

کنترل موجودی پیش بین زنجیره تامین خودروی گازسوز بر اساس تقاضای بازار

محمد میران‌بیگی (نویسنده اصلی)

کارشناس ارشد مهندسی کنترل، دانشکده برق دانشگاه علم و صنعت ایران

m.miranbeigi@gmail.com

رضا میران‌بیگی

دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف

r.miranbeigi@gmail.com

چکیده

گرایش به استفاده از سوخت گاز طبیعی به عنوان یک سوخت پاک برای مصرف کنندگان به سرعت رو به افزایش است. بحث گازسوز کردن خودروها به دلایل متعدد بحث روز بسیاری از کشورها بوده و از منابع جدید دنیا به شمار می آید، بطوری که حتی بسیاری از کشورهای پیشرفته صنعتی که فاقد منابع گازی می باشند، مشغول انجام پژوهش و تحقیق در این زمینه هستند. کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل (MPC)^۱ از طریق بکارگیری مدلی صریح و واضح از فرآیند و اعمال ورودی های کنترلی بدست آمده از حل یک مسئله بهینه سازی در یک افق کنترلی، رفتار آینده یک سیستم در یک افق مشخص را کنترل می کند. در این مقاله یک بهینه‌سازی مبتنی بر اصول کنترل کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل روی یک شبکه زنجیره تامین خودروهای گازسوز بکار گرفته شده است. هدف از این روش کنترلی، تنظیم متغیرهای تصمیم در زنجیره تامین روی یک افق زمانی هموار معین با استفاده از یک مدل تفاضلی تفصیلی از سیستم برای ارضاکردن دستورات مشتری با کوچکترین هزینه عملیاتی و حفظ موجودی کالای ایمنی مطلوب است. در نهایت نتیجه شبیه‌سازی، ویژگی دینامیکی خوبی را تحت تغییرات تقاضا را نشان می دهد.

واژه‌های کلیدی

گاز طبیعی - کنترل پیش‌بین مبتنی بر مدل - شبکه زنجیره تامین - موجودی کالای ایمنی - تقاضا.

^۱ Model predictive control

۱- مقدمه

زنجیره تامین بصورت برهم کنش 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. در این مقاله طراحی عملیاتی و کنترل سیستم‌های تولید و مونتاژ و توزیع خودرو گازسوز، تحت تقاضای بازار مدنظر است.

گاز طبیعی فشرده CNG ترکیبی از هیدروکربنهای اشباع شده عمدتاً متان CH_4 است که از چاه‌های گاز و یا همراه تولید نفت خام استخراج می‌شود. این سوخت که از طریق خط لوله حمل می‌شود، در ایستگاه‌های سوختگیری تحت فشار ۲۵۰ bar ذخیره و به مخازن خودروها تا فشار ۲۰۰ bar تزریق می‌گردد. گرایش به استفاده از CNG به عنوان یک سوخت جایگزین به علت ویژگی پاک بودن آن برای مصرف کنندگان به سرعت رو به افزایش است. بخش حمل و نقل جاده‌ای بر اساس آمارهای موجود سهم عمده‌ای از سبد انرژی کشورمان را بخود اختصاص داده و این در حالی است که آلودگی محیط زیست و کمبود منابع انرژی نظرها را به مصرف CNG معطوف نموده است. بحث گازسوز کردن خودروها به دلایل متعدد بحث روز بسیاری از کشورها بوده و از منابع جدید دنیا به شمار می‌آید، بطوری که حتی بسیاری از کشورهای پیشرفته صنعتی که فاقد منابع گازی می‌باشند، مشغول انجام پژوهش و تحقیق در این زمینه هستند. برخی مزایای استفاده از گاز طبیعی شامل: کاهش هزینه سوخت برای مالک خودرو که استفاده از گاز طبیعی، هزینه سوخت خودرو را تا ۸۵٪ کاهش می‌دهد، کاهش آلودگی محیط زیست، کاهش هزینه سرویس و نگهداری موتور، ایمنی بالای گاز طبیعی و ایمنی بیشتر مخازن سوخت است. از جمله معایب محدود استفاده از گاز طبیعی می‌توان به وزن بالای مخزن (در صورت استفاده از مخازن فولادی)، دفعات بیشتر سوختگیری و افت قدرت حدوداً ده درصدی آن نسبت به قدرت خودرویی که از بنزین استفاده می‌کند، اشاره نمود.

