بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه سیستان و بلوچستان

تحصیلات تکمیلی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد در مهندسی شیمی گرایش طراحی فرآیند

عنوان:

بررسی دینامیکی چیدمان‌های برج‌های تقطیر پشت‌سر هم جهت کنترل عملکرد آن‌ها

استاد راهنما:

دکتر جعفر صادقی

استاد مشاور:

دکتر فرهاد شهرکی

تحقیق و نگارش:

مبینا خدادوست

(این پایان‌نامه از حمایت مالی شرکت ملی گاز ایران بهره‌مند شده است)

(آذر ۱۳۸۹)

بسمه تعالی

این پایان‌نامه با عنوان بررسی دینامیکی چیدمان‌های برج‌های تقطیر پشت سر هم جهت کنترل عملکرد آن‌ها قسمتی از برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد مهندسی شیمی توسط دانشجو مبینا خدادوست تحت راهنمایی استاد پایان‌نامه دکتر جعفر صادقی و مشاوره‌ی دکتر فرهاد شهرکی تهیه شده است. استفاده از مطالب آن به منظور اهداف آموزشی با ذکر مرجع و اطلاع کتبی به حوزه تحصیلات تکمیلی دانشگاه سیستان و بلوچستان مجاز می‌باشد.

مبینا خدادوست

این پایان‌نامه ۸ واحد درسی شناخته می‌شود و در تاریخ ۱۳۸۹/۹/۱۸ توسط هیئت داوران بررسی و درجه ..... به آن تعلق گرفت.

	نام و نام خانوادگی	**امضاء**	**تاریخ**
استاد راهنما:	دکتر جعفر صادقی		۱۳۸۹/۹/۱۸
استاد مشاور:	دکتر فرهاد شهرکی		۱۳۸۹/۹/۱۸
داور ۱:	دکتر عبدالرضا صمیمی		۱۳۸۹/۹/۱۸
داور ۲:	دکتر سید سعید توکلی افشاری		۱۳۸۹/۹/۱۸
نماینده تحصیلات تکمیلی:	دکتر علیرضا حسین نژاد		۱۳۸۹/۹/۱۸

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب مبینا خدادوست تأیید می‌کنم که مطالب مندرج در این پایان‌نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آن استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این پایان‌نامه پیش از این برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه سیستان و بلوچستان می‌باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو: مبینا خدادوست

امضاء:

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه‌ی ایثار و از خودگذشتگی،

به پاس عاطفه‌ی سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است،

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید

و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند

این پایان‌نامه را به **پدر بزرگوار و مادر مهربانم** تقدیم می‌کنم.

دستان گرمشان بوسه‌گاه فرزندشان باد که راه دستیابی به گوهر دانش را به رویم گشودند.

و تقدیم به

خواهران و برادرانم

به پاس

یک عمر مهربانی و محبتشان

سپاسگزاری و قدردانی

ستایش مخصوص خداست که هستی او اول در وجود است بی‌آن‌که پیش از آن اولی باشد و آخر در وجود است بی آن‌که بعد از او آخری باشد. ستایش **خدای** راست که وسایل بسط علم و ایمان را در جوهر ذات ما آمیخت و اسباب اخذ و قبض علوم آسمانی و حقایق وحی الهی را برای ما قرار داد و ما را به حقایق و روح زندگی ابدی کامیاب گردانید. «صحیفه سجادیه»

از استاد راهنمای گرانقدر و بزرگوارم جناب آقای دکتر **جعفرصادقی** کمال تشکر و قدردانی را دارم، ایشان که با صبر زیاد و لطف فراوان در تمام مراحل انجام پایان‌نامه راهنمایی‌ها و دلسوزی‌های ارزشمندشان را از من دریغ نکردند. در محضر ایشان درس علم و اخلاق آموختم و همواره سپاس‌گزار ایشان خواهم بود. از درگاه ایزد منان برای ایشان آرزوی موفقیت و بهروزی روز افزون می‌نمایم.

لازم می‌دانم از زحمات استاد ارجمندم جناب آقای دکتر فرهاد شهرکی که به عنوان استاد مشاور و جناب آقای مهندس مسعود متولیان نائینی که به عنوان مشاور صنعتی در تمام مراحل اجرای پایان‌نامه مرا از مساعدت‌ها و هم فکری‌هایشان بهره‌مند ساختند و از کلیه‌ی مسئولین شرکت ملی گاز ایران، به‌خصوص مدیریت و کارکنان واحد تحقیق و فناوری به‌خاطر حمایت و همکاری در انجام پایان‌نامه تشکر نمایم.

