



بررسی تاثیر تابع D در غنی‌سازی ایزوتوپ‌های میانی تلوریم با استفاده از آبشار مربعی

فاطمه منصورزاده^۱، سجاد خوشه چین^{۲*}، محمد حسن ملاح^۱، سید جابر صفدری^۱

۱. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای

۲. سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران

چکیده:

در این مقاله به محاسبه پارامترهای بهینه در آبشار مربعی جهت جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزئی پرداخته شده است. در این راستا یک کد محاسباتی تهیه شده و تغییرات پارامتر D برای آبشارهایی با تعداد مراحل ۲۰، ۲۵، ۴۰ و ۵۰ جهت جداسازی ایزوتوپ میانی تلوریم (Te-123) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تابع D ابزاری مناسب جهت تعیین تعداد مراحل آبشار خواهد بود و آبشار با تعداد مراحل ۵۰ بهترین گزینه برای جداسازی Te-123 می‌باشد. همچنین جهت افزایش غنای این ایزوتوپ از مقدار طبیعی ۰/۰۰۸۹ تا ۰/۷۵، از آبشار مربعی در ۳ گام استفاده می‌شود و میزان بازیابی کل آن برابر با ۹۴٪ خواهد بود.

کلید واژه: ایزوتوپ‌های پایدار، جداسازی، تلوریم ۱۲۳، آبشار مربعی، ضریب بازیابی

Investigation of the D function on the enrichment of intermediate tellurium isotopes using a square cascade

Fatemeh Mansourzadeh¹, Sajad Khooshechin^{2*}, M. H. Mallah¹, Jaber Safdari¹

¹ Material and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box: 11365-8486, Tehran, Iran.

² Iran Advanced Technologies Company, Atomic Energy Organization of Iran, P. O. Box: 143995531, Tehran, Iran.

Abstract:

In this paper, the optimal parameters in a square cascade for the separation of multicomponent isotopes are calculated. In this regard, a computational code has been prepared and the changes of parameter D for cascades with 20, 25, 40 and 50 stages to separate the intermediate isotope of tellurium (Te-123) have been investigated. The results show that the D function will be a suitable tool to determine the number of stages and the cascade with 50 stages is the best option for separation of Te-123. Also, to increase the enrichment of this isotope from the natural value of 0.0089 to 0.75, a square cascade is used in 3 steps and the total recovery rate will be equal to 94%.

Keywords: Stable isotopes, Separation, Te-123, Square cascade, Recovery coefficient

* Email: khooshechinsajad @ gmail.com

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر تقاضا برای تولید ایزوتوپ‌های با غلظت بالا افزایش یافته است که بیشترین کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار در تولید رادیو ایزوتوپ‌ها، استفاده در دستگاه ام آر آی، تحقیقات فیریک کاربردی، الکترونیک و صنعت هسته‌ای می‌باشد [۱]. روش‌های مختلفی برای جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی نیز معرفی شده است که از میان آنها استفاده از آبشار مربعی [۲] یکی از روش‌های متداول می‌باشد. با توجه به جریان‌های برگشتی در مراحل اول و آخر، آبشارهای مربعی قابلیت بهره‌برداری در خوراک‌های پایین و همچنین ضریب برش‌های مختلف را دارا می‌باشند که اصطلاحاً از انعطاف‌پذیری بالایی در بهره‌برداری برخوردار است. در جدا کردن ایزوتوپ‌های میانی لازم است تا ترکیب چند جزئی در خوراک را به دو گروه دسته بندی نمود. تابع D به عنوان معیاری جهت جداسازی دو گروه ایزوتوپی در آبشارهای طولی توسط زنگ و همکاران معرفی شده است [۳].

در این مقاله ابتدا تغییرات پارامتر D برای آبشارهایی با تعداد مراحل $۲۰, ۲۵, ۳۰, ۴۰$ و ۵۰ جهت جداسازی ایزوتوپ میانی تلوریم ($Te-123$) مورد بررسی قرار گرفته است. سپس در آبشار مربعی منتخب نرخ جریان خوراک ورودی به مراحل آبشار، برش مرحله اول، برش آبشار و نرخ جریان خوراک به زنجیره و مرحله ورود خوراک به آن به عنوان متغیر بهینه سازی در گامهای مختلف محاسبه شده است.

