

شبیه سازی و بهینه سازی برج دی بوتانایزر واحد الفین پتروشیمی اراک به منظور رفع مشکل جداسازی نامناسب و افزایش تولید برش C₄

سعید علامه نژاد ، سعید خواجه مندلی ، فرجام جاوید

واحد تحقیق و توسعه شرکت پتروشیمی اراک

E-mail : research@arpc-ir.net , allamehnezhad@noavar.com

چکیده

در این مقاله، مشکل جداسازی نامناسب و پیامدهای آن در برج دی بوتانایزر واحد الفین پتروشیمی اراک مورد بررسی قرار گرفته است. دو راهکار "بهینه سازی شرایط عملیاتی" و "یافتن محل بهینه ورود خوراک" برای رفع مشکل مذکور عملی به نظر می رسد. بنابراین ابتدا دی بوتانایزر با نرم افزارهای HYSYS، PRO/II و CHEMCAD شبیه سازی شد. سپس کمینه کردن میزان اتلاف C₄ در محصول پایین برج به عنوان تابع هدف تعیین، محدودیت ها مشخص و شرایط عملیاتی بهینه سازی گردید. نتایج نشان داد که جداسازی را نمی توان با تغییر شرایط کارکرد برج بهبود بخشید. به منظور بررسی راه حل دوم - تعیین محل بهینه سینی خوراک - ضمن جابجایی محل ورود خوراک به برج از سینی ۲۶ تا ۱۱ در نرم افزار شبیه ساز، تمام مراحل بهینه سازی انجام شد و تغییرات مهم ترین پارامترهای برج نظیر بار حرارتی ریویلر و کندانسور، جریان برگشتی، دبی محصولات و میزان اتلاف برش C₄ به ازای سینی های مختلف خوراک ترسیم گردید. تحلیل نمودارها بیانگر آن است که برای بهبود جداسازی باید محل ورود خوراک را از سینی ۲۱ به ۱۵ تغییر داد. با انجام این کار تولید برش C₄ به میزان ۱۶ تن در روز افزایش خواهد یافت.

واژه های کلیدی: بهینه سازی؛ شبیه سازی؛ جداسازی؛ سینی خوراک؛ دی بوتانایزر

مقدمه

برج دی بوتانایزر واحد الفین پتروشیمی اراک دارای مشکلات جداسازی نامناسب (Poor Separation) و ناپایداری (Instability) می باشد که باعث اتلاف مقادیر زیادی از برش با ارزش چهار کربنه (C₄-Cut) و بروز معضلات عدیده ای در واحدهای پایین دست شده است. برای حل مشکلات مذکور پروژه "شبیه سازی و بهینه سازی برج دی بوتانایزر واحد الفین و ارائه راهکار برای حل مشکلات جداسازی نامناسب و ناپایداری آن" در دستور کار واحد تحقیق و توسعه شرکت پتروشیمی اراک قرار گرفت. نتیجه بررسی مشکل جداسازی نامناسب برج و راهکار رفع آن در این مقاله و دستاوردهای بخش های دیگر پروژه فوق در قالب دو مقاله دیگر تحت عناوین "تعیین محل مناسب سنسور کنترل کننده دما به کمک شبیه سازی در برج

دی بوتانایزر واحد الفین پتروشیمی اراک" و "ارائه راه کار برای رفع مشکل ناپایداری برج دی بوتانایزر واحد الفین پتروشیمی اراک" به هشتمین کنگره ملی مهندسی شیمی ارائه گردید. ضمناً نتایج این پروژه تحقیقاتی جهت اجرا به اداره مهندسی فرآیند، بهره برداری و تعمیرات واحد الفین ارجاع داده شده است.

شرح عملکرد و مشخصات برج دی بوتانایزر

دی بوتانایزر واحد الفین پتروشیمی اراک حلقه اتصال این واحد با واحدهای هیدروژناسیون بنزین پیرولیز (PGH) و لاستیک پلی بوتادین (BD/PBR) می باشد. این برج با قطر ۹۱۵ میلی متر، ۴۰ سینی از نوع دریچه ای (ValveTray) دارد که سینی ۲۱ آن از پایین به عنوان محل ورود خوراک در نظر گرفته شده است. محصول بالاسری (برش C₄) و

جداسازی نامناسب همراه محصول پایین برج خارج شده، به هدر می رود که با احتساب قیمت ۴۸ دلار بر تن، زیان مستقیم ناشی از آن حدود ۳۵۰,۰۰۰ دلار در سال می باشد. وجود ترکیبات چهار کربنه در بنزین پیرولیز خام از طرف دیگر باعث افزایش بار راکتور هیدروژناسیون واحد PGH و مصرف بیشتر هیدروژن می گردد. با توجه به کارکرد راکتور در ۱۲۵ درصد ظرفیت طراحی و مشکل کمبود هیدروژن در مجتمع پتروشیمی اراک، چاره اندیشی برای رفع معضل جداسازی نامناسب بسیار حائز اهمیت می باشد.