از جناب آقای مهندس ایمان محمدی چایجان به جهت همکاری صمیمانه و در اختیار قرار دادن اطلاعات مورد نیاز پایان‌نامه و دوستانم خانم مهندس سحر خاوری، خانم مهندس نعیمه ستاره شناس، آقای مهندس حامد علوی، آقای مهندس میرمحمد خلیلی پور و آقای مهندس محمد سردشتی به‌پاس لطف بی‌کرانشان به اینجانب تشکر می‌کنم.

در پایان از دوست بزرگوارم آقای مهندس طه قیامی به‌خاطر کمک و فداکاری همه جانبه‌شان کمال تشکر را می‌نمایم. بدون کمک این بزرگوار بدون شک قادر به پایان رساندن این مسیر نبودم، برای ایشان آرزوی موفقیت روز افزون دارم.

چکیده

تقطیر یکی از پر کاربردترین عملیات واحد در فرآیندهای صنایع شیمیایی می‌باشد، به همین دلیل درک و تشخیص رفتار دینامیکی برج‌های تقطیر دارای اهمیت زیادی است. جداسازی یک خوراک چند جزئی به بیش از دو محصول با قرار گرفتن چند برج تقطیر در چیدمان‌های مختلف امکان‌پذیر است. تحقیقات زیادی برای تعیین بهترین روش قرار گرفتن برج‌های تقطیر در چیدمان‌های مختلف انجام شده است ولی در زمینه‌ی بررسی دینامیکی چیدمان‌های برج‌های تقطیر مطالعاتی کمی انجام شده است. آگاهی کافی درباره‌ی دینامیک فرآیندهای شیمیایی با توجه به این‌که این فرآیندها عملاً هیچ‌گاه در شرایط پایدار نمی‌باشند و با شرایط متغیر عملیاتی و اغتشاشات محیطی مواجه هستند و با این وجود باید کیفیت محصولات خود را حفظ کنند، لازم می‌باشد. در این پایان‌نامه، رفتار دینامیکی سه برج تقطیر، موجود در واحد تثبیت نقطه‌ی شبنم فاز ۲ پالایشگاه گاز پارس جنوبی، در چیدمان‌های مختلف بررسی شده است. در این تحقیق، شبیه‌سازی چیدمان‌های مختلف سه برج تقطیر در حالت پایا در محیط Aspen Plus و در حالت دینامیکی در محیط Aspen Dynamic انجام شده است و برای بررسی دینامیکی چیدمان‌های مختلف برای اولین بار در صنعت ایران از اتصال نرم افزارهای Aspen Dynamic وSimulink استفاده شده است. رفتار دینامیکی ۵ چیدمان مختلف این سه برج با تغییر ۵ درصدی شدت جریان خوراک ورودی بررسی شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که شبیه‌سازی در حالت پایا بعنوان نقطه شروع در شبیه‌سازی مناسب می‌باشد و بهتر است از نرم‌افزارهایی که در حالت دینامیکی شبیه‌سازی را انجام می‌دهند برای شبیه‌سازی فرآیندهای شیمیایی استفاده شود زیرا نتایجی که در این حالت بدست می‌آیند به نتایج بدست آمده در حالت واقعی نزدیکتر خواهند بود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در بین ۵ چیدمان مختلف، توالی دوم و پنجم دینامیک مناسبی جهت کنترل دارند زیرا قادر به دفع اغتشاش بوجود آمده می‌باشند و چیدمان‌های اول، سوم و چهارم دینامیک پیچیده‌ای دارند و کنترل این سه توالی دشوار خواهد بود.

