كنترل استنتاجي پيش‌بين برج تقطير

پرديس رفويي[١] و محمد شاهرخي*[٢]

[١] دانشجوي كارشناسي ارشد مهندسي شيمي - دانشكده مهندسي شيمي و نفت - دانشگاه صنعتي شريف

[٢] استاد دانشكده مهندسي شيمي و نفت - دانشگاه صنعتي شريف

(تاريخ دريافت ٨۶/٩/۴ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح‌شده ٨٩/٤/٢٧ ، تاريخ تصويب ٨٩/٧/٣)

چكيده

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

واژه‌هاي كليدي: تقطير چند جزئي، كنترل استنتاجي، تخمين زننده، شبكه عصبي مصنوعي، كنترل پيش‌بين

مقدمه

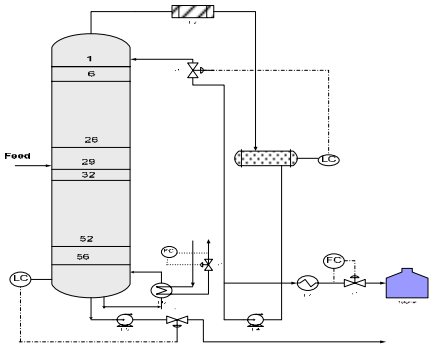
در برج‌هاي تقطير چندجزئي، هدف، حداقل كردن ناخالصي جز كليدي سنگين در محصول بالاي برج و ناخالصي جز كليدي سبک در محصول پايين برج است. در كنترل يک برج تقطير، ايده‌آل آن است كه هر دو غلظت محصول بالا و پايين برج اندازه‌گيري و توسط دو متغير ورودي كنترل شود، به طوري كه غلظت اجزاي كليدي در هر دو محصول بالا و پايين در مقدار مقرر خود قرار گيرد. برج‌هاي تقطير معدودي هستند كه اين ساختار كنترل ايده‌آل را داشته باشند، چرا كه آناليزورهاي غلظت گران بوده و هزينه نگهداري بالايي را به سيستم تحميل مي‌كنند. از اين رو متغيرهاي ثانويه از جمله دماي سيني‌هاي برج، اندازه‌گيري و كنترل 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 كنترل كيفيت محصول برج بهره گرفت. تا كنون روش‌هاي مختلفي براي تخمين غلظت محصول برج با استفاده از دماي سيني‌هاي برج ارائه شده است. اولين بار برازيلو(Brosilow)و همكاران، با استفاده از مدل فرايند واندازه‌گيري‌هاي ثانويه اثر اغتشاش روي خروجي اصلي فرايند (غلظت محصول برج) را پيش‌بيني كرده‌اند[١و٢]. در روش ارائه‌شده، اندازه‌گيرهاي ثانويه به نحوي انتخاب مي‌شوند كه تخمين‌زننده طراحي‌شده كمترين حساسيت را به خطاي مدل‌سازي و نويز اندازه‌گيري داشته باشد. در اين روش درستي تخمين تا حد زيادي به درستي مدل فرايند وابسته است كه از نقاط ضعف اين روش به حساب مي‌آيد. مجدل(Mejdell) و همكارانش، 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[١] PCA انجام گرفته است. آنها عملكرد سه تخمين‌زننده فيلتركالمن، تخمين‌زننده استنتاجي برازيلو و تخمين‌زننده[٢] PLS را براي برج تقطير مورد مطالعه‌شان بررسي و مقايسه كرده‌اند. نتايج نشان مي‌دهد كه تخمين‌زننده ارائه‌شده، در مقايسه با دو تخمين‌زننده ديگر عملكرد مناسب‌تري دارند[٣و٤]. كانو(Kano) و همكارانش، غلظت هر دو محصول بالا و پايين يک برج تقطير چندجزئي با تعداد ٣٠ سيني را با استفاده از دماي سيني‌هاي برج، ميزان جريان برگشتي و نرخ حرارت ريبويلر و به كارگيري روش حداقل مربعات جزئي تخمين زده‌اند[٥]. آنها در سال ٢٠٠٣ يک روش جديد با عنوان كنترل استنتاجي ارائه كرده‌اند. به اين ترتيب كه مقادير آينده خروجي اصلي فرايند با استفاده از اندازه‌گيري‌هاي ثانويه تخمين زده شده و به جاي مقادير جاري آن كنترل مي‌شود. با استفاده از آناليز[٣]

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۶۱۶۵۴۱۹ , فاكس : ٦٦٠٢٢٨٥٣ ، Email: Shahrokhi@sharif.edu

SVD، از ۳۰ سينى يک برج تقطير چندجزئي، پنج سينى 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[٧]. 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 پايينى 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[٨]. گويتا(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 سينى-هاي برج مورد مطالعه وي به عنوان ورودي‌هاي شبکه عصبي در تخمين غلظت اجزاي محصولات برج به کار گرفته شده است[٩]. در اين مقاله، با استفاده از معيارهاي انتخاب سينى مناسب براي برج‌هاي تقطير چندجزئي خلوص بالا که رفتار ويژه‌اي در مقايسه با برج‌هاي ديگر دارند، چهار سينى 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) پتروشيمى بندر امام است. برج تقطير مورد نظر شامل ٥٦ سينى بوده و خوراک وارد سينى ٢٩ مي‌شود. شماي کلي برج تقطير تولوئن در شکل(١) 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 ٩٩.٩٩٢٥٣درصد از محصول بالاي برج خارج شده و مخلوط زايلن‌ها به عنوان محصول پايين برج وارد برج سوم(جداسازي زايلن‌ها) مي‌شود.



