کنترل استنتاجي پيش‌بين برج تقطير

پرديس رفويي[۱] و محمد شاهرخي*[۲]

[۱]دانشجوي کارشناسي ارشد مهندسي شيمي - دانشکده مهندسي شيمي و نفت - دانشگاه صنعتي شريف

[۲] استاد دانشکده مهندسي شيمي و نفت - دانشگاه صنعتي شريف

(تاريخ دريافت ۸۶/۹/۴ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح‌شده ۸۹/٤/۲۷ ، تاريخ تصويب ۸۹/۷/۳)

چکيده

در اين مقاله، عملکرد کنترل استنتاجي پيش‌بين غلظت با بهره‌گيري از شبکه عصبي براي تخمين، در يک برج تقطير چند جزيي خلوص بالا بررسي شده است. ابتدا يک شبکه عصبي مصنوعي براي تخمين غلظت محصول بالاي برج از روي دماي سيني‌هاي برج طراحي شده و سپس يک کنترلر پيش‌بين براي کنترل غلظت تخمين زده‌شده به کار گرفته شده است. عملکرد سيستم کنترل استنتاجي پيش‌بين ارائه‌شده براي حذف اغتشاش و تغيير مقدار مقرر بررسي شده است. نتايج شبيه‌سازي نشان مي‌دهد که کنترلر پيشنهادي از عملکرد مناسبي بهره‌مند است.

واژه‌هاي کليدي: تقطير چند جزئي، کنترل استنتاجي، تخمين زننده، شبکه عصبي مصنوعي، کنترل پيش‌بين

مقدمه

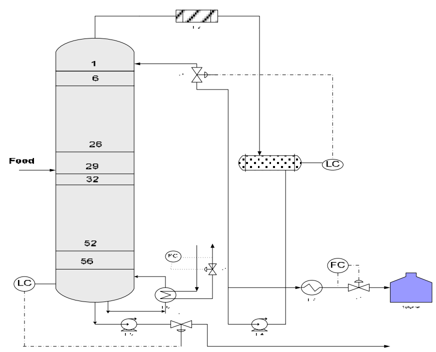
در برج‌هاي تقطير چندجزئي، هدف، حداقل کردن ناخالصي جز کليدي سنگين در محصول بالاي برج و ناخالصي جز کليدي سبک در محصول پايين برج است. در کنترل يک برج تقطير، ايده‌آل آن است که هر دو غلظت محصول بالا و پايين برج اندازه‌گيري و توسط دو متغير ورودي کنترل شود، به طوري که غلظت اجزاي کليدي در هر دو محصول بالا و پايين در مقدار مقرر خود قرار گيرد. برج‌هاي تقطير معدودي هستند که اين ساختار کنترل ايده‌آل را داشته باشند، چرا که آناليزورهاي غلظت گران بوده و هزينه نگهداري بالايي را به سيستم تحميل مي‌کنند. از اين رو متغيرهاي ثانويه از جمله دماي سيني‌هاي برج، اندازه‌گيري و کنترل مي‌شوند. با توجه به ارتباط بين غلظت و دما در برج‌هاي تقطير، مي‌توان غلظت را با استفاده از دماي سيني‌هاي برج تخمين زد و از غلظت تخمين زده‌شده در کنترل کيفيت محصول برج بهره گرفت. تا کنون روش‌هاي مختلفي براي تخمين غلظت محصول برج با استفاده از دماي سيني‌هاي برج ارائه شده است. اولين بار برازيلو(Brosilow)و همکاران، با استفاده از مدل فرايند واندازه‌گيري‌هاي ثانويه اثر اغتشاش روي خروجي اصلي فرايند (غلظت محصول برج) را پيش‌بيني کرده‌اند[۱و۲]. در روش ارائه‌شده، اندازه‌گيرهاي ثانويه به نحوي انتخاب مي‌شوند که تخمين‌زننده طراحي‌شده کمترين حساسيت را به خطاي مدل‌سازي و نويز اندازه‌گيري داشته باشد. در اين روش درستي تخمين تا حد زيادي به درستي مدل فرايند وابسته است که از نقاط ضعف اين روش به حساب مي‌آيد. مجدل(Mejdell) و همکارانش، با استفاده از روش حداقل مربعات جزئي و داده‌هاي زماني يک برج تقطير چندجزئي، غلظت محصول بالا را بر اساس دماي سيني‌هاي برج تخمين زده‌اند. انتخاب سيني‌هاي مناسب بر اساس معيار[۱] PCA انجام گرفته است. آنها عملکرد سه تخمين‌زننده فيلترکالمن، تخمين‌زننده استنتاجي برازيلو و تخمين‌زننده[۲] PLS را براي برج تقطير مورد مطالعه‌شان بررسي و مقايسه کرده‌اند. نتايج نشان مي‌دهد که تخمين‌زننده ارائه‌شده، در مقايسه با دو تخمين‌زننده ديگر عملکرد مناسب‌تري دارند[۳و٤]. کانو(Kano) و همکارانش، غلظت هر دو محصول بالا و پايين يک برج تقطير چندجزئي با تعداد ۳۰ سيني را با استفاده از دماي سيني‌هاي برج، ميزان جريان برگشتي و نرخ حرارت ريبويلر و به کارگيري روش حداقل مربعات جرئي تخمين زده‌اند[۵]. آنها در سال ۲۰۰۳ يک روش جديد با عنوان کنترل استنتاجي ارائه کرده‌اند. به اين ترتيب که مقادير آينده خروجي اصلي فرايند با استفاده از اندازه‌گيري‌هاي ثانويه تخمين زده شده و به جاي مقادير جاري آن کنترل مي‌شود. با استفاده از آناليز[۳]

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۶۱۶۵۴۱۹ , فاکس : ٦٦۰۲۲۸٥۳ ، Email: Shahrokhi@sharif.edu

SVD، از ۳۰ سيني يک برج تقطير چندجزئي، پنج سيني انتخاب شده و در تخمين غلظت به کار گرفته شده است[٦]. مينگ(Ming) و همکاران، با استفاده از داده‌هاي ديناميکي به دست آمده از فرايند[٤] (TE)، يک شبکه عصبي برگشتي به عنوان تخمين‌زننده طراحي کرده‌اند و ادعا کرده‌اند که شبکه عصبي طراحي‌شده مي‌تواند جايگزين آناليزورهاي غلظت شود[۷]. باهار(Bahar)براي تخمين غلظت هر دو محصول بالا و پايين يک برج تقطير چندجزئي، يک شبکه عصبي مصنوعي به عنوان تخمين‌زننده طراحي کرده است. سه دما از قسمت بالايي برج و سه دما از قسمت پاييني برج بر اساس معيارSVD، به ترتيب براي استنتاج غلظت محصول بالا و پايين انتخاب شده‌اند. در نهايت با استفاده از ساختار کنترل پيش‌بين مقادير تخمين‌زده‌شده غلظت، کنترل شده‌اند[۸]. گوپتا(Gupta)، يک شبکه عصبي رو به جلو براي تخمين غلظت همه اجزاي يک برج تقطير چندجزئي در هر دو محصول بالا و پايين ارائه کرده است. دماي همه سيني-هاي برج مورد مطالعه وي به عنوان ورودي‌هاي شبکه عصبي در تخمين غلظت اجزاي محصولات برج به کار گرفته شده است[۹]. در اين مقاله، با استفاده از معيارهاي انتخاب سيني مناسب براي برج‌هاي تقطير چندجزئي خلوص بالا که رفتار ويژه‌اي در مقايسه با برج‌هاي ديگر دارند، چهار سيني انتخاب شده است. سپس يک شبکه عصبي مصنوعي به عنوان تخمين‌زننده غلظت محصول بالاي برج تقطير مورد مطالعه، طراحي شده است. در نهايت غلظت تخمين‌زده‌شده، توسط کنترل پيش‌بين با هدف ثابت نگه داشتن غلظت تولوئن در محصول بالاي برج به کار گرفته مي‌شود. عملکرد کنترل استنتاجي پيش‌بين ارائه‌شده براي هر دو حالت تغيير مقدار مقرر و حذف اغتشاش، بررسي شده و با کنترلر PI مقايسه شده است.

