac{1}{2} u^T \theta u + bu \quad \text{subject to} \quad Au \leq B \quad (27-4)$$

که در آن

$$A = \begin{bmatrix} G_c \\ -G_c \\ I \\ -I \\ I \\ -I \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} Y_{\max} - F_p \hat{x}(t) - H_p D_p \\ -Y_{\min} + F_p \hat{x}(t) + H_p D_p \\ U_{\max} \\ -U_{\min} \\ \Delta U_{\max} + U_c(t-1) \\ -\Delta U_{\min} - U_c(t-1) \end{bmatrix}$$

می‌باشد. θ و b نیز بر اساس رابطه (۲۰-۴) به صورت روابط

$$\theta = (G_c^T Q G_c + R + M) \quad (28-4)$$

$$b = -G_c^T Q (r - F_p \hat{x}(t) - H_p D_p) - Mu(t-1) \quad (29-4)$$

استخراج می‌شوند.

برای حل مسئله کنترل پیش‌بین توصیف شده از سیستم مدیریت زنجیره تامین در بخش ۲-۲-۴، باید کلیه روابط به شکل روابط (۲۱-۴) تا (۲۴-۴) بازنویسی شوند و در صورت نیاز به یک تخمین حالت با وجود نویزهای فرآیند و اندازه‌گیری، از تخمین زنده حالت فیلتر کالمن موصوف در بخش ۲-۳-۲-۴ هم استفاده کرد.

۲-۲-۴- طراحی کنترل کننده پیش‌بین غیرمتمرکز

در کنترل سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین مقیاس بزرگ، از جهات زیادی مثل بار محاسباتی زیاد و پیچیدگی محاسباتی بکارگیری کنترل‌کننده‌های متمرکز، مشکلات تعمیر و نگهداری آن‌ها به علت ابعاد بالا و یک ریسک بالا از خطا به علت طبیعت متمرکز آن‌ها غالباً ضروری است که نظریه‌های کنترلی غیرمتمرکز یا توزیع شده باشند،

بدین معنی که ورودی‌های کنترل محلی با استفاده از اندازه‌گیری‌های محلی و مدل‌های مرتبه کاهش یافته از دینامیک‌های محلی محاسبه می‌شوند. امتیاز اصلی این کار این است که بار محاسباتی می‌تواند کاهش یابد و هر کنترل‌کننده می‌تواند با دیگر کنترل‌کننده‌ها برای حاصل شدن یک حل خوب، مرتبط شده و همکاری کند، چرا که برای سیستم‌های مقیاس بزرگ با کنترل پیش‌بین متمرکز، محاسبه آنلاین ورودی ابعاد بالا بسیار پیچیده و نامناسب، غیرعملی و غیرانعطاف‌پذیر به نظر می‌رسد. همچنین در صورت نیاز به تخمین حالت‌ها، تخمین‌های محلی غیرمتمرکز ساده‌تر و دقیق‌تر هستند. از آنجا که مدل‌سازی توصیف شده با روابط (۴-۱) تا (۴-۳) ذاتاً غیرمتمرکز و محلی است، در نتیجه برهم‌کنش کامل میان رده‌های همسایه خود به خود در نظر گرفته می‌شود. تابعی معیار کلی (۴-۶) برای یک پیاده‌سازی غیرمتمرکز با تبدیل به سه MPC محلی برای سه رده انبار و توزیع و خرده‌فروش بصورت زیر در می‌آید

$$J_w = \sum_{k \in W} \left(\sum_{j=1}^p \sum_{i \in DP} \{w_{y,i,k} (y_{i,k}(t+j) - y_{s,i,k})^2\} \right. \\ \left. + \sum_{j=0}^{c-1} \sum_{i \in DP} \{w_{x,i,k',k} (x_{i,k'}(t+j))^2\} \right. \\ \left. + \sum_{j=0}^{c-1} \sum_{i \in DP} \{w_{\Delta x,i,k',k} (x_{i,k'}(t+j) - x_{i,k'}(t+j-1))^2\} \right) \quad (30-4)$$

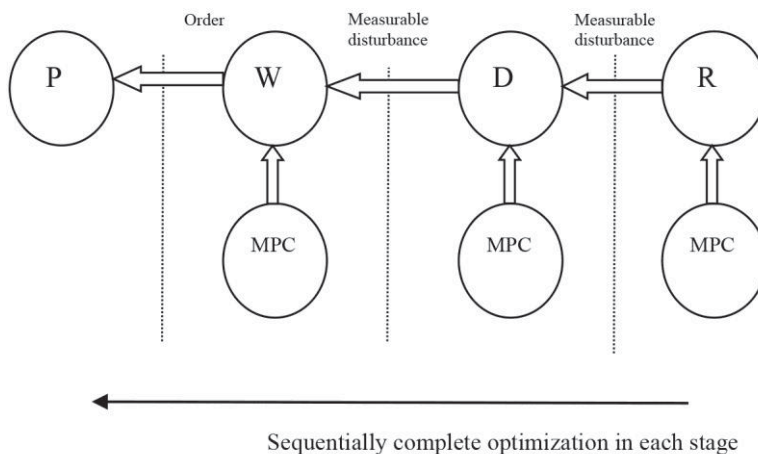
$$J_D = \sum_{k \in D} \left(\sum_{j=1}^p \sum_{i \in DP} \{w_{y,i,k} (y_{i,k}(t+j) - y_{s,i,k})^2\} \right. \\ \left. + \sum_{j=0}^{c-1} \sum_{i \in DP} \{w_{x,i,k',k} (x_{i,k'}(t+j))^2\} \right. \\ \left. + \sum_{j=0}^{c-1} \sum_{i \in DP} \{w_{\Delta x,i,k',k} (x_{i,k'}(t+j) - x_{i,k'}(t+j-1))^2\} \right) \quad (31-4)$$

$$J_R = \sum_{k \in R} \left(\sum_{j=1}^p \sum_{i \in DP} \{w_{y,i,k} (y_{i,k}(t+j) - y_{s,i,k})^2\} \right. \\ \left. + \sum_{j=0}^{c-1} \sum_{i \in DP} \{w_{x,i,k',k} (x_{i,k'}(t+j))^2\} \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^p \sum_{i \in DP} \{w_{BO,i,k} (BO_{i,k}(t+j))^2\} \right. \\ \left. + \sum_{j=0}^{c-1} \sum_{i \in DP} \{w_{\Delta x,i,k',k} (x_{i,k'}(t+j) - x_{i,k'}(t+j-1))^2\} \right) \quad (32-4)$$

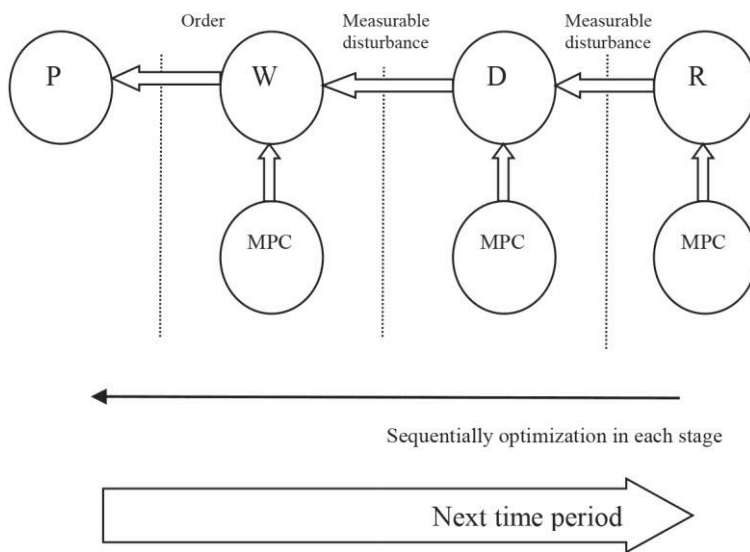
که رابطه (۳۰-۴) با رابطه (۱-۵) و رابطه (۳۱-۴) با رابطه (۱-۵) و رابطه (۳۲-۴) با رابطه‌های (۲-۴) و (۳-۴) به کار می‌روند.

در سیستم‌های کنترل غیر متمرکز غالباً طراحی روش‌های هماهنگ‌کننده کنترل‌کننده‌ها ضروری است تا درجه‌ای از هماهنگی بین زیرسیستم‌های کنترلی برای دستیابی به یک همگرایی در مقدار متغیرهای مشترک فراهم شود. در اینجا به جای طراحی روش‌های هماهنگ‌کننده، فرض می‌شود که کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرمتمرکز محلی به صورت سری و ناهمزمان از رده بالادستی به رده پایین‌دستی و با سرعت بالایی کار می‌کنند.

در این فصل، دو نوع سیستم کنترلی غیرمتمرکز برای بکارگیری با سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین مقیاس بزرگ در نظر گرفته می‌شود. بدین صورت که در نوع اول مطابق شکل (۵-۴) در ابتدا کنترل‌کننده پیش‌بین برای تمام افق پیش‌بینی و کنترل و برای تمام زمان‌های نمونه‌برداری در رده خرده‌فروش نسبت به اغتشاش‌های ورودی تقاضای مشتری در دوره زمانی در نظر گرفته شده، حل می‌شود. سپس کل دنباله‌های کنترلی حاصله‌ی مربوط به گره‌های خرده‌فروش به عنوان اغتشاش‌های ورودی به رده بالادستی (رده توزیع) داده می‌شود. کنترل‌کننده رده توزیع نیز دنباله‌های کنترلی حاصل از خود را به رده انبار می‌دهد. کنترل‌کننده پیش‌بین رده توزیع نیز بر اساس اغتشاش‌های ورودی خود یعنی دنباله‌های کنترلی رده پایین‌دستی خود حل می‌شود. در نوع دوم بر عکس نوع اول یک چرخه تکرار در حل برقرار است. در این روش مطابق شکل (۶-۴) در اولین زمان نمونه‌برداری، کنترل‌کننده پیش‌بین گره‌های (رده) خرده‌فروش حل می‌شود و سپس اولین درایه‌های کنترل آن به عنوان اغتشاش‌های اندازه‌گیری شده به رده توزیع فرستاده می‌شوند. سپس کنترل‌کننده پیش‌بین رده خرده‌فروش حل می‌شود و سپس اولین درایه‌های کنترل آن به عنوان اغتشاش‌های اندازه‌گیری شده به رده مخزن (انبار) فرستاده می‌شوند، و در زمان‌های نمونه‌برداری بعدی، این روند تکرار می‌شود.



شکل (۴-۵) کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز نوع ۱



شکل (۴-۶) کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز نوع ۲

۴-۲-۵- کنترل دولایه‌ای موجودی

نظربه اینکه حفظ موجودی کالا در سطوح هدف عموماً اهمیت کمتری نسبت به کیفیت سرویس دارد، یک لایه کنترلی ثانویه مطرح می‌شود. تنظیم سریع سطح موجودی از طریق کنترل‌کننده‌های فیدبک ساده حاصل می‌شود که یک کنترل‌کننده فیدبک، موجودی هر محصول در هر گره ذخیره را حفظ می‌کند. یک قانون کنترل فیدبک عمومی برای موجودی محصول i ام در k امین گره بصورت زیر تولید می‌شود.

$$\lambda_{i,k}(t) = \sum_{m=0}^{\alpha} a_{i,k,m} y_{i,k}(t-m) + \sum_{n=1}^{\beta} b_{i,k,m} \lambda_{i,k}(t-n) + c \quad (33-4)$$

و به عنوان قید تساوی با تابع یا توابع محلی هزینه همراه با نقاط تنظیم موجودی برابر با صفر (چون وظیفه تنظیم موجودی به کنترل (۳۳-۵) محول و به عنوان قید تساوی وارد مسئله می‌شود. قانون کنترل به عنوان یک جمع وزنی از λ کنترل شده گذشته (همچون سطوح موجودی) و متغیر جمعی دستکاری‌شونده λ گذشته بیان می‌شود که به صورت

$$\lambda_{i,k}(t) = \sum_{k'} x_{i,k',k}(t-L_{k',k}) \quad k, k' \in \{W, D, R\}, i \in DP \quad (34-4)$$

می‌باشد. بازنویسی رابطه (۳۳-۴) بصورت کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالگیر (PI) گسسته، معادله زیر می‌شود.

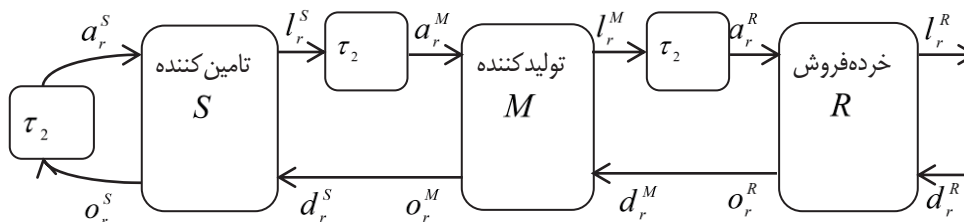
$$\begin{aligned} \lambda_{i,k}(t) = & \lambda_{i,k}(t-1) - K_c \left(1 + \frac{\Delta t}{\tau_I} + \frac{\tau_D}{\Delta t}\right) y_{i,k}(t) + \\ & K_c \left(1 + 2\frac{\tau_D}{\Delta t}\right) y_{i,k}(t-1) \\ & - K_c \left(\frac{\tau_D}{\Delta t}\right) y_{i,k}(t-2) + \frac{\Delta t}{\tau_I} y_{s,i,k} \end{aligned} \quad (35-4)$$

که K_c بهره تناسبی کنترل‌کننده، τ_I زمان بخش انتگرال، τ_D زمان بخش مشتق و Δt

مدت کنترلی گسسته است که مساوی دوره زمانی تصمیم گسسته شبکه است. کنترل‌کننده‌های موجودی باید برای دنبال کردن نقطه تنظیم بسته همانند پاسخ سریع به یک سطح نقطه تنظیم اعمالی جدید) و حذف اغتشاش خوب همانند تحمل کردن انحراف کوچک از نقطه تنظیم) تنظیم شوند. به هر حال تاخیرهای انتقال بزرگ و تغییر تقاضای غیرساکن، فاکتورهای کلیدی هستند که ممکن است بطور قابل توجهی عملکرد دینامیکی کنترل‌کننده‌های PID را خراب کنند. از اینرو تنظیم کنترلی دقیق برای دوری از ناپایداری یا عملکرد دینامیکی ضعیف ضروری است.

۴-۳- سیستم مدیریت زنجیره تامین همراه با در نظر گرفتن چرخه‌های اطلاعاتی

در مدل‌های پیشرفته‌تر سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین همچون مدل دینامیکی مبتنی بر نظریه بازی آشامیدنی مابین تمامی اعضای متوالی زنجیره تامین، هر دو جریان مواد و جریان اطلاعات وجود دارند و یک نوع وابستگی میان متغیرهای دینامیکی هر دو رده متوالی به وجود می‌آید. در اینجا مسئله مدیریت زنجیره تامین با استفاده از مدل بازی آشامیدنی که در [۴۶] ارائه شده است، به صورت یک زنجیره تامین سه رده‌ای شامل بخش‌های تامین (مواد اولیه)، تولید (کارخانه) و خرده‌فروش مدل می‌شود. طرح گرافیکی این مدل در شکل زیر دیده می‌شود.



شکل (۷-۴) طرح گرافیکی یک زنجیره تامین نمونه‌ی سه رده‌ای دارای چرخه‌های اطلاعاتی

در این مدل، در ابتدا برای آسانی محاسبات یک زنجیره تامین سه رده‌ای شامل یک گره تامین و یک گره تولید و یک گره خرده‌فروش در نظر گرفته می‌شوند. در

حقیقت نسبت به مدل زنجیره تامین بدون چرخه‌های اطلاعاتی، گره‌های انبار و توزیع و خرده‌فروش به صورت واحد در نظر گرفته شده و گره تامین‌کننده هم قبل از تولید لحاظ شده است. اما طبیعتاً نتیجه این روش به سیستم‌های دارای رده‌های انبار و توزیع مجزا و دارای گره‌های متعدد در هر رده، قابل تعمیم است.

به عنوان نمونه‌ای از سیستم زنجیره تامین نشان داده شده در شکل (۴-۷) می‌توان بازی آشامیدنی MIT کلاسیک را نام برد. در این نمونه تامین‌کننده S به عنوان تامین‌کننده بطری برای کارخانه M است که آبجو می‌سازد و در بطری می‌ریزد و سپس برای فروش به مشتری آن را به خرده‌فروش R انتقال می‌دهد. پیکان‌های مستقیم، جریان اطلاعات (سفارش‌ها) و پیکان‌های تاخیردار شده، جریان مواد (انتقال کالاها) هستند. یک استثنا در انتهای سمت چپ 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 مدل می‌شود. بنابراین زنجیره تامین به وسیله تقاضای مشتری یعنی تعداد دستگاه‌ها و کالاهای فروخته شده در روز تحریک می‌شود و سپس یک سری جریان‌های اطلاعات و کالا در سیستم به راه می‌افتند. فرض می‌شود که جریان‌های اطلاعات تاخیر زمانی ندارند (یا چشم‌پوشی می‌شود) و به شکل سه پیکان به سمت چپ در شکل بالا دیده می‌شوند. جریان‌های مواد دارای تاخیر انتقال هستند که با بلوک τ_2 به عنوان مقدار تاخیر در روز برای انتقال ثابت بیان می‌شود. در تامین‌کننده S جریان اطلاعات خارج‌شونده یعنی o_r^s به ساخت کالا تبدیل می‌شود و این فرآیند تبدیل با تاخیر ساده‌ای مدل می‌شود. گره M برای S یک گره پایین دستی و برای R یک گره بالادستی است.

همان‌گونه که ذکر شد یک متغیر مهم در زنجیره تامین موجودی در هر رده است و یک هدف مهم در مدیریت و کنترل زنجیره تامین برآوردن سریع تقاضای مشتری در عین نگهداشتن سطح موجودی در هر رده در پایین‌ترین حد ممکن است. برای نمونه گره M باید به یک تقاضای آمده از گره R به واسطه موجودی جاری‌اش و سفارش دادن کالاها (یک جریان اطلاعاتی) به واسطه گره S پاسخ دهد. تامین‌کننده تلاش

می‌کند تا سفارش تولیدکننده‌ها را به وسیله موجودی خود یا ساخت کالا برآورده کند و کالاها (یک جریان کالا) را بعد از یک تاخیر که به روش انتقال بستگی دارد به کارخانه منتقل نماید. در این نوع مدل نیز مانند بخش ۴-۲ از روش حل مسئله بهینه‌سازی کنترل‌کننده پیش‌بین موصوف در بخش ۴-۲-۳ استفاده می‌شود.

۴-۳-۱- مدل دینامیکی

با اینکه زنجیره تامین به صورت ذاتی یک سیستم زمان گسسته است، در اینجا از یک مدل زمان پیوسته برای مدل‌کردن زنجیره تامین استفاده می‌شود و سپس این مدل برای بکارگیری با کنترل‌کننده پیش‌بین با زمان نمونه‌برداری گسسته می‌شود [۴۶]. در این مدل طبق شکل (۴-۶)، اگر $x \in \{S, M, R\}$ باشد، a_r^x نماینده نرخ اکتساب رده x ، تعداد کالاهایی که در روز از رده بالادستی کسب می‌شوند و o_r^x نرخ سفارش رده x ، تعداد کالاهایی که در روز به رده بالادستی سفارش داده می‌شوند و l_r^x نرخ انتقال رده x ، تعداد کالاهایی که در روز به رده پایین دستی انتقال داده می‌شوند و d_r^x نرخ انتقال 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 $t \geq 0$ و $x \in \{S, M, R\}$ به صورت معادلات حالت رابطه (۴-۳۶) و قیدهای حالت رابطه (۴-۳۷) و با در نظر گرفتن رابطه نرخ انتقال (۴-۳۸) بیان می‌شوند

$$\begin{cases} \dot{s}^x(t) = a_r^x(t) - l_r^x(t) \\ \dot{o}_u^x(t) = o_r^x(t) - a_r^x(t) \\ \dot{b}^x(t) = d_r^x(t) - l_r^x(t) \end{cases} \quad (۴-۳۶)$$

$$0 \leq (s^x(t), o_u^x(t), b^x(t)) \leq s_{\max}^x \quad (۴-۳۷)$$

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

$$l_r^x(t) = d_r^x(t - \tau_1) + \frac{b^x(t)}{t_b} \quad (۴-۳۸)$$

که در آن $s^x(t)$ و $o_{ii}^x(t)$ و $b^x(t)$ متغیرهای حالت این سیستم هستند. $s^x(t)$ سفارش‌های انباشته شده موجودی رده x ، بیانگر تعداد کالاهای به طور جاری موجود در رده x برای انتقال به رده پایین دستی می‌باشد. سفارش‌های انجام نشده $o_{ii}^x(t)$ ، بیانگر تعداد کالاهایی است که رده x همچنان از رده بالادستی دریافت می‌کند. همچنین $b^x(t)$ سفارش‌های انباشته شده از دوره‌های زمانی قبل، بیانگر تعداد کالاهایی است که رده x همچنان به رده پایین دستی انتقال می‌دهد. در این مدل دینامیک‌های زنجیره تامین از نرخ‌هایی از انباشتگی و یکی از دو نوع تاخیر جریان کالا ناشی می‌شوند. به عنوان نمونه، نرخ تغییر زمانی (نرخ انباشتگی) موجودی کالا یعنی s^x ، به صورت اختلاف میان نرخ اکتساب و نرخ انتقال بیان می‌شود. دو متغیر انباشتگی دیگر هم $\dot{o}_{ii}^x(t)$ و $\dot{b}^x(t)$ هستند. s_{\max}^x نیز یک مجموعه سه عضوی ثابت حداکثر برای متغیرهای حالت در رده x و $o_{r\max}^x$ مقدار حداکثر برای نرخ سفارش در رده x می‌باشد. به عبارتی رابطه (۴-۳۷) اذعان بر این دارد که موجودی، سفارش انجام نشده و سفارش انباشته شده در هر رده به صورت مستقل از پایین به صفر و از بالا به یک مقدار ثابت محدود می‌شوند.

در این سیستم زنجیره تامین دو نوع تاخیر در جریان کالا وجود دارد. نوع اول تاخیر به عنوان تاخیر خط لوله‌ای^۱ است که جریان خارج شده از هر بلوک (به جز خرده فروش) به یک بلوک شامل این تاخیر زمانی وارد می‌شود. برای نمونه α_r^x در هر رده، برابر با نرخ انتقال l_r^x از رده قبلی با یک تاخیر زمانی خالص است که برای انتقال کالا از رده منبع به رده مقصد سپری می‌شود. نوع دوم تاخیر که به تاخیر مواد مرتبه اول معروف است، یک زمان تاخیر یا جریان متوسط مرتبط با جریان خروجی از یک رده‌ی دارای مواد (کالا) ذخیره (انباشته) شده است و برابر با کالای انباشته شده (تعداد دستگاه‌ها یا واحدها) تقسیم بر زمان جریان متوسط می‌باشد. در معادله نرخ انتقال (۴-۳۸) هر دو نوع تاخیر به کارگرفته می‌شوند. در این معادله، سفارش‌ها بر مبنای ارضای تقاضای مشتری به علاوه تسویه سفارش‌های انباشته شده انجام می‌شوند. همچنین 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 (۳۸-۴) در (۳۶-۴) دیده می‌شود که متغیر حالت $b^x(t)$ کنترل‌ناپذیر است، اما اگر نرخ تقاضا به یک مقدار ماندگار همگرا شود $b^x(t)$ به صفر همگرا خواهد شد. پس $b^x(t)$ پایدارپذیر است و می‌توان این سیستم را کنترل کرد. بنابراین برای هر سه رده $s^x(t)$ و $o_u^x(t)$ در مسئله بهینه‌سازی وارد می‌شوند. اما از سوی دیگر چون $b^x(t)$ کنترل‌ناپذیر است، در مسئله بهینه‌سازی وارد نمی‌شود و باید در هر رده با استفاده از مدل خود، ورودی‌های خارجی مقتضی و محدودیت‌های تعریف‌شده به صورت محلی محاسبه شود.