شکل١: 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(١)، خلاصه‌اي از داده‌هاي عملياتي و عوامل طراحي برج آورده شده است.

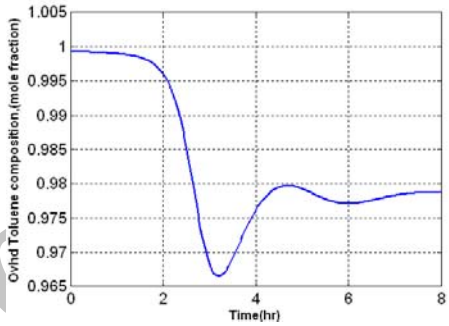
جدول١:مشخصات طراحي، شرايط خوراک و داده‌هاي عملياتي

تعداد سينى‌ها	٥٦
قطر داخلى سينى‌ها	m٣.٥
فاصله بين سينى‌ها	m٠.٦٥
نوع سينى‌ها	Sieve
شماره سينى خوراک	٢٩
نرخ خوراک	kgmol/hr٦٩٨.٩
فشار خوراک	kg/cm^2-g٤.٢٠٦
دماى خوراک	C°١٤١
علظت خوراک(درصد مولى)	
بنزن	٠.٠٢١٥
تولوئن	٧٣.٩١٨٩
زايلن‌ها(اورتو-پارا-متا)	٢٣.٠٩٤٦
کيومن	٠.٨٢٢٨
بى فنيل	١.١٩٣٤٧
آروماتيک‌هاى سنگين	٠.٢٠٧٥
فشار سينى بالاى برج	kg/cm^2-g٠.٣٥
فشار سينى پايين برج	kg/cm^2-g٠.٩
نرخ جريان برگشتى	kgmol/hr٨٦٥
نرخ محصول بالاى برج	kgmol/hr٥١٦.٩
نرخ حرارت ريبويلر	Mj/hr٣٤٨.٩

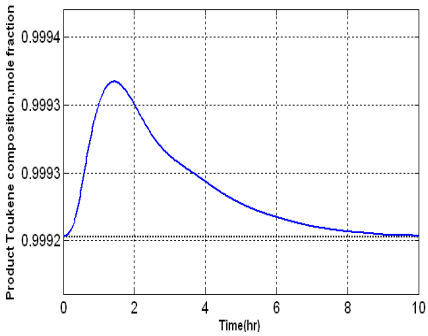
شبيه‌سازي ديناميكي و استاتيكي برج توسط نرم‌افزار HYSYS3.2 انجام گرفته است و كنترل آن از طريق به كارگيري objectهاي HYSYS در محيط برنامه‌نويسي MATLAB انجام شده است.

كنترل مستقيم غلظت

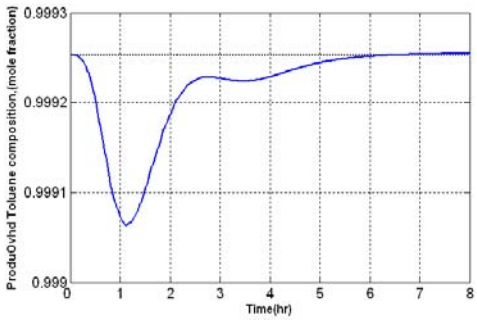
با توجه به تأخير زماني زياد دستگاه‌هاي اندازه‌گيري غلظت(در مورد برج مورد نظر ۱۵ دقيقه در نظر گرفته شده است)، كنترل مستقيم غلظت همان طور كه در شكل‌هاي (۲) تا (۴) مشاهده مي‌شود، در تغيير مقدار مقرر و حذف اغتشاش خوراک عملكرد بسيار كند و ضعيفي ارائه مي‌دهد.



شكل۲:كنترل مستقيم غلظت به ازاى تغيير مقدار مقرر



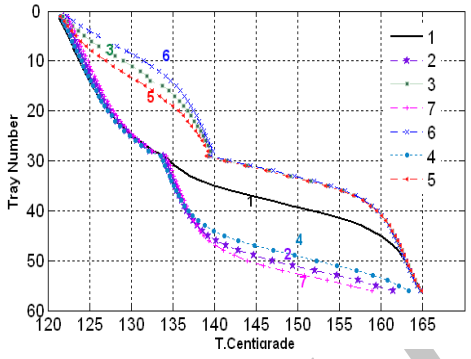
شكل۳: كنترل مستقيم غلظت براى ۱۵درصد كاهش غلظت تولوئن خوراک