شبیه سازی و بهینه سازی دی بوتانایزر

مهم ترین عوامل موثر در جداسازی یک برج تقطیر، مشخصات مکانیکی (قطر، تعداد و نوع سینی ها، فاصله بین سینی ها، محل ورود خوراک و ...) و شرایط عملیاتی آن (فشار، میزان جریان برگشتی و ...) می باشد. در طراحی برجهای تقطیر، مقادیر بهینه پارامترهای مذکور برای رسیدن به جداسازی مورد نظر تعیین می شود [۲,۳].

با توجه به تغییر مشخصات و ترکیب درصد خوراک و نیز شرایط عملیاتی دی بوتانایزر نسبت به طراحی (جدول ۲)، در شرایط موجود باید پارامترهای فوق الذکر را مجدداً بهینه سازی نمود. از آنجایی که تغییر برخی از این پارامترها نظیر قطر، تعداد و نوع سینی ها و فاصله بین آنها بسیار پرهزینه بوده و به سادگی امکان پذیر نمی باشد، بهبود عملکرد برج تنها از طریق "بهینه سازی شرایط عملیاتی" و یا "تغییر محل سینی خوراک" انجام می شود.

• شبیه سازی

امروزه در دنیا استفاده از نرم افزارهای قدرتمند شبیه سازی برای بهینه سازی فرآیند به عنوان بهترین، منطقی ترین، کم هزینه ترین و ایمن ترین روش پذیرفته شده است [۴]. بنابراین برای بهینه سازی دی بوتانایزر، ابتدا باید برج شبیه سازی شود. در این پروژه تحقیقاتی

پایین دی بوتانایزر (بنزین پیرولیز خام) به عنوان خوراک به واحدهای BD/PBR و PGH ارسال می گردد. جدول ۱ مشخصات خوراک، محصولات بالاسری و پایین برج را در حالت طراحی نشان می دهد [۱].

جدول ۱ - مشخصات خوراک و محصولات دی بوتانایزر در حالت طراحی

Component	Stream		
	Feed	Distillate	Bottom
Methyl Acetylene	8.8	8.8	0.0
Propadiene	0.1	0.1	0.0
VinylAcetylene	170.8	158.5	12.3
1,3-Butadiene	3528.9	3527.9	1.0
1-Butene	2513.6	2513.2	0.4
n-Butane	254.8	254.6	0.2
C5+	4068.0	12.9	4055.1
Total (Kg/hr)	10545	6476	4069

بر اساس بررسی های به عمل آمده، مشخصات و ترکیب درصد خوراک (Feed Condition & Composition) و نیز شرایط عملیاتی (Operating Conditions) دی بوتانایزر در حال حاضر منطبق بر طراحی نمی باشد. جدول ۲ نشان می دهد که با سبک تر شدن خوراک، اپراتور به ناچار برای حفظ خلوص محصول بالاسری، دمای پایین برج را به میزان قابل ملاحظه ای کاهش داده است.

جدول ۲ - مقایسه خوراک و شرایط عملیاتی دی بوتانایزر در حالت فعلی با طراحی

Condition	Design	Actual
Feed Temperature (°C)	59	48
C4-Cut in Feed (%Wt.)	61.5	67.5
C5+ in Feed (%Wt.)	38.5	32.5
Top Temperature (°C)	41.1	34
Bottom Temperature (°C)	113	66
Top Pressure (KPa)	460	370
Bottom Pressure (KPa)	500	400
C4 -Cut in Bottom (%Wt.)	0.34	25.0
C5+ in Distillate (%Wt.)	0.20	Nil-3.2

میزان ترکیبات چهار کربنه در پایین برج که مطابق طراحی باید حداکثر ۰/۳۴ درصد وزنی باشد در شرایط فعلی تا حدود ۲۵ درصد افزایش یافته است. به عبارت دیگر مقادیر زیادی از برش با ارزش C₄ (حدود ۲۲ تن در روز) در اثر