هدف مدیریت زنجیره تامین در اینجا، کم کردن هزینه‌های کلی شامل دوری کردن از سفارش‌های برگشتی (نگهداشتن نزدیک صفر) و نگهداشتن سفارش‌های انجام نشده و سطح موجودی کالا نزدیک سطح‌های مطلوب (معمولاً پایین) می‌باشد. هدف کنترل برای هر رده میل کردن $s^x(t)$ به موجودی مطلوب ثابت s_d^x و همگرا شدن $o_u^x(t)$ به سفارش اجرا نشده مطلوب $o_{ud}^x(t)$ می‌باشد که $o_{ud}^x(t) = \tau_2 \cdot d_{rss}$ (تقاضای حالت ماندگار است) است. بین گره‌های این سیستم مدیریت زنجیره تامین رابطه‌های زیر برقرار است.

$$S : a_r^s(t) = o_r^s(t - \tau_2), d_r^s(t) = o_r^M(t) \quad (۳۹-۴)$$

$$M : a_r^M(t) = l_r^s(t - \tau_2), d_r^M(t) = o_r^R(t) \quad (۴۰-۴)$$

$$R : a_r^R(t) = l_r^M(t - \tau_2) \quad (۴۱-۴)$$

در نهایت با جانشانی این معادلات در دسته معادلات (۳۶-۴) و رابطه (۳۸-۴)، سه مدل دینامیکی زمان پیوسته جداگانه برای هر سه رده مذکور به وجود خواهد آمد

$$\begin{cases} \dot{s}^S(t) = o_r^S(t - \tau_2) - o_r^M(t - \tau_1) - \frac{b^S(t)}{t_b} \\ \dot{o}_u^S(t) = o_r^S(t) - o_r^S(t - \tau_2) \\ \dot{b}^S(t) = o_r^M(t - \tau_2) - o_r^M(t - \tau_1) - \frac{b^S(t)}{t_b} \end{cases} \quad (42-4)$$

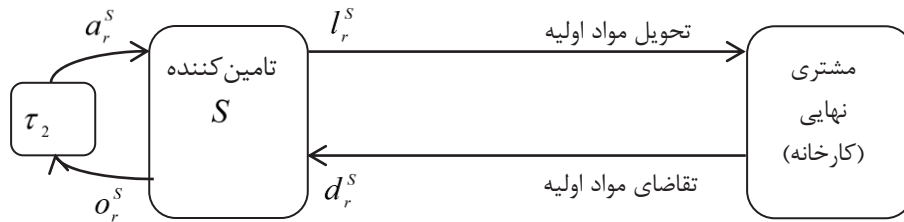
$$\begin{cases} \dot{s}^M(t) = o_r^M(t - \tau_1 - \tau_2) - o_r^R(t - \tau_1) + \frac{b^S(t - \tau_2)}{t_b} - \frac{b^M(t)}{t_b} \\ \dot{o}_u^M(t) = o_r^M(t) - o_r^M(t - \tau_1 - \tau_2) - \frac{b^S(t - \tau_2)}{t_b} \\ \dot{b}^M(t) = o_r^R(t) - o_r^R(t - \tau_1) - \frac{b^M(t)}{t_b} \end{cases} \quad (43-4)$$

$$\begin{cases} \dot{s}^R(t) = o_r^R(t - \tau_1 - \tau_2) - d_r^R(t - \tau_1) + \frac{b^M(t - \tau_2)}{t_b} - \frac{b^R(t)}{t_b} \\ \dot{o}_u^R(t) = o_r^R(t) - o_r^R(t - \tau_1 - \tau_2) - \frac{b^M(t - \tau_2)}{t_b} \\ \dot{b}^R(t) = d_r^R(t) - d_r^R(t - \tau_1) - \frac{b^R(t)}{t_b} \end{cases} \quad (44-4)$$

که در این معادلات به ازای $x \in \{S, M, R\}$ ، ۹ متغیر حالت $s^x(t)$ و $o_u^x(t)$ و $b^x(t)$ ، سه متغیر تصمیم (کنترل) $o_r^x(t)$ و یک ورودی اغتشاش اندازه‌گیری شده $d_r^R(t)$ در نظر گرفته می‌شوند. بر اساس این معادلات دیده می‌شود که دو چرخه اطلاعاتی بین رده‌ها وجود دارد. در چرخه ۱ مدل (۴۲-۴) برای S به $o_r^M(t)$ از M و مدل (۴۳-۴) برای M به $b^S(t)$ از S نیاز دارند. در چرخه ۲ نیز مدل (۴۳-۴) برای M به $o_r^R(t)$ از R و مدل (۴۴-۴) برای R به $b^M(t)$ از M نیاز دارند.

۴-۳-۲- طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین متمرکز

در اینجا نیز همانند طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین برای سیستم مدیریت زنجیره تامین بدون چرخه‌های اطلاعاتی در بخش ۴-۲، ابتدا طراحی متمرکز و سپس طراحی غیرمتمرکز کنترل‌کننده پیش‌بین برای سیستم مدیریت زنجیره تامین با چرخه‌های اطلاعاتی انجام می‌شود. برای نمونه در جهت پیاده‌سازی کنترل‌کننده پیش‌بین تنها بر روی یک زنجیره تامین تک رده‌ای شامل یک گره تامین‌کننده مطابق شکل (۴-۸)، معادلات دینامیکی این رده به صورت رابطه (۴-۴۵) بازنویسی شده، با زمان نمونه‌برداری گسسته شده و تابعی معیار مقید نیز به صورت رابطه (۴-۴۶) در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۴-۸) زنجیره تامین تک رده‌ای دارای چرخه اطلاعاتی

$$\begin{cases} \dot{s}^S(t) = o_r^S(t - \tau_2) - d_r^S(t - \tau_1) - \frac{b^S(t)}{t_b} \\ o_u^S(t) = o_r^S(t) - o_r^S(t - \tau_2) \\ \dot{b}^S(t) = d_r^S(t - \tau_2) - d_r^S(t - \tau_1) - \frac{b^S(t)}{t_b} \end{cases} \quad (4-45)$$

$$J_S =$$

$$\sum_{j=1}^p (W_s [s^S(t_{k+j}) - s_d^S]^2 + W_{ou} [o_u^S(t_{k+j}) - o_{ud}^S]^2) + \sum_{j=0}^{c-1} (W_u [o_r^S(t_{k+j})]^2 + W_{\delta u} [o_r^S(t_{k+j}) - o_r^S(t_{k+j-1})]^2) \quad (4-46)$$

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

در این معادلات مقادیر $t_k = k \cdot \delta$ به عنوان نمونه‌های زمان گسسته هستند و δ به عنوان زمان نمونه‌برداری و $k \in N = \{1, 2, \dots\}$ است. همچنین سه متغیر حالت $s^s(t_k)$ و $o_u^s(t_k)$ و $b^s(t_k)$ ، یک متغیر کنترل $o_r^s(t_k)$ و یک ورودی اغتشاش اندازه‌گیری شده $d_r^s(t_k)$ در نظر گرفته می‌شوند. p افق پیش‌بینی و c افق کنترل است. فاکتورهای وزنی ثابت نامنفی W_s مربوط به هزینه‌های ذخیره موجودی کالا و وسایل موجودی کالا W_{ou} مربوط به هزینه‌های سفارش‌های برآورده نشده و W_u مربوط به هزینه‌های کنترل و سفارش دادن هستند. 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 از یک بخش توقیف حرکت در این تابعی معیار با فاکتور وزنی $W_{\delta u}$ استفاده می‌شود. همچنین s_d^s سطح موجودی مطلوب ثابت و o_{ud}^s سفارش اجرائده مطلوب در رده S می‌باشند. همان‌طور که دیده می‌شود، چون $b^s(t_k)$ کنترل‌ناپذیر است، در مسئله بهینه‌سازی وارد نمی‌شود.

اما در صورتی که زنجیره تامین کامل سه رده‌ای شکل (۴-۶) در نظر گرفته شود، تابعی معیار زیر برای کنترل متمرکز پیش‌بین مدل دینامیکی توصیف شده با رابطه‌های (۴-۲) تا (۴-۴) و با توجه به محدودیت‌های حالت و کنترل رابطه (۴-۳۷) در نظر گرفته می‌شود

$$J_{total} = \sum_{x \in \{S, M, R\}} \left(\sum_{j=1}^p (W_s^x [s^x(t_{k+j}) - s_d^x]^2 + W_{ou}^x [o_u^x(t_{k+j}) - o_{ud}^x]^2) + \sum_{j=0}^{c-1} (W_u^x [o_r^x(t_{k+j})]^2 + W_{\delta u}^x [o_r^x(t_{k+j}) - o_r^x(t_{k+j-1})]^2) \right) \quad (47-4)$$

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

در اینجا نیز t_k به عنوان نمونه‌های زمان گسسته، فاکتورهای وزنی ثابت نامنفی

W_s^x مربوط به هزینه‌های ذخیره موجودی کالا و وسایل موجودی کالا W_{ou}^x مربوط به هزینه‌های سفارش‌های برآورده نشده و W_u^x مربوط به هزینه‌های کنترل و سفارش دادن، و W_{di}^x مربوط به هزینه‌های بخش توقیف حرکت استفاده در رده x هستند. همچنین S_d^x سطح موجودی مطلوب ثابت و O_{ud}^x سفارش اجرا نشده مطلوب در رده x می‌باشند. همچنین چون متغیرهای $b^x(t_k)$ کنترل‌ناپذیرند، در مسئله بهینه‌سازی وارد نمی‌شوند.

۴-۳-۳- طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین غیرمتمرکز

اگر سیستم مدیریت زنجیره تامین مقیاس بزرگ مدنظر باشد، با توجه به دلایلی که در بخش‌های قبل ذکر شد، غالباً استفاده از روش‌های کنترل غیرمتمرکز ضروری است. چرخه‌های اطلاعاتی، پیاده‌سازی کنترل‌کننده پیش‌بین غیرمتمرکز را پیچیده‌تر می‌کند چراکه در هر به روز رسانی، MPC رده‌های جفت شده در هر چرخه باید پیش‌بینی‌هایی را برای ورودی/حالت دیگری فرض کنند. درکل چنین پیش‌بینی‌هایی با پیش‌بینی‌های محاسبه شده‌ی محلی واقعی برای این ورودی‌ها/حالت‌ها متفاوت هستند. همانند روش موصوف در بخش ۴-۲ در صورتی که چرخه اطلاعاتی وجود نداشته باشد، کار آسان است و رده‌ها می‌توانند به صورت متوالی از رده پایین‌دستی به رده بالادستی به روز شوند و پیش‌بینی‌های واقعی در هر به روزرسانی از رده‌های پایین‌دستی به رده‌های بالادستی منتقل شوند. بنابراین MPC، اولین بخش از این پیش‌بینی‌های واقعی به وسیله هر رده پیاده‌سازی می‌شوند. ازاینرو نبود چرخه‌ها دلالت دارد بر توانایی رده‌ها در انتقال خط‌مشی‌هایی که قرار است پیاده شوند. هنگامی که چرخه‌های اطلاعاتی برقرار باشند، پیش‌بینی‌های متقابل در دسترس نیستند. ازاینرو برخی پیش‌بینی‌ها باید فرض شوند. این موجب یک اختلاف اجتناب‌ناپذیر میان آنچه که یک رده می‌خواهد انجام دهد و آنچه که رده‌های مرتبط (جفت شده) با آن فرض می‌کنند می‌خواهد انجام دهد، می‌شود. این اختلاف را باید با استفاده از روش‌هایی به کمترین حد ممکن رساند.

اگر از روش طراحی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرمتمرکز محلی استفاده شود، غالباً

نیاز به طراحی روش‌های هماهنگ‌کننده این زیرسیستم‌های محلی نیز می‌باشد. بدین معنی که در کنترل‌کننده‌های توزیع‌شده درجه‌ای از هماهنگی می‌بایست بین زیرسیستم‌های کنترلی برای دستیابی به یک همگرایی در مقدار متغیرهای مشترک فراهم شود. در این راستا می‌توان یک روش هماهنگی را که در آن زیر سیستم‌ها در حین حل مسئله بهینه‌سازی‌شان تبادل اطلاعات می‌کنند استفاده کرد. در این روش مسئله‌های بهینه‌سازی محلی باید بطور سریع و تکراری همراه با تبادل اطلاعات، در هر زمان نمونه برداری حل شوند تا یک همگرایی کلی در حل مسئله بهینه‌سازی حاصل شود. در یک وضعیت دیگر که در آن ظرفیت شبکه برای این ارتباطات کافی نیست، زیرسیستم‌ها نمی‌توانند دائماً تبادل اطلاعات کنند و کنترل‌کننده‌های محلی تنها یک بار پس از حل هر مسئله بهینه‌سازی در ساختار آنلاین پیش‌بین، می‌توانند تبادل اطلاعات کنند که برای این وضعیت نیز از روش‌هایی همچون، روشی که در آن کنترل‌کننده‌های پیش‌بین محلی از پیش‌بینی‌های کنترل‌کننده‌های همسایه در مرحله گذشته برای تخمین زدن اثرپذیری از زیر سیستم‌های همسایه استفاده می‌کنند، می‌توان بهره برد.

در روش به کارگرفته‌شده در اینجا، فرض بر این است که ظرفیت شبکه برای تبادل اطلاعات کافی نبوده و اطلاعات پس از هر زمان نمونه‌برداری بین رده‌های مجاور مبادله می‌شود. رده‌های جفت‌شده، پیش‌بینی‌های محاسبه‌شده قبلی را در هر به روزرسانی از یکدیگر دریافت می‌کنند و به این پیش‌بینی‌ها به عنوان پیش‌بینی‌های فرض شده در هر به روزرسانی تکیه می‌کنند. برای محدود کردن اختلاف میان پیش‌بینی‌های فرض شده و واقعی، یک جریمه محلی روی انحراف میان پیش‌بینی‌های جاری و پیش‌بینی‌های قبلی تحت عنوان بخش توقیف حرکت در نظر گرفته می‌شود. در این روش زیرسیستم‌ها LTI بوده و به صورت دینامیکی جفت‌شده هستند اما ارتباط میان رده‌ها تنها از طریق ورودی‌های کنترلی است. از آنجا که مدل زمان پیوسته استفاده شده با این روش ذاتاً غیرمتمرکز و محلی است، در نتیجه برهم‌کنش کامل میان رده‌های همسایه در حل مسئله بهینه‌سازی تابعی معیار کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز خود به خود در نظر گرفته می‌شود. اثبات همگرایی پیاده‌سازی، مستلزم اعمال جریمه توقیف حرکت

است که به جای اعمال به صورت یک قید به عنوان بخش توقیف حرکت به تابعی معیار اضافه شده است. مشخص است که بکارگیری MPC همراه با بخش توقیف حرکت، حساسیت کنترل‌کننده را به اختلافات پیش‌بینی کم می‌کند. اما به هر حال به سبب آن عملکرد مسیریابی نقطه تنظیم کاهش پیدا می‌کند. با این حساسیت کاهش یافته می‌توان اختلاف میان پیش‌بینی‌های واقعی و فرض شده را برای مسئله MPC سیستم‌های غیرمتمرکز تحت چرخه‌های اطلاعاتی دربرگیرنده‌ی زیرسیستم‌ها کاهش داد.

در روش کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز برای سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی موصوف با روابط مدل زمان پیوسته $(\epsilon-2)$ تا $(\epsilon-4)$ و محدودیت‌های حالت و کنترل رابطه $(\epsilon-37)$ ، ابتدا این مدل با استفاده از نمونه‌های زمان گسسته t_k به مدل زمان گسسته تبدیل شود. بر اساس این روش در هر زمان نمونه‌برداری، هر رده مسئله بهینه‌سازی محلی خود را با توجه به اغتشاش‌های ورودی محلی و محدودیت‌های تعریف شده محلی محاسبه می‌کند و دنباله کنترلی بهینه محلی خود را بر مبنای یک روش هماهنگی مناسب، در جهت همگرایی مقادیر مشترک کنترلی با رده‌های همسایه (رده‌های جفت‌شده با خود) به اشتراک می‌گذارد. بنابراین برای زمان به روزرسانی t_k ، موجودی پیش‌بینی شده واقعی به صورت محلی تعریف شده در لحظه‌های $\{t_k, t_{k+1}, \dots, t_{k+p}\}$ به صورت $\{s^x(t_k : t_k), s^x(t_{k+1} : t_k), \dots, s^x(t_{k+p} : t_k)\}$ نوشته می‌شود و متغیرهای دیگر هم به همین صورت نوشته می‌شوند. موجودی واقعی در هر زمان t_k با $s^x(t_k)$ و در نتیجه $s^x(t_k) = s^x(t_k : t_k)$ داده می‌شود. این رویه برای متغیرهای دیگر هم برقرار است.

برای هر زیرمدل در مسئله MPC در اینجا دو متغیر حالت s^x و O_u^x ، یک متغیر کنترل O_r^x و یک مجموعه از دیگر ورودی‌های قابل اندازه‌گیری وابسته به هر رده وجود دارد. این مجموعه از ورودی‌های قابل اندازه‌گیری به عنوان اغتشاش‌های اندازه‌گیری شده (MD) در نظر گرفته می‌شوند. در این روش کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز، مقادیر

MD پیش‌بینی‌های فرض شده‌ی مسئله هستند. مجموعه مقادیر MD برای هر رده $D^x(t_k)$ ، $x \in \{S, M, R\}$ می‌باشد (مرتبط با هر زمان به روزرسانی t_k). مقادیر MD برای سه رده مذکور بدین صورت هستند

$$D^S(t_k) = \{b_{as}^S(k), o_{nas}^M(k)\} \quad (۴۸-۴)$$

$$D^M(t_k) = \{b_{as}^M(k), b_{as}^S(k), o_{nas}^R(k)\} \quad (۴۹-۴)$$

$$D^R(t_k) = \{b_{as}^R(k), b_{as}^M(k), d_r^R(k)\} \quad (۵۰-۴)$$

$$b_{as}^x(t_k) = \{b_{as}^x(t_k : t_k), \dots, b_{as}^x(t_{k+p} : t_k)\} \text{ و } o_{nas}^x(t_k) = \{o_{nas}^x(t_k : t_k), \dots, o_{nas}^x(t_{k+p} : t_k)\}$$

است.

اندیس as اشاره به این حقیقت دارد که به جز نرخ تقاضا در خرده‌فروش، همه‌ی مقادیر اغتشاش‌های اندازه‌گیری شده شامل پیش‌بینی‌های فرض شده برای هر یک از متغیرهای متناظر هستند. اگرچه سفارش انباشته شده رده به صورت محلی محاسبه می‌شود، هر مقدار سفارش انباشته شده رده تا زمانی که به پیش‌بینی نرخ تقاضای فرض شده منتج از رده پایین دستی متکی است، به عنوان MD در نظر گرفته می‌شود. نکته این‌که مقدار سفارش انباشته شده‌ی اولیه همیشه یک مقدار سفارش انباشته شده‌ی واقعی یعنی $b_{as}^x(t_k : t_k)$ برای هر رده x در هر به روزرسانی t_k است. مجموعه $X^x(t_k)$ نیز به حالت‌های مطلوب مربوط به رده x و زمان به روزرسانی t_k به صورت

$$X^x(t_k) = \{s_d^x, o_{ud}^x\} \quad (۵۱-۴)$$

برمی‌گردد که $o_{ud}^x = \tau_2 \cdot d_{rs}$ فرض می‌شود. با پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز، رده‌ها در هر زمان به روزرسانی t_k متغیر کنترل خود را به روز می‌کنند. در این روش، صورت مسئله با حل سه تابعی معیار محلی برای سه رده $x \in \{S, M, R\}$ در هر زمان

به روزرسانی t_k به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$J_S = \sum_{j=1}^p (W_s^S [s^S(t_{k+j} : t_k) - s_d^S]^2 + W_{ou}^S [o_u^S(t_{k+j} : t_k) - o_{ud}^S]^2) \quad (52-4)$$

$$+ \sum_{j=0}^{c-1} (W_u^S [o_r^S(t_{k+j} : t_k)]^2 + W_{\delta u}^S [o_r^S(t_{k+j} : t_k) - o_r^S(t_{k+j-1} : t_k)]^2)$$

$$J_M = \sum_{j=1}^p (W_s^M [s^M(t_{k+j} : t_k) - s_d^M]^2 + W_{ou}^M [o_u^M(t_{k+j} : t_k) - o_{ud}^M]^2) \quad (53-4)$$

$$+ \sum_{j=0}^{c-1} (W_u^M [o_r^M(t_{k+j} : t_k)]^2 + W_{\delta u}^M [o_r^M(t_{k+j} : t_k) - o_r^M(t_{k+j-1} : t_k)]^2)$$

$$J_R = \sum_{j=1}^p (W_s^R [s^R(t_{k+j} : t_k) - s_d^R]^2 + W_{ou}^R [o_u^R(t_{k+j} : t_k) - o_{ud}^R]^2) \quad (54-4)$$

$$+ \sum_{j=0}^{c-1} (W_u^R [o_r^R(t_{k+j} : t_k)]^2 + W_{\delta u}^R [o_r^R(t_{k+j} : t_k) - o_r^R(t_{k+j-1} : t_k)]^2)$$

در این مسئله مقادیر داده شده: حالت جاری $(s^x(t_k), o_u^x(t_k))$ ، اغتشاش‌های اندازه‌گیری شده $D^x(t_k)$ ، حالت‌های مطلوب $X^x(t_k)$ ، ثابت‌های وزنی نامنفی $(W_s^x, W_{ou}^x, W_u^x, W_{\delta u}^x)$ به ازای هر $x \in \{S, M, R\}$ هستند. هدف این مسئله پیدا کردن دنباله کنترلی بهینه

$$o_{ropt}^x(k) = \{o_{ropt}^x(t_k : t_k), o_{ropt}^x(t_{k+1} : t_k), \dots, o_{ropt}^x(t_{k+c-1} : t_k)\} \quad (55-4)$$

از روی بهینه‌سازی این سه تابعی معیار با توجه به نوع زمان گسسته مدل (۵-۴۲) تا (۵-۴۴) و محدودیت‌های رابطه (۵-۳۷) در هر زمان به روزرسانی t_k است. همچنین $o_r^x(t_{k-1} : t_k) = o_{ropt}^x(t_{k-1} : t_{k-1})$ می‌باشد. رویه حل کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز این مسئله نیز به صورت زیر بیان می‌شود.

رویه حل مسئله:

قانون MPC غیرمتمرکز برای هر رده $x \in \{S, M, R\}$ به صورت زیر حاصل

می‌شود:

- اطلاعات داده شده: حالت اولیه $(s^x(t_0), o_u^x(t_0), b^x(t_0))$ و پارامترهای δ و p و ثابت‌های وزنی $(W_S^x, W_{ou}^x, W_u^x, W_{\delta u}^x)$.

- در زمان اولیه $t_0 = 0$ ، $D^x(t_0)$ به صورت زیر تولید شود:

۱- یک نرخ سفارش نامی ثابت o_{mom}^x انتخاب و برای $j = 0, \dots, p$ ،

$o_{ras}^x(t_j : t_0) = o_{mom}^x$ قرار داده شود. اگر $x = R$ یا $x = M$ باشد آنگاه

باید $o_{ras}^x(0)$ به ترتیب به M یا S انتقال پیدا کند.

۲- $b_{as}^x(0)$ محاسبه شود و اگر $x = S$ یا $x = M$ باشد آنگاه باید به ترتیب

به M یا R انتقال پیدا کند.

۳- $X^x(t_0)$ محاسبه شود و هر سه تابعی معیار محلی مذکور برای به

دست آوردن $o_{ropt}^x(0)$ حل شوند.

- روند تکرار کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرمتمرکز:

۱- کنترل جاری $o_{ropt}^x(t_k : t_k)$ میان زمان‌های به روزسانی t_k و t_{k+1}

پیاده‌سازی شود.