۲. معادلات حاکم بر آبشارهای مربعی

۱.۲. معادلات بقای جریان و جرم

در یک آبشار مربعی نرخ جریان ورودی به تمام مراحل ثابت می‌باشد [۱]. معادلات (۲) تا (۵) مربوط به موازنه جریان در تمام نقاط تلاقی جریان‌ها می‌باشند. همچنین با استفاده از تعریف برش و معادلات بقای جریان در هر مرحله روابط (۶) و (۷) برقرار خواهند بود. در این روابط θ_s, M_s, N_s و Z_s به ترتیب به برش مرحله s ، نرخ جریان پیشرونده مرحله s ، نرخ جریان پسرونده مرحله s و نرخ جریان ورودی به مرحله s اشاره دارند [۴]. پارامترهای ε و ε' نیز به ترتیب بیانگر جریان‌های برگشتی در مراحل اول و آخر در آبشار مربعی می‌باشند.

$$Z_1 = Z_2 = \dots = Z_S = Z \quad (۱)$$

$$Z = M_{s-1} + N_{s+1}, \quad s \neq s_f \quad (۲)$$

$$Z = M_{s-1} + N_{s+1} + F, \quad s = s_f \quad (۳)$$

$$Z = M_{s-1} + \varepsilon', \quad s = S \quad (۴)$$

$$Z = N_2 + \varepsilon, \quad s = 1 \quad (۵)$$

$$M_s = Z\theta_s \quad (۶)$$

$$N_s = Z(1 - \theta_s) \quad (۷)$$

با توجه به معادلات فوق جریان‌های M_s, N_s و نیز پارامترهای ε و ε' مجهول می‌باشند. بنابراین در یک زنجیره مربعی با S مرحله $2S$ مجهول از جنس جریان وجود دارد. معادلات مستقل نیز $2S$ هستند که شامل معادلات جریان در مراحل و نقاط تلاقی می‌باشند. بنابراین برای اینکه بتوان معادلات را حل نمود باید مقدار ۲ پارامتر را معین کرد. از جمله پارامترهای عملیاتی و مهم در آبشار مربعی برش مراحل می‌باشد که با داشتن دو برش مرحله اول و برش آبشار می‌توان نرخ تمام جریان‌ها را بدست آورد.

معادلات (۸) تا (۱۲) نیز مربوط به بقای جزء A_m در مرحله s و نقاط تلاقی می‌باشند.

$$ZZ_{i,s} = M_s y_{i,s} + N_s x_{i,s} \quad (۸)$$

$$ZZ_{i,s} = M_{s-1} y_{i,s-1} + N_{s+1} x_{i,s+1} + F z_{i,F}, \quad s = s_f \quad (۹)$$

$$ZZ_{i,s} = M_{s-1} y_{i,s-1} + N_{s+1} x_{i,s+1}, \quad s \neq s_f \quad (۱۰)$$

$$ZZ_{i,s} - M_{s-1}y_{i,s-1} - \varepsilon' y_{i,p} = 0 \quad , \quad s = S \quad (11)$$

$$ZZ_{i,s} - N_{s+1}x_{i,s+1} - \varepsilon x_{i,w} = 0 \quad , \quad s = 1 \quad (12)$$

۲.۲ تابع D

به منظور جداسازی اجزای میانی، مخلوط ایزوتوپ‌ها را باید به دو گروه تقسیم نمود به گونه‌ای که ایزوتوپ میانی مطلوب به عنوان ایزوتوپ انتهایی یکی از گروه‌ها مطرح شود. تابع D به عنوان معیاری از جداسازی دو گروه ایزوتوپ‌ها توسط زنگ ارائه شده است [۳]. بهترین مقدار برای این تابع عدد یک است. بیان ریاضی تابع D به صورت زیر است:

$$D = \frac{P}{F} \sum_{i=1}^k y_{i,p} + \frac{W}{F} \sum_{i=k+1}^{N_c} x_{i,w} \quad (13)$$