جدول ۲- مقایسه نتایج شبیه سازی و داده های عملیاتی برای محصول پایین برج

	Simulation	Actual	%Error
Temp. (°C)	66.67	66.00	+1.0
Press (Kpa)	400	400	0.0
Flow (Kg/hr)	4224	4281	- 1.3
Components	%Wt		
M-Acetylene	0.00	0.00	0.0
i-Butene	3.17	3.39	- 6.4
13-Butadiene	13.21	13.82	- 4.4
1-Butene	1.55	1.64	- 5.4
i-Butane	0.01	0.01	0.0
n-Butane	0.91	0.94	- 3.1
Cis2-Butene	2.55	2.57	- 0.7
Tr2-Butene	2.59	02.62	- 1.1
i-Pentane	7.47	7.37	+ 1.3
n-Pentane	11.61	11.45	+ 1.4
Tr2-Pentene	8.58	8.46	+ 1.4
Cis2-Pentene	1.13	1.11	+ 1.8
3M-1-butene	3.22	3.19	+ 0.9
13-CC5==	20.55	20.28	+ 1.3
CycloC5=	1.17	1.15	+ 1.7
CycloC5	2.84	2.81	+ 1.0
n-Hexane	1.46	1.44	+ 1.3
Benzene	9.57	9.44	+ 1.4
1-Pentene	1.90	1.87	+ 1.6
Mecyclopentan	0.80	0.79	+ 1.2
3M1C5=	2.54	2.50	+ 1.6
Toluene	3.18	3.14	+ 1.2

• بهینه سازی

بعد از شبیه سازی دی بوتانایزر، برای یافتن بهترین شرایط عملیاتی کارکرد برج از قابلیت بهینه سازی (Optimizer) موجود در نرم افزارهای شبیه ساز HYSYS، PRO/II و CHEMCAD استفاده گردید.

اولین مرحله در هر پروژه بهینه سازی، تعریف تابع هدف (Objective Function) می باشد [۵]. بعد از انجام این کار، بهینه ساز با تغییر پارامترهای سیستم، تابع هدف را کمینه (Minimize) یا بیشینه (Maximize) می نماید. با توجه به مشکل جداسازی نامناسب دی بوتانایزر و اتلاف برش C₄، تابع هدف برای بهینه سازی این برج "کمینه کردن مقدار برش چهار کربنه در محصول پایین آن" تعیین گردید.

نرم افزارهای شبیه ساز HYSYS، PRO/II و CHEMCAD مورد استفاده قرار گرفت.

برای شبیه سازی دی بوتانایزر نیاز به مجموعه کاملی از داده های عملیاتی بود. به همین دلیل هم زمان با ثبت شرایط عملیاتی در واحد الفین، نمونه های متعددی از خوراک و محصولات برج توسط دستگاه بسیار پیشرفته "GC/MS-Varian2200" آنالیز شده، اجزا و ترکیب درصد آنها به صورت دقیق مشخص گردید.

نتایج یکسان حاصل از شبیه سازهای فوق الذکر در حالات طراحی و واقعی به ترتیب با اطلاعات نمودار فرایندی (PFD) و داده های عملیاتی تطابق داشته و نشان می دهد که نرم افزارها با دقت بالایی رفتار برج را پیش بینی می نمایند (جدول ۳ و ۴).

جدول ۳- مقایسه نتایج شبیه سازی و داده های عملیاتی برای محصول بالا سری

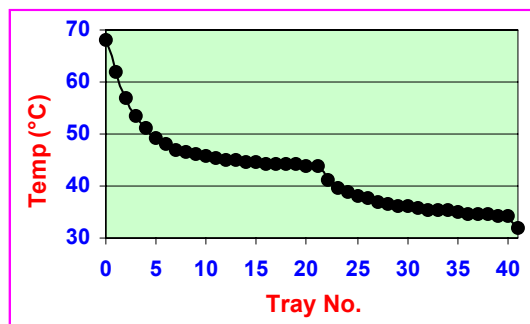
	Simulation	Actual	%Error
Temp. (°C)	33.5	33.5	0.00
Press (Kpa)	370	370	0.00
Flow (Kg/hr)	5704	5647	+ 1.1
Components	%Wt		
M-Acetylene	0.02	0.02	0.00
i-Butene	25.50	25.56	- 0.23
13-Butadiene	55.20	55.16	0.00
1-Butene	10.56	10.57	- 0.94
i-Butane	0.29	0.29	0.00
n-Butane	2.25	2.24	+ 0.45
Cis2-Butene	2.29	2.27	+ 0.88
tr2-Butene	3.65	3.64	+ 0.27
i-Pentane	0.04	0.04	0.00
n-Pentane	0.00	0.00	0.00
Tr2-Pentene	0.00	0.00	0.00
Cis2-Pentene	0.00	0.00	0.00
3M-1-butene	0.19	0.18	+ 5.26
1,3-CC5==	0.01	0.01	0.00
Cyclopentene	0.00	0.00	0.00