مشخصات برج تقطير

برج تقطير مورد مطالعه اين مقاله، برج دوم(برج تولوئن) واحد جداسازي (بنزن-تولوئن-زايلن) پتروشيمی بندر امام است. برج تقطير مورد نظر شامل ٥٦ سيني بوده و خوراک وارد سيني ۲۹ مي‌شود. شماي کلي برج تقطير تولوئن در شکل(۱) نشان داده شده است. خوراک برج که شامل بنزن، تولوئن، مخلوط زايلن‌ها و ديگر هيدروکربن-هاي سنگين است، محصول پايين برج قبلي(جداسازي بنزن) است. تولوئن با خلوص بالاي ۹۹.۹۹۲۵۳درصد از محصول بالاي برج خارج شده و مخلوط زايلن‌ها به عنوان محصول پايين برج وارد برج سوم(جداسازي زايلن‌ها) مي‌شود.



شکل۱: شماي کلي برج تقطير تولوئن

نرخ حرارت ريبويلر برج ثابت بوده و از طريق يک کنترلر دبي، ميزان بخار ورودي به ريبويلر ثابت نگه داشته مي‌شود. سطح مايع ريبويلر و سطح مايع مخزن جريان برگشتي به ترتيب توسط ميزان محصول پايين برج و جريان برگشتي کنترل مي‌شود و غلظت محصول بالاي برج توسط ميزان جريان محصول بالاي برج کنترل مي-شود. در جدول(۱)، خلاصه‌اي از داده‌هاي عملياتي و عوامل طراحي برج آورده شده است.

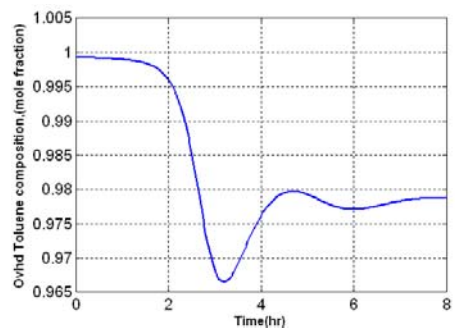
جدول۱:مشخصات طراحي، شرايط خوراک و داده‌هاي عملياتي

تعداد سینی‌ها	۵۶
قطر داخلی سینی‌ها	m۳.۵
فاصله بین سینی‌ها	m۰.۶۵
نوع سینی‌ها	Sieve
شماره سینی خوراک	۲۹
نرخ خوراک	kgmol/hr۶۹۸.۹
فشار خوراک	kg/cm²-g۴.۲۰۶
دمای خوراک	C°۱۴۱
علظت خوراک(درصد مولی)	
بنزن	۰.۰۲۱۵
تولوئن	۷۳.۹۱۸۹
زایلن‌ها(اورتو–پارا–متا)	۲۳.۰۹۴۶
کیومن	۰.۸۲۲۸
بی فنیل	۱.۱۹۳۴۷
آروماتیک‌های سنگین	۰.۲۰۷۵
فشار سینی بالای برج	kg/cm²-g۰.۳۵
فشار سینی پایین برج	kg/cm²-g۰.۹
نرخ جریان برگشتی	kgmol/hr۸۶۵
نرخ محصول بالای برج	kgmol/hr۵۱۶.۹
نرخ حرارت ریبویلر	Mj/hr۴۸.۹

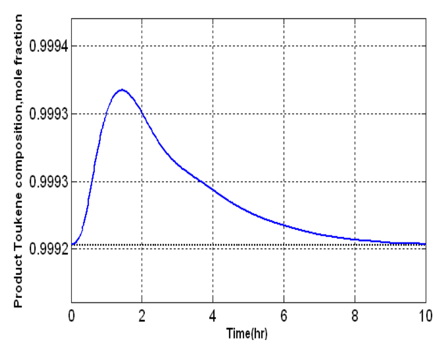
شبیه‌سازي دینامیکي و استاتیکي برج توسط نرم‌افزار HYSYS3.2 انجام گرفته است و کنترل آن از طریق به کارگیري objectهاي HYSYS در محیط برنامه‌نویسي MATLAB انجام شده است.

کنترل مستقیم غلظت

با توجه به تأخیر زماني زیاد دستگاه‌هاي اندازه‌گیري غلظت(در مورد برج مورد نظر ۱۵ دقیقه در نظر گرفته شده است)، کنترل مستقیم غلظت همان طور که در شکل‌هاي (۲) تا (۴) مشاهده مي‌شود، در تغییر مقدار مقرر و حذف اغتشاش خوراک عملکرد بسیار کند و ضعیفي ارائه مي‌دهد.



شکل۲:کنترل مستقیم غلظت به ازای تغییر مقدار مقرر

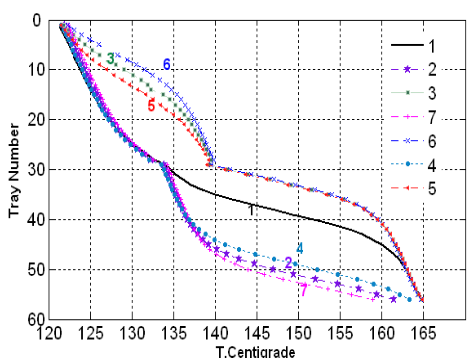


شکل۳: کنترل مستقیم غلظت برای ۱۵درصد کاهش غلظت تولوئن خوراک

شکل۴: کنترل مستقیم غلظت برای ۱۵درصد افزایش غلظت تولوئن خوراک

کنترل غیر مستقیم غلظت

در سیستم‌هاي دوجزئي با فشار ثابت، دما به طور مستقیم در ارتباط با غلظت است. از دیدگاه تئوري، بهترین مکان براي قرار دادن حسگر دما براي کنترل غلظت محصول بالاي برج، سیني اول است. از دیدگاه عملي به دلیل وجود تغییرات فشار در طول برج باید محل حسگر دما از سیني اول به سیني‌هاي پایین‌تر تغییر کند. در سیستم‌هاي چندجزئي از جمله برج مورد مطالعه این مقاله، دما به دلیل عواملي از جمله اثر فشار و تغییرات فشار روي دماي سیني‌ها، اثر غلظت جز غیرکلیدي و نوع و بزرگي اغتشاش‌هاي وارد به برج، معیار کاملا مناسبي از غلظت نیست. به ازاي مقادیر مختلف متغیر کنترل‌کننده (جریان محصول بالاي برج)، نمودار حالت یکنواخت دما در شکل(۵) نشان داده شده است.



شکل۵: نمودار حالت یکنواخت دماي سینی‌های برج

همان طور که از شکل مشخص است، در صورتي که سیني‌هاي بین سیني ششم و پانزدهم را به عنوان محل حسگر دما انتخاب کنیم، براي شکل‌هاي(۳) و(٥) و(٦) هر دو محصول بالا و پایین برج در حد مناسبي کنترل مي‌شود. انتخاب همین سیني‌ها براي شکل‌هاي (۲) و(٤) و(۷)، غلظت محصول بالا را در مقدار مقرر خود ثابت نگه مي‌دارد. در حالي که غلظت محصول پایین برج با تغییرات زیادي رو به رو است. انتخاب سیني‌هاي بین سیني چهل‌وهشتم و سیني پنجاه‌ودوم براي شکل‌هاي (۲) و (٤) و(۷)مناسب است. در حالي که انتخاب همین سیني‌ها براي شکل‌های(۳) و(٥) و(٦) سبب تغییرات زیادي در غلظت محصول بالاي برج مي‌شود. مقادیر ناخالصي‌هاي هر دو محصول بالا و پایین برج، به ازاي مقادیر حالت یکنواخت متفاوت در جدول (۲) آورده شده است.