شكل۴: كنترل مستقيم غلظت براى ۱۵درصد افزايش غلظت تولوئن خوراک

كنترل غير مستقيم غلظت

در سيستم‌هاي دوجزئي با فشار ثابت، دما به طور مستقيم در ارتباط با غلظت است. از ديدگاه تئوري، بهترين مكان براي قرار دادن حسگر دما براي كنترل غلظت محصول بالاي برج، سيني اول است. از ديدگاه عملي به دليل وجود تغييرات فشار در طول برج بايد محل حسگر دما از سيني اول به سيني‌هاي پايين‌تر تغيير كند. در سيستم‌هاي چندجزئي از جمله برج مورد مطالعه اين مقاله، دما به دليل عواملي از جمله اثر فشار و تغييرات فشار روي دماي سيني‌ها، اثر غلظت جز غيركليدي و نوع و بزرگي اغتشاش‌هاي وارد به برج، معيار كاملا مناسبي از غلظت نيست. به ازاي مقادير مختلف متغير كنترل‌كننده (جريان محصول بالاي برج)، نمودار حالت يكنواخت دما در شكل(۵) نشان داده شده است.



شكل۵: نمودار حالت يكنواخت دماي سينى‌هاى برج

همان طور كه از شكل مشخص است، در صورتي كه سيني‌هاي بين سيني ششم و پانزدهم را به عنوان محل حسگر دما انتخاب كنيم، براي شكل‌هاي(۳) و(۵) و(٦) هر دو محصول بالا و پايين برج در حد مناسبي كنترل مي‌شود. انتخاب همين سيني‌ها براي شكل‌هاي (۲) و(٤) و(۷)، غلظت محصول بالا را در مقدار مقرر خود ثابت نگه مي‌دارد. در حالي كه غلظت محصول پايين برج با تغييرات زيادي رو به رو است. انتخاب سيني‌هاي بين سيني چهل‌وهشتم و سيني پنجاه‌ودوم براي شكل‌هاي (۲) و (٤) و(۷)مناسب است. در حالي كه انتخاب همين سيني‌ها براي شكل‌هاى(۳) و(۵) و(٦) سبب تغييرات زيادي در غلظت محصول بالاي برج مي‌شود. مقادير ناخالصي‌هاي هر دو محصول بالا و پايين برج، به ازاي مقادير حالت يكنواخت متفاوت در جدول (۲) آورده شده است.

جدول۲: مقادير ناخالصی درمحصول بالا و پايين برج

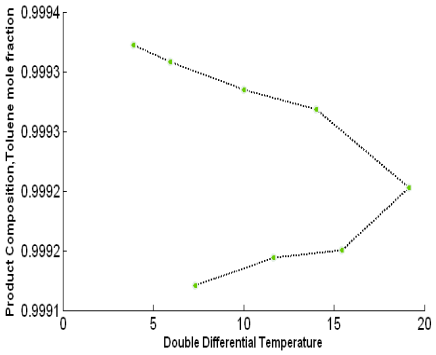
Plot.No	Xyl.Ovh (ppm)	Tol.bott (ppm)
6	30007.21990	28.2728
3	15067.2771	34.1843
5	7450.7375	38.6204
1	185.4789	428.9372
7	69.5172	95701.4882
2	94.2302	52447.6701
4	111.9025	27897.4468

بويد (Boyd) براي كنترل برج‌هايي كه مشابه برج تولوئن مورد نظر رفتار sharp split دارند، استفاده از اختلاف دماي سينی‌ها را ارائه كرده است. اختلاف دماي دو سيني قسمت پايين برج از اختلاف دماي دو سيني قسمت بالاي برج كم شده و از اين اختلاف براي كنترل دما استفاده شده است. بويد تأكيد كرده است كه اين روش براي برج‌هاي تقطير با خلوص بالا به كار گرفته مي شود؛ به طوري كه خلوص محصولات در حدppm باشد و براي زماني كه 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 كار گرفتن $\Delta\Delta T$، به عنوان متغير كنترل‌كننده، سيستم كنترل برج موردمطالعه را با دو مشكل بسيار عمده مواجه كرد. يک مشكل، موضوع منحصر به فرد نبودن رابطه غلظت و $\Delta\Delta T$ است و مشكل ديگر رفتار ديناميكي نامناسب اين متغير است. در شكل(٦)، نمودار غلظت تولوئن در محصول بالاي برج بر حسب $\Delta\Delta T$ به ازاي نقاط حالت يكنواخت مختلف رسم شده است. همان طور كه از شكل 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 كنترل‌كننده(ميزان جريان محصول بالاي برج) و همچنين اغتشاش خوراک برج در شكل‌هاي (٧) تا (٩) آورده شده است. سبب رفتار غيرفازمينيمم و به شدت غيرخطي $\Delta\Delta T$ مي‌شود كه كنترل توسط اين متغير، از جمله تنظيم كنترلر با مشكل همراه شود. استفاده از اختلاف اختلاف دما به ازاي يک سري از اغتشاش‌هاي خوراک برج تقطير تولوئن مورد نظر، سبب ناپايداري سيستم شد. لويبن(Luyben) براي كنترل برج‌هايي كه رفتار sharp split دارند، استفاده از متوسـط دماهاي چندين سيني برج را ارائه كرده است و نشان داده است كه روش ارائه‌شده در مقايسه با استفاده از كنترل تک‌سيني، عملكرد كنترل را در حد چشمگيري بهبود بخشيده است[١١]. باكلي(Buckly) و همكاران گزارشي از بهبود عملكرد كنترل چندين برج تقطير صنعتي، در صورت استفاده از متوسط ٤ الي ٥ سيني تهيه كرده‌اند[١٢]. در اين مقاله T_{AV} را متوسط همان ٤ سيني انتخاب شده در نظر مي‌گيريم.