پارامترهای عملیاتی نمی توان جداسازی آن را به میزان قابل ملاحظه ای بهبود بخشید. به همین دلیل روش دوم - تغییر محل سینی خوراک - به عنوان تنها راه ممکن برای حل مشکل جداسازی مورد بررسی قرار گرفت.

تعیین محل بهینه سینی خوراک

معمولاً در طراحی برجهای تقطیر چند محل برای ورود خوراک در نظر گرفته می شود تا در صورت تغییر مشخصات و شرایط خوراک، اپراتور بتواند با جابجایی محل ورود خوراک از بروز اشکال در جداسازی برج جلوگیری نماید. به عبارت دیگر همواره برای یک برج با خوراک مشخص فقط یک سینی برای ورود خوراک وجود دارد که منجر به بهترین جداسازی می گردد. این سینی را محل بهینه سینی خوراک (Optimum Feed Tray Location) گویند [۸-۶].

تغییر مشخصات خوراک دی بوتانایزر نسبت به طراحی (جدول ۲) بهترین دلیل برای اثبات لزوم تعیین مجدد محل بهینه سینی خوراک می باشد. شواهد و قرائن دیگر نیز مؤید آن است که در حال حاضر خوراک در محل مناسب وارد برج نمی شود. به عنوان نمونه، پروفیل دمای برج (شکل ۱) نشان می دهد که در شرایط فعلی تغییر بسیار اندکی در دمای محدوده سینی های ۱۱ تا ۲۱ وجود دارد و این به معنی جداسازی نامناسب در سینی های مذکور می باشد [۸،۹]. پروفیل غلظت اجزا در طول برج نیز بیانگر این مطلب است. شکل ۲ نمونه ای از پروفیل غلظت را نشان می دهد.



شکل ۱ - پروفیل دمای برج در شرایط واقعی

بدیهی است برای یافتن کمترین یا بیشترین مقدار تابع هدف برای یک سیستم، پارامترهای موثر بر آن را فقط می توان در محدوده قابل قبولی تغییر داد. به عبارت دیگر محدودیت‌های خاصی (Constraints) برای پارامترهای هر سیستم وجود دارد [۵]. برای دی بوتانایزر محدودیت های زیر شناسایی و برای بهینه ساز تعریف گردید:

۱) با توجه به اینکه ریویلر و کندانسور برج تا ۱۰ درصد بیشتر از طراحی توان گرمایش و سرمایش دارند، حداکثر بار حرارتی (Duty) برای آنها به ترتیب ۱۱۰۰ و ۱۳۵۰ کیلو وات در نظر گرفته شد.

۲) خلوص محصول بالاسری باید حداقل ۹۹/۷ درصد وزنی باشد. بنابراین حداکثر مقدار ناخالصی (C5+) در آن سه دهم (۰/۳) درصد تعیین گردید.

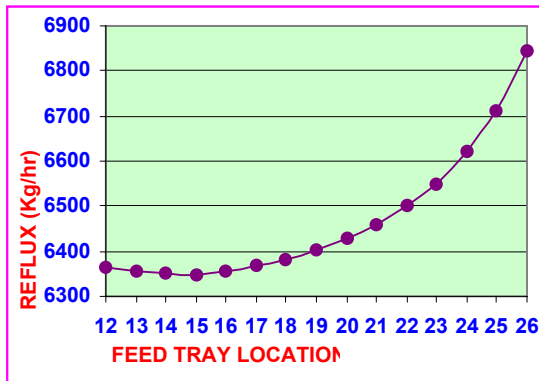
۳) با توجه به محدودیت قطر برج، فاکتور مشخصه طغیان (Max. Flooding Factor) برابر ۷۰ درصد قرار داده شد. شایان ذکر است که این عدد مطابق پیشنهاد طراح می باشد.

پس از تعریف تابع هدف و محدودیت های یاد شده، بهینه ساز با تغییر پارامترهای عملیاتی برج نظیر میزان جریان برگشتی، بار حرارتی ریویلر و کندانسور و ... بهترین شرایط کارکرد را برای بهبود جداسازی و رسیدن به کمترین مقدار اتلاف برش C₄ تعیین نمود (جدول ۵).