جدول۲: مقادیر ناخالصی درمحصول بالا و پایین برج

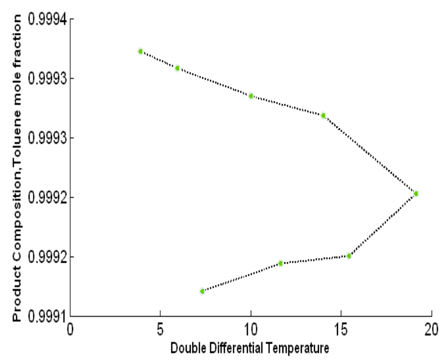
Plot.No	Xyl.Ovh (ppm)	Tol.bott (ppm)
6	30007.21990	28.2728
3	15067.2771	34.1843
5	7450.7375	38.6204
1	185.4789	428.9372
7	69.5172	95701.4882
2	94.2302	52447.6701
4	111.9025	27897.4468

بويد (Boyd) براي کنترل برج‌هايي که مشابه برج تولوئن مورد نظر رفتار sharp split دارند، استفاده از اختلاف دماي سيني‌ها را ارائه کرده است. اختلاف دماي دو سيني قسمت پايين برج از اختلاف دماي دو سيني قسمت بالاي برج کم شده و از اين اختلاف براي کنترل دما استفاده شده است. بويد تأکيد کرده است که اين روش براي برج‌هاي تقطير با خلوص بالا به کار گرفته مي شود؛ به طوري که خلوص محصولات در حدppm باشد و براي زماني که خلوص محصول در حد درصد مولي است، اين روش نامناسب خواهد بود.اختلاف دماها به صورت زير محاسبه مي‌شود.

$$\Delta\Delta T = (T_{52} - T_{32}) - (T_{26} - T_6) \qquad (۱)$$

به کار گرفتن $\Delta\Delta T$، به عنوان متغير کنترل‌کننده، سيستم کنترل برج موردمطالعه را با دو مشکل بسيار عمده مواجه کرد. يک مشکل، موضوع منحصر به فرد نبودن رابطه غلظت و $\Delta\Delta T$ است و مشکل ديگر رفتار ديناميکي نامناسب اين متغير است. در شکل(٦)، نمودار غلظت تولوئن در محصول بالاي برج بر حسب $\Delta\Delta T$ به ازاي نقاط حالت يکنواخت مختلف رسم شده است. همان طور که از شکل مشخص است، به ازاي يک $\Delta\Delta T$ مشخص، دو غلظت متفاوت براي محصول بالاي برج تولوئن مورد مطالعه، وجود دارد. پاسخ مدار باز $\Delta\Delta T$، به ازاي تغييرات پله متغير کنترل‌کننده(ميزان جريان محصول بالاي برج) و همچنين اغتشاش خوراک برج در شکل‌هاي (۷) تا (۹) آورده شده است. سبب رفتار غيرفازمينيمم و به شدت غيرخطي $\Delta\Delta T$ مي‌شود که کنترل توسط اين متغير، از جمله تنظيم کنترلر با مشکل همراه شود. استفاده از اختلاف اختلاف دما به ازاي يک سري از اغتشاش‌هاي خوراک برج تقطير تولوئن مورد نظر، سبب ناپايداري سيستم شد. لوبن(Luyben) براي کنترل برج‌هايي که رفتار sharp split دارند، استفاده از متوســط دماهاي چندين سيني برج را ارائه کرده است و نشان داده است که روش ارائه‌شده در مقايسه با استفاده از کنترل تک‌سيني، عملکرد کنترل را در حد چشمگيري بهبود بخشيده است[۱۱]. باکلي(Buckly) و همکاران گزارشي از بهبود عملکرد کنترل چندين برج تقطير صنعتي، در صورت استفاده از متوسط ٤ الي ٥ سيني تهيه کرده‌اند[۱۲]. در اين مقاله T_{AV} را متوسط همان ٤ سيني انتخاب شده در نظر مي‌گيريم.

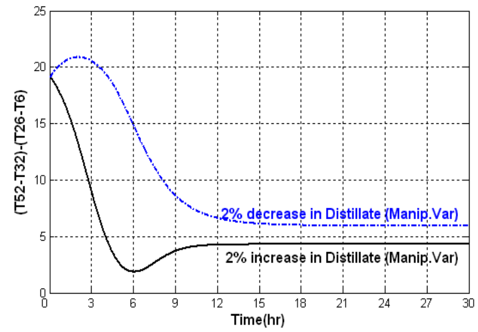
$$T_{AV} = \frac{(T_6 + T_{26} + T_{32} + T_{52})}{4} \qquad (۲)$$



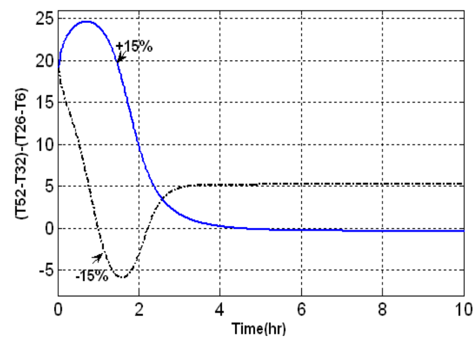
شکل٦: غلظت تولوئن در محصول بالا به اختلاف اختلاف دما

با انتخاب T_{AV}، به عنوان متغير کنترل‌کننده، مشکل يک به يک نبودن رابطه غلظت و متغير $\Delta\Delta T$ و رفتار غير فاز مينيمم وجود نخواهد داشت. در شکل (۹) غلظت محصول بالاي برج تولوئن مورد مطالعه به ازاي T_{AV} براي حالات يکنواخت متفاوت نشان داده شده است. همان طور که مشاهده مي‌شود، اين موضوع براي T_{AV} وجود ندارد. همان طور که از شکل‌هاي (۱۰) و (۱۱) آشکار است، پاسخ ديناميکي T_{AV} به ازاي تغييرات پله در متغير ورودي و شرايط خوراک در مقايسه با $\Delta\Delta T$، رفتار غير فاز مينيمم ندارد و همچنين رفتار خطي‌تري را ارائه داده است. اين موضوع سبب مي‌شود تنظيم کنترلر در صورت استفاده از T_{AV} به عنوان متغير ثانويه با سهولت بيشتري انجام گيرد. استفاده از T_{AV} بر خلاف $\Delta\Delta T$ براي حذف همه اغتشاش‌هاي خوراک برج مورد نظر باعث ناپايداري سيستم نمي‌شود.

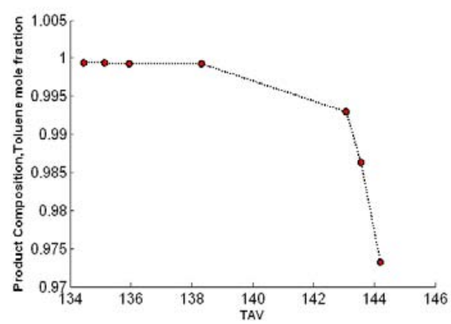
اگر از T_{AV} به جاي غلظت براي کنترل استفاده شود، پاسخ مدار بسته سيستم در اثر اغتشاش در خوراک، مطابق شکل‌هاي (۱۲) و(۱۳) است.