سیستم زنجیره تامین نیز به عنوان یک سیستم مقیاس بزرگ شناخته می‌شود که می‌توان برای کنترل آن روش‌های متمرکز و غیرمتمرکز کنترلی را بکاربرد. سیستم‌های مدیریت زنجیره تامین غالباً توسط کنترل‌کننده‌های کلاسیک PID به صورت متمرکز و غیرمتمرکز کنترل شده‌اند که برخی از آنها در [۱] و [۲] و [۳] دیده می‌شوند. کاپسوتیس^۲ برای اولین بار MPC را برای کنترل یک مسئله مدیریت موجودی تک محصولی بکاربرد [۵]. زافستاس^۳ نیز در حل مسئله کنترل بهینه‌ی تولید/موجودی، با استفاده از MPC،

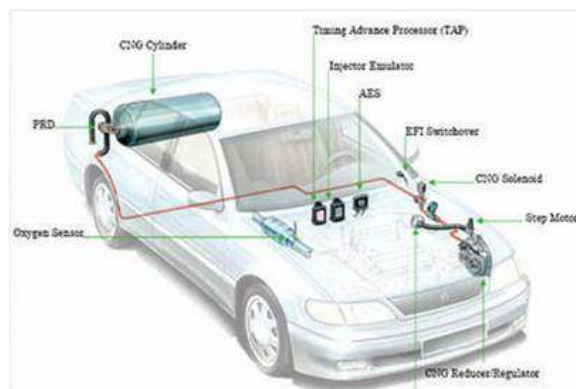
^۲ KapsiotisTzafestas

^۳ Tzafestas

انحراف از مقادیر موجودی مطلوب را جریمه کرد [۶]. لویز^۴ نیز کنترل کننده پیش بین را برای کنترل یک شبکه توزیع و تولید چند محصولی با تاخیرهای زمانی و بدون در نظر گرفتن سفارش های برگشتی بکاربرد [۷]. در این روش از یک روش حل مسئله بهینه سازی مبتنی بر برنامه ریزی خطی مقیاس بزرگ استفاده شد. وانگ^۵ مسئله کنترل زنجیره تامین را بوسیله روش MPC مبتنی بر تخمین حالت ها به منظور افزایش عملکرد و مقاومت در برابر تغییرات تقاضا بیان کرد [۸]. در یک مقاله ارائه شده در سال های اخیر نیز یک MPC را برای بهینه سازی سیستم های تولید و توزیع شامل یک مدل زمان بندی شده ی ساده شده برای تابع تولید پیشنهاد شده است. روش کنترلی پیشنهادی فقط نوع قطعی تقاضا را که نیاز برای یک رویه کنترل موجودی کالا را کاهش می دهد، ملاحظه کرده است [۹].

مدل قابل کاربرد با شبکه های تولید و توزیع طبقه ای، دارای ساختار اختیاری می باشد. در این مقاله برای اعمال کردن نامعینی سیستم در مدل شبکه زنجیره تامین، یک افق غلتان^۶ در ساختار MPC پیشنهاد می شود. این روش یک افق غلتان برای ایجاد مشارکت عمل های کنترلی گذشته و حال در جهت پیش بینی های آینده استفاده می کند. مدل های پیش بینی بهینه برای پیش بینی تغییر تقاضای آینده استفاده می شوند.

بدین ترتیب در بخش دوم این مقاله اجزای سیستم گازرسانی خودرو و تشریح و در بخش سوم، سیستم مدیریت زنجیره تامین و یک مدل دینامیکی از آن توصیف می شود و در بخش چهارم، اصول روش کنترلی MPC تشریح شده و ساختار آن برای کنترل سیستم های مدیریت زنجیره تامین طراحی می شوند. در بخش پنجم نیز شبیه سازی های مربوطه ارائه شده و در بخش ششم، نتایج بکارگیری روش های کنترلی مذکور بررسی می شوند.



شکل (۱) خودروی گازسوز

^۵ Lopez

^۶ Wang

^۷ Rolling horizon

۲- تشریح سیستم گاز رسانی خودرو

همان گونه که ذکر شد، سیستم سوخت رسانی گاز طبیعی یا CNG یکی از سیستم‌هایی است که در کاهش الودگی محیط زیست تاثیر فراوانی دارد. برای استفاده از سوخت گاز طبیعی فشرده نیاز به تامین تجهیزات و قطعات (مطابق شکل ۱) زیر قبل از رده تولید یا مونتاژ خودروی گازسوز می‌باشد:

مخزن: مخزن، بزرگترین و سنگین ترین قسمت سیستم CNG هستند. البته مخازن سبکتری از جنس کامپوزیت و مخلوط آن با فولاد نیز ساخته می شود ولی بسیار گران قیمت هستند.

شیرمخزن: هر مخزن CNG دارای شیر مخصوصی بنام شیر مخزن است که چند وظیفه را بعهده دارد (شیر چندمنظوره). این شیر راه عبور گاز را باز و یا مسدود می نماید. با بستن شیر مذکور جریان گاز داخل مخزن به دیگر تجهیزات قطع می گردد. همچنین در صورت افزایش فشار بیش از حد مجاز، سیستم ایمنی تعبیه شده در این شیر فعال شده و با هدایت گاز به خارج مخزن از بروز حوادث جلوگیری می نماید.

کیت CNG:

به اجزای بکار رفته از مخزن تا ورودی سیستم سوخت رسانی (کاربراتور یا منیفولد در موتور انژکتوری) کیت CNG گفته می شود. این قطعات در ساده ترین نوع عبارتند از: شیر مخزن، شیر سوختگیری، شیر یکطرفه، شیرهای برقی گاز و بنزین، رگلاتور، میکسر و شیر تنظیم گاز، لوله فولادی، شیلنگها و اتصالات، ادوانسر، کلید انتخاب سوخت و فشارنما.