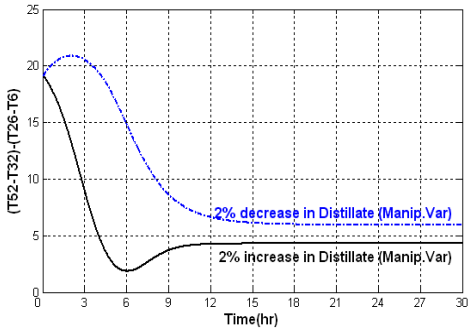
$$T_{AV} = \frac{(T_6 + T_{26} + T_{32} + T_{52})}{4} \qquad (۲)$$



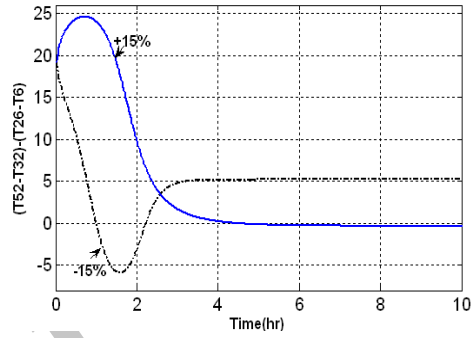
شكل۶: غلظت تولوئن در محصول بالا به اختلاف اختلاف دما

با انتخاب T_{AV}، به عنوان متغير كنترل‌كننده، مشكل يک به يک نبودن رابطه غلظت و متغير $\Delta\Delta T$ و رفتار غير فاز مينيمم وجود نخواهد داشت. در شكل (٩) غلظت محصول بالاي برج تولوئن مورد مطالعه به ازاي T_{AV} براي حالات يكنواخت متفاوت نشان داده شده است. همان طور كه مشاهده مي‌شود، اين موضوع براي T_{AV} وجود ندارد. همان طور كه از شكل‌هاي (١٠) و (١١) آشكار است، پاسخ ديناميكي 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 كنترلر 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.

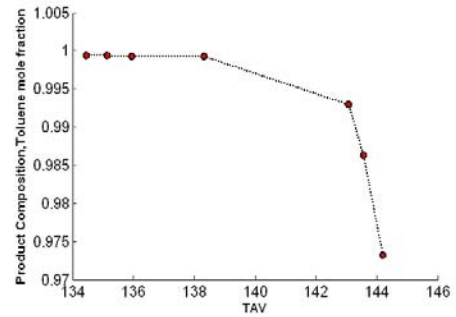
اگر از T_{AV} به جاي غلظت براي كنترل استفاده شود، پاسخ مدار بسته سيستم در اثر اغتشاش در خوراک، مطابق شكل‌هاي (١٢) و(١٣) است.



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

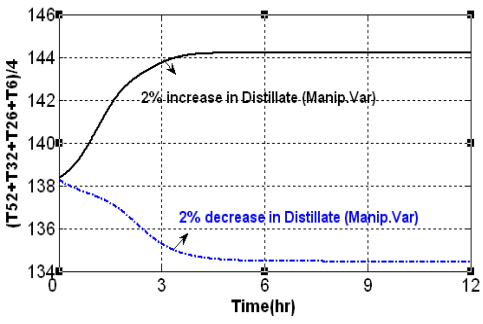


شکل۸: تغییرات $\Delta\Delta T$ برای ۱۵% اغتشاش درغلظت تولوئن خوراک

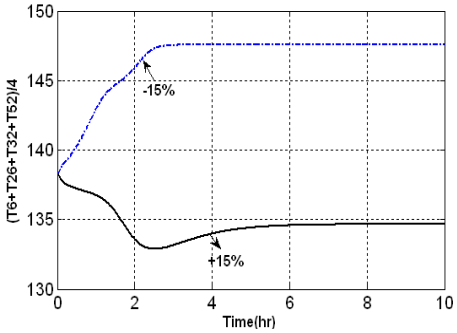


شکل۹: غلظت تولوئن در محصول بالا به متوسط دماها

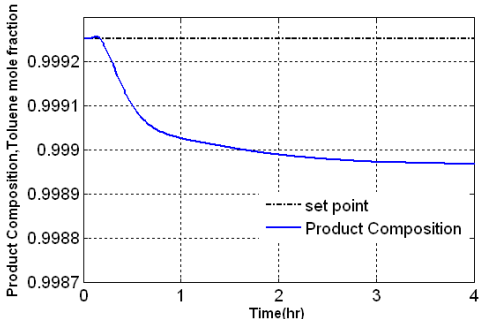
همان طور که مشخص است، در اثر وارد شدن اغتشاش‌هاي خوراک، ثابت نگه داشتن دما در مقدار مقرر خود، غلظت محصول بالا را کنترل نمي‌کند.