شکل۷: تغییرات $\Delta\Delta T$ به ازای ۲% تغییر ورودی

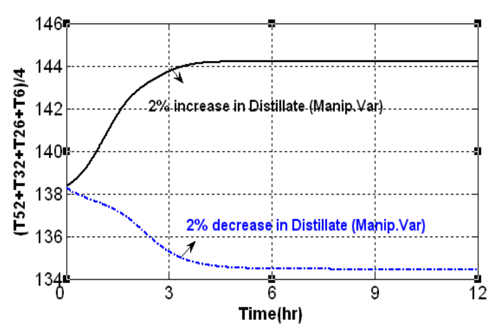


شکل۸: تغییرات $\Delta\Delta T$ برای ۱۵% اغتشاش درغلظت تولوئن خوراک

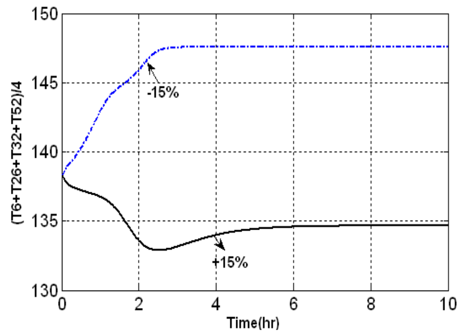


شکل۹: غلظت تولوئن در محصول بالا به متوسط دماها

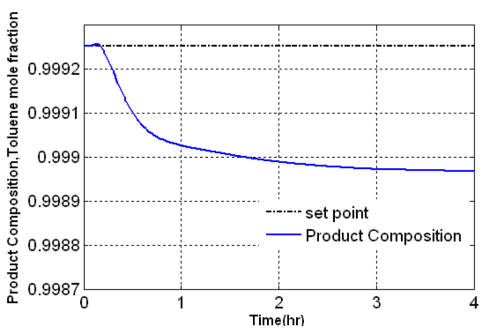
همان طور که مشخص است، در اثر وارد شدن اغتشاش‌هاي خوراک، ثابت نگه داشتن دما در مقدار مقرر خود، غلظت محصول بالا را کنترل نمي‌کند.



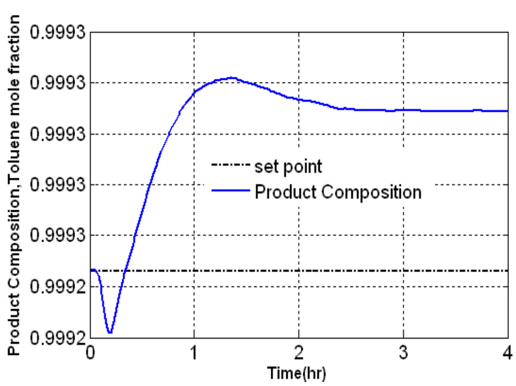
شکل۱۰: تغییرات T_{AV} به ازای ۲% تغییر ورودی



شکل۱۱: تغییرات T_{AV} برای ۱۵% اغتشاش درغلظت تولوئن



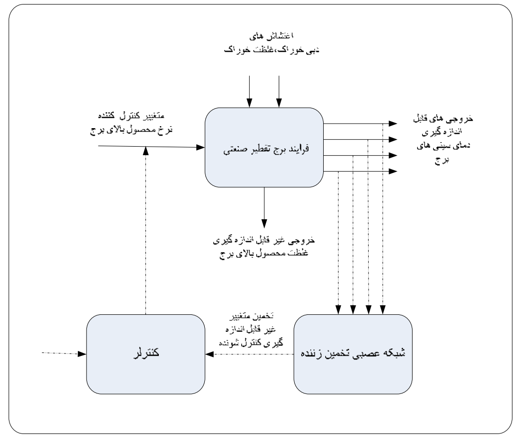
شکل۱۲: پاسخ مدار بسته غلظت محصول بالا به ازای ۱۵% کاهش غلظت تولوئن خوراک



شکل۱۳: پاسخ مدار بسته غلظت محصول بالا به ازای ۱۵% افزایش غلظت تولوئن در خوراک

این موضوع به آن دلیل است که در برج‌هاي تقطیر چندجزئي کنترل غلظت محصول توسط کنترل دما انجام مي‌گیرد. در صورت تغییر در شرایط خوراک، مقدار مقرر دما براي دستیابي به غلظت ثابت و یکنواخت محصول، باید تغییر کند. این بدان معناست که در کنترل یک برج تقطیر چندجزئي به وسیله دما، همواره مقدار واحدي براي مقدار مقرر دما وجود ندارد و باید این مقدار مقرر بر حسب تغییر در شرایط خوراک ورودي تغییر کند. خروجي غیر قابل اندازه‌گیري (غلظت) را پیش‌بیني کرده و در نهایت

مقادير تخمين زده شده در كنترل كيفيت محصول برج به كار گرفته مي‌شوند. شكل(١٤) ساختار كنترل استنتاجي به كار گرفته شده را نشان مي‌دهد.



شكل١٤: ساختار كنترل استنتاجی

شبكه عصبي طراحي شده براي تخمين غلظت محصول برج تولوئن

براي تخمين غلظت تولوئن در محصول بالاي برج موردمطالعه،از همان دماي سيني‌هاي بيست و شش،شش از بالاي برج و پنجاه دوم، سي و دوم از پايين برج به عنوان ورودي‌هاي شبكه عصبي استفاده مي‌شود. در شبكه عصبي طراحي‌شده، غلظت پيش‌بيني شده تولوئن توسط شبكه عصبي بر اساس ورودي و خروجي‌هاي لحظات قبلي به دست مي‌آيد. به اين ترتيب كه بردار ورودي شبكه عصبي شامل دماي سيني‌ها در لحظه حاضر و لحظات قبلي و همچنين غلظت تخمين‌زده‌شده در لحظه حاضر است. بردار ورودي شبكه عصبي تخمين‌زننده به اين ترتيب است:

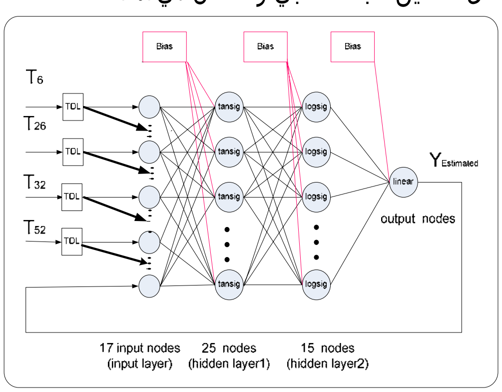
$$u_k=[T_i(k),T_i(k-n),T_i(k-2n),T_i(k-3n),y(k)] \quad (۳)$$

در اين معادله T_i ها دماي همان ٤ سيني منتخب و y غلظت پيش‌بيني شده توسط شبكه عصبي است. بنابراين بردار ورودي شامل ١٧ المان است(دماها در لحظات حاضر و گذشته و غلظت تخمين‌زده‌شده). n در رابطه(٣) برابر با ٥ دقيقه در نظر گرفته مي‌شود. براي به دست آوردن داده‌هاي ورودي- خروجي مورد نياز براي آموزش شبكه عصبي، با استفاده از شبيه‌سازي برج مورد نظر، پاسخ‌هاي ديناميكي سيستم را به تغييرات مختلف در مشخصات خوراک از جمله دبي و غلظت خوراک برج و همچنين تغييرات در متغير كنترل‌كننده (ميزان جريان محصول بالاي برج) به دست آورده و نمودار دما به دست آمده و غلظت متناظر آن در آموزش شبكه به كار گرفته شده است[١٤].