شکل (۲) کیت CNG

شیرسوختگی: عمل سوختگی توسط یک شیر یک طرفه (با طراحی خاص) انجام می شود که پس از سوختگی و جدا شدن کوپلینگ سوختگی ایستگاه ، خروج گاز را در جهت عکس غیر ممکن می سازد. شیریکطرفه: این شیر که صرفاً جنبه ایمنی دارد ، روی ورودی شیر مخزن نصب می گردد. از خروجی شیر سوختگی به ورودی این شیر بوسیله لوله فشار قوی اتصال برقرار می شود. در زمان سوختگی مسیر این شیر باز و گاز به راحتی وارد مخزن می گردد. بمحض قطع جریان گاز این شیر مسیر برگشت گاز را مسدود می نماید .

شیرقطع سریع: این شیر که به Cut off valve معروف است در صورت استفاده از شیر دستی سر مخزن در مسیر بین خروجی شیر مخزن و رگلاتور نصب می گردد و بمحض خاموش شدن خودرو بصورت اتوماتیک مانع ورود گاز به رگلاتور می شود و عملاً جریان گاز فشار بالا را به رگلاتور قطع می نماید این شیر صرفاً جنبه ایمنی دارد .

شیربرقی گاز: شیر برقی گاز وسیله ای است که در مسیر خروجی گاز از مخزن تا رگلاتور قرار دارد و هنگامی که کلید انتخاب سوخت در حالت وسط و یا بنزین قرار دارد، بسته شده و مسیر گاز را می بندد. شیربرقی بنزین: شیر برقی بنزین وسیله ای است که در مسیر بنزین و قبل از کاربراتور قرار دارد و هنگامی که سوئیچ بسته یا کلید انتخاب سوخت در حالت وسط و یا گاز قرار دارد ، مانع ورود بنزین به کاربراتور می گردد.

رگلاتور: رگلاتور یکی از مهمترین قسمت های کیت CNG می باشد که وظیفه آن کاهش فشار گاز از ۲۰۰ بار به فشار معین و قابل استفاده جهت خودرو می باشد. در اثر همین کاهش فشار در رگلاتور به موجب پدیده انبساط گاز سرمای شدیدی ایجاد می شود که بایستی جهت جلوگیری از یخ زدگی، بدنه رگلاتور را گرم نگاه داشت.

میکسر :وظیفه میکسر، مخلوط کردن گاز و هوا است. میکسرها متناسب با نوع موتور محاسبه ، طراحی و ساخته می شوند. در خودروهای کاربراتوری میکسر بین هواکش و کاربراتور، و در سیستم های انژکتوری که مجهز به دبی سنج مکانیکی هوا هستند.

واحدپیش اندازجرقه :پیش انداز جرقه یک وسیله الکترونیکی می باشد که زمان جرقه را در حالت استفاده از گاز در خودرو بصورت اتوماتیک تنظیم می نماید.

فشارنما: به کمک آن می توان از فشار درون مخزن گاز CNG و در نتیجه از میزان گاز موجود در آن آگاهی یافت.

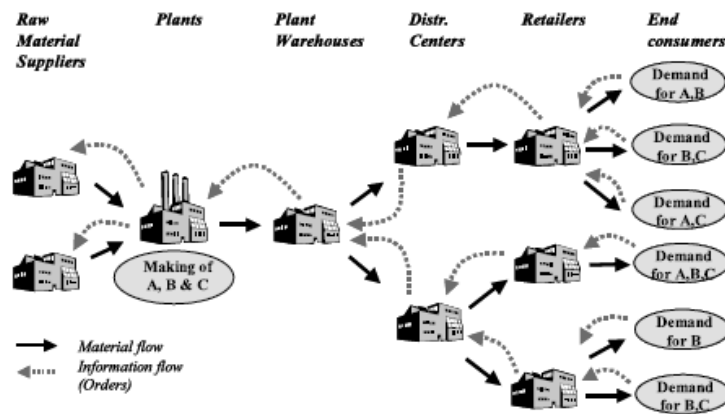
واحد کنترل الکترونیکی: این واحد سیگنالهایی را که از سنسور های مختلف دریافت می کند با اطلاعات ثبت شده در حافظه سیستم تطبیق داده و در صورت نیاز به تنظیمات جدید سیگنالهای را به کاراندازها

می دهد بعبارتی وسیله ایست که گاز مورد نیاز موتور و سایر پارامترهای آن را کنترل نموده و می تواند در موارد ضروری برای ایمنی بطور اتوماتیک شیر خودکار را قطع نماید .
 تمامی این قطعات در کنار هم سیستم گازرسانی خودرو را تشکیل می دهند. در این پژوهش تامین این اجزا برای تولید و مونتاژ خودروی گازسوز اولین مرحله کار است [۱۰].