۳. روش کار

در این تحقیق از گاز هگزافلوراید تلوریم طبیعی با ۸ ایزوتوپ پایدار به عنوان خوراک جهت جداسازی ایزوتوپ سوم آن (Te-123) استفاده شده است. همانطور که از جدول ۱ ملاحظه می‌شود در میان ایزوتوپ‌های میانی جداسازی ایزوتوپ سوم پیچیده‌تر است.

جدول ۱. غلظت ایزوتوپ‌های تلوریم در خوراک طبیعی

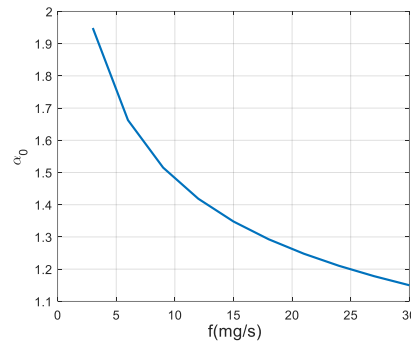
شماره	1	2	3	4	5	6	7	8
ایزوتوپ	Te-120	Te-122	Te-123	Te-124	Te-125	Te-126	Te-128	Te-130
غلظت	0.00090	0.02550	0.00890	0.04740	0.07070	0.18840	0.31740	0.34080

روش کار به این ترتیب است که ابتدا مطالعات پارامتریک بر روی پارامتر D در آبشارهای مربعی با تعداد مراحل ۲۰، ۲۵، ۴۰ و ۵۰ انجام شده و آبشار با مناسب‌ترین تعداد مرحله برای جداسازی ایزوتوپ سوم تعیین می‌شود. پس از آن محاسبات بهینه‌سازی برای آبشار با تعداد مراحل منتخب انجام می‌شود.

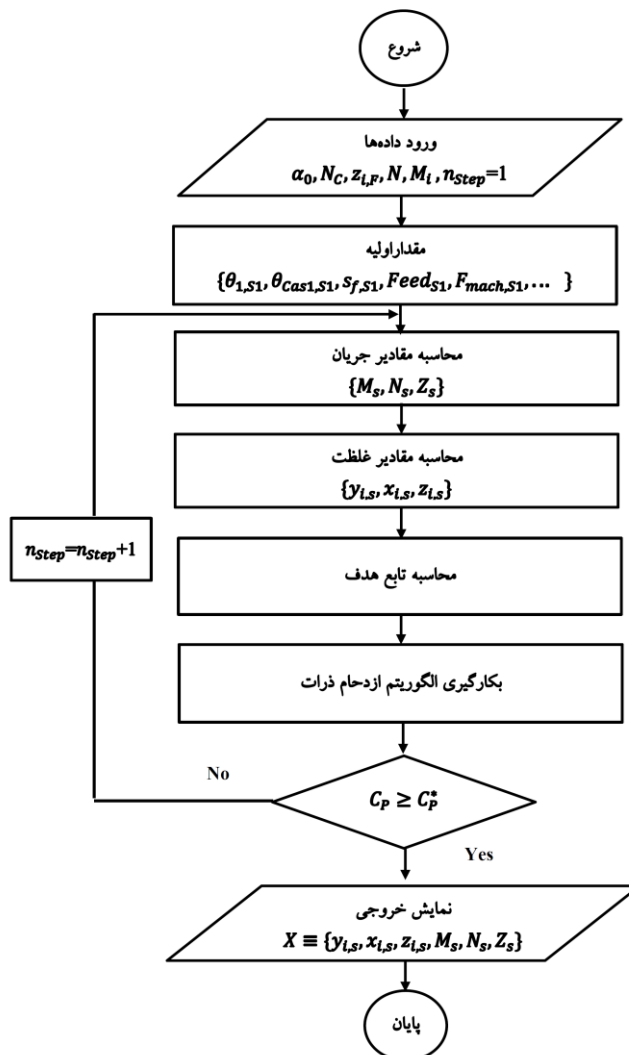
با توجه به اینکه در مراجع [۳-۵] به تاثیر و اهمیت زیاد تابع D در جداسازی ایزوتوپ‌های میانی پرداخته شده است، در این بخش ابتدا به بررسی تاثیر فاکتور جداسازی (α_0)، تعداد مراحل آبشار (N) و نسبت نرخ جریان ورودی به مراحل به نرخ جریان خوراک (Z/F) بر پارامتر D برای جداسازی ایزوتوپ Te-123 پرداخته می‌شود. محدوده‌ی این پارامترها به ترتیب "۱/۴ - ۱/۰۵"، "۲۰-۵۰"، "۲-۱۸" انتخاب شده اند.