براي آموزش شبكه عصبي بايد ابتدا همه داده‌هاي ورودي-خروجي، P، بر اساس رابطه(٤) نرمال شده باشند و سپس در آموزش شبكه استفاده شوند.

$$P_n=\frac{P-P_{\min}}{P_{\max}-P_{\min}} \quad (٤)$$

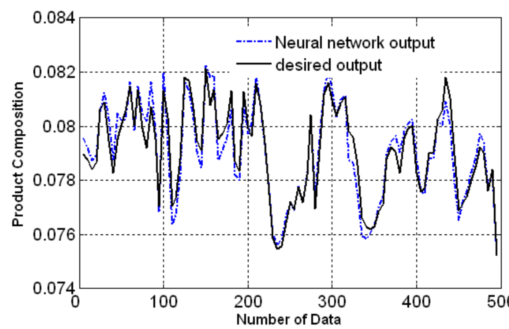
$P_{\min}$ و $P_{\max}$ به ترتيب مقادير حداقل و حداكثر داده‌هاي ورودي و خروجي است. شبكه عصبي طراحي شده به عنوان تخمين‌زننده غلظت، يک شبكه عصبي MLP است كه يک لايه ورودي، دو لايه پنهان و يک لايه خروجي دارد. لايه ورودي كه شامل ١٧ گره عصبي است و دماي سيني‌هاي منتخب را در لحظه حاضر و لحظات قبلي و همچنين غلظت تولوئن در لحظه حاضر را به عنوان ورودي دريافت مي‌كند. لايه پنهان اول و دوم به ترتيب هر يك شامل ٢٥ و ١٥ گره عصبي هستند. لايه خروجي شامل يک گره عصبي است كه سيگنال‌هاي رسيده از لايه پنهان دوم در اين گره عصبي با هم جمع شده و خروجي شبكه عصبي كه غلظت تخمين‌زده‌شده تولوئن در بالاي برج است را تشكيل مي‌دهد. در گره‌هاي عصبي لايه‌هاي پنهان از تابع فعال‌سازي سيگموئيد استفاده شده است و در گره عصبي لايه خروجي نيز از تابع فعال‌سازي خطي استفاده شده است. شكل١٥، اين شبكه عصبي را نشان مي‌دهد.



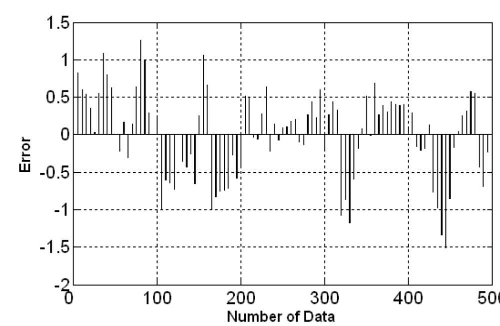
شكل١٥: شبكه عصبی طراحی شده

پس از انجام عمليات آموزش شبكه عصبي، وزن‌هاي مربوط به اتصالات اين شبكه عصبي به دست مي‌آيد. سپس عملكرد شبكه عصبي آموزش داده شده با استفاده

از ۲۵درصد داده‌هاي ورودي-خروجي سيستم كه در آموزش شبكه استفاده نشده است، از طريق آزمايش اعتبار سنجيده مي‌شود. (به طور كلي ۲۰۰۰ سري داده‌هاي ورودي- خروجي جمع‌آوري شده است كه ۱۵۰۰ سري براي آموزش شبكه و از ۵۰۰ سري داده‌هاي باقي‌مانده در آزمايش اعتبار استفاده شده است). نتايج مربوط به آزمايش اعتبار بين خروجي شبكه عصبي و خروجي فرايند واقعي در اشكال (١٦) و (١٧) آورده شده است. نتايج حاصل از تخمين غلظت تولوئن محصول بالاي برج مورد مطالعه با استفاده از شبكه عصبي به ازاي تغيير متغير كنترل‌كننده و اغتشاش‌هاي خوراک برج در اشكال (١٨) تا (٢٠) آورده شده است. همان طور كه از شكل‌ها مشخص است، شبكه عصبي تخمين زننده از دقت و درستي بالايي بهره‌مند است.



شکل١٦: مقایسه میان خروجی مطلوب و خروجی شبکه عصبی



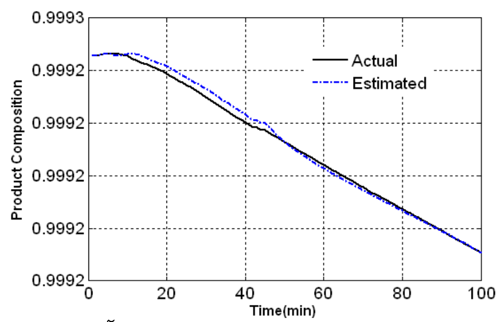
شکل١٧: خطای میان خروجی مطلوب و خروجی شبکه عصبی

کنترل پیش‌بین

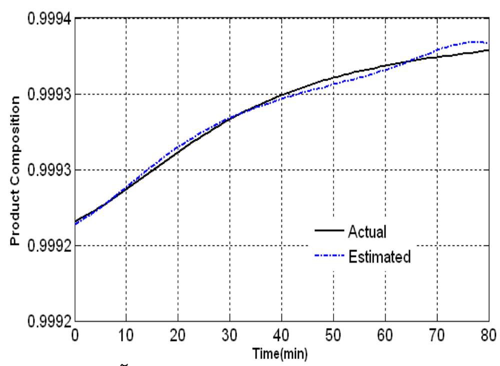
در كنترل پيش‌بين با استفاده از مدل فرايند، رفتار آينده سيتم پيش‌بيني شده و مقادير كنترل‌كننده در گام-هاي بعدي به نحوي كه رفتار فرايند بهينه شود، با استفاده از مدل سيستم تعيين مي‌شود. براي تعيين مقادير ورودي‌ها در گام‌هاي بعدي، مقادير مقرر و قيدهاي آينده فرايند به كنترل پيش‌بين داده مي‌شود و كنترلر با پيش-بيني رفتار سيستم در افق پيش‌بيني درنظرگرفته شده، با حداقل كردن تابع هدف مورد نظر، مقادير بهينه متغيرهاي ورودي را در افق كنترل تعيين مي‌كند[١٣].

روش‌هاي كنترل پيش‌بين از پيش‌بيني رفتار سيستم استفاده مي‌كنند. در اين بخش نشان داده مي‌شود كه چگونه اين پيش‌بيني انجام مي‌شود. فرم كلي معادله پيش‌بيني به اين شكل است.

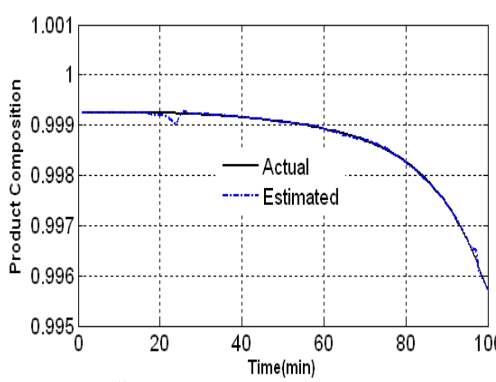
$$\underset{\rightarrow k}{y} = H\Delta \underset{\rightarrow k-1}{u} + P \underset{\leftarrow k}{x} \quad (5)$$