۲- در هر زمان به روزسانی t_{k+1}

a. $(s^x(t_{k+1}), o_u^x(t_{k+1}), b^x(t_{k+1}))$ به دست آید.

b. در زمان t_{k+1} ، $D^x(t_{k+1})$ به صورت زیر تولید شود:

i. $o_{ras}^x(t_{j+k+1} : t_{k+1}) = o_{ropt}^x(t_{j+k+1} : t_k)$ برای مقادیر

$j = 0, \dots, c-2$ $o_{ras}^x(t_{j+k+1} : t_{k+1}) = o_{ropt}^x(t_{j+M-1} : t_k)$ برای

$j = c-1, \dots, p$ قرار داده شود. اگر $x = R$ یا $x = M$ باشد

آنگاه باید $o_{ras}^x(k+1)$ به ترتیب به M یا S انتقال پیدا کند.

ii. $b_{ds}^x(k+1)$ محاسبه شود و اگر $x = S$ یا $x = M$ باشد آنگاه

باید به ترتیب به M یا R انتقال پیدا کند.

iii. $X^x(t_{k+1})$ محاسبه شود و هر سه تابعی معیار محلی موصوف

با روابط (۵۲-۵) تا (۵۴-۵) برای به دست آوردن $o_{opt}^x(k+1)$

حل شوند.

۳- $k = k + 1$ قرار داده شده و این روند برای زمان‌های نمونه برداری بعدی


هم تکرار شود.

به وسیله این روش، هر رده به صورت اولیه با فرض اینکه رده‌های همسایه‌اش یک نرخ سفارش نامی را به کار می‌گیرند، یک مقدار کنترلی نرخ سفارش بهینه را محاسبه می‌کند. سپس در مراحل بعد هر رده با فرض اینکه اغتشاش‌های اندازه‌گیری شده مبتنی بر باقی‌مانده‌ی دنباله کنترلی محاسبه‌شده به وسیله رده‌های همسایه در به روزرسانی قبلی هستند، یک مقدار کنترلی نرخ سفارش بهینه را در هر به روزرسانی محاسبه می‌کند.

همچنین در روش حل مسائل کنترل پیش‌بین متمرکز و غیرمتمرکز در مورد محاسبه‌ی مقادیر متغیر حالت کنترلی ناپذیر اما پایدارپذیر سفارش انباشته‌شده $b^x(t_k)$ می‌توان دو راهکار را در نظر گرفت. در راهکار اول با توجه به اینکه $b^x(t_k)$ در هر زمان به روزرسانی تنها به نرخ تقاضای رده x وابسته است، در هر زیرسیستم این متغیر حالت جدا از کل مدل زیرسیستم به صورت گسسته مدل شده و با نرخ تقاضا تحریک می‌شود و مقادیر معین حاصله در حل مسئله کنترلی پیش‌بین به عنوان اغتشاش اندازه‌گیری شده به کار گرفته می‌شوند. در راهکار دوم می‌توان این متغیر حالت را نیز با کل زیرسیستم به صورت گسسته مدل کرد، اما ثابت وزنی مربوط به آن را در تعریف تابعی معیار صفر در نظر گرفت. در این صورت مقدار این متغیر حالت در هر زمان نمونه برداری از خود مدل زیرسیستم به عنوان اغتشاش اندازه‌گیری شده برداشت می‌شود.



فصل ۵:
نمونه‌های کاربردی
کنترل‌کننده پیش‌بین
در مدیریت زنجیره تامین



با توجه به تمام روش‌های مشروحه در فصل قبل در مورد بکارگیری کنترل‌کننده‌های متمرکز و غیرمتمرکز پیش‌بین مبتنی بر مدل بر روی سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین، در این فصل با استفاده از شبیه‌سازی‌های انجام شده‌ی این روش‌ها به بررسی مزایا و کمبودهای هر کدام از این روش‌ها پرداخته خواهد شد. در این راستا در ادامه، این فصل به دو بخش اصلی بکارگیری کنترل‌کننده پیش‌بین روی سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین بدون جریان چرخه‌های اطلاعاتی و بکارگیری کنترل‌کننده پیش‌بین روی سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین همراه با چرخه‌های اطلاعاتی تقسیم می‌شود.

بخش‌های سوم و چهارم این فصل که همان بخش‌های اصلی مذکور هستند، دقیقاً مطابق با بخش‌های فصل قبل پیش می‌روند. در این راستا باید در هر کدام از دو نوع مدل سیستم مدیریت زنجیره تامین موردنظر، مدل‌های زمان گسسته که سازگار با طبیعت زنجیره‌های تامین هستند مورد استفاده قرار بگیرند. تاخیرهای انتقال موجود در هر دو مدل نیز تقریب‌زده می‌شوند.

در بخش سوم، ابتدا کنترل‌کننده پیش‌بین متمرکز روی سیستم مدیریت زنجیره تامین بدون چرخه اطلاعاتی پیاده‌سازی می‌شود. سپس کنترل‌کننده پیش‌بین غیرمتمرکز برای این سیستم بکارگیری نقاط تنظیم موجودی یک بار در تابعی معیار و بار دیگر با استفاده از یک ساختار کنترلی دولایه انجام می‌شود. در این شبیه‌سازی‌ها با توجه به چالش‌های موجود در مورد تنوع تقاضای مشتری، تحریک سیستم‌ها با تقاضاهای ثابت و تصادفی مشتری انجام می‌شود. در مورد این مدل از تقاضای تصادفی ARIMA نیز استفاده می‌شود. در بخش چهارم، کنترل‌کننده‌های پیش‌بین متمرکز و غیرمتمرکز به صورت جداگانه روی سیستم مدیریت زنجیره تامین همراه با چرخه اطلاعاتی پیاده‌سازی می‌شوند. با توجه به اینکه مدل داده شده در اینجا یک مدل زمان پیوسته است، این مدل به یک مدل زمان گسسته تبدیل شده و استفاده می‌شود. شبیه‌سازی‌های

انجام شده روی این مدل از سیستم مدیریت زنجیره تامین، با توجه به تقاضاهای ثابت مشتری و همچنین تغییرات ناگهانی تقاضاهای مشتری انجام می‌شود. توجه شود که تمام محاسبات و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام می‌شوند. در شبیه‌سازی‌های این فصل در هر دو نوع مدل از سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین، چه در حالت پیاده‌سازی متمرکز و چه در حالت پیاده‌سازی غیرمتمرکز، چالش اصلی پاسخ‌دهی مناسب سیستم در برابر تغییرات تقاضای مشتری با استفاده از کنترل‌کننده پیش‌بین بوده و بررسی اثر بخش توقیف حرکت در برطرف کردن این چالش مدنظر است.

تضمین پایداری در پیاده‌سازی کنترل پیش‌بین نیز بر اساس طول افق بیان می‌شود. بر این اساس، از یک نتیجه‌ی نظریه کنترل پیش‌بین افق نامحدود استفاده می‌شود که اگر طول افق پیش‌بینی از یک حد بالاتر باشد پایداری کنترل‌کننده پیش‌بین تضمین شده خواهد بود.

۵-۲- کنترل پیش‌بین سیستم مدیریت زنجیره تامین بدون در نظر گرفتن چرخه‌های اطلاعاتی

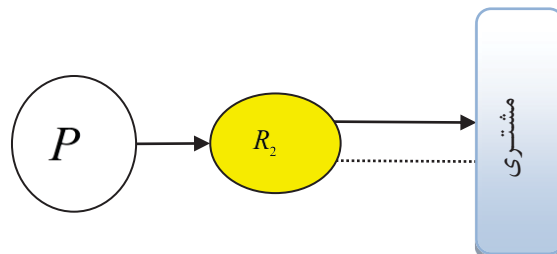
در اینجا روابط مدل (۴-۱) تا (۴-۳) به عنوان روابط اصلی مدل‌های تفصیلی تفاضلی زمان گسسته سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین بدون وجود چرخه‌های اطلاعاتی بین رده‌ها در نظر گرفته شده و با پایه تابعی معیار (۴-۵) در ساختار کنترل پیش‌بین بهینه‌سازی می‌شوند. این مدل شامل تاخیرهای انتقال و زمان نمونه‌برداری روزانه می‌باشد. در شبیه‌سازی‌های مربوط به این بخش، زمان نمونه‌برداری برابر با یک روز بوده و تاخیرهای انتقال براساس واحد روز بیان می‌شوند.

بنا به ضرورت تخمین حالت‌های سیستم با توجه به دلایلی که در بخش قبل ذکر شد، در تمام شبیه‌سازی‌های این بخش از فیلتر کالمن با نویزهای فرآیند و اندازه‌گیری سفید با میانگین صفر و کواریانس‌های برابر با ۱ استفاده می‌شود. همچنین تاخیرهای انتقال با تقریب زمان پیوسته مرتبه چهار Pade از آن‌ها جایگزین می‌شوند. در این

عملیات تقریب‌سازی، از آنجا که تقریب‌سازی Pade برای سیستم‌های زمان پیوسته بیان می‌شود، مدل زمان گسسته‌ی سیستم مدیریت زنجیره تامین باید به یک سیستم زمان پیوسته‌ی معادل تبدیل شده و پس از عملیات تقریب زدن، مدل فضای حالت زمان پیوسته‌ی حاصله به مدل فضای حالت گسسته‌ی معادل تبدیل شود. البته برای اینکه نیازی به این عملیات تبدیل فضای حالت زمان گسسته به زمان پیوسته و بالعکس روی این مدل زمان گسسته نباشد، می‌توان از روش تقریب زمان گسسته‌ی جانشانی تاخیرهای زمانی با صفرهایی در تابع تبدیل سیستم (Delay to Zero) استفاده کرد. همچنین در اکثر شبیه‌سازی‌ها فرض بر این است که ثابت‌های وزنی موجودی و سفارش برگشتی و بخش‌های توقیف حرکت مربوط به گره‌های قرارگرفته شده در یک رده، با یکدیگر برابر هستند.

۵-۲-۱- کنترل پیش‌بین متمرکز

در ابتدا یک زنجیره تامین دو رده‌ای شامل یک گره خرده‌فروش و یک کارخانه (مرکز تولید) مطابق شکل (۵-۱) مدنظر قرار می‌گیرد. ورودی این خرده‌فروش تنها از یک کارخانه حاصل می‌شود. افق پیش‌بینی برابر با ۲۰ واحد زمانی، افق کنترل برابر با ۱۰ واحد زمانی، تاخیر انتقال برابر ۳ واحد زمانی، سفارش فسخ شده ثابت $LO(t)$ برابر با ۲ واحد کالا و تقاضای مشتری برابر با ۳۰ واحد کالا است. ثابت‌های وزنی، نقطه تنظیم موجودی و محدودیت‌های حالت (سطح موجودی و سطح سفارش برگشتی حداکثر) طبق جدول زیر داده شده است. موجودی اولیه گره خرده‌فروش نیز برابر با موجودی مطلوب در این گره است.

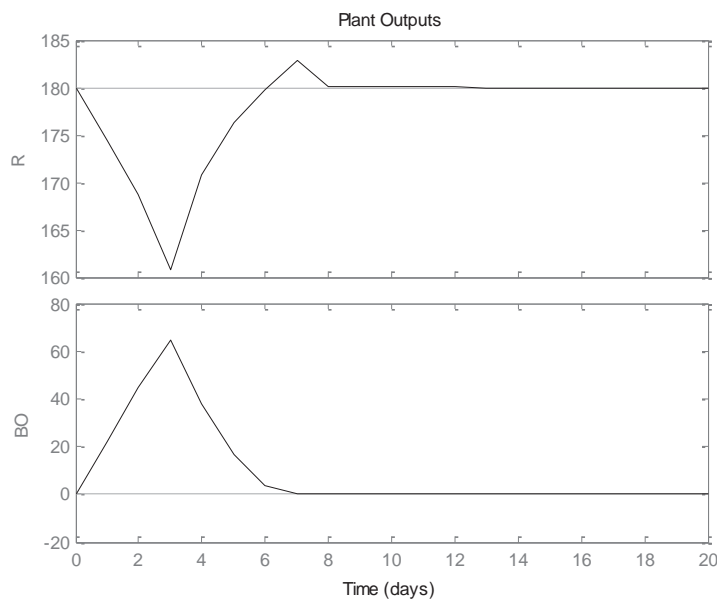


شکل (۵-۱) یک نمونه زنجیره تامین دو گره‌ی

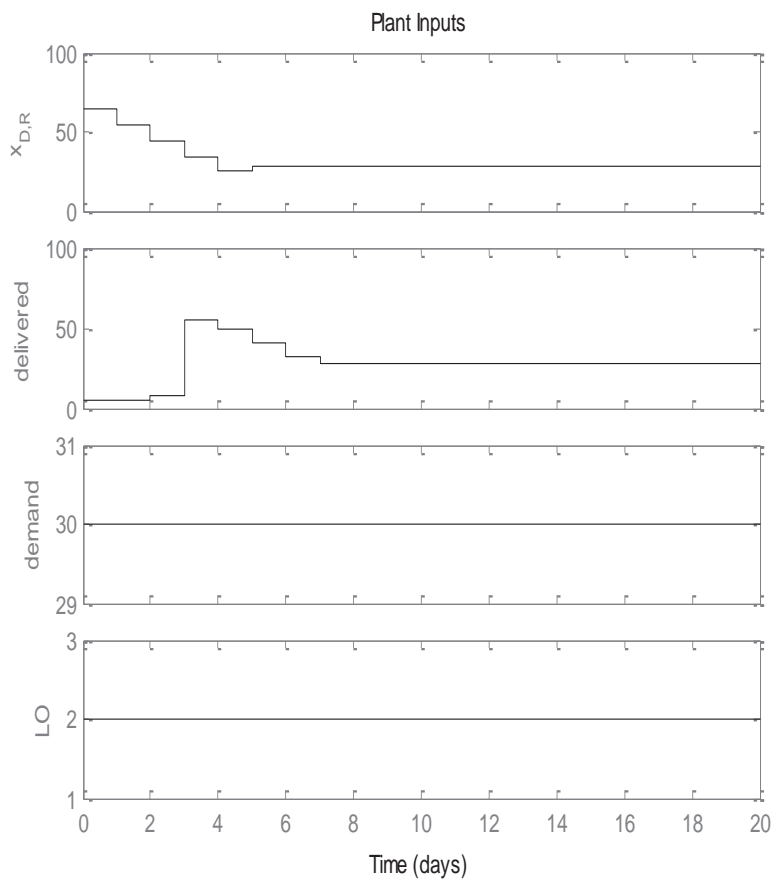
جدول (۱-۵) داده‌های گره خرده‌فروش

وزن سفارش برگشتی	وزن موجودی	هزینه انتقال و تحویل (وزن ورودی)	نقطه تنظیم موجودی	سطح سفارش برگشتی حداکثر	سطح موجودی حداکثر
۲	۴	۱	۱۸۰	۱۰۰	۳۰۰

همان‌طور که در شکل‌های (۲-۵) و (۳-۵) مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده پیش‌بین خرده‌فروش با سفارش مناسب کالا به مرکز تولید در یک زمان کمتر از ۱۰ روز در ۲۰ دوره زمانی به برآورده کردن تقاضای مشتری دست می‌یابد و از آنجا که تقاضا یک مقدار ثابت فرض شده، استفاده از بخش توقیف حرکت ضروری نیست.



شکل (۲-۵) عملکرد دینامیکی زنجیره تامین دو گرهی (خروجی‌ها)



شکل (۳-۵) عملکرد دینامیکی زنجیره تامین دو گرهی (ورودی‌ها)

این بار تعداد گره‌های سیستم را افزایش داده و یک زنجیره تامین واقعی‌تر مطابق شکل (۴-۴) و دسته معادلات (۴-۴) در نظر گرفته می‌شود که یک سیستم مدیریت زنجیره تامین سه رده‌ای دو محصولی دارای یک مرکز تولید، دو مرکز توزیع و سه خرده فروش است. بردار خروجی و بردار ورودی این سیستم برای شکل دادن فضای حالت به شکل

$$Y = \begin{bmatrix} y_{1,D1} \\ y_{2,D1} \\ y_{1,D2} \\ y_{2,D2} \\ y_{1,R1} \\ y_{2,R1} \\ y_{1,R2} \\ y_{2,R2} \\ y_{1,R3} \\ y_{2,R3} \\ BO_{1,R1} \\ BO_{2,R1} \\ BO_{1,R2} \\ BO_{2,R2} \\ BO_{1,R3} \\ BO_{2,R3} \end{bmatrix}_{16 \times 1} = \begin{bmatrix} D1 \\ D2 \\ D3 \\ D4 \\ R1 \\ R2 \\ R3 \\ R4 \\ R5 \\ R6 \\ B1 \\ B2 \\ B3 \\ B4 \\ B5 \\ B6 \end{bmatrix}_{16 \times 1}, \quad U = \begin{bmatrix} x_{1,P,D1} \\ x_{1,D1,R1} \\ x_{1,D1,R2} \\ x_{2,P,D1} \\ x_{2,D1,R1} \\ x_{2,D1,R2} \\ x_{1,P,D2} \\ x_{1,D2,R1} \\ x_{1,D2,R3} \\ x_{2,P,D2} \\ x_{2,D2,R1} \\ x_{2,D2,R3} \\ d_{1,R1} \\ d_{2,R1} \\ d_{1,R2} \\ d_{2,R2} \\ d_{1,R3} \\ d_{2,R3} \\ R_{1,R1} \\ R_{2,R1} \\ R_{1,R2} \\ R_{2,R2} \\ R_{1,R3} \\ R_{2,R3} \end{bmatrix}_{24 \times 1} = \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \\ I4 \\ I5 \\ I6 \\ I7 \\ I8 \\ I9 \\ I10 \\ I11 \\ I12 \\ d1 \\ d2 \\ d3 \\ d4 \\ d5 \\ d6 \\ r1 \\ r2 \\ r3 \\ r4 \\ r5 \\ r6 \end{bmatrix}_{24 \times 1}$$

تعریف می‌شوند. مقدار سفارش فسخ شده برابر با صفر واحد کالا، افق پیش‌بینی برابر با ۲۰ واحد زمانی، افق کنترل برابر با ۱۰ واحد زمانی، تاخیر انتقال برابر ۵ واحد زمانی در انتقال از رده تولید به توزیع و برابر ۳ واحد زمانی در انتقال از رده توزیع به

خرده‌فروش، و تقاضای مشتری برابر با ۵۰ واحد کالا برای گره خرده‌فروش ۱، ۴۰ واحد کالا برای گره خرده‌فروش ۲ و ۳۰ واحد کالا برای گره خرده‌فروش ۳ است. ثابت‌های وزنی، نقاط تنظیم موجودی و سطوح موجودی و سطوح سفارش برگشتی حداکثر طبق جدول (۲-۵) داده شده است. مقدار اولیه سطوح موجودی کالا و سفارش‌های برگشتی برای تمامی رده‌ها نیز برابر با صفر است.

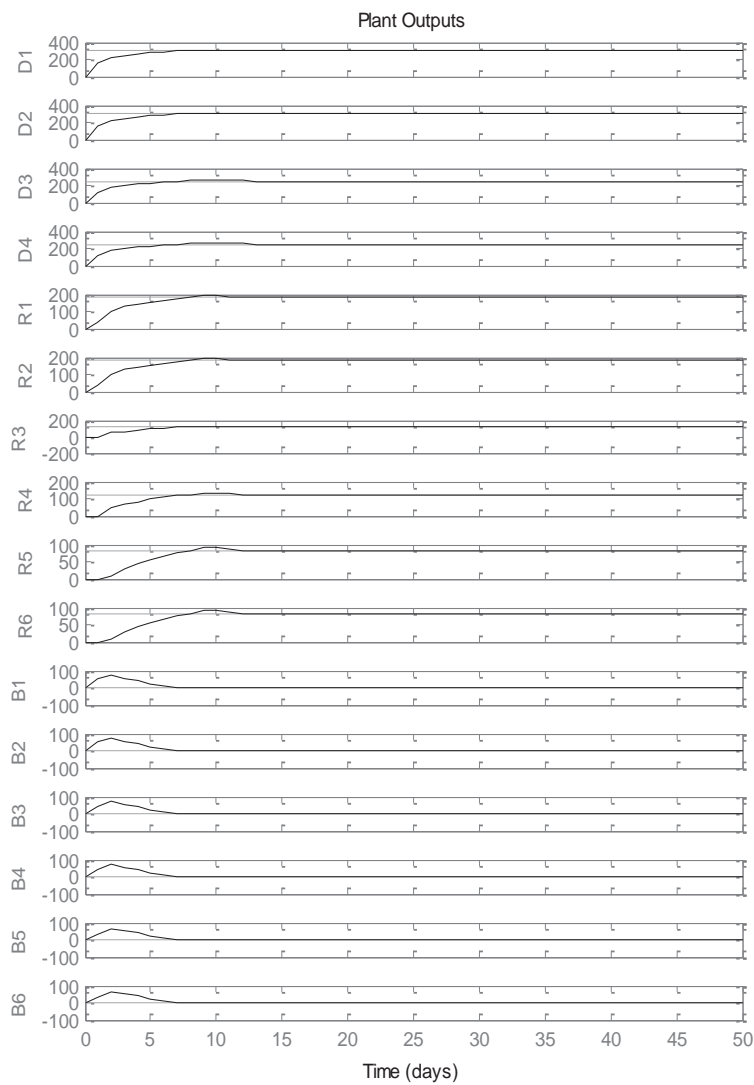
جدول (۲-۵) داده‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین سه رده‌ای

خرده فروش	توزیع	
۳۰۰	۷۰۰	سطح موجودی حداکثر (برای هر دو نوع محصول و تمام گره‌های رده)
۷۰۰	-	سطح سفارش برگشتی حداکثر (برای هر دو نوع محصول و تمام گره‌های رده)
۱۸۰:گره ۱ ۱۲۰:گره ۲ ۸۰:گره ۳	۳۰۰:گره ۱ ۲۵۰:گره ۲	نقطه تنظیم موجودی محصول (برای هر دو نوع محصول)
توزیع به خرده‌فروش $\begin{bmatrix} 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix}$	تولید به توزیع $[0.2 \quad 0.1]$	هزینه انتقال (برای هر دو نوع محصول)
۰.۱	-	هزینه تحویل (برای هر دو نوع محصول و تمام گره‌های رده)
۱	۱	وزن‌های موجودی (برای هر دو نوع محصول و تمام گره‌های رده)
۱	-	وزن‌های سفارش برگشتی (برای هر دو نوع محصول و تمام گره‌های رده)

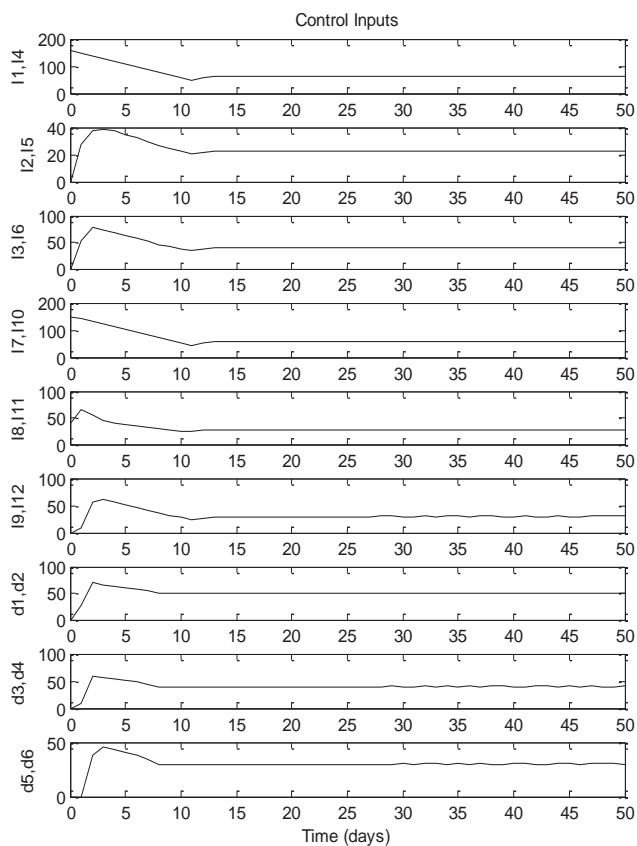
در نهایت عملکرد دینامیکی شبکه زنجیره تامین در شبیه‌سازی‌های شکل‌های (۵-۵) و (۴-۵) دیده می‌شوند. با وجود بالا رفتن ابعاد شبکه، نقاط تنظیم موجودی در این شبیه‌سازی به خوبی دنبال می‌شوند و طبق انتظار، سفارش‌های برگشتی نیز به مقدار صفر میل خواهند کرد و در نهایت میزان کالای تحویل داده شده به مشتری با تقاضای مشتری در حالت ماندگار برابر می‌شود. آنچه مسلم است هر چه میزان افق کنترل افزایش داده شود در مدت زمان کمتری تقاضای مشتری برآورده می‌شود (زمان نشست کاهش پیدا می‌کند) و هر چه میزان افق پیش‌بینی افزایش داده شود میزان بالادستی خروجی‌ها کاهش پیدا می‌کند، اما هزینه محاسباتی نیز افزایش پیدا خواهد کرد.