۳- تشریح سیستم مدیریت زنجیره تامین و ارائه یک مدل دینامیکی از آن

کنترل سیستم های مدیریت زنجیره تامین را می توان به عنوان کنترل یک سری از سیستم های مقیاس بزرگ در نظر گرفت و یک کنترل کننده پیش بین را برای کنترل آن بکار گرفت. کنترل پیش بین از جهت تشکیل مدلی صریح از سیستم به منظور محاسبات کنترلی، بررسی رفتار سیستم در یک افق زمانی آینده و در نظر گرفتن محدودیت های ورودی ها، حالت ها و خروجی های سیستم در محاسبات کنترلی، بکارگیری مدل های اغتشاش برای در نظر گرفتن نامعینی تقاضا و پاسخ مناسب به تغییرات تقاضا، یک روش مناسب برای کنترل این سیستم ها به نظر می رسد [۱۱].

در اغلب زنجیره های تامین، هدف ما تنظیم متغیرهای تصمیم برای بیشینه کردن رضایت مشتری با کمترین هزینه عملیاتی است. زیرسیستم های نمونه می توانند شامل واحدهای فروشنده های مواد خام، تولید و مونتاژ و توزیع و خرده فروش برای محصولات مختلف A و B و C، مطابق شکل ۳ گره های سیستم باشند و با یکدیگر در ارتباط هستند [۱۲]. در این سیستم هر گره بوسیله یک مجموعه از گره های بالادستی تغذیه شده و یک مجموعه از گره های پایین دستی را تغذیه می کنند. هر کدام از این گره ها یک سطح موجودی کالای تنظیم شده دارند که در کنترل این سیستم باید برآورده شوند و در برابر هر گونه دستور مشتری، این سطح موجودی کالا باید حفظ شود.



شکل (۳) ساختار یک نمونه از سیستم های زنجیره تامین

بر همین اساس، مراکز تولید P ، مخازن W ، مراکز توزیع D ، خرده فروش های R ، گره های سیستم را تشکیل می دهند. برای هر گره k ، یک مجموعه از گره های بالادستی (قبلی) بوسیله k' مشخص می شوند که می تواند گره k را تامین کند. همچنین یک دسته از گره های پایین دستی (بعدی) بوسیله k'' که می تواند بوسیله k تامین شود، مشخص می شود. همه جفت های (k', k) و یا (k, k'') معتبر، مسیرهای مجاز داخل شبکه را تشکیل می دهند. همه متغیرها در شبکه زنجیره تامین همچون موجودی کالا و بارهای انتقال، متغیرهای پیوسته فرض می شوند.

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

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

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

می باشد 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) می باشند. همچنین برای اینکه تحویل واقعی محصول واقع شود، تعادل موجودی کالا برای گره های خرده فروش بصورت علی الحساب اصلاح می شود که با $d_{i,k}(t)$ نشان داده می شود

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

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

میزان تقاضای برآورده نشده به عنوان سفارش های برگشتی برای هر محصول و دوره زمانی ثبت می شوند. از اینرو معادله تعادل برای سفارش های برگشتی بصورت زیر در خواهد آمد که

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

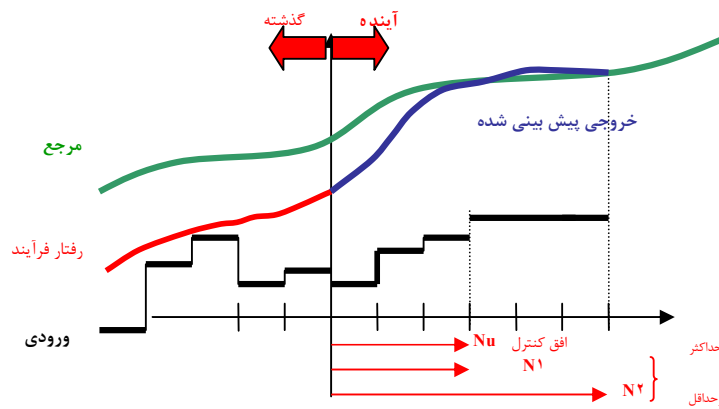
$$\forall k \in \{R\}, \quad t \in T, \quad i \in DP.$$

که $R_{i,k}(t)$ به تقاضا برای محصول i در گره خرده فروش k ام و دوره زمانی t اشاره دارد. $LO_{i,k}(t)$ به مقدار فسخ شده سفارش های برگشتی (به علت اینکه شبکه موفق به ارضای آنها در یک حد زمانی معقول نشده است) اشاره دارد.

۴- طراحی کنترل کننده پیش بین

۴-۱- اصول کنترل پیش بین

کنترل پیش بین مبتنی بر مدل، به عنوان یک روش کنترل افق دورشونده یا کنترل افق متحرک شناخته می شود که به یک استراتژی فیدبک مناسب، خصوصاً به جای سیستم های خطی و غیرخطی با محدودیت های حالت و ورودی تبدیل شده است. چنانچه تأخیر زمانی در مقایسه با ثابت زمانی های مؤثر سیستم قابل توجه باشد، نیاز به یک کنترل کننده پیش بین پیشرفته اجتناب ناپذیر است. کنترل پیش بین، نامی است که به شکلی از کنترل که در آن پیش بینی رفتار یک سیستم در فرمول بندی آن نقش دارد اطلاق می شود و زمانی که کارایی بهتری نسبت به آنچه که از کنترل غیرپیش بین به دست آمده مورد نیاز باشد به آن پرداخته می شود.