جدول ۵ - بهترین شرایط عملیاتی کارکرد برج برای تولید محصول با کمترین مقدار اتلاف C₄

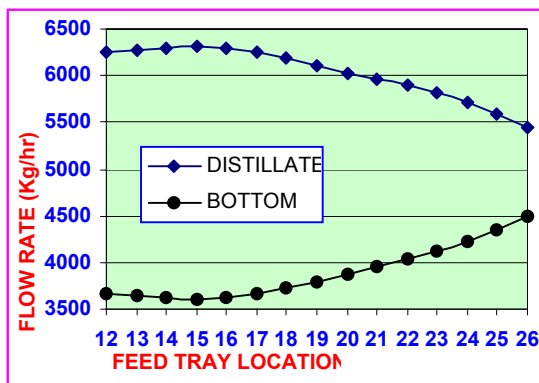
Top Pressure (KPa)	370
Q-Condenser (KW)	1289
Q-Reboiler (KW)	1052
Reflux Flow (Kg/hr)	6672
Maximum Flooding Factor (%)	70
Bottom Temperature (°C)	65.8
Distillate Flow (Kg/hr)	5653
Bottom Flow (Kg/hr)	4275

بررسی عملکرد دی بوتانایزر در حالت واقعی نشان داد که برج نزدیک به شرایط بهینه کار می کند. بنابراین با تغییر

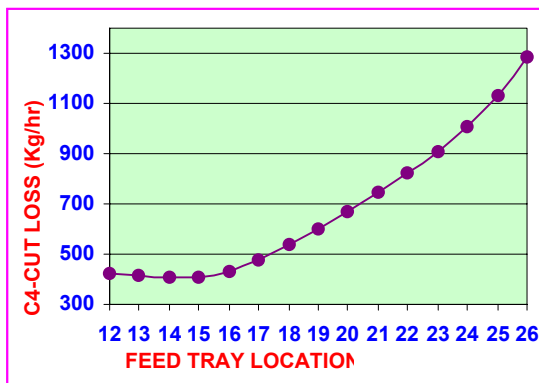


شکل ۴ - تغییرات دبی جریان برگشتی با جابجایی سینی خوراک

تغییرات دبی محصولات بالاسری و پایین برج و نیز اتلاف C₄ از پایین برج به ازای سینی های مختلف خوراک، روندی مشابه با جریان برگشتی دارد (شکل های ۵ و ۶).

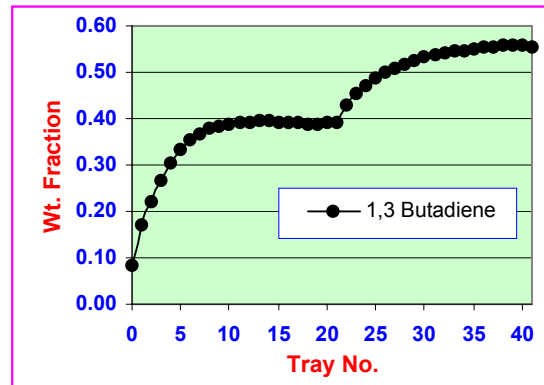


شکل ۵ - تغییرات دبی محصولات بالاسری و پایین برج با جابجایی سینی خوراک



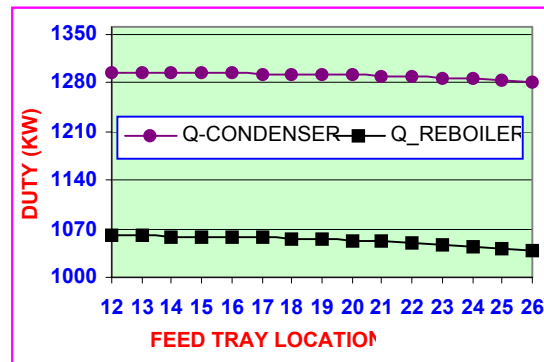
شکل ۶ - میزان اتلاف برش C₄ به ازای سینی های متفاوت خوراک

تفسیر نمودارهای فوق بیانگر آن است که سینی ۱۵ بهترین محل برای ورود خوراک به برج می باشد.