شکل١٨: مقایسه تخمین غلظت و مقدار واقعی آن به ازای ۲% تغییر ورودی



شکل١٩: مقایسه تخمین غلظت و مقدار واقعی آن به ازای ۱۵% افزایش غلظت تولوئن خوراک



شکل٢٠: مقایسه تخمین غلظت و مقدار واقعی آن به ازای ۱۵% کاهش غلظت تولوئن خوراک

در اينجا H ماتريس $Toeplitz$ پاسخ پله سيستم است. P ماتريسي است که عوامل آن به عوامل مدل بستگي دارد. يکي از متداول‌ترين مدل‌ها براي کنترل پيش‌بين مدل[5] $ARMA$ است:

$$a(z)y_k = b(z)u_k \qquad (٦)$$

با در نظر گرفتن $A(z) = a(z)\Delta(z)$ مدل زير به دست مي‌آيد:

$$A(z)y_k = b(z)\Delta u_k \qquad (٧)$$

که در اين رابطه $A(z)$ و $B(z)$ به صورت زير تعريف مي‌شوند و فرض مي‌شود که براي يک سيستم سره، $b_o = 0$ است.

$$\begin{aligned} A(z) &= 1 + A_1 z^{-1} + A_2 z^{-2} + \ldots + A_{n+1} z^{-n-1} \\ b(z) &= b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \ldots + b_n z^{-n} \end{aligned} \qquad (٨)$$

پيش‌بيني چند گام به جلو

معادله تفاضل متناظر براي مدل به اين ترتيب است:

$$\begin{aligned} y_{k+1} &= -A_1 y_k - \ldots - A_{n+1} y_{k-n} + \\ & b_1 \Delta u_k + \ldots + b_n \Delta u_{k-n+1} \end{aligned} \qquad (٩)$$

براي راحتي، اين معادله مي‌تواند به دو بخش تقسيم شود: در بخش اول، همه اجزاء شناخته شده هستند(به ورودي‌ها و خروجي‌هاي گذشته مربوط هستند) و بخش دوم شامل تغييرات ورودي‌هاي آينده است. معادله(۹) پيش‌بيني يک گام به جلو را با دانستن داده‌هاي گذشته و Δu زمان حال مي‌دهد. معادله تفاضل را براي n_y لحظه بعد مي‌توان به فرم ماتريسي زير نوشت:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ A_1 & 1 & \cdots & 0 \\ A_2 & A_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{C_A} \underbrace{\begin{bmatrix} y_{k+1} \\ y_{k+2} \\ \vdots \\ y_{k+ny} \end{bmatrix}}_{\underset{\to k}{y}} + \underbrace{\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \cdots & A_{n+1} \\ A_2 & A_3 & \cdots & 0 \\ A_3 & A_4 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{H_A} \underbrace{\begin{bmatrix} y_k \\ y_{k-1} \\ \vdots \\ y_{k-n} \end{bmatrix}}_{\underset{\leftarrow k}{y}}$$
$$= \underbrace{\begin{bmatrix} b_1 & 0 & \cdots & 0 \\ b_2 & b_1 & \cdots & 0 \\ b_3 & b_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{C_{zb}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+ny-1} \end{bmatrix}}_{\Delta \underset{\to k-1}{u}} + \underbrace{\begin{bmatrix} b_2 & b_3 & \cdots & b_n \\ b_3 & b_4 & \cdots & 0 \\ b_4 & b_5 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{H_{zb}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u_{k-1} \\ \Delta u_{k-2} \\ \vdots \\ \Delta u_{k-n+1} \end{bmatrix}}_{\Delta \underset{\leftarrow k-1}{u}} \qquad (١٠)$$

با استفاده از علائم $Teoplitz\ /\ Hankel$ معادله به فرم ساده زير در مي‌آيد.

$$C_A \underset{\to k}{y} + H_A \underset{\leftarrow k}{y} = C_{zb} \Delta \underset{\to k-1}{u} + H_{zb} \Delta \underset{\leftarrow k-1}{u} \qquad (١١)$$

از رابطه بالا پيش‌بيني خروجي به اين شکل در مي‌آيد:

$$\underset{\to k}{y} = C_A^{-1}\left(C_{zb} \Delta \underset{\to k-1}{u} + H_{zb} \Delta \underset{\leftarrow k-1}{u} - H_A \underset{\leftarrow k}{y} \right) \qquad (١٢)$$

براي راحتي، معادله را مي‌توان به اين ترتيب نشان داد:

$$\underset{\to k}{y} = H \Delta \underset{\to k-1}{u} + P \Delta \underset{\leftarrow k-1}{u} + Q \underset{\leftarrow k}{y} \qquad (١٣)$$

در اين رابطه

$$H = C_A^{-1} C_{zb}, P = C_A^{-1} H_{zb}, Q = -C_A^{-1} H_A$$

C_A^{-1} به راحتي با توجه به اينکه $C_A^{-1} = C_{1/A}$ است، حساب مي‌شود. يک جايگزين براي محاسبات ماتريسي در حل معادلات ديوفانتين است.

تابع هدف و بهينه‌سازي

قانون کنترل با مينيمم کردن يک تابع هدف به دست مي‌آيد. تابع هدفي که براي GPC استفاده مي‌شود، به اين صورت است:

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=n_w}^{n_y} \left\| r_{k+i} - y_{k+i} \right\|_2^2 + \lambda \left\| \Delta u_{k+i} \right\|_2^2 \\ &= \sum_{i=n_w}^{ny} \left\| e_{k+i} \right\|_2^2 + \lambda \left\| \Delta u_{k+i} \right\|_2^2 \end{aligned} \qquad (١٤)$$

فرض مي‌شود که در خارج از افق کنترلي تغييرات کنترل صفر است. درجه آزادي که مي‌توان براي بهينه-سازي استفاده کرد، گام‌هاي بعدي متغير ورودي است. يعني اولين n_u حرکت بعدي. پس قانون کنترل با مينيمم کردن تابع هدف J با استفاده از تغيير آينده متغيرهاي کنترل‌کننده تعيين مي‌شود. از $\Delta \underset{\to}{u}$ تعيين شده ، فقط المان اول آن به سيستم اعمال مي‌شود و بهينه‌سازي در هر لحظه تکرار مي‌شود[١٥].

تابع هدف به فرم فشرده زير مي‌تواند نوشته شود:(براي سادگي انديس k براي لحظه نمونه‌گيري حذف شده است)

$$J = \left\| \underset{\to}{\mathbf{r}} - \underset{\to}{\mathbf{y}} \right\|_2^2 + \lambda \left\| \Delta \underset{\to}{\mathbf{u}} \right\|_2^2 \qquad (١٥)$$

با جايگذاري $\underset{\to}{\mathbf{y}}$ از رابطه(۱۳) در رابطه(۱۵) داريم:

$$J = \left\| \underset{\to}{\mathbf{r}} - H \Delta \underset{\to}{\mathbf{u}} + P \Delta \underset{\leftarrow}{\mathbf{u}} + Q \underset{\leftarrow}{\mathbf{y}} \right\|_2^2 + \lambda \left\| \Delta \underset{\to}{\mathbf{u}} \right\|_2^2 \qquad (١٦)$$

موضوع بهينه‌سازي به اين شکل خواهد بود:

$$\begin{aligned} \min_{\Delta \underset{\to}{u}} \quad J &= \Delta \underset{\to}{\mathbf{u}}^T \left(H^T H + \lambda I \right) \Delta \underset{\to}{\mathbf{u}} \\ &+ 2 \Delta \underset{\to}{\mathbf{u}}^T H^T \left[P \Delta \underset{\leftarrow}{\mathbf{u}}^T - Q \underset{\leftarrow}{\mathbf{y}} - \underset{\to}{\mathbf{r}} \right] + k \end{aligned} \qquad (١٧)$$