طبق این شکل‌های (۴-۵) و (۵-۵) از آنجا که پارامترهای مربوط به دو نوع محصول همانند سطوح موجودی و ثابت‌های وزنی یکسان هستند، مقادیر خروجی و کنترل هر دونوع محصول در هر گره یکسان هستند. در کل، نمودار ورودی‌های کنترل سیستم مدیریت زنجیره تامین یک برنامه زمان‌بندی به ارگان‌های زنجیره تامین یعنی واحدهای تولید و انبار و توزیع و خرده‌فروشی و سیستم لجستیکی (حمل و نقل کالا) برای برآورده کردن تقاضای مشتری با توجه به اهداف سازمانی می‌دهد.

به این علت که با زیاد شدن ابعاد سیستم مدیریت زنجیره تامین، نشان دادن همه‌ی نمودارهای بزرگ خروجی‌ها و ورودی‌های سیستم مشکل است، از اینجا به بعد با توجه به اینکه در این کتاب، همه‌ی گره‌های یک رده دارای نقاط تنظیم سطوح موجودی، حداکثر سطوح موجودی، سفارش برگشتی مطلوب معادل صفر، حداکثر سفارش برگشتی، و تاخیر انتقال یکسانی فرض می‌شوند، از یک میانگین خروجی و ورودی کنترلی مرتبط با هر رده استفاده می‌شود (اگر ثابت‌های وزنی هم برای گره‌های موجود در یک رده یکسان در نظر گرفته شوند، این میانگین معادل با خروجی و ورودی کنترلی هر کدام از این گره‌های هم رده است).



شکل (۵-۴) عملکرد دینامیکی زنجیره تامین سه رده‌ای تحت کنترل پیش‌بین متمرکز (خروجی‌ها)



شکل (۵-۵) عملکرد دینامیکی زنجیره تامین سه رده‌ای تحت کنترل پیش‌بین متمرکز (کنترل‌ها)

□ بررسی اثر بخش توقیف حرکت

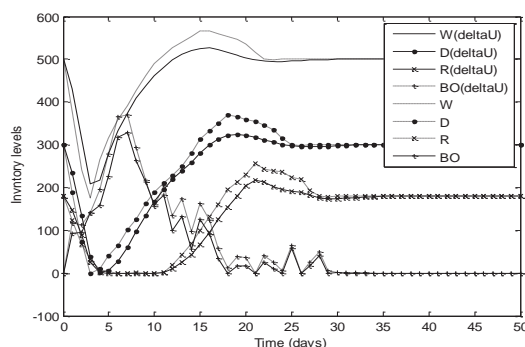
انتظار می‌رود در نظر گرفتن بخش توقیف حرکت، نوعی مقاومت در برابر تغییرات تقاضا در حفظ کردن موجودی کالا در گره‌های زنجیره تامین بوجود آورد. برای این آزمون یک زنجیره تامین چهار رده‌ای شامل دو مرکز تولید، دو گره انبار، چهار گره توزیع و چهار گره خرده‌فروش که در آن بین تمامی گره‌های یک رده با گره‌های

رده‌های مجاور کالا رد و بدل می‌شود، و با مقادیر داده‌شده‌ی جدول (۳-۵) در نظر گرفته می‌شود.

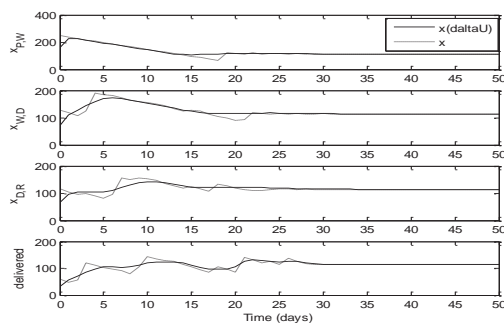
جدول (۳-۵) داده‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین چهار رده‌ای

	مخزن	توزیع	خرده فروش
سطح موجودی حداکثر (برای تمام گره‌های رده)	۱۰۰۰	۷۰۰	۳۰۰
سطح سفارش برگشتی حداکثر (برای تمام گره‌های رده)	-	-	۷۰۰
نقطه تنظیم موجودی (برای تمام گره‌های رده)	۵۰۰	۳۰۰	۱۸۰
هزینه انتقال (برای تمام گره‌های رده)	تولید به مخزن مخزن $\begin{bmatrix} 0.5 & 0.2 \\ 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}$	مخزن به توزیع توزیع $\begin{bmatrix} 0.5 & 0.2 \\ 0.5 & 0.2 \\ 0.2 & 0.5 \\ 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}^T$	توزیع به خرده‌فروش خرده‌فروش $\begin{bmatrix} 0.5 & 0.2 & 0.5 & 0.5 \\ 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.2 \\ 0.5 & 0.5 & 0.2 & 0.5 \end{bmatrix}$
وزن‌های تحویل (برای تمام گره‌های رده)	-	-	۰.۵
وزن‌های موجودی (برای تمام گره‌های رده)	۱	۱	۱
وزن‌های سفارش برگشتی (برای تمام گره‌های رده)	-	-	۱
وزن‌های بخش توقیف حرکت (در صورت وجود)	۳	۳	۳

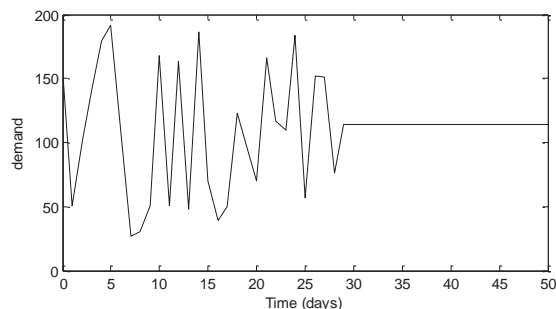
مقدار سفارش فسخ شده برابر با ۳ واحد کالا، تاخیر انتقال برابر ۵ واحد زمانی در انتقال از رده تولید به مخزن، برابر ۳ واحد زمانی در انتقال از رده مخزن به توزیع و برابر ۲ واحد زمانی در انتقال از رده توزیع به خرده‌فروش، و تقاضای مشتری متغیر بین ۲۰ تا ۲۰۰ واحد کالا مطابق شکل (۵-۸) است. داده‌های زنجیره تامین طبق جدول (۵-۲) داده شده است. مقدار اولیه سطوح موجودی کالا و سفارش‌های برگشتی برای تمامی رده‌ها نیز برابر با مقادیر حالت ماندگار متناظر (نقطه تنظیم) آن‌هاست. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای افق پیش‌بینی برابر با ۲۰ واحد زمانی و افق کنترل برابر با ۱۰ واحد زمانی به صورت شکل‌های (۵-۶) و (۵-۷) می‌باشند.



شکل (۵-۶) اثر بخش توقف حرکت در عملکرد زنجیره تامین تحت کنترل پیش‌بین متمرکز (خروجی‌ها)



شکل (۵-۷) اثر بخش توقف حرکت در عملکرد زنجیره تامین تحت کنترل پیش‌بین متمرکز (کنترل‌ها)



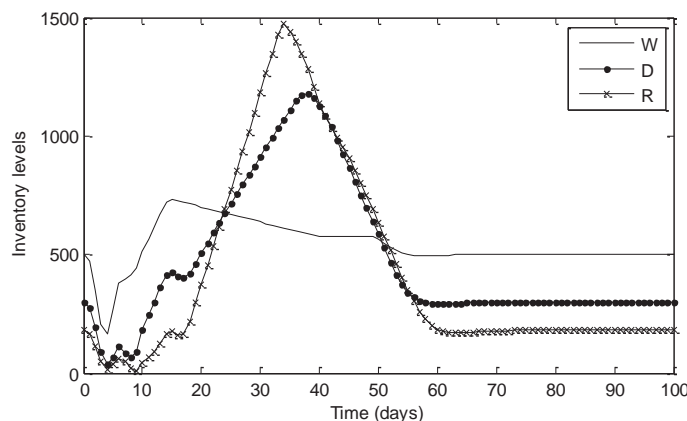
شکل (۵-۸) تقاضای متغیر مشتری بین ۲۰ تا ۲۰۰ واحد کالا

در این شبیه‌سازی‌ها نمودارهای خط‌چین شده مربوط به عملیات کنترل بدون استفاده از بخش توقیف حرکت هستند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با اثر بخش توقیف حرکت، عملکرد دینامیکی زنجیره تامین در حفظ موجودی رده‌ها و کاهش دادن سفارش‌های برگشتی بهبود یافته، صاف‌تر و دارای مقادیر پیک کمتری است. اما به هرحال چون ساختار کنترلی متمرکز است، پیک‌ها آن‌چنان شدید نیستند (امری که به نظر می‌رسد در ساختار غیرمتمرکز متفاوت باشد چون نامعینی اغتشاش اندازه‌گیری شده برای هر رده وجود دارد).

در طراحی کنترل‌کننده پیش‌بین، می‌توان در هر زمان نمونه‌برداری مقادیر مرجع و اغتشاش‌های اندازه‌گیری شده را برای تمام طول افق برابر با مقدار آن‌ها در همان زمان نمونه‌برداری به صورت مقدارهای ثابت در نظر گرفت. در یک راهکار دیگر تحت عنوان "انتظارداشتن"^۱ می‌توان در هر زمان نمونه‌برداری مقادیر مرجع و اغتشاش‌های اندازه‌گیری شده‌ی پیش‌بینی شده برای تمام طول افق (یا برابر با پیش‌بینی مقدار آن‌ها تا چند گام جلوتر) را در نظر گرفت. شبیه‌سازی‌های شکل‌های (۵-۶) و (۵-۷) با راهکار دوم انجام شده‌اند. یک نمونه از شبیه‌سازی بدون پیش‌بینی مقادیر اغتشاش‌های اندازه‌گیری شده در شکل زیر آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود به سبب وجود

1. Anticipation (Look Ahead)

نداشتن یک پیش‌بینی مناسب از تقاضای مشتری، سطوح موجودی کالا و سفارش برگشتی دارای پیک‌های شدید و بالاتر از حد مجاز است.



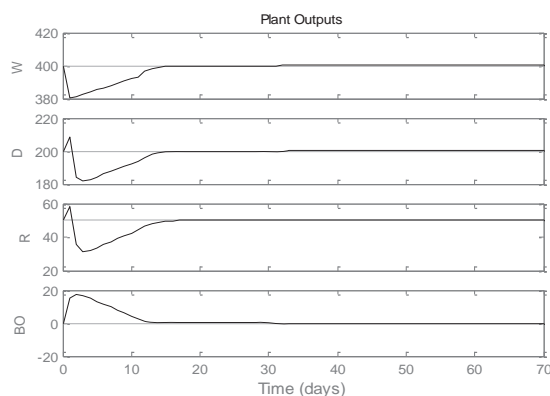
شکل (۹-۵) پاسخ دینامیکی زنجیره تامین بدون پیش‌بینی‌های تقاضا در طول افق

۵-۲-۲- کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز

برای سیستم‌های زنجیره تامین مقیاس بزرگ به دلیل مشکل ابعادی و کاهش بار محاسباتی و غیرعملی بودن کنترل متمرکز، گاهاً استفاده از کنترل‌های محلی در یک ساختار کنترلی غیر متمرکز اجتناب‌ناپذیر است. در این قسمت سیستم‌های زنجیره تامین با کنترل‌کننده‌های غیرمتمرکز پیش‌بین محلی (۴-۳۰) تا (۴-۳۲) تحت تقاضاهای ثابت و تصادفی مشتری مدیریت و شبیه‌سازی می‌شوند. با توجه به بخش ۴-۲-۴، کنترل‌کننده پیش‌بین غیرمتمرکز نوع ۱ دارای قابلیت به روزرسانی کنترل‌کننده‌های محلی تحت پیش‌بینی‌های تغییر تقاضا در یک دوره زمانی نیست و تنها قابلیت استفاده با تقاضاهای ثابت را دارد (دارای طراحی آفلاین است) و دارای پاسخ و ساختار مشابه با ساختار کنترل‌کننده پیش‌بین غیرمتمرکز نوع ۲ تحت تحریک تقاضای ثابت (با در نظر گرفتن بسیار کوچک بودن نامعینی‌های سیستم، در صورت وجود) است.

□ بررسی اثر افزایش تاخیر انتقال و رده‌ها و گره‌های زنجیره تامین در ارضای تقاضای مشتری

در اینجا باز هم یک سیستم زنجیره تامین چهار رده‌ای برای شبیه‌سازی استفاده شده است. افق کنترل و افق پیش‌بینی به ترتیب معادل ۱۰ و ۲۰ واحد زمانی و طول هر دوره زمانی برابر یک و مقدار سفارش فسخ شده معادل صفر فرض می‌شوند. مقدار اولیه سطوح موجودی کالا و سفارش‌های برگشتی برای تمامی رده‌ها نیز برابر با مقادیر حالت ماندگار متناظر آن‌هاست. در ابتدا یک زنجیره تامین شامل یک گره تولید، یک گره ذخیره، یک مرکز توزیع، یک گره خرده‌فروش فرض می‌شود. نقاط تنظیم موجودی، ظرفیت‌های ذخیره ماکزیمم در هر گره و اطلاعات هزینه انتقال برای هر کانال تامین‌کننده در جدول (۵-۴) آمده‌اند. پاسخ دینامیکی برای تقاضای ۸ واحد کالا محاسبه شد. شکل (۵-۱۰)، انحراف سطوح موجودی از نقاط تنظیم بر W و D و R ، را بدون استفاده از بخش توقیف حرکت نشان می‌دهد. انحرافات برای گره‌های بالادستی به سبب تعداد بیشتر گره‌های پایین‌دستی که بوسیله رده‌های بالادستی بکار می‌روند، تقویت می‌شود (اثر شلاق چرمی). این آزمایش با یک زنجیره تامین شامل یک گره تولید، یک گره ذخیره، دو مرکز توزیع، چهار گره خرده‌فروش با همان داده‌های جدول (۵-۴) نیز انجام می‌شود (زنجیره تامین چند طبقه اول).

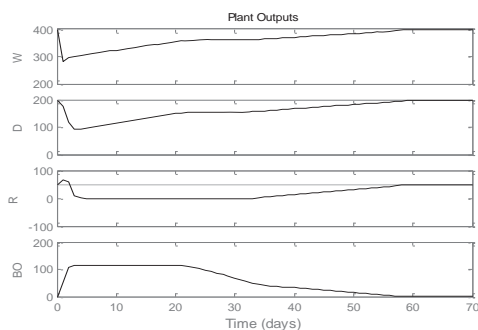


شکل (۵-۱۰) پاسخ دینامیکی زنجیره تامین تک طبقه بدون استفاده از بخش توقیف حرکت

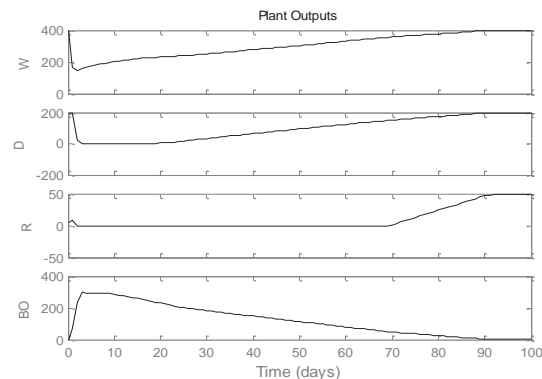
جدول (۵-۴) داده‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین یک طبقه

	مخزن	مرکز توزیع	خرده فروش
سطح موجودی حداکثر	۱۰۰۰	۷۰۰	۳۰۰
سطح سفارش برگشتی حداکثر	-	-	۷۰۰
نقطه تنظیم موجودی	۴۰۰	۲۰۰	۵۰
هزینه انتقال	تولید به مخزن ۰.۲	مخزن به توزیع ۰.۲	توزیع به خرده فروش ۰.۲
وزن‌های موجودی	۱	۱	۱
وزن‌های سفارش برگشتی	-	-	۱
تاخیر انتقال			$L = [1 \ 1 \ 1]$

شکل (۵-۱۱)، انحراف از سطوح موجودی تنظیمی برای مخزن و توزیع و خرده‌فروش نوعی در زنجیره تامین را نشان می‌دهد. این آزمایش بار دیگر با یک زنجیره تامین شامل دو گره تولید، دو گره ذخیره، چهار مرکز توزیع، چهار گره خرده‌فروش با همان مقادیر جدول (۵-۴) و تاخیر انتقال $L = [2 \ 2 \ 2]$ نیز انجام می‌شود (زنجیره تامین چند طبقه دوم) که این نمونه به یک زنجیره تامین واقعی نزدیکتر است. شکل (۵-۱۲)، انحراف از سطوح موجودی تنظیمی برای مخزن و توزیع و خرده‌فروش را نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۱) پاسخ دینامیکی زنجیره تامین چند طبقه اول بدون استفاده از بخش توقیف حرکت



شکل (۵-۱۲) پاسخ دینامیکی زنجیره تامین چند طبقه دوم بدون استفاده از بخش توقیف حرکت

نهایتاً از این شبیه‌سازی‌ها برداشت می‌شود که زیاد شدن طبقه‌ها و رده‌ها در زنجیره تامین، زمان نشست و نوسان و پیک انحراف را بالا می‌برند. همچنین افزایش تاخیر انتقال هم به دلیل انباشتگی تقاضا، این تاثیرات منفی را تشدید می‌کند. برای حل این مشکلات و برطرف کردن کندی پاسخ می‌توان از کنترل‌کننده‌های کمکی مثل کنترل‌کننده‌های فیدبک خطی استفاده کرد. همان‌گونه که گفته شد این شبیه‌سازی‌ها حاصل پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های پیش‌بین غیرمتمرکز نوع ۱ و نوع ۲ هستند (چون تحت تقاضای ثابت این دو تقریباً معادل هم هستند).

باید به این نکته توجه شود که در ساختار کنترلی غیرمتمرکز شدت تاثیر بد زیاد شدن طبقه‌ها و رده‌ها در زنجیره تامین و افزایش تاخیر انتقال، به دلیل بالا رفتن ریسک خطا در انتقال سفارش کالا از رده پایین دستی به بالادستی بسیار بیشتر از ساختار کنترلی متمرکز است.

□ کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز دولایه تحت تقاضای تصادفی ARIMA و بررسی اثر بخش توقیف حرکت

در این قسمت یک ساختار کنترلی دولایه موجودی مطابق بخش ۴-۲-۵ و با

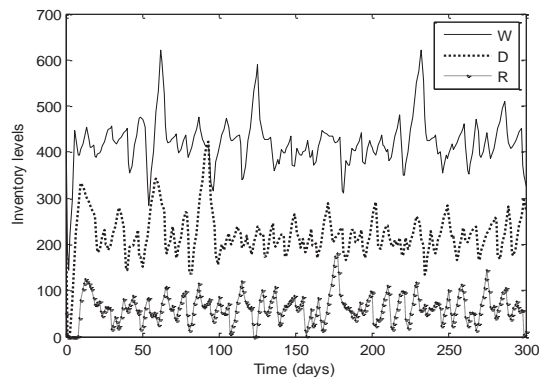
استفاده از قید تساوی توصیف شده با روابط (۴-۳۴) و (۴-۳۵) شبیه‌سازی می‌شود. افق پیش‌بینی برابر ۲۰ و افق کنترلی برابر ۱۰ واحد زمانی و داده‌های جدول (۵-۳) در نظر گرفته می‌شوند. با این تفاوت که نقاط مطلوب موجودی در تابعی معیار این کنترل‌کننده برابر با صفر هستند. مقدار سفارش فسخ شده برابر با ۳ واحد کالا، تاخیر انتقال برابر ۵ واحد زمانی در انتقال از رده تولید به مخزن، برابر ۳ واحد زمانی در انتقال از رده مخزن به توزیع و برابر ۲ واحد زمانی در انتقال از رده توزیع به خرده‌فروش است. مقدار اولیه سطوح موجودی کالا و سفارش‌های برگشتی برای تمامی رده‌ها نیز برابر با صفر است. تمامی پارامترهای ثابت کنترل‌کننده فیدبک نیز (بهره‌ها و ثابت‌های زمانی) برابر با یک و نقاط مطلوب موجودی در رابطه (۴-۳۵) به ترتیب ۴۰۰ و ۲۰۰ و ۵۰ واحد کالا برای رده‌های مخزن و توزیع و خرده‌فروش در نظر گرفته می‌شوند. آن‌جا که مدل سری‌های زمانی ARIMA، مدل متداول پیش‌بینی تقاضاست، فرض می‌شود که تقاضای محصول از یک مدل سری‌های زمانی $ARIMA(p, d, q)$ بصورت زیر پیروی می‌کند:

$$R_{i,k}(t) = \frac{\theta(z^{-1})}{\phi(z^{-1})\nabla^d} a_{i,k}(t) \quad (1-5)$$

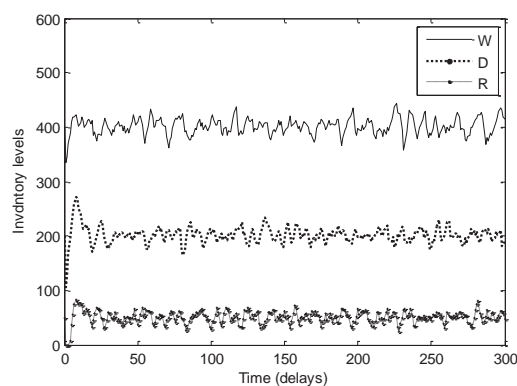
$$\forall k \in \{R\}, \quad t \in T, \quad i \in DP$$

که $a_{i,k}(t)$ ضربه‌های تصادفی مستقل با توزیع‌های گوسی با میانگین صفر دارای واریانس معین است. z^{-1} عملگر شیفت به عقب تعریف شده با $z^{-1}a_{i,k}(t) = a_{i,k}(t-1)$ و $z^{-q}a_{i,k}(t) = a_{i,k}(t-q)$ است. $\theta(z^{-1})$ و $\phi(z^{-1})$ هم چندجمله‌ای‌هایی از مرتبه p و q است.

با استفاده از یک تقاضای تصادفی مبتنی بر مدل $ARIMA(10,10,10)$ با حداکثر پراکندگی ۵۰ واحد کالا، پاسخ دینامیکی شبکه برای یک تغییر تقاضای تصادفی شبکه بدون استفاده از بخش توقیف حرکت، و همچنین با استفاده از بخش توقیف حرکت، در شکل‌های (۵-۱۳) و (۵-۱۴) بررسی می‌شوند.



شکل (۵-۱۳) سطوح زنجیره تامین تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز دو لایه برای یک تغییر تقاضای تصادفی ARIMA بدون استفاده از بخش توقیف حرکت



شکل (۵-۱۴) سطوح موجودی زنجیره تامین تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز دو لایه برای یک تغییر تقاضای تصادفی ARIMA با استفاده از بخش توقیف حرکت

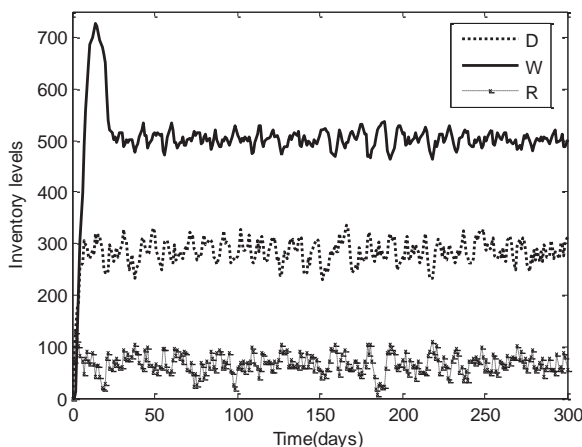
در نتیجه استفاده از بخش توقیف حرکت در هنگام تصادفی بودن تقاضا، در دستیابی به پاسخ مناسب بسیار موثر است.