فاکتور جداسازی در محاسبات بهینه‌سازی نیز مطابق شکل (۱) استفاده می‌شود و در محاسباتی که مربوط به تعیین تعداد مراحل است محدوده نرخ ماشین بین ۱۵-۲۵ (mg/s) در نظر گرفته شده است که معادل فاکتور جداسازی بین ۱/۳۵ - ۱/۲ می‌باشد. بنابراین در بررسی‌های انجام شده با تغییر تعداد مراحل و نسبت Z/F محدوده‌ای از فاکتور جداسازی مناسب است که به طور تقریبی ناحیه فوق را پوشش دهد.

جهت انجام محاسبات در این مقاله نیز یک کد محاسباتی تهیه شده است که الگوریتم آن مطابق شکل (۲) می‌باشد.



شکل ۱. تغییرات فاکتور جداسازی بر حسب نرخ جریان خوراک ماشین



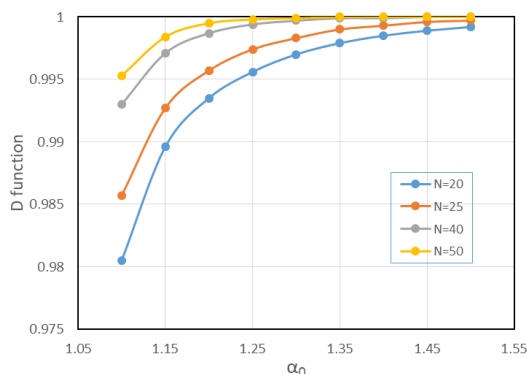
شکل ۲. الگوریتم بهینه سازی پارامترهای آبشار به روش PSO

۳. نتایج و بحث

در بخش اول تعداد مراحل مناسب جهت جداسازی $Te-130$ تعیین می‌گردد و در بخش دوم نتایج بهینه‌سازی آبشار مربعی در چند گام برای زنجیره منتخب ارائه می‌گردد.