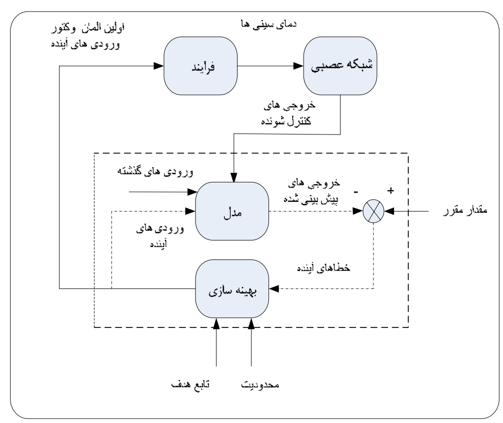
$k=\left\|\underset{\leftarrow}{\mathbf{r}}-P\Delta\underset{\leftarrow}{\mathbf{u}}-Q\underset{\leftarrow}{\mathbf{y}}\right\|$ شامل عبارت‌هايي است که به $\Delta\underset{\leftarrow}{u}$ وابسته نيست و مي‌تواند حذف شود. تابع هدف به دست‌آمده مجذوري و مثبت است و یک مينيمم دارد. بنابراين با قرار دادن مشتق اول برابر صفر مي‌توان $\Delta\underset{\leftarrow}{u}$ بهينه را به دست آورد:

$$\Delta\underset{\leftarrow}{\mathbf{u}}=\left(H^T H+\lambda I\right)^{-1}H^T\left[\underset{\leftarrow}{\mathbf{r}}-P\underset{\leftarrow}{\mathbf{y}}-Q\Delta\underset{\leftarrow}{\mathbf{u}}\right] \qquad (۱۸)$$

اولين المان از $\Delta\underset{\leftarrow}{u}$ به دست آمده، به عنوان مقادير ورودي لحظه بعدي استفاده مي‌شود و محاسبات در لحظه بعدي دوباره تکرار مي‌شود[۱۵].

کنترل استنتاجي پيش‌بين غلظت برج تولوئن

بعد از تخمين غلظت با استفاده از اندازه‌گيري‌هاي ثانويه، از آن در ساختار کنترل پيش‌بين براي کنترل غلظت استفاده مي‌شود (شکل۲۱). در اين قسمت ابتدا مدل‌هاي $ARMA$ غلظت، براي استفاده در کنترل پيش-بين شناسايي مي‌شوند[۱٦]. غلظت تخمين زده شده با استفاده از کنترل پيش‌بين کنترل مي‌شود.



شکل۲۱: ساختار کنترل استنتاجي پيش‌بين فرمولاسيون الگوريتم GPC [٦]

براي به دست آوردن داده‌هاي ورودي-خروجي براي شناسايي مدل سيستم از ورودي‌هاي $PRBS$ [۷] استفاده شده است. با استفاده از داده‌هاي به دست‌آمده و جعبه ابزار شناسايي $MATLAB$ مدل $ARMA$ مربوط به آن به غلظت تولوئن در محصول بالاي برج مورد نظر به ميزان جريان محصول بالا به عنوان متغير کنترل‌کننده، شناسايي شده است. از بين داده‌هاي اندازه‌گيري‌شده برج تولوئن حدود ۲۰درصد براي تعيين اعتبار مدل، استفاده شده است. مدل غلظت در دو محدوده خلوص بالا(براي حذف اغتشاش) و محدوده غيرخلوص بالا(براي تغيير مقدار مقرر به مقداري که در محدوده خلوص بالا قرار نمي‌گيرد) به دست آمده است:

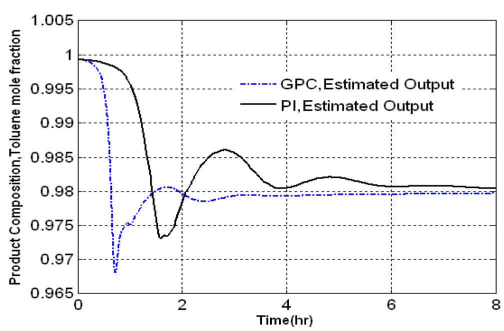
مدل مربوط به محدوده خلوص بالاي غلظت:

$$\begin{aligned}&y(k)-1.826\,y(k-1)+0.9364\,y(k-2)\\&-0.2216\,y(k-3)+0.1119\,y(k-4)\\&=3.495e-6u(k-4)\end{aligned} \qquad (۱۹)$$

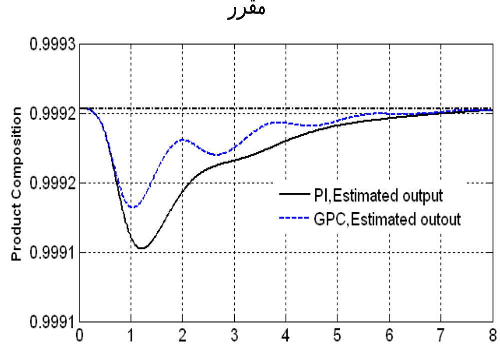
مدل مربوط به محدوده غيرخلوص بالاي غلظت:

$$\begin{aligned}&y(k)-2.204\,y(k-1)+1.19\,y(k-2)\\&+.2338\,y(k-3)-0.2191\,y(k-4)\\&=8.805e-9u(k-4)\end{aligned} \qquad (۲۰)$$

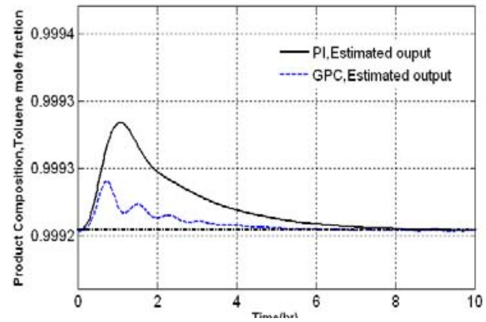
نتايج کنترل استنتاجي پيش‌بين به ازاي تغيير مقدار مقرر و حذف اغتشاش براي برج تولوئن مورد مطالعه در زير آورده شده است. پاسخ مدار بسته غلظت به ازاي تغيير مقدار مقرر از۰.۹۹۹۲۵۳ به ۰.۹۸، براي دو حالتي که از کنترلر پيش‌بين و PI به منظور کنترل غلظت تخمين-زده‌شده استفاده شود، در شکل(۲۲) نشان داده شده است. پاسخ مداربسته غلظت به ازاي اغتشاش‌هاي خوراک در اشکال(۲۳) و (۲٤) آورده شده است. همان طور که مشاهده مي‌شود، کنترلر پيش‌بين عملکرد مناسبتري از کنترلر PI ارائه کرده است.



شکل۲۲: پاسخ مدار بسته غلظت محصول بالا برای تغيير مقدار مقرر



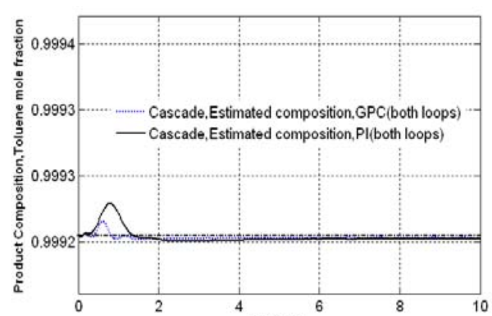
شکل۲۳: پاسخ مدار بسته غلظت محصول بالا به ازای ۱۵% کاهش غلظت تولوئن خوراک



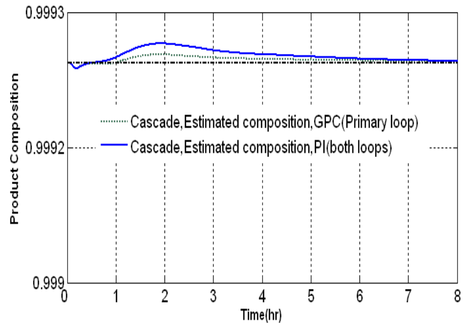
شکل٢٤: پاسخ مدار بسته غلظت محصول بالا به ازای ١٥%
افزايش غلظت تولوئن خوراک