□ بررسی اثر کنترل ثانویه موجودی

در اینجا نیز از زنجیره تامین قسمت قبل استفاده می‌شود با این تفاوت که از نقاط مطلوب تنظیم موجودی (تابعی معیار یا کنترل موجودی ثانویه) ۵۰۰ و ۳۰۰ و ۸۰ واحد

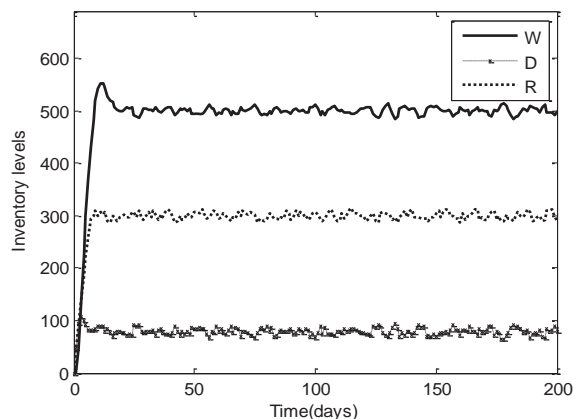
کالا به ترتیب برای رده‌های مخزن و توزیع و خرده‌فروش و ثابت‌های وزنی موجودی معادل ۰.۵ استفاده می‌شوند و تمامی مقادیر ثابت کنترل‌کننده فیدبک به جز فواصل زمانی که برابر با یک است برابر با ۰.۵ در نظر گرفته می‌شوند.

با استفاده از یک تقاضای تصادفی مبتنی بر مدل $ARIMA(10,10,10)$ ، پاسخ دینامیکی برای یک تغییر تقاضای تصادفی، با استفاده از کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز و با استفاده از کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز همراه با فیدبک خطی، با مقادیر اولیه صفر بررسی می‌شود.



شکل (۵-۱۵) سطوح موجودی کالا برای یک تغییر تقاضای تصادفی $ARIMA$ با استفاده از کنترل پیش‌بین تک لایه غیرمتمرکز

همان‌گونه که از شکل‌های (۵-۱۵) و (۵-۱۶) دیده می‌شود، استفاده از کنترل‌کننده‌های خطی سرعت عکس‌العمل سیستم کنترلی را در امتداد افق پیش‌بینی بالا می‌برد و پاسخ مناسب‌تری نسبت به اغتشاشات و تاخیرهای انتقال حاصل می‌شود. دلیل اصلی این عملکرد هم در رقابتی‌تر شدن سیستم در ارضای معیارهای بهینه‌سازی است. در حقیقت با استفاده از کنترل‌کننده‌های خطی، کنترل‌کننده پیش‌بین آزادی عمل بیشتری برای برقراری توازن میان معیارهای لجستیکی خواهد داشت.



شکل (۵-۱۶) سطوح موجودی کالا برای یک تغییر تقاضای تصادفی ARIMA با استفاده از کنترل پیش‌بین دو لایه غیرمتمرکز

۵-۳- کنترل پیش‌بین سیستم مدیریت زنجیره تامین با در نظر گرفتن چرخه‌های اطلاعاتی برای کنترل این گونه سیستم‌ها به صورت نمونه یک سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای یک گره تامین، یک گره تولید و یک گره خرده‌فروش بر اساس مدل بازی آشامیدنی برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. مدل‌های دینامیکی (۴-۲۲) تا (۴-۴۴) که مدل‌های دینامیکی زمان پیوسته هستند با استفاده از امکانات نرم‌افزار MATLAB با زمان نمونه‌برداری کنترل‌کننده پیش‌بین به مدل‌های زمان گسسته تبدیل می‌شوند. تاخیرهای زمانی موجود نیز با تقریب زننده مرتبه چهار Pade تقریب زده شده و جایگزین می‌شوند. نرخ‌های داده‌شده در این مسئله بر حسب روز هستند و زمان نمونه‌برداری مدل سیستم و کنترل‌کننده پیش‌بین برابر با ۰.۲ روز است. اثر Ahead Look (پیش‌بینی تقاضا در امتداد افق) نیز در این شبیه‌سازی‌ها به کار گرفته می‌شود. مقادیر نقاط تنظیم موجودی، ظرفیت‌های ذخیره ماکزیمم در هر گره (رده) و فاکتورهای وزنی نیز در جدول (۵-۵) آمده‌اند. تمامی متغیرهای حالت به عنوان خروجی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین هم در نظر گرفته می‌شوند. مقادیر حالت‌ماندگار سفارش‌های انباشته شده به علت پایداربودن در نقطه تعادل صفر و شکل نمایی، خود به خود پس از حالت گذار صفر می‌شوند.

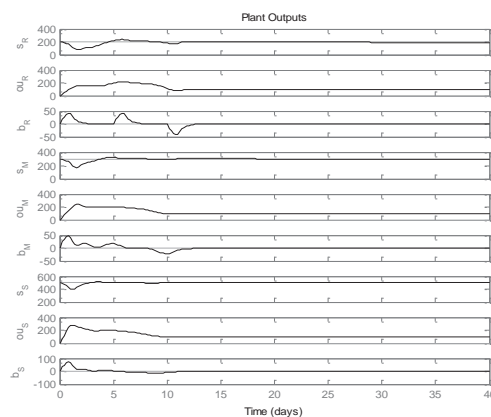
جدول (۵-۵) جدول داده‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه اطلاعاتی ۱

خرده فروش	تولیدکننده	تامین کننده	
۴۰۰	۶۰۰	۸۰۰	سطح موجودی حداکثر
۲۵۰	۳۵۰	۴۵۰	سطح سفارش برآورده نشده حداکثر
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	سطح سفارش انباشته شده حداکثر
۲۰۰	۳۰۰	۵۰۰	نقطه تنظیم موجودی محصول
۳	۳	۳	W_s
۱	۱	۱	W_{ou}
۱	۱	۱	W_u
۱	۱	۱	$W_{\alpha u}$
۲۰۰	۳۰۰	۵۰۰	سطح موجودی اولیه

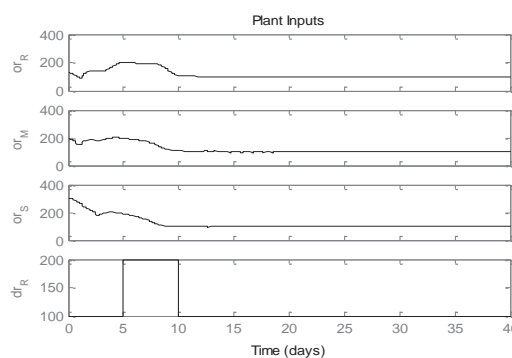
۵-۳-۱- کنترل پیش‌بین متمرکز

برای این منظور تابعی معیار متمرکز (۴-۴۷) با افق پیش‌بینی برابر با ۵۰ دوره زمانی (۱۰ روز) و افق کنترل برابر با ۲۰ دوره زمانی (۴روز) در نظر گرفته می‌شوند. تاخیرهای زمانی $\tau_1 = \tau_2 = 1$ و $t_b = 0.5$ واحد زمانی در نظر گرفته می‌شوند. مقادیر اولیه سفارش‌های برآورده نشده نیز برابر صفر است. برای بررسی بهتر اثر تغییرات تقاضای مشتری از یک نرخ تقاضای مشتری پالسی با دامنه ۱۰۰ واحد کالا در روز با دوره زمانی ۵ واحد زمانی در زمان ۵ و شرایط اولیه ۱۰۰ واحد کالا استفاده می‌شود. شکل‌های زیر، پاسخ دینامیکی را در ۴۰ طول دوره زمانی نشان می‌دهند. اثر شلاق چرمی بوضوح در این شکل‌ها قابل مشاهده است. نرخ سفارش برای هر رده پایین دستی برابر با نرخ تقاضای رده بالادستی است. با توجه به شکل ورودی رده‌های مختلف دیده می‌شود که از رده‌های پایین دستی به سمت رده‌های بالادستی میزان اختلاف تقاضای رده با ورودی کنترلی بیشتر می‌شود، اما در نهایت همگی به مقدار حالت ماندگار خواهند رسید.

استفاده از بخش توقیف حرکت، اثر شلاق چرمی و اثر بد نامعینی‌های سیستم را کاهش می‌دهد. تغییرات تقاضای محصول از سوی مشتری در جلوی زنجیره تامین به عقب زنجیره تامین به نوسانات بیشتر در تقاضا برای رده‌ها تبدیل می‌شود. منفی شدن علامت سفارش انباشته نیز به معنای کاهش پیدا کردن نرخ ارسال کالا از رده بالادستی برای رده پایین دستی است.



شکل (۵-۱۷) خروجی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین تحت کنترل پیش‌بین متمرکز در برابر نرخ تقاضای پالسی با استفاده از بخش توقیف حرکت



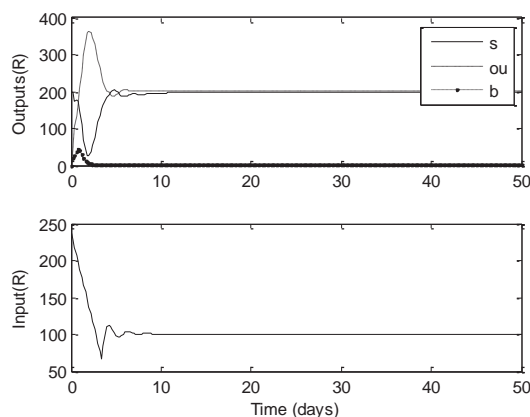
شکل (۵-۱۸) ورودی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین تحت کنترل پیش‌بین متمرکز در برابر نرخ تقاضای پالسی با استفاده از بخش توقیف حرکت

همان‌طور که دیده می‌شود، مقادیر حالت ماندگار سفارش‌های برآورده نشده و ورودی هم برابر با تقاضای نهایی است. اما به هر حال این نوع کنترل‌کننده متمرکز با دلایل ذکر شده در فصل‌های قبل برای پیاده‌سازی مقیاس بزرگ مناسب نیست.

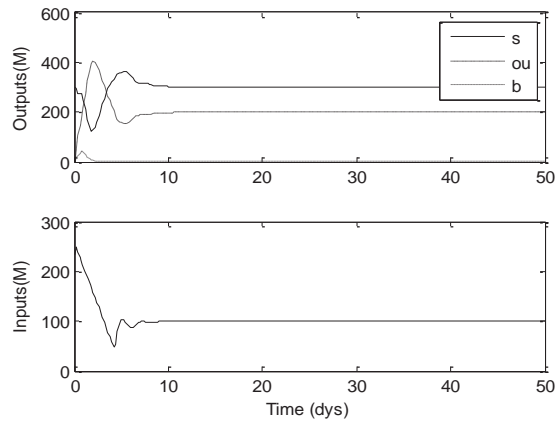
۵-۳-۲- کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز

برای پیاده‌سازی‌های مقیاس بزرگ سیستم مدیریت زنجیره طبق آنچه گفته شد از ساختارهای کنترلی غیرمتمرکز استفاده می‌شود. برای این هدف سیستم و تابعی معیار مرتبط با آن باید به صورت غیرمتمرکز تفکیک شوند. در اینجا ابتدا هر سه رده زنجیره تامین تفکیک شده و به صورت مجزا شبیه‌سازی می‌شوند. این بدین معناست که هر کدام از این رده‌ها می‌توانند به تنهایی و به صورت محلی نسبت به تحریک تقاضا پاسخ کنترلی منحصر بفردی از خود نشان دهند.

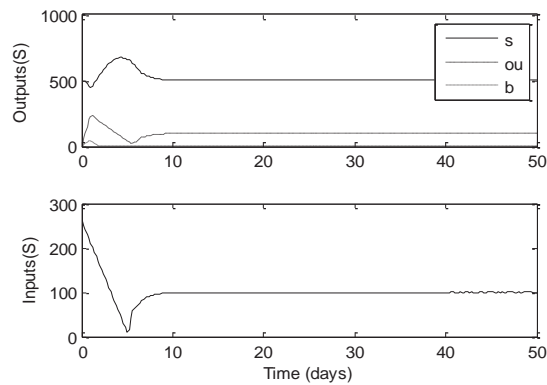
شکل‌های (۵-۱۹) تا (۵-۲۰) با مفروضات قبلی داده‌های مسئله (بخش قبل) به ترتیب پاسخ‌های دینامیکی زیرسیستم‌های خرده‌فروش، تولید و تامین به تحریک نرخ تقاضای ثابت ۱۰۰ واحد کالا در روز هستند. همان‌طور که دیده می‌شود عمل کنترل محلی به خوبی قابل پیاده‌سازی است.



شکل (۵-۱۹) پاسخ دینامیکی زیرسیستم خرده‌فروشی با استفاده از کنترل پیش‌بین محلی تحت نرخ تقاضای ثابت ۱۰۰ واحد کالا در روز



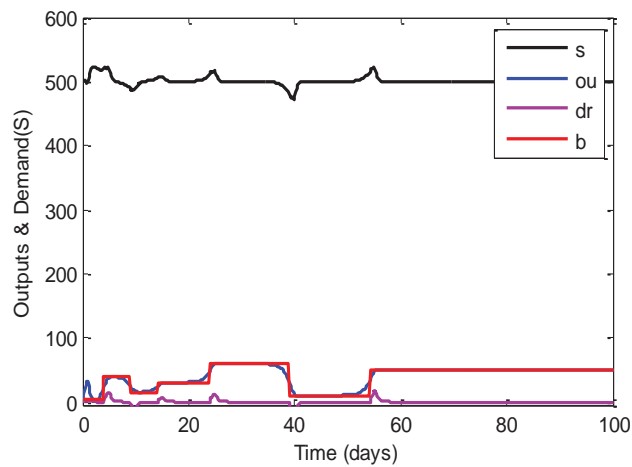
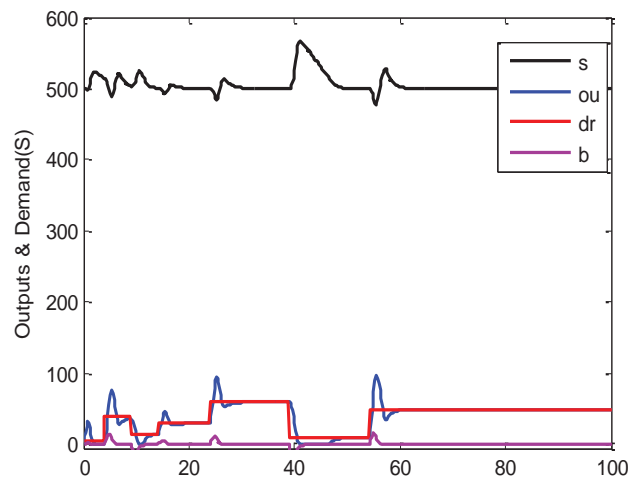
شکل (۲۰-۵) پاسخ دینامیکی زیرسیستم تولید با استفاده از کنترل پیش‌بین محلی تحت نرخ تقاضای ثابت ۱۰۰ واحد کالا در روز



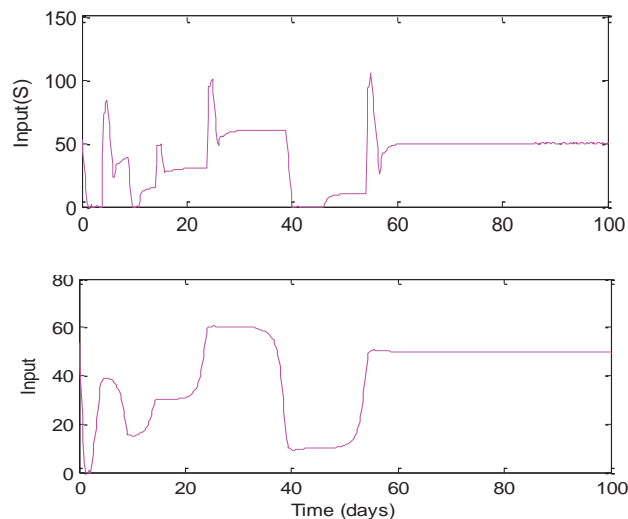
شکل (۲۱-۵) پاسخ دینامیکی زیرسیستم تامین با استفاده از کنترل پیش‌بین محلی تحت نرخ تقاضای ثابت ۱۰۰ واحد کالا در روز

سپس زیرسیستم تفکیک شده‌ی تامین‌کننده رابطه (۴-۴۵) و تابعی معیار آن (۴-۴۶) برای بررسی جزئی‌تر عملکرد یک زیرسیستم تک رده‌ای استفاده می‌شود. در این راستا یک کنترل‌کننده پیش‌بین محلی روی یک گره تامین برای پاسخ‌دهی مناسب،

ابتدا به یک نرخ تقاضای ضربانی با بررسی اثر Look Ahead و بعد به یک نرخ

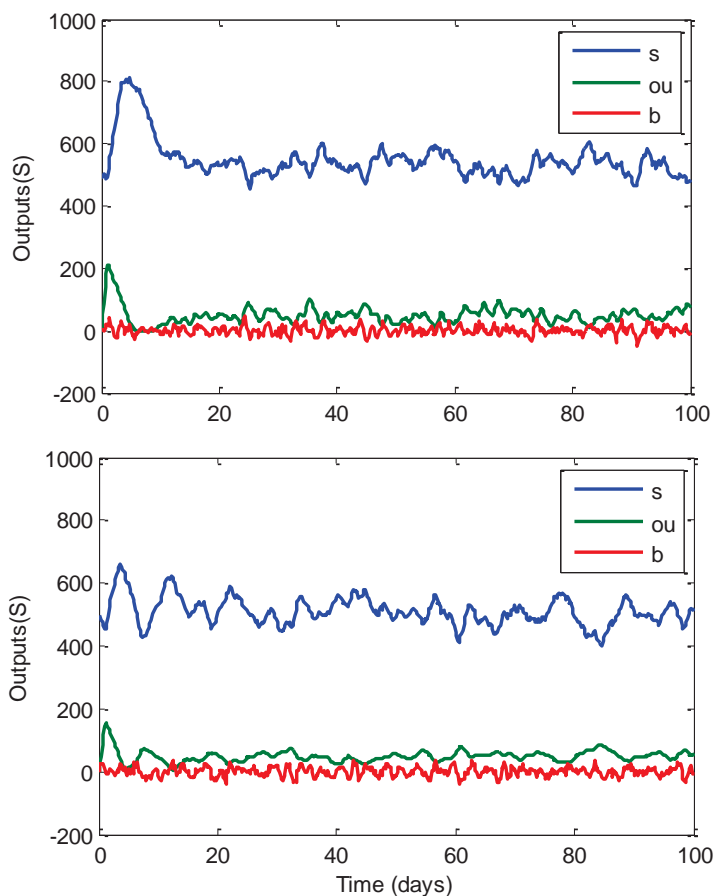


شکل (۵-۲۲) اثر Look Ahead روی خروجی‌های سیستم تحت کنترل پیش‌بین محلی در رده تامین (شکل بالایی: بدون اثر Look Ahead و شکل پایینی همراه با اثر Look Ahead



شکل (۵-۲۳) اثر **Look Ahead** روی ورودی‌های سیستم تحت کنترل پیش‌بین محلی در رده تامین

تقاضای تصادفی با توزیع نرمال با میانگین ۵۰ و انحراف استاندارد ۲۰ واحد کالا در روز، و با بررسی اثر توقیف حرکت به کار گرفته می‌شود. با مشاهده شکل‌های (۵-۲۲) و (۵-۲۳) مشخص می‌شود که اگر یک پیش‌بینی دقیق از تقاضای مشتری در طول افق در دسترس باشد و کل این پیش‌بینی‌ها در مسئله بهینه‌سازی کنترل‌کننده پیش‌بین در هر زمان نمونه‌برداری اعمال شود، سطوح موجودی و ورودی با تغییرات تقاضای مشتری نوسان کمتری دارند و این هم رضایت بیشتر مشتری را با هزینه عملیاتی کمتر به همراه دارد. اثر بهبود بخشی بکارگیری بخش توقیف حرکت با ثابت وزنی ۳ در پاسخ خروجی سیستم مدیریت زنجیره تامین نیز در شکل‌های (۵-۲۴) و (۵-۲۵) با نوسانات کوچک‌تری دیده می‌شود و نمودار صاف‌تری خواهیم داشت. در حقیقت میانگین خروجی‌ها به مقدار مطلوب (نقطه تنظیم) با اعمال این اثر نزدیک‌تر می‌شود. کماینکه میانگین انحراف سفارش برآورده نشده از مقدار مطلوب (تقاضا) در طول افق بدون اثر توقیف حرکت حدود ۰.۴۳۳۶ و با اعمال آن ۰.۲۰۶۶ شد.



شکل (۵-۲۴) اثر بخش توقیف حرکت روی خروجی‌های سیستم تحت کنترل پیش‌بین محلی در رده تامین (شکل بالایی: بدون اثر توقیف حرکت و شکل پایینی همراه با اثر توقیف حرکت

□ کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز مدیریت زنجیره تامین سه رده‌ای توام با چرخه‌های اطلاعاتی

با توجه به اینکه هرکدام از زیر سیستم‌های این زنجیره تامین می‌توانند به صورت محلی کنترل شوند و با زیر سیستم‌های همسایه برای به دست آوردن یک پاسخ همگرای

بهینه ارتباط برقرار کنند، ساختار کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با روش هماهنگی پیشنهاد شده بین گره‌های زنجیره تامین شبیه‌سازی می‌شود. همچنین با توجه به مزایای استفاده از اثر Look Ahead و بخش توقیف حرکت، هر دو این‌ها در شبیه‌سازی‌ها بررسی می‌شوند.

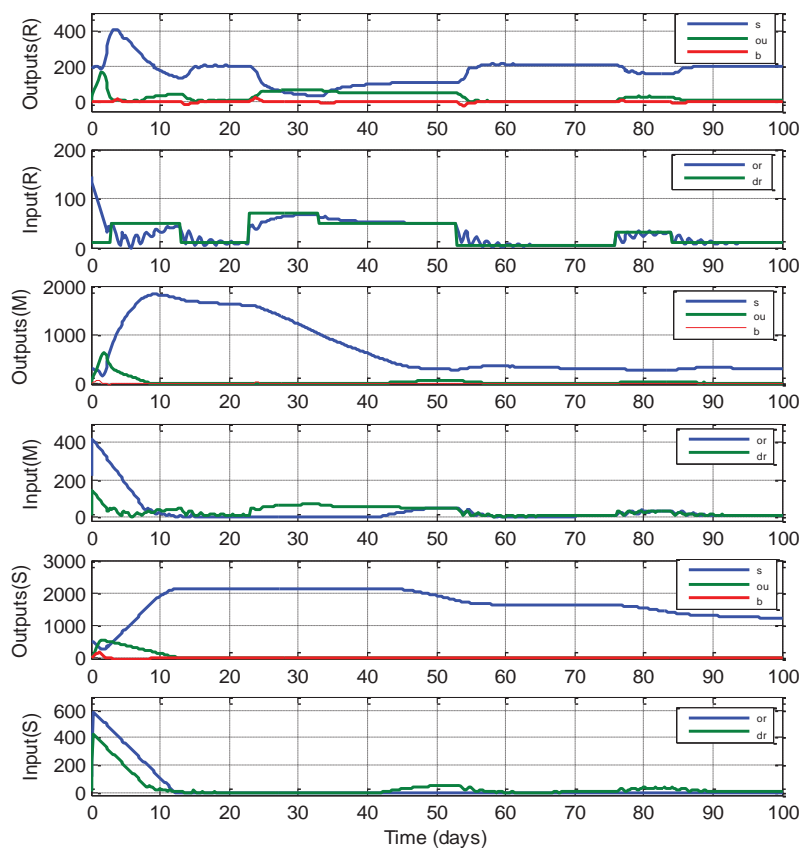
مطابق جدول (۶-۵) مقادیر داده‌شده این سیستم مدیریت زنجیره تامین سه رده‌ای - سه گرهی - تک محصولی فرض شده‌اند. افق پیش‌بینی و کنترل برای گره خرده‌فروش به ترتیب ۱۳ و ۵ واحد زمانی، برای گره تولید به ترتیب ۳۵ و ۱۵ واحد زمانی، برای گره تامین به ترتیب ۳۰ و ۵ واحد زمانی فرض می‌شوند. تاخیرهای خط لوله‌ای معادل یک روز و تاخیر مرتبه اول نیز با ثابت ۰.۵ فرض می‌شوند.