واژگان کلیدی: رفتار دینامیکی، تقطیر، برج، چیدمان، Aspen Plus، Aspen Dynamic، Simulink.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: پیشگفتار ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- لزوم طراحی و بررسی دینامیکی فرآیندهای شیمیایی ۳

۱-۲-۱- کنترل فرآیندهای صنعتی ۳

۱-۲-۲- شبیه‌سازی دینامیکی فرآیندهای صنعتی ۴

۱-۳- استفاده از نرم‌افزارهای مناسب جهت شبیه‌سازی فرآیندهای شیمیایی ۵

۱-۳-۱- توانایی‌های نرم‌افزار Aspen Suite 2006 ..... ۶

۱-۳-۲- شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار Aspen Suite 2006 ..... ۷

۱-۳-۳- فرآیند شبیه‌سازی در Aspen Plus ۷

۱-۳-۴- فرآیند شبیه‌سازی در Aspen Dynamic ۷

۱-۴- ساختار پایان‌نامه ۸

۱-۴-۱- اهداف پژوهش انجام‌شده ۸

۱-۴-۲- نوآوری پژوهش انجام شده ۸

۱-۴-۳- ساختار پایان‌نامه ۱۰

فصل دوم: مروری بر تحقیق‌های انجام شده ۱۱

۲-۱- مقدمه ۱۲

۲-۲- مروری بر مطالعات انجام‌شده بر روی توالی‌های تقطیر ۱۲
۲-۳- مروری بر مطالعات انجام شده بر روی دینامیک تقطیر ۱۵
۲-۴- مروری بر مطالعات انجام شده بر روی کنترل برج تقطیر ۱۷
۲-۴-۱- مراحل طراحی کنترل‌کننده برای فرآیندهای چند متغیره ۱۸
۲-۴-۱-۱- انتخاب متغیرهای کنترل‌شونده ۱۸
۲-۴-۱-۲- انتخاب متغیرهای قابل تنظیم ۱۸
۲-۴-۱-۳- انتخاب حلقه‌های مناسب ۱۹
۲-۵- نتیجه‌گیری ۲۳
فصل سوم: شبیه‌سازی دینامیکی فرآیندهای شیمیایی ۲۴
۳-۱- مقدمه ۲۵
۳-۲- مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند ۲۵
۳-۳- کاربردهای شبیه‌سازی ۲۶
۳-۳-۱- کاربردهای شبیه‌سازی در پژوهش و توسعه‌ی فرآیندها ۲۶
۳-۳-۲- کاربردهای شبیه‌سازی در طراحی فرآیند ۲۶
۳-۳-۳- کاربردهای شبیه‌سازی در بهره‌برداری مطلوب از تاسیسات موجود ۲۷
۳-۴- کاربردهای نوین شبیه‌سازی پیشرفته ۲۸
۳-۴-۱- ارتباط با نرم‌افزارهای دیگر ۲۸
۳-۴-۲- استفاده‌ی مستقیم در کنترل فرآیند ۲۸
۳-۴-۳- اتصال به سیستم مدیریت ۲۸
۳-۵- مزایای شبیه‌سازی دینامیکی ۲۹

۳-۶- شبیه‌سازی برج تقطیر ۳۱
۳-۶-۱- شبیه‌سازی دینامیکی فرآیندها ۳۲
۳-۶-۲- تفاوت شبیه‌سازی حالت پایا و دینامیک در نرم‌افزارهای Aspen Plus و Aspen Dynamic ۳۴
۳-۶-۳- انتقال از حالت پایا به حالت دینامیک ۳۵
۳-۶-۴- پارامترهای کنترلی برج تقطیر ۳۶
۳-۷- نتیجه‌گیری ۳۹
فصل چهارم: توالی برج‌های تقطیر ۴۰
۴-۱- مقدمه ۴۱
۴-۲- تقطیر ۴۱
۴-۲-۱- مزایای تقطیر نسبت به سایر روش‌های جداسازی ۴۲
۴-۲-۲- تنگناهای تقطیر ۴۲
۴-۳- توالی برج‌های تقطیر ۴۴
۴-۳-۱- توالی تقطیر برای برج‌های ساده ۴۴
۴-۳-۲- تنگناهای عملیاتی ۴۷
۴-۴- بررسی روش‌های موجود در انتخاب بهترین توالی برج‌های تقطیر ۴۸
۴-۴-۱- روش‌های موجود برای تعیین گزینه‌ی مناسب ۴۸
۴-۴-۲- روش‌های تجربی ۴۹
۴-۴-۳- روش‌های تکاملی ۵۱
۴-۴-۴- روش‌های الگوریتمی ۵۲
۴-۵- نتیجه‌گیری ۵۲