شکل ۲ - پروفیل غلظت بوتادین در دی بوتانایزر

برای تعیین محل بهینه سینی خوراک، ابتدا تابع هدف و محدودیت های دی بوتانایزر مطابق بخش قبل برای نرم افزار تعریف شد. سپس با تغییر محل ورود خوراک به برج در شبیه ساز از سینی ۲۶ تا ۱۲، شرایط بهینه کارکرد متناظر با هر سینی تعیین گردید و نمودار تغییرات مهم ترین پارامترهای برج نظیر بار حرارتی ریبویلر و کندانسور، جریان برگشتی، دبی محصولات برج و میزان اتلاف C₄ به ازای سینی های مختلف خوراک ترسیم شد (شکل های ۳، ۴، ۵ و ۶).



شکل ۳ - بار حرارتی ریبویلر و کندانسور برای

کارکرد برج به ازای سینی های مختلف خوراک

شکل ۴ نشان می دهد که با پایین آوردن محل ورود خوراک به برج از سینی ۲۶ تا ۱۵ و یا به عبارت دیگر افزایش تعداد سینی های قسمت غنی سازی (Rectifying Section)، جریان برگشتی مورد نیاز کاهش یافته و در سینی ۱۵ به یک مقدار مینیمم می رسد. از سینی ۱۵ به بعد این روند معکوس گشته، جریان برگشتی افزایش می یابد.

مراجع

1. TPL's PFD and P&ID of Olefins Plant, Arak Petrochemical Company, 1988.
2. Wauquier J.P., "Separation Processes", Vol.2, Technip ed., Paris, 2000.
3. Ludwig E.E., "Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants", 3rd edition, Vol.2, Gulf Publishing, Hoston, 1995.
4. Himmelblau D.M., Edgar T.F., Ladsen L.S., "Optimization of Chemical Processes", McGraw- Hill Inc., 2nd edition, 2001.
5. Vanderplaats G.N., "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design", McGraw-Hill Inc., 1984
6. Perry R.H., "Chemical Engineer's Handbook", 7th edition, McGraw-Hill Inc., New York, 1997.
7. Harrison M.E., France J.J., "Troubleshooting Distillation Columns; Part1: Technique and Tools", Chemical Eng., P.116, March 1989.
8. Kister H.Z., "Distillation Operation", McGraw-Hill Inc., New York, 1990.
9. Lieberman P.N., Lieberman E.T., "A Working Guide to Process Equipment", McGraw-Hill Inc., New York, 1997.

جابجایی سینی خوراک از ۲۱ به ۱۵ و کارکرد مطابق با شرایط عملیاتی بهینه به ازای این سینی (جدول ۶)، اتلاف برش C₄ را حدود ۶۳ درصد کاهش و تولید محصول C₄ را به میزان ۱۶ تن در روز افزایش می دهد.

جدول ۶ - شرایط عملیاتی بهینه به ازای سینی خوراک ۱۵

Top Pressure (KPa)	370
Q-Condenser (KW)	1329
Q-Reboiler (KW)	1100
Reflux Flow (Kg/hr)	6346
Maximum Flooding Factor (%)	69
C4 Cut in Bottom (%Wt.)	11.2
C5+ in Top (%Wt.)	0.3
Bottom Temperature (°C)	76.8
Distillate Flow (Kg/hr)	6318
Bottom Flow (Kg/hr)	3611

نتیجه گیری

- ۱) جداسازی نامناسب دی بوتانایزر و اتلاف برش چهار کربنه ناشی از تغییرات مشخصات و ترکیبات درصد خوراک می باشد.
- ۲) نتایج شبیه سازی برج و بهینه سازی شرایط عملیاتی نشان می دهد که نمی توان با تغییر پارامترهای فرآیندی، جداسازی برج را بهبود بخشید.
- ۳) با توجه به تغییر مشخصات و ترکیب درصد خوراک در شرایط فعلی نسبت به طراحی، سینی ۲۱ محل مناسبی برای ورود خوراک به برج نمی باشد.
- ۴) بهینه سازی دی بوتانایزر به ازای سینی های مختلف خوراک و تفسیر نمودارهای مربوط، بیانگر آن است که سینی ۱۵ بهترین محل برای ورود خوراک به برج می باشد.
- ۵) با تغییر سینی خوراک از ۲۱ به ۱۵ تولید برش چهار کربنه به میزان ۱۶ تن در روز افزایش خواهد یافت.
- ۶) با احتساب ۸۰۰۰ ساعت کارکرد سالانه و قیمت ۴۸ دلار بر تن، صرفه جویی اقتصادی ناشی از افزایش تولید برش C₄ حدود ۲۵۶۰۰۰ دلار در سال می باشد.