جدول (۶-۵) داده‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه اطلاعاتی ۲

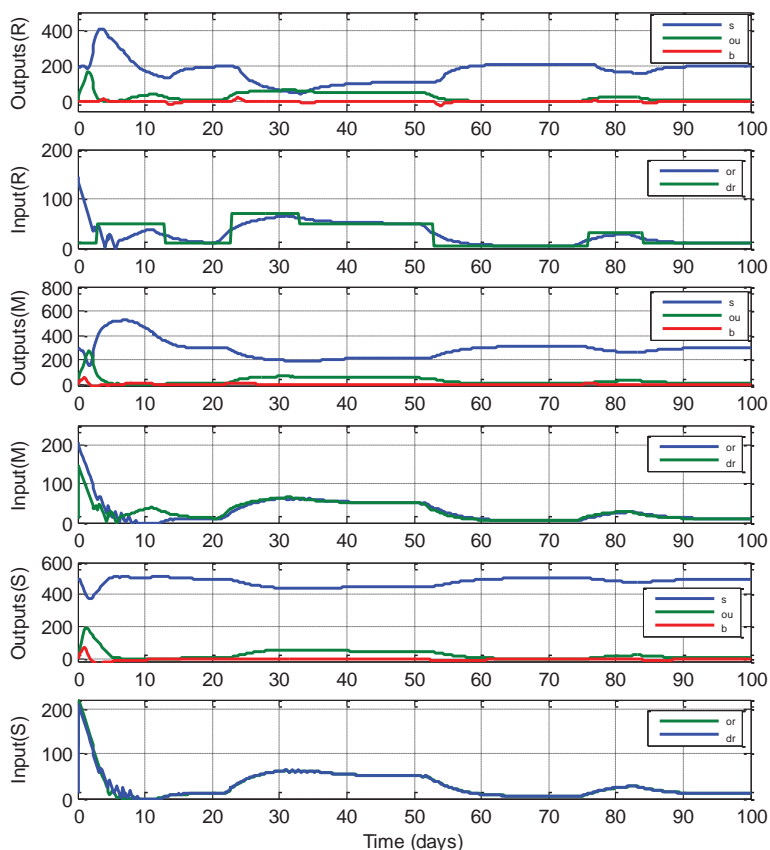
خرده فروش	تولیدکننده	تامین‌کننده	
۵۰۰	۲۰۰۰	۲۵۰۰	سطح موجودی حداکثر
۱۰۰	۵۰۰	۹۰۰	سطح سفارش برآورده‌نشده حداکثر
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	سطح سفارش انباشته‌شده حداکثر
۲۰۰	۳۰۰	۵۰۰	نقطه تنظیم موجودی محصول
۳	۱	۱	W_s
۳	۱	۱	W_{ou}
۱	۱	۲	W_u
۲	۵	۱	$W_{\delta u}$
۲۰۰	۳۰۰	۵۰۰	سطح موجودی اولیه

این سیستم مدیریت زنجیره تامین با یک تقاضای پالسی (ضربانی) که تغییرات مداوم تقاضا را به همراه دارد، تحریک می‌شود. شکل (۵-۲۵) پاسخ‌های دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین به این تقاضا تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز بدون اثر

Look Ahead و همراه با اثر بخش توقیف حرکت، شکل (۵-۲۶) پاسخ‌های دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین به این تقاضا تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز همراه با اثر Look Ahead و بخش توقیف حرکت و در نهایت شکل (۵-۲۷) پاسخ‌های دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین به این تقاضا تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با اثر Look Ahead و بدون اثر بخش توقیف حرکت را در ۱۰۰ دوره زمانی نشان می‌دهند.



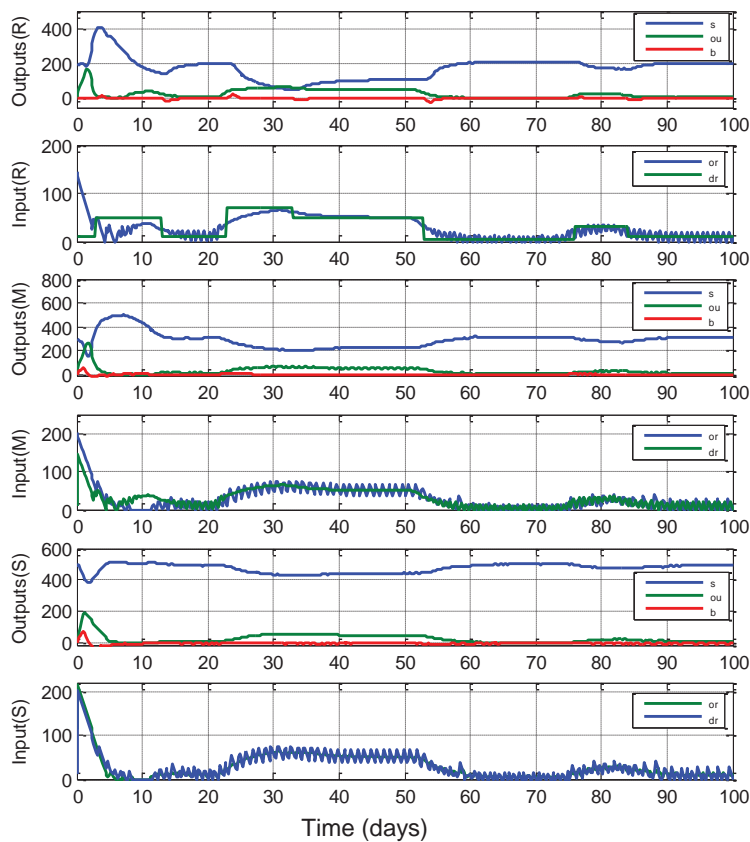
شکل (۵-۲۷) پاسخ دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز بدون اثر Look Ahead و همراه با اثر بخش توقیف حرکت



شکل (۵-۲۶) پاسخ دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با اثر **Look Ahead** و بخش توقیف حرکت

با مقایسه دو شکل (۵-۲۵) و (۵-۲۶) مشخص می‌شود که اگر پیش‌بینی تقاضا در آینده در دسترس باشد، سطوح موجودی با دقت بیشتری حفظ می‌شوند و انحراف از سطوح مطلوب موجودی وجود نخواهد داشت. همچنین پیک‌های کوچکتری در انحراف از سطوح موجودی مطلوب در طول افق بوجود آمده و نوسانات برآوردن

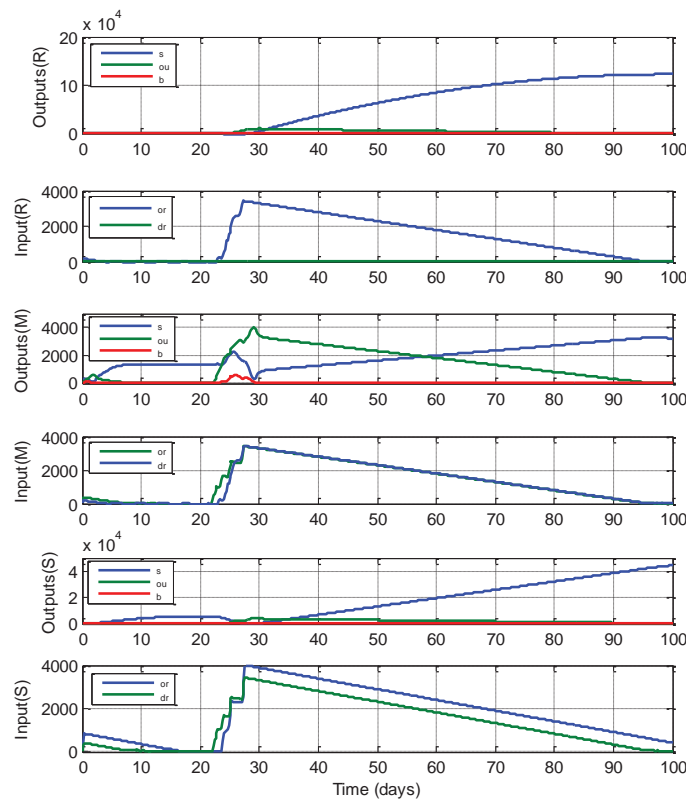
سفارش مشتری تا رسیدن به سفارش برآورده نشده مطلوب (یعنی مقدار حالت ماندگار تقاضای مشتری که در اینجا نرخ ۱۰ واحد کالا در روز است) کمتر شده و در نتیجه هزینه عملیاتی کلی سیستم مدیریت زنجیره تامین کاهش می‌یابد.



شکل (۵-۲۷) پاسخ دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با اثر **Look Ahead** و بدون بخش توقیف حرکت

طبق شکل (۵-۲۷) نیز چون با وجود پیش‌بینی تقاضا در طول افق، برای دورنشدن هر زیرسیستم از مقدار کنترلی‌اش در زمان نمونه‌برداری قبلی جریمه‌ای (بخش توقیف

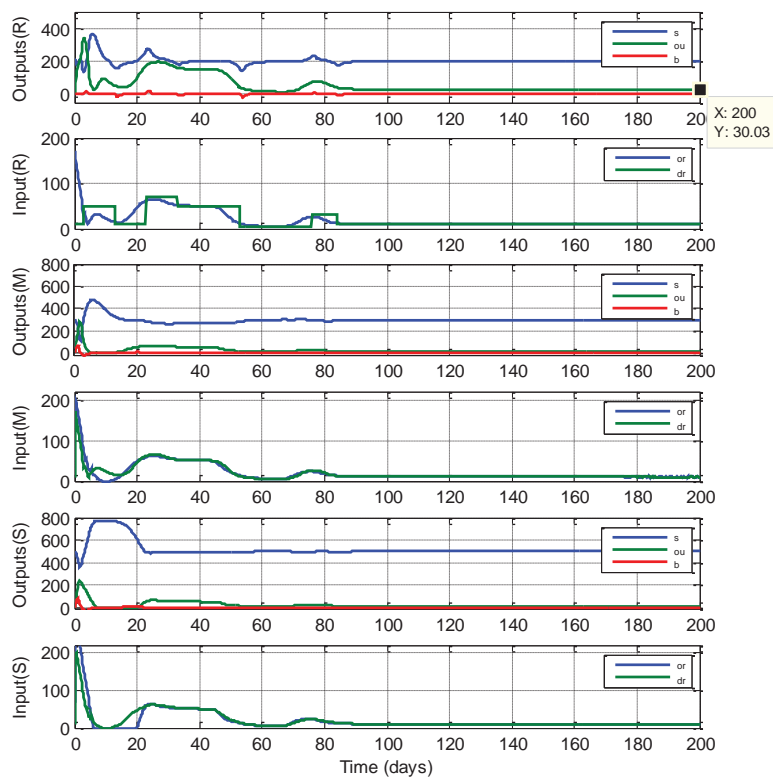
حرکت) اعمال نمی‌شود، پایداری سیستم به خوبی گارانتی نمی‌شود (نوسانات وجود دارند، اما در یک محدوده‌ی معین قرار دارند) و ممکن است در صورت انتخاب نامناسب افق و یا وزن‌های تابعی معیار و یا افزایش تاخیرها کاملاً از دست برود. در تمام این شبیه‌سازی اثر شلاق چرمی به وضوح از رده پایین دستی به بالادستی هویداست. بر اساس آن با تغییرات تقاضای مشتری، سفارش داده شده به هر زیرسیستم و تغییرات آن از رده پایین دستی به بالا دستی افزایش می‌یابد، اما مقدار نهایی همه سفارش‌ها (کنترل) برابر مقدار نهایی تقاضاست. با اثر بخش توقیف حرکت و Look Ahead اثر شلاق چرمی کمتر خواهد شد.



شکل (۵-۲۸) پاسخ دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی

تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با تاخیرهای انتقال $\tau_1 = 3, \tau_2 = 2$

در انتها نیز اثر افزایش تاخیرهای خط لوله‌ای (انتقال) بررسی می‌شود. تاخیرهای زمانی $\tau_1 = 3, \tau_2 = 2$ و $t_b = 0.5$ واحد زمانی در نظر گرفته می‌شوند. شکل (۵-۲۸)، نتیجه کنترل این سیستم مدیریت زنجیره تامین را نشان می‌دهد. به علت اینکه افزایش تاخیرها پایداری روش کنترل کلی را مختل کرد، طبق روش افق نامحدود باید افق پیش‌بینی را برای تضمین پایداری افزایش داد که این باعث بالارفتن هزینه عملیاتی می‌شود. افق پیش‌بینی و کنترل برای گره خرده‌فروش به ترتیب ۳۰ و ۵ واحد زمانی، برای گره تولید به ترتیب ۵۰ و ۱۰ واحد زمانی، برای گره تامین به ترتیب ۵۰ و ۱۰ واحد زمانی فرض می‌شوند.




شکل (۵-۲۹) پاسخ دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با تاخیرهای انتقال با $\tau_1 = 3, \tau_2 = 2$ با افزایش افق‌ها

طبق شکل (۵-۲۹) سطوح موجودی (با صرف یک هزینه بالاتر از حد معمول به سبب افزایش افق) حفظ می‌شوند و مقادیر سفارش نهایی در همه رده‌ها نیز به سبب اینکه $\tau_2 = 2$ است، سه برابر مقدار تقاضای نهایی یعنی ۳۰ واحد کالا در روز می‌شود. مشاهده می‌شود که پاسخ‌های دینامیکی در برخی رده‌ها از پاسخ‌های دینامیکی شبیه‌سازی‌های قبلی (تاخیر انتقال برابر با یک) هم بهتر شده است. این به علت افزایش افق است و با انتخاب این افق‌ها برای مسئله قبل نیز پاسخی به مراتب صاف‌تر و بهتر از این مسئله حاصل خواهد شد. در کل هر چه افق پیش‌بینی بلندتر باشد میزان نوسان‌های پاسخ دینامیکی کمتر و هر چه افق کنترل بلندتر باشد زمان نشست کاهش می‌یابد، اما به هر حال با افزایش افق میزان محاسبات یا به عبارتی بار محاسباتی مسئله و هزینه عملیاتی افزایش می‌یابد.

۵-۴- افق پیش‌رو

در کنترل سیستم مدیریت زنجیره تامین متوالی بدون چرخه‌های اطلاعاتی نیز همانند روش بکارگرفته شده در این کتاب در مورد سیستم مدیریت زنجیره تامین با چرخه‌های اطلاعاتی می‌توان از یک روش هماهنگی حل همزمان مشابه استفاده کرد. در باب کنترل پیش‌بین سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین، روش‌های هماهنگ‌سازی همزمان کنترل‌کننده‌های محلی همانند بهینه‌سازی NASH که هماهنگ‌سازی این کنترل‌کننده‌ها در حالتی است که ظرفیت سیستم اجازه می‌دهد تا تبادل همزمان میان اطلاعات کنترل‌کننده‌های محلی صورت پذیرد، مهم‌ترین زمینه باز تحقیقاتی است. در این کتاب فرض بر این بود که گره‌های موجود در یک رده در یک مقیاس مکانی واحد هستند و فاصله زیاد مسافتی بین آن‌ها وجود ندارد. اما اگر گره‌های رده‌ها نیز از یکدیگر دور باشند روش کنترل محلی را باید برای تک تک این گره‌ها به صورت جداگانه به کاربرد که، این خود بار محاسباتی را افزایش داده و میزان نوسانات پاسخ نیز افزایش پیدا می‌کند. اما به هر حال این روش عملی‌تر بوده و دارای خطاهای تخمین و هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمتری است. همچنین به علت ابعاد کم زیرسیستم‌های

محلی ریسک خطا پایین‌تر است. در یک ایده دیگر اگر در سیستم مدیریت زنجیره تامین در هر رده چندین عامل (گره) وجود داشته باشد مثلاً در در سیستم مدیریت زنجیره تامین توام با چرخه‌های اطلاعاتی رده تامین خود دارای چند عامل باشد (مانند تامین‌کننده‌های DELL که شامل سامسونگ و میکرون و اینتل است) مسئله تصمیم پیچیده‌تر می‌شود چراکه نرخ‌های بروزرسانی عوامل مختلف در یک رده عموماً متفاوت هستند (در این کتاب نرخ‌های بروز رسانی برای سیستم مدیریت زنجیره تامین بدون چرخه‌های اطلاعاتی یکسان در نظر گرفته شده بودند) و باید یک بسط مناسب از روش‌های انجام شده را تحت شرایط کاری ناهمزمان انجام داد. زمینه روش‌های پایدارسازی محلی این نوع سیستم‌ها در مبحث پایداری نیز موضوع جالبی است. در باب مدل‌سازی تقاضای روش‌های فازی از روش‌های مرسوم امروزی هستند که می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند. راهکارهای بسیاری نیز در باب مقاوم‌سازی کنترلی سیستم‌های مقیاس بزرگ مطرح هستند. در سیستم مدیریت زنجیره تامین می‌توان نامعینی‌های اعمال شده روی تقاضای مشتری و همچنین تاخیرهای انتقال را مدل کرده و روش‌های مقاوم‌سازی مرسوم را در مورد آن‌ها به کار گرفت.



**جمع‌بندی و خلاصه‌ای
از
مطالب کتاب**



در مجموع با توجه به مطالب بیان شده، سیستم مدیریت زنجیره تامین به صورت برهم‌کنش و دینامیک‌های یک شبکه تقاضا با زیرسیستم‌های نمونه‌ای مربوط به مراحل شامل فروشنده‌های مواد خام، تولید (کارخانه) و سیستم‌های مونتاژ و مراکز توزیع، تعریف می‌شود. طراحی عملیاتی و کنترل مستقیم شبکه دراصل بوسیله روش‌های گوناگونی چون مدل‌های تحلیلی قطعی، مدل‌های تحلیلی تصادفی و مدل‌های شبیه‌سازی جفت شده با معیارهای بهینه‌سازی مطلوب و اندازه‌گیری‌های عملکرد شبکه، مشخص می‌شود. معمولاً ارزش شبکه عملیاتی، سطح موجودی میانگین و سطح سرویس مشتری (ارضای نرخ سفارش‌های مشتری) اندازه‌گیری‌های عملکرد بکاربرده شده هستند. در اغلب زنجیره‌های تامین، هدف ما تنظیم متغیرهای تصمیم برای بیشینه‌کردن رضایت مشتری با کمترین هزینه عملیاتی است. زیرسیستم‌های نمونه شامل واحدهای فروشنده‌های مواد خام، تولید و مونتاژ و توزیع و 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 تنظیم‌شده دارند که در کنترل این سیستم باید برآورده شوند و در برابر هرگونه دستور مشتری، این سطح موجودی کالا باید حفظ شود.

به طور کلی به چند دلیل روش کنترل پیش‌بین، یک روش کنترلی سازگار با سیستم مدیریت زنجیره تامین به نظر می‌رسد:

۱. پیش‌بینی تقاضا (بکارگیری مدل‌های پیش‌بینی اغتشاش اندازه‌گیری شده) و مقادیر کالایی که باید برای برآورده‌کردن این تقاضا بین گره‌های زنجیره تامین حمل و نقل شود، فاکتورهای اساسی در کنترل سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین هستند (روند پیش‌بینی)،

۲. سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین غالباً دارای تاخیرهای زمانی انتقال هستند،

۳. به دلیل اعمال قیدهای ظرفیت در حل مسئله بهینه‌سازی.

نوعاً کنترل‌کننده‌های پیش‌بین در مدل متمرکز پیاده‌سازی می‌شوند. در این حالت سیستم کلی مدل شده و همه ورودی‌های کنترلی در یک مسئله بهینه‌سازی محاسبه می‌شوند. بر این اساس در پیاده‌سازی‌های روش کنترل پیش‌بین در این کتاب روی دو مدلی که از سیستم مدیریت زنجیره تامین در نظر گرفته شده است برای زمانی که گره‌های زنجیره تامین خیلی از هم دور نیستند، روش متمرکز قبل از روش غیرمتمرکز شبیه‌سازی شد. در کاربردهای مقیاس بزرگ مانند سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین گاهاً ضروری است که نظریه‌های کنترلی غیرمتمرکز یا توزیع شده باشند، بدین معنی که ورودی‌های کنترل محلی با استفاده از اندازه‌گیری‌های محلی و مدل‌های مرتبه کاهش یافته از دینامیک‌های محلی محاسبه می‌شوند. مزیت اصلی کنترل غیرمتمرکز کاهش بار محاسباتی و پیچیدگی محاسباتی است، چرا که برای سیستم‌های مقیاس بزرگ با کنترل پیش‌بین متمرکز، محاسبه آنلاین ورودی ابعاد بالا بسیار پیچیده و نامناسب، غیرعملی و غیرانعطاف‌پذیر به نظر می‌رسد و مشکلات کنترل متمرکز همچون پیچیدگی‌های تعمیر و نگهداری به علت ابعاد بالا و یک ریسک بالا از خطا به علت طبیعت متمرکز آن‌ها را به همراه ندارد.

چون در حل مسائل این کتاب، افق پیش‌بینی به اندازه کافی بزرگ در نظر 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 نقطه تعادل مرجع خواهیم رسید. همچنین به سبب بررسی تنوع بیشتری از سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین در شبیه‌سازی‌ها، شرایط مسئله با تغییر وزن‌ها، شرایط اولیه و سطوح مطلوب تنظیم تغییر داده شدند.

بطور 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 برای سیستم‌های مقیاس بزرگ با کنترل پیش‌بین متمرکز، محاسبه آنلاین ورودی ابعاد بالا بسیار پیچیده و نامناسب، غیرعملی و غیرانعطاف‌پذیر به نظر می‌رسد. از شبیه‌سازی مشخص می‌شود که کنترل پیش‌بین متمرکز برای هر دو نوع مدل

بکارگرفته شده (چه بدون چرخه‌های اطلاعاتی و چه با وجود آن)، دارای بار محاسباتی بیشتری نسبت به نوع غیرمتمرکز است، اما دارای سرعت بیشتر و انحرافات کمتری در پاسخ مطلوب می‌باشد. دلیل آن هم این است که در کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز تنها اولین آرایه کنترلی حاصل از رده پایین دستی به عنوان اغتشاش ورودی به رده 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 (بخش توقیف حرکت) در نوع غیرمتمرکز نمود بیشتری دارد، چون این اثر در نوسانات شدید تقاضا اجازه نمی‌دهد ورودی تغییرات شدید داشته باشد. در حقیقت اثر بیشتر بخش توقیف حرکت در نوع کنترلی متمرکز روی پایین آوردن هزینه عملیاتی است (چون تغییرات ورودی کم می‌شود، هزینه کلی تابعی معیار کم می‌شود). همچنین خطای انتقال اطلاعات بین رده‌ها با تاخیر انتقال که نامعینی مدل سیستم به شمار می‌رود، در این نوع کنترلی بسیار کمتر است.

همچنین بر اساس شبیه‌سازی‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین بدون چرخه‌های اطلاعاتی مشاهده می‌شود که زیاد شدن طبقه‌ها و رده‌ها و تاخیر انتقال در شبکه زنجیره تامین، زمان نشست و نوسان و پیک انحراف را بالا می‌برند که این نتیجه به مدل سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی و همچنین نوع متمرکز کنترل پیش‌بین هم قابل تعمیم است. همچنین تقویت انحرافات برای گره‌های بالادستی به علت تعدد بیشتر گره‌های پایین دستی است که بوسیله گره‌های بالادستی به خدمت گرفته می‌شوند. برای حل این مشکلات و برطرف کردن کندی پاسخ از کنترل‌کننده‌های کمکی فیدبک خطی در یک ساختار کنترلی دولایه برای مدل اول استفاده شد. با استفاده از این ساختار کنترل موجودی ثانویه مشخص می‌شود که شاخص عملکرد (هزینه تابعی معیار) کنترل دو لایه برای کل دوره‌های زمانی به طور قابل توجهی پایین‌تر است. همچنین افق کنترل بزرگتری برای دستیابی کنترل تک لایه به یک عملکرد قابل قیاس با روش دولایه نیاز است (افزایش افق کنترل و کنترل ثانویه، هر دو زمان نشست را کم می‌کند).