فصل پنجم: طراحی و شبیه‌سازی واحد مورد بررسی ۵۳

۵-۱- مقدمه ۵۴

۵-۲- بررسی موردی (Case Study) ۵۴

۵-۲-۱- واحد ۱۰۵ پالایشگاه گاز پارس جنوبی ۵۴

۵-۲-۲- شرح فرآیند (آشنایی با فرآیند) ۵۵

۵-۳- شبیه‌سازی و طراحی فرآیند ۵۸

۵-۳-۱- شبیه‌سازی فرآیند در حالت پایا ۵۸

۵-۳-۲- شبیه‌سازی فرآیند در حالت دینامیک ۶۷

۵-۴- ساختارهای کنترلی فرآیند ۷۵

۵-۵- اتصال نرم‌افزار Aspen Dynamic 2006 به نرم‌افزار Simulink ۸۱

۵-۵-۱- تنظیمات اولیه‌ی نرم‌افزار Simulink ۸۲

۵-۵-۲- بررسی دینامیک توالی‌های مختلف با توجه به اغتشاش در خوراک ۸۳

۵-۶- مشکلات موجود در طراحی و شبیه‌سازی ۸۵

۵-۷- نتیجه‌گیری ۸۶

فصل ششم: بررسی و تحلیل نتایج ۸۷

۶-۱- مقدمه ۸۸

۶-۲- پاسخ چیدمان‌های مختلف ۸۸

۶-۲-۱- مقادیر جزء کلیدی در محصولات ۸۸

۶-۲-۲- پاسخ توالی اول به تغییرات خوراک ۸۹

۶-۲-۳- پاسخ توالی دوم به تغییرات خوراک ۹۱

۶-۲-۴- پاسخ توالی سوم به تغییرات خوراک ۹۲
۶-۲-۵- پاسخ توالی چهارم به تغییرات خوراک ۹۴
۶-۲-۶- پاسخ توالی پنجم به تغییرات خوراک ۹۵
۶-۳- بررسی پراکندگی نتایج مطالعه‌ی دینامیکی توالی‌های مختلف ۹۷
۶-۳-۱- واریانس پاسخ توالی اول ۹۷
۶-۳-۲- واریانس پاسخ توالی دوم ۹۹
۶-۳-۳- واریانس پاسخ توالی سوم ۱۰۰
۶-۳-۴- واریانس پاسخ توالی چهارم ۱۰۲
۶-۳-۵- واریانس پاسخ توالی پنجم ۱۰۳
۶-۴- پراکندگی در منحنی نرمال محصولات توالی‌های مختلف ۱۰۵
۶-۴-۱- پراکندگی در منحنی نرمال توالی اول ۱۰۶
۶-۴-۲- پراکندگی در منحنی نرمال توالی دوم ۱۰۷
۶-۴-۳- پراکندگی در منحنی نرمال توالی سوم ۱۰۸
۶-۴-۴- پراکندگی در منحنی نرمال توالی چهارم ۱۰۹
۶-۴-۵- پراکندگی در منحنی نرمال توالی پنجم ۱۱۰
۶-۵- مقایسه‌ی توالی‌های مختلف در پاسخ به تغییرات خوراک ۱۱۱
۶-۵-۱- مقایسه‌ی فعالیت انجام‌شده با کار قبلی ۱۱۱
۶-۶- نتیجه‌گیری ۱۱۲
فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۳
۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۱۴

۷-۲-پیشنهادات ۱۱۶

مراجع ۱۱۷

پیوست‌ها ۱۲۱

پیوست (الف): برج RadFrac ۱۲۲

پیوست (ب): انتخاب معادله حالت ۱۲۴

پیوست (پ): برج DSTWU ۱۲۷

پیوست (ت): روش میان‌بر Fenske-Underwood-Gilliland ۱۲۸

پیوست (ث): مدل holdup ۱۳۰

پیوست (ج): نمونه‌ای از محاسبات انجام شده جهت تعیین اندازه برج تقطیر ۱۳۲

پیوست (چ): نحوه محاسبه‌ی معادلات ریاضی در نرم‌افزار Aspen Dynamic ۱۳۳

پیوست (ح): منحنی‌های پاسخ توالی‌های مختلف ۱۳۵

پیوست (خ): نمودار جعبه‌ای پاسخ توالی‌های مختلف به تغییرات خوراک ۱۴۰

پیوست (د): رونوشت برنامه‌ی حاوی تغییرات خوراک ۱۴۶

فهرست جدول‌ها

عنوان جدول **صفحه**

جدول ۴-۱. تعداد توالی‌های ممکن تقطیر مربوط به برج‌های ساده..... ۴۷

جدول ۵-۱. مشخصات خوراک واحد مورد بررسی..... ۵۸

جدول ۵-۲. مشخصات محصولات برج‌های تقطیر ۵۹

جدول ۵-۳. نحوه‌ی جداسازی برج‌ها در توالی‌های پنج‌گانه..... ۶۰

جدول ۵-۴. نتایج به دست آمده از نرم‌افزار Aspen Plus 2006 برای توالی‌های ساده در حالت پایا ۶۶