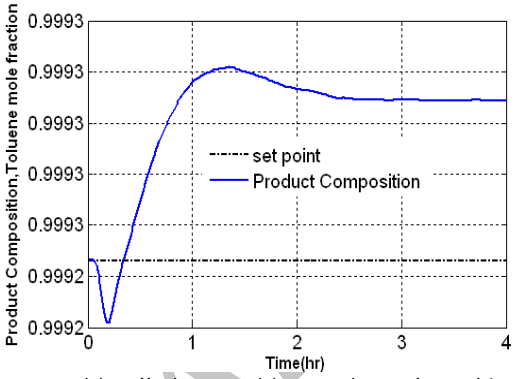
شکل۱۰: تغییرات T_{AV} به ازای ۲% تغییر ورودی



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



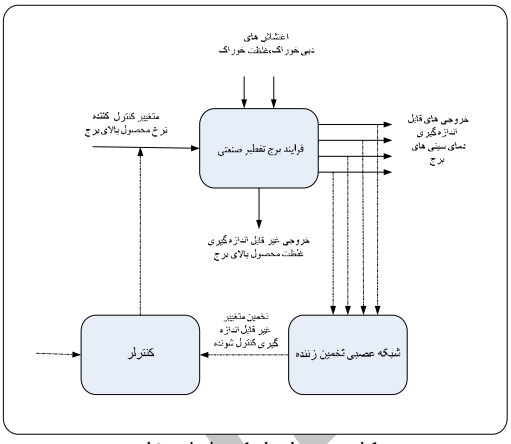
شکل۱۲: پاسخ مدار بسته غلظت محصول بالا به ازای ۱۵% کاهش غلظت تولوئن خوراک



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

این موضوع به آن دليل است که در برج‌هاي تقطير چندجزئي کنترل غلظت محصول توسط کنترل دما انجام مي‌گيرد. در صورت تغيير در شرايط خوراک، مقدار مقرر دما براي دستيابي به غلظت ثابت و يکنواخت محصول، بايد تغيير کند. اين بدان معناست که در کنترل يک برج تقطير چندجزئي به وسيله دما، همواره مقدار واحدي براي مقدار مقرر دما وجود ندارد و بايد اين مقدار مقرر بر حسب تغيير در شرايط خوراک ورودي تغيير کند. خروجي غير قابل اندازه‌گيري (غلظت) را پيش‌بيني کرده و در نهايت

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 استنتاجي

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:

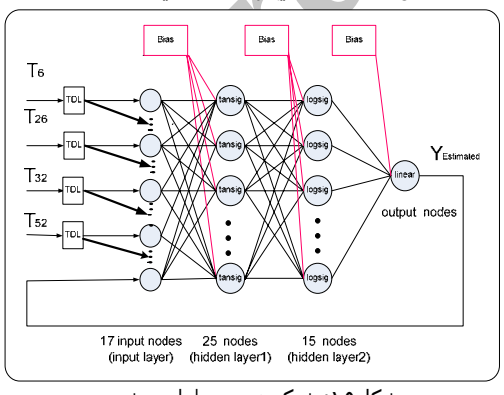
$$u_k = [T_i(k), T_i(k-n), T_i(k-2n), T_i(k-3n), y(k)] \quad (٣)$$

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 خوراك از جمله دبي و غلظت خوراك 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.

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

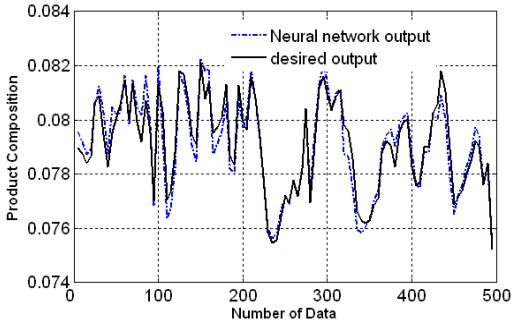
$P_{\min}$ و $P_{\max}$ به ترتيب مقادير حداقل و حداكثر داده‌هاي ورودي و خروجي است. شبكه عصبي طراحي شده به عنوان تخمين‌زننده غلظت، يک شبكه عصبي MLP است كه يک لايه ورودي، دو لايه پنهان و يک لايه خروجي دارد. لايه ورودي كه شامل ١٧ گره عصبي است و دماي سيني‌هاي منتخب را در لحظه حاضر و لحظات قبلي و همچنين غلظت 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.