شکل (۴) روند پیش بینی در کنترل پیش بین مبتنی بر مدل با تعیین ورودی مناسب

عبارت MPC یک طبقه یا کلاس از روش های کنترل کامپیوتری که رفتار آینده یک سیستم در یک افق مشخص را از طریق به کارگیری مدلی صریح و واضح از فرآیند، کنترل می کند. در هر گام کنترلی، روش MPC یک دنباله حلقه باز از تنظیمات متغیرهای دستکاری شونده (MV) را به منظور بهینه سازی رفتار آینده سیستم (CV) محاسبه می کند که در نهایت دنباله ای از متغیرهای ورودی مناسب در افق تعریف شده برای کنترل جهت اعمال به سیستم به دست می آید. اولین درایه این دنباله و در برخی موارد عملی چند درایه و یا برازشی از آن ها، به سیستم اعمال شده و عملیات پیش بینی و بهینه سازی در هر گام کنترلی که می تواند دوره نمونه برداری سیستم باشد، مجدداً انجام می پذیرد [۱۳ و ۱۴].

همانطور 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 کار گرفت. اما این یک حالت ایده‌آل است و در حالت کلی دنباله ورودی به دست آمده باید تنها تا زمان در دسترس قرار گرفتن اندازه‌گیری‌های بعدی به سیستم اعمال گردد [۱۵].

هدف سیستم کنترلی در این مقاله، عمل کردن زنجیره تامین در نقطه بهینه با وجود اثر تغییر تقاضاست [۱۶]. 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 [۱۷]. 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. بر اساس این حقیقت که عمل‌های کنترلی حال و گذشته در پاسخ آینده سیستم موثرند، یک افق زمانی غلتان 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 (شکل ۲). در هر دوره زمانی اولین عمل کنترلی در دنباله محاسبه شده و پیاده می‌شود. [۱۸].

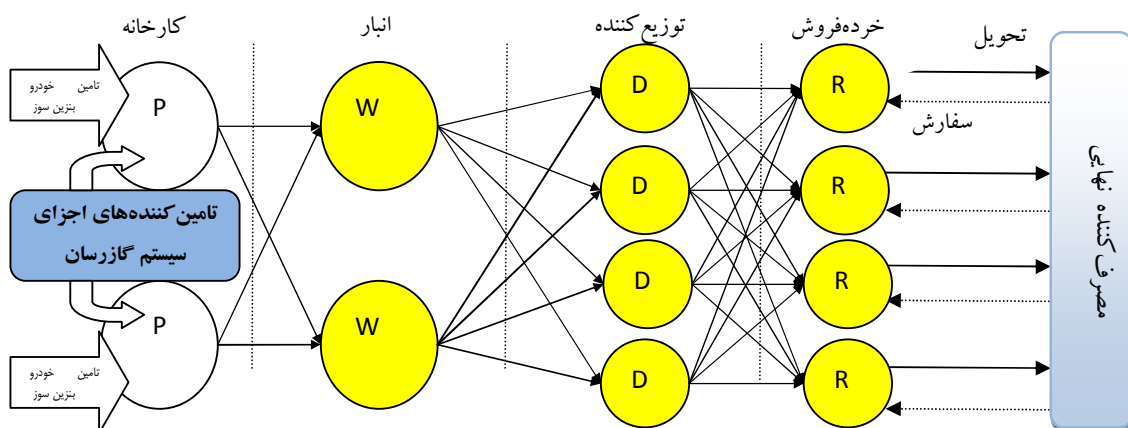
ساختار ریاضی تابعی معیار در یک زمان، سفارش‌های برگشتی، انتقال و هزینه‌های موجودی کالا را بصورت زیر در نظر می‌گیرد

$$\begin{aligned}
 J_{total} = & \quad (4) \\
 & \sum_{t+1}^{t+P} \sum_{k \in \{W, D, R\}} \sum_{i \in DP} \{w_{y,i,k} (y_{i,k}(t) - y_{s,i,k})^2\} \\
 & + \sum_t^{t+C-1} \sum_{k \in \{W, D, R\}} \sum_{i \in DP} \{w_{x,i,k',k} (x_{i,k',k}(t))^2\} \\
 & + \sum_{t+1}^{t+P} \sum_{k \in \{R\}} \sum_{i \in DP} \{w_{BO,i,k} (BO_{i,k}(t))^2\} \\
 & + \sum_t^{t+C-1} \sum_{k \in \{W, D, R\}} \sum_{i \in DP} \{w_{\Delta x,i,k',k} (x_{i,k',k}(t) - x_{i,k',k}(t-1))^2\}
 \end{aligned}$$

که در آن در آن $y_{s,i,k}$ 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، 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 اعتبار شرکت و تقاضای آینده، تخمین زده می‌شود) می‌باشد. 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. وزن‌های $w_{\Delta x,i,k',k}$ نیز متناظر با جریمه روی سرعت تغییر برای میزان انتقال داده شده محصول i از طریق کانال (k', k) است. همچنین P افق پیش‌بینی و C افق کنترل هستند.