جدول ۵-۵. ادامه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار Aspen Plus 2006 برای توالی‌های ساده در حالت پایا..... ۶۶

جدول ۵-۶. نتایج تغییر یافته پس از شبیه‌سازی در حالت دینامیک..... ۷۹

جدول ب-۱. معادلات حالت مناسب برای مواد قطبی..... ۱۲۴

جدول ب-۲. معادلات حالت مناسب برای مواد غیر قطبی..... ۱۲۵

فهرست شکل‌ها

عنوان شکل **صفحه**

شکل ۴-۱(الف). جداسازی دقیق ۴۴

شکل ۴-۱(ب). جداسازی غیر دقیق ۴۵

شکل۴-۲. توالی‌های مستقیم و غیر مستقیم برای برج‌های تقطیر ساده ۴۵

شکل۴-۳. توالی‌های ممکن برای جداسازی یک مخلوط ۴ جزیی (تبدیل به ۴ محصول) ۴۶

شکل۴-۴. موازنه‌ی جرم در اطراف بالای برج تقطیر ۵۰

شکل ۵-۱. نمایی از PFD مربوط به فرآیند مورد بحث ۵۷

شکل ۵-۲. انتخاب مواد در نرم‌افزار Aspen Plus 2006 ..... ۶۱

شکل ۵-۳. انتخاب معادله حالت در Aspen Plus 2006 ..... ۶۱

شکل ۵-۴. قرار دادن دستگاه‌های عملیاتی در نمودار جریان ۶۲

شکل ۵-۵. شمایی از برج‌های DSTWU و RadFrac ۶۳

شکل ۵-۶. وارد کردن مشخصات برج DSTWU ۶۳

شکل ۵-۷. وارد کردن مشخصات برج RadFrac ۶۳

شکل ۵-۸. توالی‌های ساده ممکن برای جداسازی خوراک مورد نظر در حالت پایا ۶۵

شکل ۵-۹. انتخاب شبیه‌سازی دینامیکی در نرم‌افزار Aspen Plus 2006 ..... ۶۸

شکل ۵-۱۰. وارد کردن اطلاعات مربوط به سینی‌های برج تقطیر ۶۹

شکل ۵-۱۱. تعیین اندازه‌های مخزن مایع برگشتی ۶۹
شکل ۵-۱۲. تعیین اندازه‌های مخزن بخار خروجی از جوش‌آور ۷۰
شکل ۵-۱۳. وارد کردن داده‌های افت فشار درون برج ۷۰
شکل ۵-۱۴. تعیین افت فشار شیرهای موجود در نمودار جریان ۷۱
شکل ۵-۱۵. توالی‌های ساده ممکن برای جداسازی خوراک مورد نظر در حالت دینامیک ۷۳
شکل ۵-۱۶. نمایی از صفحه‌ی تنظیم نرم‌افزار Aspen Dynamic 2006 ۷۵
شکل ۵-۱۷. نحوه‌ی تنظیمات کنترل‌کننده‌های فشار ۷۶
شکل ۵-۱۸(الف). نحوه‌ی تنظیمات کنترل‌کننده‌ی سطح چگالنده ۷۷
شکل ۵-۱۸(ب). نحوه‌ی تنظیمات کنترل‌کننده‌ی سطح جوش‌آور ۷۷
شکل ۵-۱۹. نحوه‌ی تنظیمات کنترل‌کننده‌ی جریان خوراک ۷۸
شکل ۵-۲۰. نمایی از قرار دادن ساختارهای کنترلی در توالی‌های مختلف ۸۱
شکل ۵-۲۱. تعریف متغیرهای مختلف در مدل اتصال دهنده‌ی Aspen Dynamic و Simulink ۸۲۰
شکل ۵-۲۲. نحوه‌ی تنظیم نرم‌افزار Simulink ۸۳
شکل ۵-۲۳. نمایی از مدل مربوط به اتصال نرم‌افزارهای Aspen Dynamic و Simulink ۸۴
شکل۶-۱. نحوه‌ی تغییرات جداسازی محصولات در توالی اول ۹۰
شکل ۶-۲. نحوه‌ی تغییرات جداسازی محصولات در توالی دوم ۹۲
شکل ۶-۳. نحوه‌ی تغییرات جداسازی محصولات در توالی سوم ۹۳
شکل ۶-۴. نحوه‌ی تغییرات جداسازی محصولات در توالی چهارم ۹۵
شکل ۶-۵. نحوه‌ی تغییرات جداسازی محصولات در توالی پنجم ۹۶
شکل ۶-۶. واریانس پاسخ برج‌های توالی اول ۹۸
شکل ۶-۷. واریانس پاسخ برج‌های توالی دوم ۱۰۰