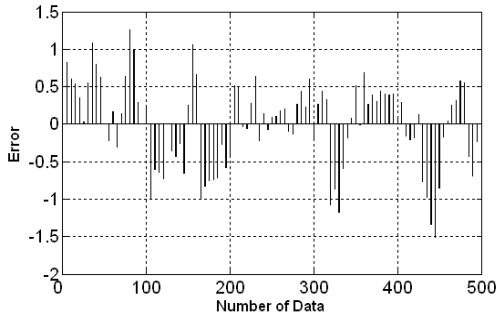
شكل١٥: شبكه عصبي طراحي شده

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 (۱۶) و (۱۷) آورده شده است. نتايج حاصل از تخمين غلظت توليوئن محصول بالاي برج مورد مطالعه با استفاده از شبكه عصبي به ازاي تغيير متغير كنترل‌كننده و اغتشاش‌هاي خوراک برج در اشكال (۱۸) تا (۲۰) آورده شده است. همان طور كه از شكل‌ها مشخص است، شبكه عصبي تخمين زننده از دقت و درستي بالايي بهره‌مند است.



شكل۱۶: مقايسه ميان خروجي مطلوب و خروجي شبكه عصبي



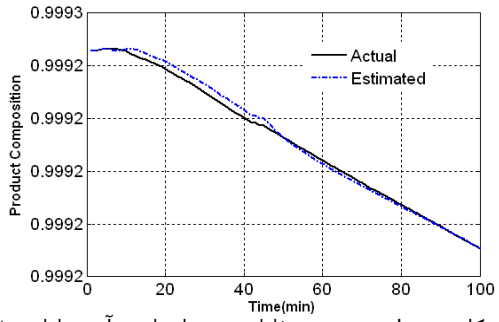
شكل۱۷: خطاي ميان خروجي مطلوب و خروجي شبكه عصبي

كنترل پيش‌بين

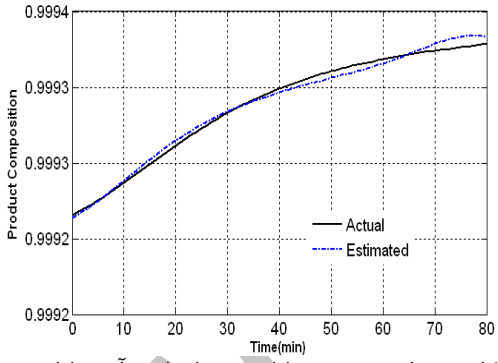
در كنترل پيش‌بين با استفاده از مدل فرايند، رفتار آينده سيتم پيش‌بيني شده و مقادير كنترل‌كننده در گام-هاي بعدي به نحوي كه رفتار فرايند بهينه شود، با استفاده از مدل سيستم تعيين مي‌شود. براي تعيين مقادير ورودي‌ها در گام‌هاي بعدي، مقادير مقرر و قيدهاي آينده فرايند به كنترل پيش‌بين داده مي‌شود و كنترلر با 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[۱۳].

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.

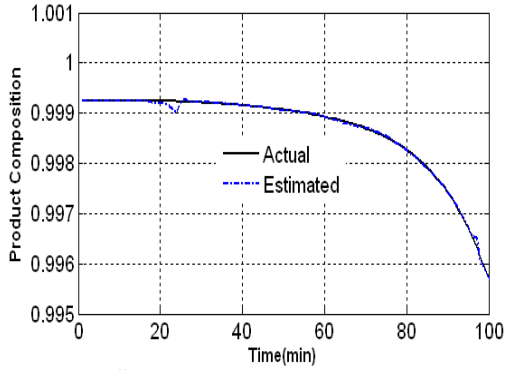
$$\underset{\rightarrow k}{y} = H\Delta \underset{\rightarrow k-1}{u} + P \underset{\leftarrow k}{x} \qquad (۵)$$



شكل۱۸: مقايسه تخمين غلظت و مقدار واقعي آن به ازاي ۲% تغيير ورودي



شكل۱۹: مقايسه تخمين غلظت و مقدار واقعي آن به ازاي ۱۵% افزايش غلظت توليوئن خوراک



شكل۲۰: مقايسه تخمين غلظت و مقدار واقعي آن به ازاي ۱۵% كاهش غلظت توليوئن خوراک

در اینجا H ماتریس *Toeplitz* پاسخ پله سیستم است. P ماتریسي است که عوامل آن به عوامل مدل بستگي دارد. یکي از متداول‌ترین مدل‌ها براي کنترل پیش‌بین مدل $ARMA$ [0] است:

$$a(z)y_k = b(z)u_k \qquad (٦)$$

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

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

که در این رابطه $A(z)$ و $B(z)$ به صورت زیر تعریف مي‌شوند و فرض مي‌شود که براي یک سیستم سره، $b_o = 0$ است.