۵- نتایج شبیه‌سازی

هدف این مقاله دوگانه‌سوز کردن خودروهای بنزین‌سوز تولیدی قبل از تحویل به مشتری نهایی است. در این مقاله یک سیستم زنجیره تامین شامل تامین‌کننده‌های اجزای سیستم گازرسانی خودرو، تامین‌کننده خودرو بنزین‌سوز، دو مرکز تولید، دو انبار، ۴ مرکز توزیع و ۴ خرده‌فروش است. پس شبکه زنجیره تامین شامل دو گره تولید، دو گره ذخیره، ۴ مرکز توزیع، ۴ گره خرده‌فروش می‌باشد. نقاط تنظیم موجودی،

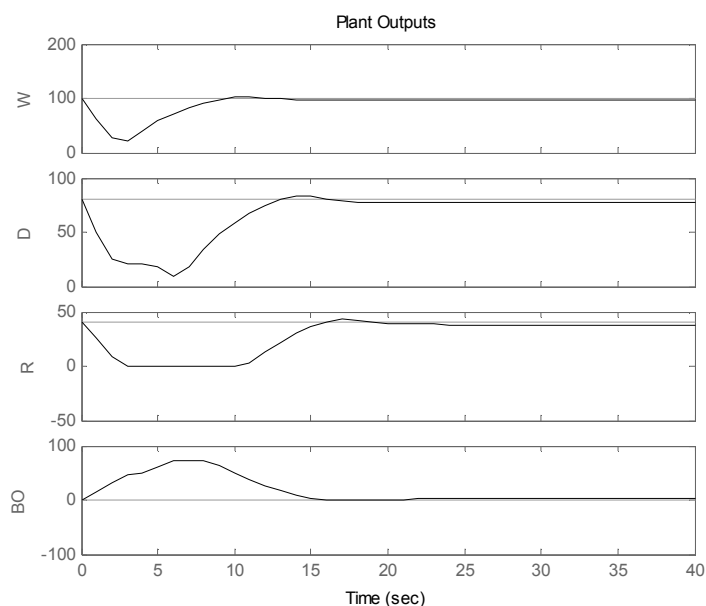


شکل (۵) ساختار سیستم مدیریت زنجیره تامین خودرو دوگانه‌سوز

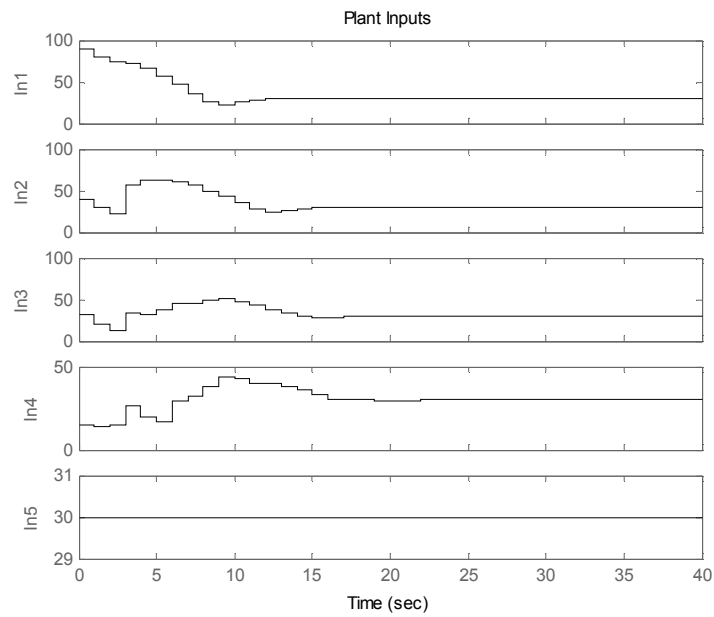
ظرفیت‌های ذخیره ماکزیمم در هر گره و اطلاعات هزینه انتقال برای هر کانال تامین‌کننده در جدول ۱ آمده‌اند. افق پیش‌بینی برابر ۱۰ واحد زمانی و افق کنترل برابر با ۵ واحد زمانی انتخاب می‌شوند. پاسخ دینامیکی شبکه برای یک تغییر پله‌ای ۳۰ واحد در تقاضای تولید محاسبه شد. مقادیر اولیه موجودی نیز همان نقاط تنظیم هستند. شکل ۶، میانگین انحراف از سطوح موجودی برای مخزن و توزیع و خرده‌فروش نوعی در شبکه را نشان می‌دهند. شکل ۷ نیز تعداد میانگین خودروهای دوگانه‌سوز کامل منتقل شده بین رده‌ها را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۸ و ۹ نیز زنجیره تامین با یک تقاضای پالسی تحریک می‌شود تا پاسخ به تغییرات تقاضا به چالش کشیده شود.