استفاده از کنترل متوالي در کنترل غلظت برج تولوئن

در کنترل غيرمستقيم غلظت، پاسخ مداربسته سيستم به اغتشاش‌هاي وارده خوراک به دليل مشخصه‌هاي ديناميکي بهتر دما در مقايسه با غلظت محصول سريع‌تر است، اما به دليل ثابت بودن مقدار مقرر حلقه دما، خطاي چشمگيري در غلظت تولوئن در محصول بالاي برج وجود دارد. از طرف ديگر استفاده از تخمين غلظت با وجود اينکه باعث بهبود عملکرد کنترل شد، اما به دليل پاسخ-هاي کند و تأخير زماني زياد غلظت، عملکرد چندان مناسبي ندارد. يک راه‌حل، استفاده از کنترل متوالي براي حذف اغتشاش است(براي حالت تغيير در مقدار مقرر استفاده از کنترل متوالي مزيتي نخواهد داشت. از اين رو فقط نتايج حذف اغتشاش بررسي مي‌شود). حلقه دما (حلقه ثانويه)، متغير ثانويه T_{AV} را کنترل مي‌کند و حلقه کنترلي غلظت(حلقه اصلي) مقدار مقرر حلقه کنترل دما را به منظور ثابت نگه داشتن غلظت در مقدار مقررش تغيير مي‌دهد. حلقه ثانويه، کنترلر PI و حلقه اصلي، کنترلر پيش‌بين است. نتايج در اشکال(٢٥) و (٢٦) آورده شده است.



شکل٢٥: پاسخ مداربسته غلظت محصول بالا به ازای ١٥٪ کاهش غلظت تولوئن خوراک



شکل٢٦: پاسخ مدار بسته غلظت محصول بالا به ازای ١٥%
افزايش غلظت تولوئن خوراک

نتيجه‌گيري

در اين مقاله، غلظت محصول بالاي يک برج تقطير چندجزئي با خلوص بالا، با استفاده از يک شبکه عصبي و بر اساس دماي سيني‌هاي برج تخمين زده شده است. نتايج نشان مي‌دهد که شبکه عصبي طراحي شده، تخمين مناسبي از غلظت ارائه مي‌دهد. سپس با استفاده از ساختار کنترل پيش‌بين، غلظت تخمين زده شده محصول بالاي برج مورد نظر در حضور اغتشاش‌هاي خوراک در مقدار کنترل شده است. نتايج شبيه‌سازي براى چهار الگوريتم کنترلى در جدول (٣) آورده شده است.

جدول٣: مقادير انتگرال مربعات خطا (**ISE**) به ازاي دو اغتشاش وارد به غلظت‌خوراک‌براي‌الگوريتم‌هاي کنترلي مختلف

No	Algorithm	ISE (load1)	ISE (load2)
1	Estimated Composition, PI	5.02×10^{-7}	12×10^{-7}
2	Estimated Composition, GPC	5.54×10^{-8}	54×10^{-8}
3	Cascade ,Estimated Composition PI(both loops)	1.85×10^{-8}	15×10^{-8}
4	Cascade ,Estimated Composition GPC(Primary loop)	2.21×10^{-9}	17×10^{-9}

همان طور که مشاهده مي‌شود، الگوريتم شماره١ که متعلق به کنترل مستقيم غلظت با استفاده از کنترلر PI است، ضعيف‌ترين عملکرد را دارد، به طوري که تابع هدف Integral Square of Error (ISE) از مرتبه 10^{-7} است. چنانچه به جاي استفاده از کنترلر PI از کنترلر پيش‌بين استفاده شود، عملکرد به بسبت بهتري حاصل مي‌شود، به طوري که تابع هدف ISE به مقدار 5.54×10^{-8} کاهش مى‌يابد. در الگوريتم شماره٣ که در آن از کنترل متوالى استفاده شده است، به نحوي که حلقه ثانويه کنترل دما و حلقه اوليه کنترل غلظت است، روند

کاهش تابع هدف ISE مشاهده می‌شود. با بهره‌گیری از کنترلر پیش‌بین در حلقه اولیه، بهترین عملکرد حاصل می‌شود. البته باید متذکر شد که بهبود عملکرد کنترل‌کننده پیش‌بین نسبت به کنترلر PI به قیمت حجم محاسبات بیشتر حاصل شده است. در ضمن استفاده از روش کنترل متوالی در خنثی‌سازی اغتشاش نسبت به حلقه ساده ارجح بوده و همان طور که انتظار می‌رود، مشخصه خطا کاهش می‌یابد.

مراجع

1- Weber,Sh. and Brosilow,C. (1972). “The use of secondary measurements to improve control.” *AICHE*. Vol.18, No.3, PP. 614-623.

2- Brosilow,C. and Joseph,B. (1978). “Inferential control of process, PartI, Steady State Analysis and Desighn.”*AICHE.*,Vol.24, PP.485-492.

3 -Mejdell,T. and Skogestad,S. (1991). “Estimation of distillation compositions from multiple temperature Measurements using Partial least squares regression.” *Ind. Eng.Chem.Res.,* Vol.30, PP. 2543-2555.

4 -Mejdell,T. and Skogestad,S. (1993). “Output estimation using multiple secondary measurements: High purity distillation.” *AICHE.*, Vol.39, No.10, PP. 1641-1653.

5- Kano,M., Miyazaki,K., Hasebe,Sh. And Hashimoto,I. (2000). “Inferential control system of distillation compostion using dynamic partial least squares regression.” *Journal of Process Control* ,Vol.10,PP.157-156.

6- Kano,M., Showchaiya,N., Hasebe,Sh. And Hashimoto,I. (2003). “Inferential control of distillation compositions: Selection of model and control configuration.” *Control Engineering Practice*, Vol.11, PP.927-933.

7- Tzu-Ming,Y.,Huang,M. and Huang.,C. (2003). “Estimate of process composition and plantwide control from multiple secondary measurements using artificial neural networks.” *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 27, PP. 55-72.

8- Bahar,A. and Ozgen,C. (2004). “Artificial neural network estimator design for the inferential model predictive control of an industrial distillation column.” *Ind.Eng.Chem.Res.,* Vol.43, PP. 6102-6111.

9- Singah,V., Gupta,I. and Gupta,H. (2008). “ANN based estimator for distillation-inferential control.” *Chemical Engineering and Processing4*,Vol.44, PP. 785-795.

10- Boyd,D.; M, (1975). “Fractionation column control.” *Chemical Engineering Progress*. Vol.71, No.6, PP. 55-60.

11-Luyben,W.L. (1972). “Profile position control of distillation columns with sharp temperature Profiles.” *AICHE* ,Vol.18, No.1, PP.238-240.

12- Buckley,P.S., Luyben, W.L. and Shunta,J.P. (1985). Design of distillation column control systems, Instrumental Society of America, Research Triangle Park, NC,1985.

13-Clarke,D.W., Mohtadi, C. and Tuffs, P.S. (1987). “Generalized predictive control-partI.” *The Basic Algorithm. Automatica*, Vol.23, 137.

14- Bulsari,A. (1995). *Neural Network for Chemical Engineers. Elsevier Science B.V.*

15- Rossiter, J. (2003). "A Model-Based Predictive Control:A Practical Approach.CRC Press.

16- Ljung L. (1987). System Identification: Theory for the User. Prentic-Hall.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1- Principal Component Analysis
2- Partial Least Square
3- Singular Value Decomposition
4- Tenesse Eastman
5- Auto Regressive Model Average
6- Generalized Predictive Control
7- Pseudo Random Binary Sequence