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

پیش‌بیني چند گام به جلو

معادله تفاضل متناظر براي مدل به این ترتیب 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، این معادله مي‌تواند به دو بخش تقسیم شود: در بخش اول، همه اجزاء شناخته شده هستند(به ورودي‌ها و خروجي‌هاي گذشته مربوط هستند) و بخش دوم شامل تغییرات ورودي‌هاي آینده است. معادله(۹) پیش‌بیني یک گام به جلو را با دانستن داده‌هاي گذشته و Δu زمان حال مي‌دهد. معادله تفاضل را براي n_y لحظه بعد مي‌توان به فرم ماتریسي زیر نوشت:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ A_1 & 1 & \cdots & 0 \\ A_2 & A_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{C_A} \underbrace{\begin{bmatrix} y_{k+1} \\ y_{k+2} \\ \vdots \\ y_{k+ny} \end{bmatrix}}_{\underset{\rightarrow k}{y}} + \underbrace{\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \cdots & A_{n+1} \\ A_2 & A_3 & \cdots & 0 \\ A_3 & A_4 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{H_A} \underbrace{\begin{bmatrix} y_k \\ y_{k-1} \\ \vdots \\ y_{k-n} \end{bmatrix}}_{\underset{\leftarrow k}{y}}$$

$$= \underbrace{\begin{bmatrix} b_1 & 0 & \cdots & 0 \\ b_2 & b_1 & \cdots & 0 \\ b_3 & b_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{C_{zb}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u_k \\ \Delta u_{k+1} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+ny-1} \end{bmatrix}}_{\underset{\rightarrow k-1}{\Delta u}} + \underbrace{\begin{bmatrix} b_2 & b_3 & \cdots & b_n \\ b_3 & b_4 & \cdots & 0 \\ b_4 & b_5 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}}_{H_{zb}} \underbrace{\begin{bmatrix} \Delta u_{k-1} \\ \Delta u_{k-2} \\ \vdots \\ \Delta u_{k-n+1} \end{bmatrix}}_{\underset{\leftarrow k-1}{\Delta u}} \qquad (١٠)$$

با استفاده از علائم *Teoplitz / Hankel* معادله به فرم ساده زیر در مي‌آید.

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

از رابطه بالا پیش‌بیني خروجي به این شکل در مي‌آید:

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

براي راحتي، معادله را مي‌توان به این ترتیب نشان داد:

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

در این 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 اینکه $C_A^{-1} = C_{1/A}$ است، حساب مي‌شود. یک جایگزین براي محاسبات ماتریسي در حل معادلات دیوفانتین است.

تابع هدف و بهینه‌سازي

قانون کنترل با مینیمم کردن یک تابع هدف به دست مي‌آید. تابع هدفي که براي *GPC* استفاده مي‌شود، به این 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 تغییرات کنترل صفر است. درجه آزادي که مي‌توان براي بهینه‌سازي استفاده کرد، گام‌هاي بعدي متغیر ورودي است. یعني اولین n_u حرکت بعدي. پس قانون کنترل با مینیمم کردن تابع هدف J با استفاده از تغییر آینده متغیرهاي کنترل‌کننده تعیین مي‌شود. از $\underset{\rightarrow}{\Delta u}$ تعیین شده ، فقط المان اول آن به سیستم اعمال مي‌شود و بهینه‌سازي در هر لحظه تکرار مي‌شود[۱۵].

تابع هدف به فرم فشرده زیر مي‌تواند نوشته شود:(براي سادگي اندیس k براي لحظه نمونه‌گیري حذف شده است)

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

با جایگذاري $\underset{\rightarrow}{\mathbf{y}}$ از رابطه(۱۳) در رابطه(۱۵) داریم:

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

موضوع بهینه‌سازي به این شکل خواهد بود:

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

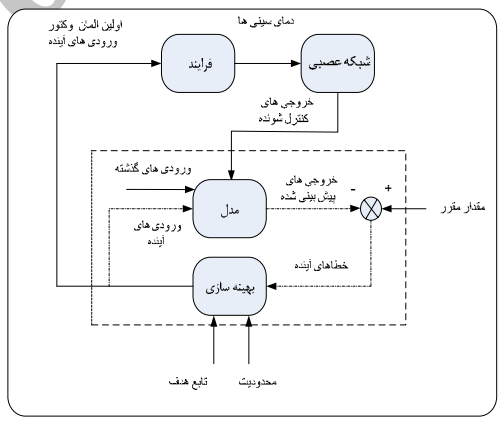
$k = \left\| \underset{\leftarrow}{\mathbf{r}} - P\Delta\underset{\rightarrow}{\mathbf{u}} - Q\underset{\leftarrow}{\mathbf{y}} \right\|$ شامل عبارت‌هايي است كه به $\Delta\underset{\rightarrow}{u}$ وابسته نيست و مي‌تواند حذف شود. تابع هدف به دست‌آمده مجذوري و مثبت است و يک مينيمم دارد. بنابراين با قرار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

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

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

كنترل استنتاجي پيش‌بين غلظت برج تولوئن

بعد از تخمين غلظت با استفاده از اندازه‌گيري‌هاي ثانويه، از آن در ساختار كنترل پيش‌بين براي كنترل غلظت استفاده مي‌شود (شكل۲۱). در اين قسمت ابتدا مدل‌هاي $ARMA$ غلظت، براي استفاده در كنترل پيش-بين شناسايي مي‌شوند[۱۶]. غلظت تخمين زده شده با استفاده از كنترل پيش‌بين كنترل مي‌شود.