جدول (۱) داده‌های زنجیره تامین

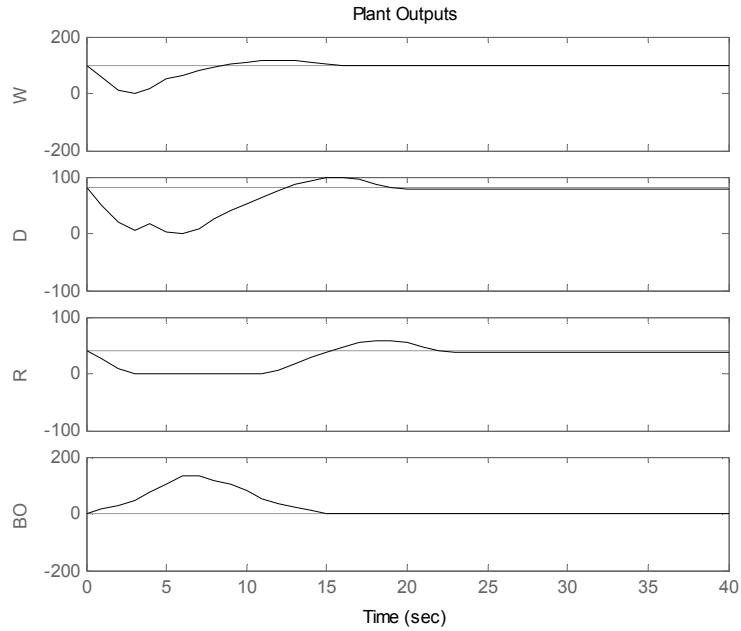
	مخزن	مرکز توزیع	خرده فروش
سطح موجودی حداکثر	۲۰۰	۱۵۰	۱۰۰
نقطه تنظیم موجودی محصول	۱۰۰	۸۰	۴۰
هزینه انتقال	تولید به مخزن	مخزن به توزیع	توزیع به خرده‌فروش
وزن‌های موجودی	۱	۱	۱
وزن‌های سفارش برگشتی	۵	۵	۵
وزن‌های بخش توقیف حرکت	-	-	۲
میزان تاخیر انتقال	۱	۱	۱
	۶	۳	۱



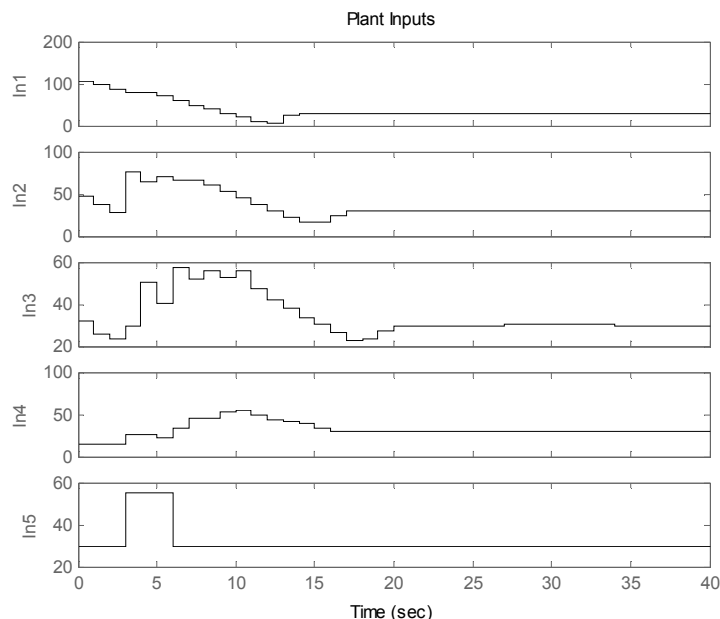
شکل (۶) پاسخ دینامیکی میانگین شبکه برای تغییر پله‌ای ۳۰ واحدی در زمان صفر



شکل (۷) ورودی کنترلی میانگین برای تغییر پله‌ای ۳۰ واحدی در زمان صفر



شکل (۸) پاسخ دینامیکی میانگین شبکه برای تغییر پالسی نشان داده شده



شکل (۹) ورودی کنترلی میانگین شبکه برای تغییر پالسی نشان داده شده

توجه شود که مقادیر میانگین گره‌های موجود در هر رده در این شبیه‌سازی‌ها مدنظر است. همان‌طور که از نتایج شبیه‌سازی مشخص است، میانگین نقاط تنظیم موجودی در گره‌ها به خوبی دنبال می‌شوند و مقادیر ورودی‌های کنترلی هم قابل قبول هستند. اثر بخش توقیف حرکت در معادله (۴) به خوبی در شکل‌های ۷ و ۸ دیده می‌شود که با استفاده از یک تقاضای پالسی، تغییرات در انحراف از نقطه تنظیم، با استفاده از این بخش کاهش پیدا کرد. در نتیجه با این برنامه‌ریزی تولید می‌توان پاسخ مناسبی به تقاضای بازار داد و خودروهای دوگانه‌سوز را با جلب رضایت حداکثری مشتری در کمترین زمان ممکن تحویل داد.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به علت مزایای استفاده از گاز طبیعی و پاک بودن آن، گازسوز کردن خودروها، بحث روز بسیاری از کشورها بوده و از منابع جدید دنیا به شمار می‌آید، بطوری که حتی بسیاری از کشورهای پیشرفته صنعتی که فاقد منابع گازی می‌باشند، مشغول انجام پژوهش و تحقیق در این زمینه هستند. در این مقاله اصول کنترل‌کننده پیش‌بین برای یک شبکه تامین خودروهای دوگانه‌سوز در حال حفظ سطح موجودی برای هر محصول و گره ذخیره‌بکار رفت. کنترل‌کننده مبتنی بر بهینه‌سازی برای هدف بیشینه‌کردن رضایت مشتری با