شکل ۶-۸. واریانس پاسخ برج‌های توالی سوم ۱۰۱
شکل ۶-۹. واریانس پاسخ برج‌های توالی چهارم ۱۰۳
شکل ۶-۱۰. واریانس پاسخ برج‌های توالی پنجم ۱۰۴
شکل۶-۱۱. نمودارهای پراکندگی در منحنی نرمال توالی اول ۱۰۶
شکل۶-۱۲. نمودارهای پراکندگی در منحنی نرمال توالی دوم ۱۰۷
شکل ۶-۱۳. نمودارهای پراکندگی در منحنی نرمال توالی سوم ۱۰۸
شکل ۶-۱۴. نمودارهای پراکندگی در منحنی نرمال توالی چهارم ۱۰۹
شکل ۶-۱۵. نمودارهای پراکندگی در منحنی نرمال توالی پنجم ۱۱۰
شکل ب-۱. نمودار درختی انتخاب معادله حالت ۱۲۶
شکل ح-۱. منحنی‌های پاسخ توالی اول به تغییرات خوراک ۱۳۵
شکل ح-۲. منحنی‌های پاسخ توالی دوم به تغییرات خوراک ۱۳۶
شکل ح-۳. منحنی‌های پاسخ توالی سوم به تغییرات خوراک ۱۳۷
شکل ح-۴. منحنی‌های پاسخ توالی چهارم به تغییرات خوراک ۱۳۸
شکل ح-۵. منحنی‌های پاسخ توالی پنجم به تغییرات خوراک ۱۳۹
شکل خ-۱. بخش‌های مختلف نمودار جعبه‌ای ۱۴۰
شکل خ-۲. نمودارهای جعبه‌ای پاسخ توالی اول ۱۴۱
شکل خ-۳. نمودارهای جعبه‌ای پاسخ توالی دوم ۱۴۲
شکل خ-۴. نمودارهای جعبه‌ای پاسخ توالی سوم ۱۴۳
شکل خ-۵. نمودارهای جعبه‌ای پاسخ توالی چهارم ۱۴۴
شکل خ-۶. نمودارهای جعبه‌ای پاسخ توالی پنجم ۱۴۵

فهرست نمادها

نماد	نشانه
A	جزء A
B	جزء B و محصول پایین برج تقطیر
$bara$	بار مطلق- واحد فشار
C	جزء C
D	جزء D و محصول بالای برج تقطیر
E	جزء E
F	شدت جریان خوراک
FC	کنترل‌کننده شدت جریان
L	شدت جریان مایع برگشتی
LC	کنترل‌کننده‌های سطح
MW	مگاوات- واحد انرژی
n	تعداد محصولات یک توالی تقطیر ساده
NC	تعداد اجزای خوراک
P	فشار
PC	کنترل‌کننده‌ی فشار
q	شرایط دمایی خوراک
R	نسبت جریان برگشتی در بالای برج تقطیر
R_F	جریان برگشتی بی‌نهایت در بالای برج تقطیر
$R_{\min}$	حداقل جریان برگشتی در بالای برج تقطیر
TC	کنترل‌کننده‌ی دما
V	شدت جریان بخار در بالای خوراک
$V_{\min}$	حداقل شدت جریان بخار در بالای خوراک
V'	شدت جریان بخار در پایین خوراک
$^{\circ}C$	درجه سانتیگراد- واحد دما

فصل اول

پیشگفتار