شكل۲۱: ساختار كنترل استنتاجي پيش‌بين فرمولاسيون الگوريتم[۶] GPC

براي به دست آوردن داده‌هاي ورودي-خروجي براي شناسايي مدل سيستم از ورودي‌هاي[۷] $PRBS$ 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 كنترل‌كننده، 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 كه در محدوده خلوص بالا قرار نمي‌گيرد) به دست آمده است:

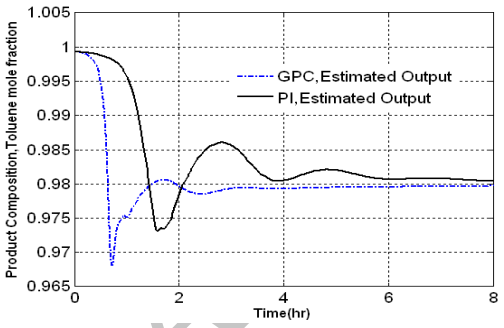
مدل مربوط به محدوده خلوص بالاي غلظت:

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

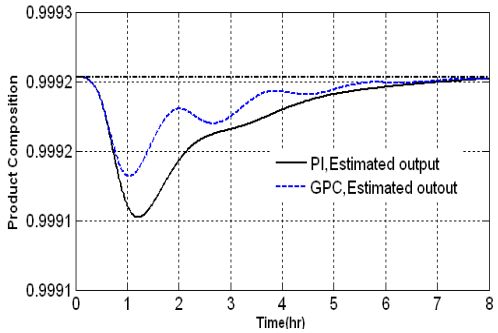
مدل مربوط به محدوده غيرخلوص بالاي غلظت:

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

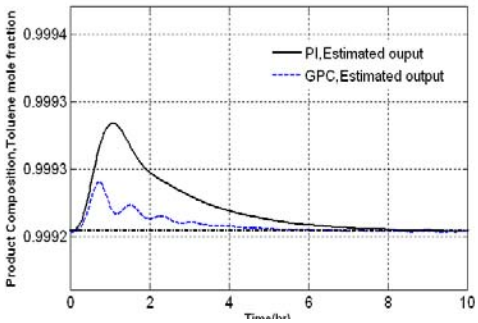
نتايج كنترل استنتاجي پيش‌بين به ازاي تغيير مقدار مقرر و حذف اغتشاش براي برج تولوئن مورد مطالعه در زير آورده شده است. پاسخ مدار بسته غلظت به ازاي تغيير مقدار مقرر از۰.۹۹۹۲۵۳ به ۰.۹۸، براي دو حالتي كه از كنترلر پيش‌بين و PI به منظور كنترل غلظت تخمين-زده‌شده استفاده شود، در شكل(۲۲) نشان داده شده است. پاسخ مداربسته غلظت به ازاي اغتشاش‌هاي خوراک در اشكال(۲۳) و (۲۴) آورده شده است. همان طور كه مشاهده مي‌شود، كنترلر پيش‌بين عملكرد مناسبتري از كنترلر PI ارائه كرده است.



شكل۲۲: پاسخ مدار بسته غلظت محصول بالا براى تغيير مقدار مقرر



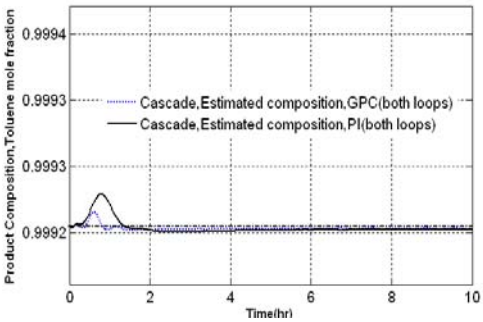
شكل۲۳: پاسخ مدار بسته غلظت محصول بالا به ازاى ۱۵% كاهش غلظت تولوئن خوراک



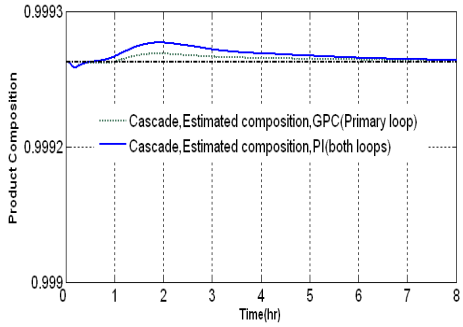
شكل٢٤: پاسخ مدار بسته غلظت محصول بالا به ازاى ١٥% افزايش غلظت تولوئن خوراک

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.



شكل٢٥: پاسخ مداربسته غلظت محصول بالا به ازاى ١٥٪ کاهش غلظت تولوئن خوراک



شكل٢٦: پاسخ مدار بسته غلظت محصول بالا به ازاى 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 مي‌يابد. 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 پی‌ش‌ی‌ن نسبت به کنترلر PI به قیمت حجم محاسبات بیشتر حاصل شده است. در ضمن استفاده از روش کنترل متوالی در خنثی‌سازی اغتشاش نسبت به حلـقه ساده ارجح بوده و همان طور که انتظار می‌رود، مشـــخصه خطا کاهـــش 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