کمترین هزینه عملیاتی است. کنترل‌کننده‌های موجودی داخل چارچوب بهینه‌سازی به عنوان محدودیت کیفی افزوده وارد می‌شوند. روش کنترلی پیشنهاد شده در کارکردن با زنجیره‌های تامین دارای اندازه واقع‌گرایانه تحت یک تنوع از تغییرات تقاضا موفق بوده است. پیش‌بینی‌های بهینه‌سازی برای تغییرات تقاضای آینده برای افزایش سیستم کنترلی بکار برده شدند. نشان داده شد که نظریه پیشنهادی برای سیستم با تاخیرهای انتقال بزرگ و تغییرات تقاضا پاسخ مناسبی می‌دهد.

۷- مراجع

- [۱]. H. Wiendahl, J. Breithaupt, "Automatic production control applying control theory," *International Journal of Production Economics*, vol. ۶۳, pp. ۳۳-۴۶, ۲۰۰۰.
- [۲]. J. Dejonckheere, SM. Disney, M. R. Lambrecht, D. R. Towill, "The impact of information enrichment on the bullwhip effect in supply chains: a control engineering perspective," *European Journal of Operational Research*, vol. ۱۵۳, pp. ۷۲۷-۵۰.
- [۳]. D. R. Towill, G. N. Evans, P. Cheema, "Analysis and design of an adaptive minimum reasonable inventory control system," *Production Planning & Control*, vol. ۸, pp. ۵۴۵-۵۵۷, ۱۹۹۷.
- [۴]. R. Grubbstrom, T. Huynh, "multi-stage capacity constrained production inventory systems in discrete-time with non-zero lead times using MRP theory," *International Journal of Production Economics*, vol. ۱۰۱, pp. ۵۳-۶۲, ۲۰۰۶.
- [۵]. G. Kapsiotis, S. Tzafestas, "Decision making for inventory/production planning using model-based predictive control," *Parallel and distributed computing in engineering systems*. Amsterdam: Elsevier, pp. ۵۵۱-۵۵۶, ۱۹۹۲.
- [۶]. S. Tzafestas, G. Kapsiotis, "Model-based predictive control for generalized production planning problems," *Computers in Industry*, vol. ۳۴, pp. ۲۰۱-۲۱۰, ۱۹۹۷.
- [۷]. P. Lopez, B. Ydstie Grossmann, "A model predictive control strategy for supply chain management," *Computers & Chemical Engineering*, vol. ۲۷, pp. ۱۲۰۱-۱۸, ۲۰۰۳.
- [۸]. W. Wang, R. Rivera, "A novel model predictive control algorithm for supply chain management in semiconductor manufacturing," *Proceedings of the American control conference*, vol. ۱, pp. ۲۰۸-۲۱۳, ۲۰۰۵.
- [۹]. S. Chopra, P. Meindl, *Supply Chain Management Strategy, Planning and Operations*, Pearson Prentice Hall Press, New Jersey, pp. ۵۸-۷۹, ۲۰۰۴.
- [۱۰]. <http://khodroha.com/CNG.htm>
- [۱۱]. E. F. Camacho, C. Bordons, *Model Predictive Control*. Springer, ۲۰۰۴.

- [12]. B. Beamon, "Supply chain design and analysis: models and methods," *International Journal of Production Economics*, vol. 50, pp. 281–94, 1998.
- [13]. E. F. Camacho, C. Bordons, *Model predictive control*, Springer, 2004.
- [14]. R. Findeisen, F. Allgöwer, L. T. Biegler, *Assessment and future directions of nonlinear model predictive control*, Springer, 2007.
- [15]. P. S. Agachi, Z. K. Nagy, M. V. Cristea, A. Imre-Lucaci, *Model Based Control*, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2009.
- [16]. R. Towill, "Dynamic Analysis of An Inventory and Order Based Production Control System," *Int. J. Prod. Res*, vol. 20, pp. 771–787, 2008.
- [17]. E. Perea, "Dynamic Modeling and Classical Control Theory for Supply Chain Management," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 24, pp. 1143–1149, 2007.
- [18]. J. D. Sterman, *Business Dynamics Systems Thinking and Modelling in A Complex World*, Mcgraw Hill Press, pp. 113–128, New York, 2000.