همچنین نشان داده شد که استفاده از بخش توقیف حرکت در هنگام تصادفی بودن تقاضا، در دستیابی به پاسخ مناسب بسیار موثر است. با اینکه کنترل پیش‌بین متمرکز در مقابل افزایش تاخیر انتقال پاسخ مناسبتری دارد، اما از نظر عملیاتی مشکل و دارای بار محاسباتی بیشتری است.

از یک مدل مبتنی بر نظریه بازی آشامیدنی گسسته شده هم برای مدل کردن چرخه‌های اطلاعاتی بین رده‌ها استفاده می‌شود. در این مدل، بین رده‌های متوالی دو نوع جریان فرآیند یعنی جریان اطلاعات و جریان مواد وجود دارد. همچنین اثر شلاق چرمی در طول شبیه‌سازی‌ها مورد بررسی قرار گرفت. 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. تعدد گره‌ها از پایین به بالا نیز این اثر را تقویت می‌کند. در کنترل غیرمتمرکز این مدل همانند مدل اول، هر زیرسیستم به صورت محلی خطی‌مشی خودش را بهینه می‌کند و با دیگر خط‌مشی‌های زیرسیستم‌های جفت شده با خودش ارتباط برقرار می‌کند. به علت اینکه در روش هماهنگی رده‌ها در مدل چرخه‌های اطلاعاتی باید مقدار کنترلی هر رده در زمان نمونه‌برداری قبلی را به عنوان اغتشاش ورودی به رده همسایه‌اش برای بهینه‌سازی زمان حال ارسال کرد، لذا اعمال بخش توقیف یکی از ابزار تضمین پایداری است. همچنین از بخش توقیف حرکت برای مقابله با اثر تغییرات ناگهانی تقاضا روی پیک ورودی کنترلی استفاده می‌شود که، مقاومت سیستم کنترلی را افزایش می‌دهد. در شبیه‌سازی‌ها با نرخ تقاضای ثابت و پالسی، استفاده از بخش توقیف حرکت، اثر شلاق چرمی و اثر بد نامعینی‌های سیستم و پیک ورودی را کاهش می‌دهد. همچنین در کلیه شبیه‌سازی‌های این کتاب با اثر Look Ahead در هر زمان نمونه‌برداری مقادیر مرجع و اغتشاش‌های اندازه‌گیری شده‌ی پیش‌بینی شده برای تمام طول افق (یا برابر با پیش‌بینی مقدار آن‌ها تا چند گام جلوتر) را در نظر گرفته شدند و به سبب وجود یک پیش‌بینی مناسب از تقاضای مشتری، سطوح موجودی کالا و سفارش کالا، پاسخ سیستم بهبود یافت و اثر بخش توقیف حرکت را تکمیل کرد.



مراجع



- [1] Hugos, M. "Essential of Supply Chain Management". Wiley, 2006.
- [2] Cook, R. L., and Rogowski, R. A. "Applying JIT Principles to Continuous Process Manufacturing Supply Chains". Proceedings and Inventory Manufacturing Journal, pp. 12-17, 1996.
- [3] Ehrhardt, R. "Finished Goods Management for JIT Production: New Models for Analysis". Int. J. Comp. Int. Manuf., Vol. 11, Issue 3, pp. 217-225, 1998.
- [4] Kim, G. C., and Takeda, E., "The JIT Philosophy is the Culture in Japan". Prod. & Inv. Man. J., pp. 47-51, 1996.
- [5] Riddalls, C. E., Bennetty, S., and Tipi, N. S. "Modelling the Dynamics of Supply Chains". International Journal of Systems Science, Vol. 31, Issue 8, pp. 969-976.
- [6] Arzu Akyuz, G., Erman Erkan, T. "Supply Chain Performance Measurement". International Journal of Production Research, Vol. 48, Issue 17, pp. 5137-5155, 2010.
- [7] Forrester, J. W. "World Dynamics". MIT press.
- [8] Beamon, B., "Supply Chain Design and Analysis: Models and Methods". International Journal of Production Economics, Vol. 55, pp. 281-94, 1998.
- [9] Blanchard, D. "Supply Chain Management". John Wiley and Sons, 2010.
- [10] Simon, H. "On the Application of Servomechanism Theory in the Study of Production Control". Econometrica, Vol. 20, pp. 247-68, 1952.
- [11] Edghill, J. S., "The Application of Aggregate Industrial Dynamic Techniques to Manufacturing Systems". Ph.D. Thesis, University of Wales College of Cardiff, 1990.
- [12] Towill, D. R., "System Dynamics Background, Methodology and Applications". Comp. & Con. Eng. J., pp. 261-268, Dec. 1993.
- [13] Towill, D. R., "Industrial Dynamics Modelling-not so Much a Subject, More a Way of Life". Measurement Control, Vol. 27, pp. 226-231, 1994.
- [14] Berry, D., Naim, M. M., and Towill, D. R., Business Process Re-engineering an Electronic Products Supply Chain". IEE Proceedings of Sci. Meas. Tech., Vol. 142, Issue 5, pp. 395-403, 1995.

- [15] Towill, D. R., and Delvecchio, A., "The Application of Filter Theory to the Study of Supply Chain Dynamics". *Production Planning & Control*, Vol. 5, Issue 1, pp. 82-96, 1994.
- [16] Lewis, J.C., Naim, M. M., and Towill, D. R., "Re-engineering the Supply Chain Interface an Integrated Approach". 2nd International Conference on Logistics, Nottingham, pp. 329-335, 1995.
- [17] Hafeez, K., Griffiths, M., Griffiths, J., and Naim, M. M., "Systems Design Echelon Steel Industry Supply Chain". *International Journal of Production Economica*, Vol. 45, pp. 121-130, 1996.
- [18] Lam, C.Y., Ip, W.H. "A Customer Satisfaction Inventory Model for Supply Chain Integration". *Expert Systems with Applications*, In Press, Uncorrected Proof, Available online 3 Aug. 2010.
- [19] Delvecchio, A., and Towill, D. R. "The Use of Expert Systems in the Design of Multi-echelon Production Distribution Systems". *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, Vol. 3, Issue 3, pp. 141-158, 1996.
- [20] Liu, R., Kumar, A., van der Aalst, W. "A Formal Modeling Approach for Supply Chain Event Management". *Decision Support Systems*, Vol. 43, Issue 3, pp. 761-778, April 2007.
- [21] Towill, D. R. "Supply Chain Dynamics". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 4, Issue 4, pp. 197-208, 1991.
- [22] Wikner, J., Towill, D. R. and Naim, M. M. "Smoothing Supply Chain Dynamics". *International Journal & Production Economics*, Vol. 22, pp. 231-248, 1991.
- [23] Sodhi, M., Tang, C. "Modeling Supply Chain Planning under Demand Uncertainty Using Stochastic Programming: A Survey Motivated by Asset Liability Management". *International Journal of Production Economics*, Vol. 121, Issue 2, pp. 728-738, Oct. 2009.
- [24] Longo, F., Mirabelli, G. "An Advanced Supply Chain Management Tool Based on Modeling and Simulation". *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 54, Issue 3, pp. 570-588, April 2008.
- [25] Evans, G., and Naim, M. M. "The Dynamics of Capacity Constrained Supply Chains". *Production and Operations Management*, pp. 28-35, 1994.

- [26] Porter, B., and Taylor, F. "Modal Control of Production Inventory Systems". *International Journal of Systems Science*, Vol. 3, Issue 3, pp. 325-331, 1972.
- [27] Porter, B., and Bradshaw, A. "Modal Control of Production Inventory Systems Using Piecewise Constant Control Policies". *International Journal of Systems Science*, Vol. 5, Issue 8, pp. 733-742, 1974.
- [28] Bradshaw, A., and Daintith, D. "Synthesis of Control Policies for Cascaded Production Inventory Systems". *International Journal of Systems Science*, Vol. 7, Issue 9, pp. 1053-1070, 1976.
- [29] Bradshaw, A., and Erol, Y. "Control Policies for Production Inventory Systems with Bounded Input". *International Journal of Systems Science*, Vol. 11, Issue 8, pp. 947-959, 1980.
- [30] Burns, J. F., and Sivazlian, B. D. "Dynamic Analysis of Multi Echelon Supply Systems". *Comput. & Ind. Eng.*, Vol. 2, pp. 181-193, 1978.
- [31] Elmaghraby, S. E. "The Design of Production Systems". New York: Reinhold, 1966.
- [32] Tzafestas, S., and Kapsiotis, G. "Coordinated Control of Manufacturing/Supply Chains Using Multi Level Techniques". *Comp. Int. Manuf. Systems*, Vol. 7, Issue 3, pp. 206-212, 1994.
- [33] Kassmann, D., Allgor, R. "Supply chain design, management and optimization". *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 21, pp. 101-106, 2006.
- [34] Christy, D. P., Grout, J. R. "Safeguarding Supply Chain Relationships". *International Journal of Production Economics*, Vol. 36, pp. 233-242, 1994.
- [35] Cachon, G. P., Zipkin, P. H. "Competitive and Cooperative Inventory Policies in a Two Stage Supply Chain". *Foqua school of Business, Duke University*, 1997.
- [36] Ho, Y. C., and Cao, X. R. "Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic". Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [37] Cao, X. R., "A Comparison of the Dynamics of Continuous and Discrete Event Systems. *Discrete Event Dynamic Systems, Analysing Complexity and Performance in the Modern World*". New York: IEEE Press, 1992.
- [38] Chopra, S., Meindl, P. "Supply Chain Management". Pearson Education, 2008.

- [39] Chandra, P. "A Dynamic Distribution Model with Warehouse and Customer Replenishment Requirements". *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 44, pp. 681-692, 1993.
- [40] Ishi, K., Takahashi, K., and Muramatsu, R. "Integrated Production, Inventory and Distribution Systems". *International Journal of Production Research*, Vol. 26, Issue 3, pp. 473-482, 1988.
- [41] Cohen, M. A., and Lee, H. L. "Resource Deployment Analysis of Global Manufacturing and Distribution Networks". *J. Mfg. Op. Mgt.*, Vol. 2, pp. 81-104, 1989.
- [42] Williams, J. F. "A Hybrid Algorithm for Simultaneous Scheduling of Production and Distribution in Multi Echelon Structures". *Management Science*, Vol. 29, Issue 1, pp. 77-92, 1983.
- [43] Altiok, T., and Raghav, R., "Multi Stage, Pull Type Production/Inventory Systems". *IEE Transactions*, Vol. 27, pp. 190-200, 1995.
- [44] Pyke, D. F., and Cohen, M. A. "Performance Characteristics of Stochastic Integrated Production Distribution Systems". *European Journal of Operational Research*, Vol. 68, pp. 23-48, 1993.
- [45] Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi, E., "Managing The Supply Chain". McGraw Hill, 2004.
- [46] Ortega, M., Lin, L. "Control Theory Applications to the Production Inventory Problem: A Review". *International Journal of Production Research*, Vol. 42, pp. 2303-22, 2004.
- [47] Bertsekas, D. "Dynamic programming and optimal control". Athena Scientific, 2000.
- [48] Bellman, R. "Dynamic programming". New Jersey, NJ: Princeton University Press, 1957.
- [49] Kwon, W. H., Han, S. "Receding Horizon Control". Springer , 2005.
- [50] Zhou, K., Doyle, J., Glover, K. "Robust and Optimal Control". New Jersey, NJ: Prentice Hall, 1995.
- [51] Bertsekas, D., Tsitsiklis, J. "Neuro Dynamic Programming". Belmont, MA: Athena Scientific, 1996.
- [52] Vassian, J. "Application of Discrete Variable Servo Theory to Inventory Control". *Operations Research*, Vol. 3, pp. 272-82, 1955.
- [53] Forrester, J. "Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers". *Harvard Business Review*, Vol. 36, pp. 37-66, 1958.

- [54] Forrester, J. "Industrial Dynamics". Cambridge, MA: MIT Press, 1961.
- [55] Barlas, Y., Yasarcan, H. "Goal Setting, Evaluation, Learning and Revision: A Dynamic Modeling Approach". Evaluation and Program Planning, Vol. 29, pp. 79–87, 2006.
- [56] Sterman, J. "Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World". New York, NY: McGraw-Hill, 2000.
- [57] Ansof, H., Slevin, D. "An Appreciation of Industrial Dynamics". Management Science, Vol. 14, pp. 91–106, 1968.
- [58] Towill, D. "Dynamic Analysis of an Inventory and Order Based Production Control System". International Journal of Production Research, Vol. 20, pp. 671–87, 1982.
- [59] Lalwani, C., Disney, S., Towill, D. "Controllable, Observable and Stable State Space Representations of a Generalized Order-up-to Policy". International Journal of Production Dynamics, Vol. 101, pp. 172–84, 2006.
- [60] Towill, D. "Industrial Dynamics Modeling of Supply Chains". Logistics Information Management, Vol. 9, pp. 43–56, 1996.
- [61] Towill, D., McCullen, P. "The Impact of Agile Manufacturing Programme on Supply Chain Dynamics". International Journal of Logistics Management, Vol. 10, Issue 1, pp. 83–96, 1999.
- [62] Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J., Simchi-Levi, D. "Quantifying the Bullwhip Effect in a Simple Supply Chain: The Impact of Forecasting, Lead Times, and Information". Management Science, Vol. 46, pp. 436–43, 2000.
- [63] Disney, S., Towill, D. "On the Bullwhip and Inventory Variance Produced by an Ordering Policy". Omega, Vol. 31, pp. 157–67, 2003.
- [64] Mentzer, J. "Supply Chain Management". Sage Publication, 2007.
- [65] Christopher, M. "Logistics and Supply Chain Management: Creating Value Added Networks". Financial Times Prentice Hall, 2005.
- [66] Agrell, P., Wikner, J. "An MCDM Framework for Dynamic Systems". International Journal of Production Economics, Vol. 45, pp. 279–92, 1996.
- [67] John, S., Naim, M. M., Towill, D. "Dynamic Analysis of a WIP Compensated Decision Support System". International Journal of Manufacturing System Design, Vol. 1, pp. 283–97, 1994.

- [68] Disney, S., Naim M. M., Towill, D. "Genetic Algorithm Optimization of a Class of Inventory Control Systems". *International Journal of Production Economics*, Vol. 68, pp. 259–78, 2000.
- [69] Riddalls, C., Bennett, S. "The Stability of Supply Chains". *International Journal of Production Research*, Vol. 40, pp. 459–75, 2002.
- [70] Bellman, R., Cooke, K. "Differential Difference Equations". New York, NY: Academic Press, 1963.
- [71] Warburton, R., Disney, S., Towill, D., Hodgson, J. "Further Insights into the Stability of Supply Chains". *International Journal of Production Research*, Vol. 42, pp. 639–48, 2004.
- [72] Zhou, L., Naim, M. M., Tang, O., Towill, D. "Dynamic Performance of a Hybrid Inventory System with a Kanban Policy in Remanufacturing Process". *Omega*, Vol. 34, pp. 585–98, 2006.
- [73] White, A. "Management of Inventory Using Control Theory". *International Journal of Technology Management*, Vol. 17, pp. 847–60, 1999.
- [74] Franklin, G., Powell, J., Workman, M. "Digital Control of Dynamic Systems". Menlo Park, CA: Addison-Wesley, 1998.
- [75] Disney, S., Towill, D. "Eliminating Inventory Drift in Supply Chains". *International Journal of Production Economics*, Vol. 93–94, pp. 331–44, 2005.
- [76] Disney, S., Towill D. "A Discrete Transfer Function Model to Determine the Dynamic Stability of a Vendor Managed Inventory Supply Chain". *International Journal of Production Research*, Vol. 40, pp.179–204, 2002.
- [77] Perea, E., Grossmann, I., Ydstie, E., Tahmassebi, T. "Dynamic Modeling and Classical Control Theory for Supply Chain Management". *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 24, pp. 1143–9, 2000.
- [78] Perea, E., Grossmann, I., Ydstie, E., Tahmassebi, T. "Dynamic Modeling and Decentralized Control of Supply Chains". *Industrial Engineering Chemistry Research*, Vol. 40, pp. 3369–83, 2001.
- [79] Lin, P., Wong, D., Jang, S., Shieh, S., Chu, J. "Controller Design and Reduction of Bullwhip for a Model Supply Chain System Using z-Transform Analysis". *Journal of Process Control*, Vol. 14, pp. 487–99, 2004.
- [80] Clark, A., Scarf, H. "Optimal Policies for a Multi Echelon Inventory Problem". *Management Science*, Vol. 6, pp. 475-90, 1960.

[81] Scarf, H. "The Optimality of (s, S) Policies for the Dynamic Inventory Problem". In: Proceedings of the First Stanford Symposium on Mathematical Methods in Social Sciences. Stanford, CA: Stanford University Press, 1960.

[82] Iglehart, D., "Optimality of (s, S) Policies in the Infinite Horizon Dynamic Inventory Problem". Management Science, Vol. 9, pp. 259-67, 1963.

[83] Hausman, W., Peterson, R. "Multiproduct Production Scheduling for Style Goods with Limited Capacity, Forecast Revisions and Terminal Delivery". Management Science, Vol. 18, pp. 370-83, 1972.

[84] Federgruen, A., Zipkin, P. "Computational Issues in an Infinite Horizon, Multi Echelon Inventory Model". Operations Research, Vol. 32, pp.818-36, 1984.

[85] Iglehart, D., Karlin, S. "Optimal Policy for Dynamic Inventory Process with Non Stationary Stochastic Demands". Studies in Applied Probability and Management Science. Stanford, CA: Stanford University Press, 1962.

[86] Song, J., Zipkin, P. "Inventory Control in a Fluctuating Demand Environment". Operations Research, Vol. 43, pp. 351-70, 1993.

[87] Sethi, S., Cheng, F. "Optimality of (s, S) Policies in Inventory Models with Markovian Demand". Operations Research, Vol. 45, pp. 931-9, 1997.

[88] Beyer, D., Sethi, S. "Average Cost Optimality in Inventory Models with Markovian Demands". Journal Optimization Theory Applications, Vol. 92, pp. 497-526, 1997.

[89] Bensoussan, A., Liu, R., Sethi, S. "Optimality of an (s, S) Policy with Compound Poisson and Diffusion Demands: A QVI Approach". SIAM Journal on Control and Optimization, Vol. 44, pp. 1650-76, 2006.

[90] Dong, L., Lee, H. "Optimal Policies and Approximations for a Serial Multi Echelon Inventory System with Time Correlated Demand". Operations Research, Vol. 51, pp. 969-80, 2003.

[91] Heath, D., Jackson, P. "Modeling the Evolution of Demand Forecasts with Application to Safety Stock Analysis in Production/Distribution Systems". IEE Transactions, Vol. 26, pp. 17-30, 1994.

- [92] Graves, S., Kletter, D., Hetzel, W. "A Dynamic Model for Requirements Planning with Application to Supply Chain Optimization". *Operations Research*, Vol. 46, pp. 35-49, 1998.
- [93] Gallego, G., Ozer, O. "Integrating Replenishment Decisions with Advance Order Information". *Management Science*, Vol. 47, pp. 1344-60, 2001.
- [94] Gallego, G., Ozer, O. "Optimal Replenishment Policies for Multi Echelon Inventory Problems under Advance Demand Information". *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol. 5, pp.157-75, 2003.
- [95] Ozer, O., Wei, W. "Inventory Control with Limited Capacity and Advance Demand Information". *Operations Research*, Vol. 52, pp. 988-1000, 2004.
- [96] Sethi, S., Yan, H., Zhang, H. "Peeling Layers of an Onion: A Periodic Review Inventory Model with Multiple Delivery Modes and Forecast Updates". *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 108, pp. 253-81, 2001.
- [97] Bensoussan, A., Crouhy, M., Proth, J. "Mathematical Theory of Production Planning". New York, NY: North-Holland, 1983.
- [98] Sethi, S., Yan, H., Zhang, H. "Inventory Models with Fixed Costs Multiple Delivery Modes, and Forecast Updates". *Operations Research*, Vol. 51, pp. 321-8, 2003.
- [99] Feng, Q., Gallego, G., Sethi, S., Yan, H., Zhang, H. "Periodic-review Inventory Model with Three Consecutive Delivery Modes and Forecast Updates". *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 124, pp. 137-55, 2005.
- [100] Simchi-Levi, D., Zhao, Y. "The Value of Information Sharing in a Two Stage Supply Chain with Production Capacity Constraints". *Naval Research Logistics*, Vol. 50, pp. 888-916, 2003.
- [101] Olsder, G., Suri, R. "Time Optimal Part Routing in a Manufacturing System with Failure Prone Machines". *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 1, pp. 722-7, 1980.
- [102] Fleming, W., Soner, H. "Controlled Markov Processes and Viscosity Solutions". New York: Springer, 1993.
- [103] [123]. Gharbi, A., Kenne, J. "Optimal Production Control Problem in Stochastic Multiple product Multiple Machine Manufacturing Systems". *IEE Transactions*, Vol. 35, pp. 941-52, 2003.

[104] Kenne, J., Gharbi, A. "Production Planning Problem in Manufacturing Systems with General Failure and Repair Time Distributions". *Production Planning and Control* Vol. 11, pp. 581-8, 2000.

[105] Sethi, S., Zhang, Q. "Hierarchical Production and Setup Scheduling in Stochastic Manufacturing Systems". *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 40, pp. 924-30, 1995.

[106] Gharbi, A., Kenne, J., Hajji, A. "Operational Level Based Policies in Production Rate Control of Unreliable Manufacturing Systems with Setups". *International Journal of Production Research*, Vol. 44, pp. 545-67, 2006.

[107] Feng, Y., Yan, H. "Optimal Production Control in a Discrete Manufacturing System with Unreliable Machines and Random Demands". *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 35, pp. 2280-96, 2000.

[108] Boukas, E., Liu, Z. "Manufacturing Systems with Random Breakdowns and Deteriorating Items". *Automatica*, Vol. 37, pp. 401-8, 2001.

[109] Sethi, S., Zhang, Q. "Hierarchical Decision Making in Stochastic Manufacturing Systems". Boston, Cambridge, MA: Birkhauser, 1994.

[110] Sethi, S., Yan, H., Zhang, H., Zhang, Q. "Optimal and Hierarchical Controls in Dynamic Stochastic Manufacturing Systems: A Survey". *Manufacturing & Service Operations Management*, Vol. 4, pp. 133-70, 2002.

[111] Samaratunga, C., Sethi, S., Zhou, X. "Computational Evaluation of Hierarchical Production Control Policies for Stochastic Manufacturing Systems". *Operations Research* Vol. 45, pp. 258-74, 1997.

[112] Keerthi, S., Gilbert, E. "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. 265-931, 1998.

[113] Morari, M., Lee, J. "Model Predictive Control: Past, Present, and Future". *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 23, pp. 667-82, 1999.

[114] Mayne, D., Rawlings, J., Rao, C., Scokaert, P. "Constrained Model Predictive Control: Stability and Optimality". *Automatica*, Vol. 36, pp. 789-814, 2000.

- [115] Wikner, J. "Continuous Time Dynamic Modeling of Variable Lead Times". *International Journal of Production Research*, Vol. 41, pp. 2787-98, 2003.
- [116] Kapsiotis, G., Tzafestas, S. "Decision Making for Inventory/Production Planning Using Model Based Predictive Control: Parallel and Distributed Computing in Engineering Systems". Amsterdam: Elsevier, pp. 551-6, 1992.
- [117] Tzafestas, S., Kapsiotis, G., Kyriannakis, E. "Model Based Predictive Control for Generalized Production Planning Problems". *Computers in Industry*, Vol. 34, pp. 201-10, 1997.
- [118] Perea, E., Ydstie, B., Grossmann, I. "A Model Predictive Control Strategy for Supply Chain Management". *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 1201-18, 2003.
- [119] Braun, M., Rivera, D., Flores, M., Carlyle, W., Kempf, K. "A Model Predictive Control Framework for Robust Management of Multi Product, Multi Echelon Demand Networks". *Annual Reviews in Control*. Vol. 27, pp. 229-45, 2003.
- [120] Braun, M., Rivera, D., Carlyle, W., Kempf, K. "Application of Model Predictive Control to Robust Management of Multi Echelon Demand Networks in Semiconductor Manufacturing". *Simulation*, Vol. 79, pp. 139-56, 2003.
- [121] Wang, W., Rivera, D., Kempf, K., Smith, K. "A Model Predictive Control Strategy for Supply Chain Management in Semiconductor Manufacturing under Uncertainty". *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 4577-82, 2004.
- [122] Wang, W., Rivera, D., Kempf, K. "A Novel Model Predictive Control Algorithm for Supply Chain Management in Semiconductor Manufacturing". *Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 1, pp. 208-13, 2005.
- [123] Yildirim, I., Tan, B., Karaesmen, F. "A Multi Period Stochastic Production Planning and Sourcing Problem with Service Level Constraints". *OR Spektrum* Vol. 27, pp. 471-89, 2005.
- [124] Basar, T., Bernhard, P. "H-infinity Optimal Control and Related Minimax Design Problems: A Dynamic Game Approach". Boston, MA: Birkhäuser, 1995.

[125] Li, L. "Supply Chain Management: Concepts, Techniques and Practices". World Scientific, 2007.

[126] Blanchini, F., Rinaldi, F., Ukovich, W. "A Network Design Problem for a Distribution System with Uncertain Demands". SIAM Journal on Optimization Vol. 7, pp. 560-78, 1997.

[127] Blanchini, F., Rinaldi, F., Ukovich, W. "Least Inventory Control of Multi Storage Systems with Non Stochastic Unknown Inputs. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 13, pp. 633-45, 1997.

[128] Bertsekas, D., Rhodes, I. "On the Minimax Reachability of Target Sets and Target Tubes". Automatica, Vol. 7, pp. 233-47, 1971.

[129] Bertsekas, D. "Infinite Time Reachability of State Space Regions by Using Feedback Control". IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 17, pp. 604-13, 1972.

[130] Blanchini, F., Pesenti, R., Rinaldi, F., Ukovich, W. "Feedback Control of Production Distribution Systems with Unknown Demand and Delays". IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 16, pp. 313-7, 2000.

[131] Boukas, E., Yang, H., Zhang, Q. "Minimax Production Planning in Failure Prone Manufacturing Systems". Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 82, pp. 269-86, 1995.

[132] Boukas, E., Shi, P., Agarwal, R. "An Application of Robust Control Technique to Manufacturing Systems with Uncertain Processing Time". Optimal Control Applications and Methods, Vol. 21, pp. 257-68, 2000.

[133] Laumanns, M., Lefebvre, E. "Robust Optimal Control of Material Flows in Demand Driven Supply Networks". Physica, Vol. 363, pp. 24-31, 2006.

[134] Bemporad, A., Borrelli, F., Morari, M. "Min-max Control of Constrained Uncertain Discrete Time Linear Systems". IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 48, pp. 1600-6, 2003.

[135] Cohen, S., Roussel, J. "Strategic Supply Chain Management: The Five Disciplines for Top Performance". McGraw-Hill Professional, 2005.

[136] Van Roy, B., Bertsekas, D., Lee, Y., Tsitsiklis, J. "A Neurodynamic Programming Approach to Retailer Inventory Management". Technical report, Laboratory for Information and Decision Systems, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1998.

- [137] Patrinos, P., Sarimveis, H. "An RBF Based Neuro-dynamic Approach for the Control of Stochastic Dynamic Systems". Proceedings of the 16th IFAC world congress, Prague, Czech Republic, 2005.
- [138] Nedic, A., Bertsekas, D. "Least Squares Policy Evaluation Algorithms with Linear Function Approximation. Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications Vol. 13, pp. 79-110, 2003.
- [139] Powell, W., Van Roy, B. "Approximate Dynamic Programming for High Dimensional Resource Allocation Problems". New York: Wiley, 2004.
- [140] Powell, W., George, A., Ayari, B., Simao, H. "Approximate Dynamic Programming for High Dimensional Resource Allocation Problems". Proceedings of the IJCNN, Montreal, August 2005.
- [141] Topaloglu, H., Powell, W. "Dynamic Programming Approximations for Stochastic, Time-staged Integer Multi Commodity Flow Problems". *Inform Journal on Computing*, Vol. 18, pp. 31-42, 2006.
- [142] Kushner, H., Yin, G. "Stochastic Approximation Algorithms and Applications". New York: Springer, 1997.
- [143] Powell, W., Ruszczyński, A., Topaloglu, H. "Learning Algorithms for Separable Approximations of Stochastic Optimization Problems". *Mathematics of Operations Research*, Vol. 29, pp. 814-36, 2004.
- [144] Powell, W. "Approximate Dynamic Programming for Operations Research". Available for download at <http://www.castlelab.princeton.edu/Papers.html>, 2006.
- [145] Bauso, D., Giarre, L., Pesenti, R. "Neuro-dynamic Programming for Cooperative Inventory cControl". American control conference, pp. 5527-32, Boston, 2004.
- [146] Bauso, D., Giarre, L., Pesenti, R. "Cooperative Inventory Control". Basel: Birkhauser, 2005.
- [147] Olfati, R., Murray, R. "Consensus Protocols for Networks of Dynamic Agents". American control conference, Vol. 2, pp. 951-956, Denver, Colorado, 2003.
- [148] Qin, S. J., Badegwell, T. A. "An Overview of Industrial Model Predictive Control Technology". 5th International Conference on Chemical Process Control, pp. 232-256, 1997.

[149] Del Re, L., Allgöwer, F., Glielmo, L. "Applied Predictive Automotive Model Predictive Control: Models, Methods and Applications". Springer, 2010.

[۱۵۰] مهدی خدابنده، حسین بلندی، "طراحی و شبیه‌سازی کنترل پیش‌بین غیرخطی زیرسیستم‌های اصلی صنایع پتروشیمی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، بهمن ۱۳۸۳.

[151] Camacho, E. F., Bordons, C. "Model Predictive Control". Springer, 2004.

[152] Qin, S. J., Badgwell, T.A., "An Overview of Nonlinear Model Predictive Applications". International Symposium on Nonlinear Model Predictive Control, Ascona, Switzerland, 1998.

[153] Rositer, J. A. "Model Based Predictive Control". CRC Press, 2003.

[154] Wang, L., Smith, S., Chessari, C. "Continuous-time Model Predictive Control of Food Extruder". Control Engineering Practice, Vol. 16, Issue 10, pp. 1173-1183, Oct 2008.

[155] Camacho, E. F., Ramirez, D.R., Limon, D., Muñoz, D., Alamo, T. "Model Predictive Control Techniques for Hybrid Systems". Annual Reviews in Control, Vol. 34, Issue 1, pp. 21-31, April 2010.

[156] Kawohl, M., Heine, T., King, R. "A New Approach for Robust Model Predictive Control of Biological Production Processes". Chemical Engineering Science, Vol. 62, Issues 18-20, pp. 5212-5215, Sep 2007.

[157] Causa, J., Karer, G., Neunz, A., Saez, D., Skrjanc, I., Zupancic, B. "Hybrid Fuzzy Predictive Control Based on Genetic Algorithms for the Temperature Control of a Batch Reactor". Computers & Chemical Engineering, Vol. 32, pp. 3254-3263, Jun 2008.

[158] Coen, T., Anthonis, J., De Baerdemaeker, J. "Cruise Control Using Model Predictive Control With Constraints". Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 63, pp. 227-236, Oct 2008.

[159] Zhang, L., Pan, M., Quan, S. "Model Predictive Control of Water Management in PEMFC". Journal of Power Sources, Vol. 180, pp. 322-329, May 2008.

[160] Chen, X., Zhai, J., Li, S., Li, L. "Application of Model Predictive Control in Ball Mill Grinding Circuit". Minerals Engineering, Vol. 20, pp. 1099-1108, Sep 2007.

[161] Guerlain, S., Jamieson, G. A., Bullemer, P., Blair, R. "The MPC Elucidator: A Case Study in The Design for Human-Automation Interaction". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A, Vol. 32, Issue 1, pp. 25-40, Jan 2002.

[162] Zhu, Y., Butoyi, F. "Multivariable and Closed-Loop Identification for Model Predictive Control". Pre-prints and Research Reports of the Departament d'Informàtica (PIRDI), Jan 2000.

[163] Cinar, A. "Nonlinear Time Series Models for Multivariable Dynamic Processes". Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, Vol. 30, pp. 147-158, 2005.

[164] Lee, J. H. "Modeling and Identification for Nonlinear Model Predictive Control: Requirements, Current Status and Future Needs". International Symposium on Nonlinear Model Predictive Control, Ascona, Switzerland, 1998.

[165] Al-Duwaish, H., Naeem, W. "Nonlinear Model Predictive Control of Hammerstein and Wiener Models Using Genetic Algorithms". In Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications (CCA'01), Mexico City, Mexico, 5-7 Sep 2001, pp. 465-469.

[166] Tenny, M.J., Wright, S.J., Rawlings, J.B. "Nonlinear Model Predictive Control via Feasibility-Perturbed Sequential Quadratic Programming". University of Wisconsin Texas-Wisconsin Modeling and Control Consortium TWMCC, Computer Sciences Dept., Optimization Technical Report, Report: TWMCC-2002-02, Aug 2002.

[۱۶۷] محمد میران‌بیگی، علی‌اکبر جلالی، "کنترل پیش‌بین غیرخطی، پایدارسازی و

بهینه‌سازی آن"، سمینار کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران، آذر ۱۳۸۷.

[168] Jia, D., Krogh, B. "Min-max Feedback Model Predictive Control for Distributed Control with Communication," In Proceedings of the 2002 American Control Conference, Anchorage, Alaska, pp. 4507-4512, May 2002.

[169] D. Pomerleau, A. Pomerleau, D. Hodouin, and E. Poulin, "A procedure for the design and evaluation of decentralised and model-based predictive multivariable controllers for a pellet cooling process," Computers and Chemical Engineering, pp. 217-233, 2003.

[170] S. Ochs, S. Engell, A. Draeger, "Decentralized vs. model predictive control of an industrial glass tube manufacturing process," In

Proceedings of the 1998 IEEE Conference on Control Applications, Trieste, Italy, pp. 16-20, 1998.

[171] F.D. Vargas-Villamil, D.E. Rivera, "Multilayer optimization and scheduling using model predictive control: Application to reentrant semiconductor manufacturing lines," *Computers and Chemical Engineering*, pp. 2009-2021, 2000.

[172] M. Baglietto, T Parisini, R Zoppoli, "Neural approximators and team theory for dynamic routing: A receding-horizon approach," In *Proceedings of the 38th IEEE Conference on Decision and Control*, Phoenix, Arizona, pp. 3283-3288, 1999.

[173] M.R. Katebi, M.A. Johnson, "Predictive control design for large-scale systems," *Automatica*, vol.3, no.33, pp. 421-425, 1997.

[174] N. Motee, Sayyar-Rodsari, "Optimal partitioning in distributed model predictive control," In *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, Denver, Colorado, June 2003.

[175] S. Sawadogo, R.M. Faye, P.O. Malaterre, and F. Mora-Camino, "Decentralized predictive controller for delivery canals," In *Proceedings of the 1998 IEEE International on Systems, Man, and Cybernetics*, San Diego, California, pp. 3380-3884, 1998.

[176] W. B. Dunbar, "Distributed receding horizon control of coupled nonlinear oscillators," *Theory and application*, pp. 13-18, December 2006.

[177] H. El fawal, D. Georges, and G. Bornard, "Optimal control of complex irrigation systems via decomposition-coordination and the use of augmented lagrangian," In *Proceedings of the 1998 IEEE International on Systems, Man and Cybernetics*, San Diego, California, pp. 3874-3879, 1998.

[178] Ion Necoara, Dang Doan, Johan A.K. Suykens, "Application of the proximal center decomposition method to distributed model predictive control," *Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control* Cancun, Mexico, Dec. 9-11, 2008.

[179] A. Richards and J. How, "A decentralized algorithm for robust constrained model predictive control," In *Proceedings of the American Control Conference*, Boston, Massachusetts, pp. 4261-4266, June 2004.

[180] R.R. Negenborn, B. De Schutter, J. Hellendoorn, "Multi-agent model predictive control for transportation networks: Serial versus parallel schemes," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 21, pp. 353-366, 2008.

[181] Yulei Sun, Nael H. El-Farra, “Quasi-decentralized model-based networked control of process systems,” *Computers and Chemical Engineering*, vol. 32, pp.2016–2029, 2008.

[182] Yan Zhang, Shaoyuan Li, “Networked model predictive control based on neighbourhood optimization for serially connected large-scale processes,” *Journal of Process Control*, vol. 17, pp. 37–50, 2007.

[183] Camponogara, E., Jia, D., Krogh, B., Talukdar, S. “Distributed Model Predictive Control,” *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 22, Issue. 1, pp. 44–52, 2004.

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) نمایی از ساختار کلی مدیریت زنجیره تامین ----- ۸
- شکل (۱-۳) روند پیش‌بینی در کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل با تعیین ورودی مناسب -- ۴۴
- شکل (۲-۳) محدودیت تساوی نهایی در یک فضای سه‌بعدی از معادلات حالت -- ۴۸
- شکل (۳-۳) دیاگرام حالت سیستم در کنترل مُد دوگان ----- ۴۹
- شکل (۱-۴) نمونه‌ای از ساختار کامل سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین ----- ۵۶
- شکل (۲-۴) ساختارهای کنترل پیش‌بین متمرکز و غیرمتمرکز در یک نگاه ----- ۶۰
- شکل (۳-۴) نمونه‌ای از زنجیره تامین بدون چرخه اطلاعاتی ----- ۶۲
- شکل (۴-۴) یک نمونه زنجیره تامین سه رده‌ای ----- ۶۵
- شکل (۵-۴) کنترل پیش‌بین غیر متمرکز نوع ۱ ----- ۸۰
- شکل (۶-۴) کنترل پیش‌بین غیر متمرکز نوع ۲ ----- ۸۰
- شکل (۷-۴) طرح گرافیکی یک زنجیره‌تأمین نمونه‌ی سه رده‌ای دارای چرخه‌های اطلاعاتی ----- ۸۲
- شکل (۸-۴) زنجیره تامین تک رده‌ای دارای چرخه اطلاعاتی ----- ۸۸
- شکل (۱-۵) یک نمونه زنجیره تامین دو گرهی ----- ۱۰۰
- شکل (۲-۵) عملکرد دینامیکی زنجیره تامین دو گرهی (خروجی‌ها) ----- ۱۰۱
- شکل (۳-۵) عملکرد دینامیکی زنجیره تامین دو گرهی (ورودی‌ها) ----- ۱۰۲
- شکل (۴-۵) عملکرد دینامیکی زنجیره تامین سه رده‌ای تحت کنترل پیش‌بین متمرکز (خروجی‌ها) ----- ۱۰۶

- شکل (۵-۵) عملکرد دینامیکی زنجیره تامین سه رده‌ای تحت کنترل پیش‌بین متمرکز (کنترل‌ها) ----- ۱۰۷
- شکل (۶-۵) اثر بخش توقیف حرکت در عملکرد زنجیره تامین تحت کنترل پیش‌بین متمرکز (خروجی) ----- ۱۰۹
- شکل (۷-۵) اثر بخش توقیف حرکت در عملکرد زنجیره تامین تحت کنترل پیش‌بین متمرکز (کنترل‌ها) ----- ۱۰۹
- شکل (۸-۵) تقاضای متغیر مشتری بین ۲۰ تا ۲۰۰ واحد کالا ----- ۱۱۰
- شکل (۹-۵) پاسخ دینامیکی زنجیره‌تأمین بدون پیش‌بینی‌های تقاضا در طول افق -- ۱۱۱
- شکل (۱۰-۵) پاسخ دینامیکی زنجیره‌تأمین تک طبقه بدون استفاده از بخش توقیف حرکت ----- ۱۱۲
- شکل (۱۱-۵) پاسخ دینامیکی زنجیره‌تأمین چند طبقه اول بدون استفاده از بخش توقیف حرکت ----- ۱۱۳
- شکل (۱۲-۵) پاسخ دینامیکی زنجیره‌تأمین چند طبقه دوم بدون استفاده از بخش توقیف حرکت ----- ۱۱۴
- شکل (۱۳-۵) سطوح زنجیره‌تأمین تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز دو لایه برای یک تغییر تقاضای تصادفی ARIMA بدون استفاده از بخش توقیف حرکت ---- ۱۱۶
- شکل (۱۴-۵) سطوح موجودی زنجیره‌تأمین تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز دو لایه برای یک تغییر تقاضای تصادفی ARIMA با استفاده از بخش توقیف حرکت ---- ۱۱۶
- شکل (۱۵-۵) سطوح موجودی کالا برای یک تغییر تقاضای تصادفی ARIMA با استفاده از کنترل پیش‌بین تک لایه غیرمتمرکز ----- ۱۱۷

- شکل (۱۶-۵) سطوح موجودی کالا برای یک تغییر تقاضای تصادفی ARIMA با استفاده از کنترل پیش‌بین دو لایه غیرمتمرکز ----- ۱۱۸
- شکل (۱۷-۵) خروجی های سیستم مدیریت زنجیره تامین تحت کنترل پیش بین متمرکز در برابر نرخ تقاضای پالسی با استفاده از بخش توقیف حرکت ----- ۱۲۰
- شکل (۱۸-۵) ورودی های سیستم مدیریت زنجیره تامین تحت کنترل پیش بین متمرکز در برابر نرخ تقاضای پالسی با استفاده از بخش توقیف حرکت ----- ۱۲۰
- شکل (۱۹-۵) پاسخ دینامیکی زیرسیستم خرده‌فروشی با استفاده از کنترل پیش بین محلی تحت نرخ تقاضای ثابت ۱۰۰ واحد کالا در روز ----- ۱۲۱
- شکل (۲۰-۵) پاسخ دینامیکی زیرسیستم تولید با استفاده از کنترل پیش بین محلی تحت نرخ تقاضای ثابت ۱۰۰ واحد کالا در روز ----- ۱۲۲
- شکل (۲۱-۵) پاسخ دینامیکی زیرسیستم تامین با استفاده از کنترل پیش بین محلی تحت نرخ تقاضای ثابت ۱۰۰ واحد کالا در روز ----- ۱۲۲
- شکل (۲۲-۵) اثر Look Ahead روی خروجی های سیستم تحت کنترل پیش بین محلی در رده تامین (شکل بالایی: بدون اثر Look Ahead و شکل پایینی همراه با اثر Look Ahead) ----- ۱۲۳
- شکل (۲۳-۵) اثر Look Ahead روی ورودی های سیستم تحت کنترل پیش بین محلی در رده تامین ----- ۱۲۴
- شکل (۲۴-۵) اثر بخش توقیف حرکت روی خروجی های سیستم تحت کنترل پیش بین محلی در رده تامین (شکل بالایی: بدون اثر توقیف حرکت و شکل پایینی همراه با اثر توقیف حرکت) ----- ۱۲۵

- شکل (۲۵-۵) پاسخ دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز بدون اثر Look Ahead و همراه با اثر بخش توقیف حرکت ----- ۱۲۷
- شکل (۲۶-۵) پاسخ دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با اثر Look Ahead و بخش توقیف حرکت ----- ۱۲۸
- شکل (۲۷-۵) پاسخ دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با اثر Look Ahead و بدون بخش توقیف حرکت ----- ۱۲۹
- شکل (۲۸-۵) پاسخ دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با تاخیرهای انتقال $\tau_1 = 3, \tau_2 = 2$ --- ۱۳۰
- شکل (۲۹-۵) پاسخ دینامیکی سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه‌های اطلاعاتی تحت کنترل پیش‌بین غیرمتمرکز با تاخیرهای انتقال $\tau_1 = 3, \tau_2 = 2$ با افزایش افق‌ها ۱ ----- ۱۳۱

فهرست جداول

جدول (۱-۲) خانواده‌ی مدل‌های IOBPCS ----- ۲۷

جدول (۱-۳) مقایسه اجمالی روش‌های پایدارسازی حلقه‌بسته MPC ----- ۵۳

جدول (۱-۵) داده‌های گره خرده‌فروش ----- ۱۰۱

جدول (۲-۵) داده‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین سه رده‌ای ----- ۱۰۴

جدول (۳-۵) داده‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین چهار رده‌ای ----- ۱۰۸

جدول (۴-۵) داده‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین یک طبقه ----- ۱۱۳

جدول (۵-۵) داده‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه اطلاعاتی ۱ --- ۱۱۹

جدول (۶-۵) داده‌های سیستم مدیریت زنجیره تامین دارای چرخه اطلاعاتی ۲ --- ۱۲۶

فهرست علائم اختصاری

<i>APIOBPCS</i>	سیستم کنترل تولید مبتنی بر سفارش و موجودی و خط انتقال خودکار...خط انتقال خودکار
<i>APVIOBPCS</i>	سیستم کنترل تولید مبتنی بر سفارش و موجودی متغیر و خط انتقال خودکار.....خودکار
<i>CV</i>	متغیر کنترل شونده.....متغیر کنترل شونده
<i>DV</i>	متغیر اغتشاشی.....متغیر اغتشاشی
<i>HJB</i>	معادلات هامیلتون- ژاکوبی- بلمن.....معادلات هامیلتون- ژاکوبی- بلمن
<i>IBPCS</i>	سیستم کنترل تولید مبتنی بر موجودی.....سیستم کنترل تولید مبتنی بر موجودی
<i>IHGPC</i>	کنترل پیش‌بین تعمیم یافته افق نامحدود.....کنترل پیش‌بین تعمیم یافته افق نامحدود
<i>IOBPCS</i>	سیستم کنترل تولید مبتنی بر سفارش و موجودی.....سیستم کنترل تولید مبتنی بر سفارش و موجودی
<i>JIT</i>	ارسال به موقع کالا.....ارسال به موقع کالا
<i>LMI</i>	نامساوی ماتریسی خطی.....نامساوی ماتریسی خطی
<i>LP</i>	برنامه ریزی خطی.....برنامه ریزی خطی
<i>LS</i>	روش حداقل مربعات.....روش حداقل مربعات
<i>MCDM</i>	روش تصمیم‌سازی چند معیاره.....روش تصمیم‌سازی چند معیاره
<i>MCNLP</i>	برنامه ریزی غیرخطی مکمل مختلط.....برنامه ریزی غیرخطی مکمل مختلط
<i>MILP</i>	برنامه‌ریزی خطی صحیح مرکب مقیاس بزرگ.....برنامه‌ریزی خطی صحیح مرکب مقیاس بزرگ
<i>MLS</i>	روش حداقل مربعات خطی اصلاح شده.....روش حداقل مربعات خطی اصلاح شده
<i>MMFE</i>	مدل شرط‌بندی ارزیابی پیش‌بینی.....مدل شرط‌بندی ارزیابی پیش‌بینی

<i>MMPC</i>	کنترل پیش‌بین حداقل - حداکثر
<i>MPC</i>	کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل
<i>MRP</i>	طرح‌ریزی مواد اولیه مورد نیاز
<i>MRP2</i>	طرح‌ریزی منابع تولید
<i>MV</i>	متغیر دستکاری شونده
<i>MVC</i>	کنترل حداقل واریانس
<i>NLP</i>	برنامه ریزی غیرخطی
<i>NLS</i>	روش حداقل مربعات غیرخطی
<i>NMPC</i>	کنترل پیش‌بین غیرخطی
<i>OR</i>	روش تحقیق در عملیاتی
<i>PADE</i>	روش تقریب‌سازی پید
<i>P</i>	کنترل‌کننده تناسبی
<i>PI</i>	کنترل‌کننده تناسبی - انتگرال‌گیر
<i>PID</i>	کنترل‌کننده تناسبی - مشتق‌گیر - انتگرال‌گیر
<i>SCM</i>	مدیریت زنجیره تامین
<i>VIOBPCS</i>	سیستم کنترل تولید مبتنی بر سفارش و موجودی متغیر
<i>VMI</i>	مدیریت موجودی توسط فروشنده
<i>WIP</i>	کالاهای در حال ساخت