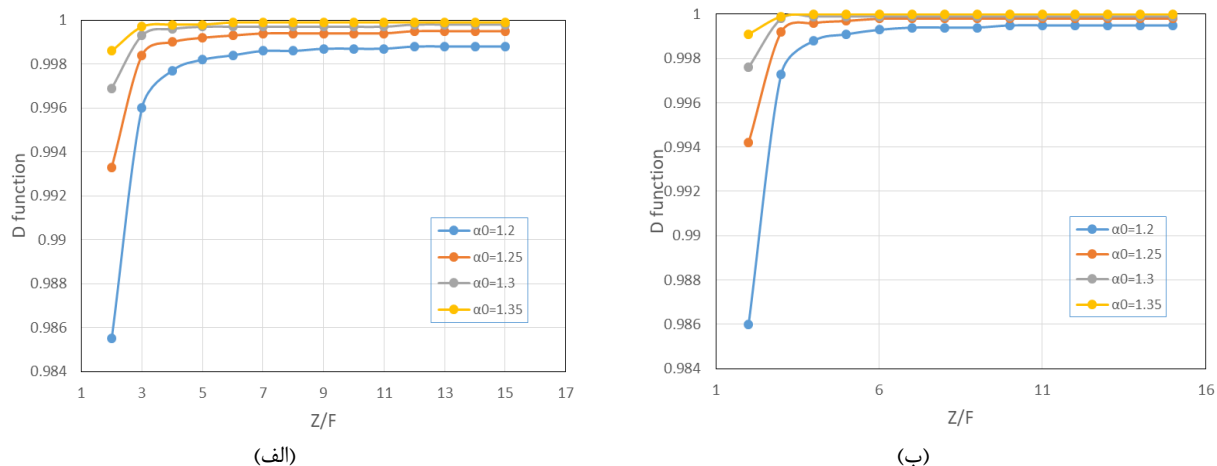
۱.۴. تعیین تعداد مراحل

شکل (۳) تغییرات تابع D را بر حسب فاکتور جداسازی برای تعداد مراحل مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد مراحل، مقدار D افزایش یافته و در صورتی که تعداد مراحل برابر با ۵۰ در نظر گرفته شود تغییر چندانی در مقدار D بر حسب فاکتور جداسازی از مقدار بیشتر از $1/20$ وجود ندارد.



شکل ۳. تغییرات مقدار تابع D بر حسب α_0 در یک آبشار مربعی با تعداد مراحل مختلف

شکل (۴) نیز تغییرات تابع D را بر حسب مقدار نسبت Z/F برای زنجیره با تعداد مراحل ۴۰ و ۵۰ نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در صورتی که تعداد مراحل برابر با ۵۰ انتخاب شود، در نسبت‌های مختلف Z/F تفاوت چشمگیری بین مقدار D برای فاکتورهای جداسازی $1/25$ تا $1/35$ وجود ندارد. اما در صورتی که تعداد مراحل برابر با ۴۰ در نظر گرفته شود مطابق شکل ۴-الف، مقادیر D برای فاکتورهای جداسازی کمتر از $1/30$ در نسبت‌های مختلف Z/F با یکدیگر متفاوت است.



شکل ۴. الف) تغییرات مقدار تابع D بر حسب Z/F در یک آبشار مربعی با ۴۰ مرحله در α_0 های مختلف، ب) تغییرات مقدار تابع D بر حسب Z/F در یک آبشار مربعی با ۵۰ مرحله در α_0 های مختلف

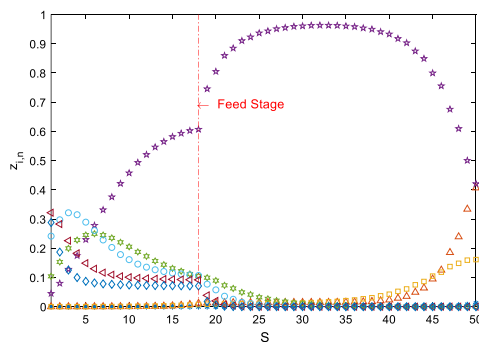
بنابراین براساس نتایج بدست آمده از شکل‌های (۳) و (۴) در صورتی که برای جداسازی ایزوتوپ Te-123 از ماشین با مشخصات ارائه شده در بخش قبل استفاده، بهتر است از زنجیره با ۵۰ مرحله استفاده گردد.

۲.۴. نتایج بهینه سازی آبشار مربعی انعطاف پذیر

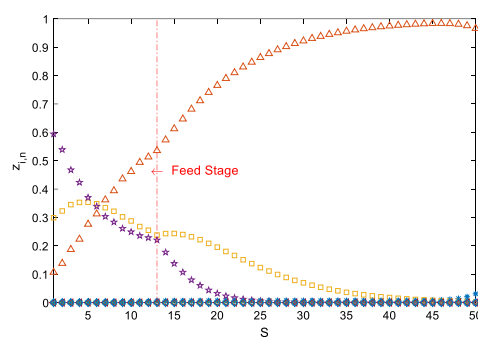
در این بخش نتایج بهینه‌سازی برای جداسازی Te-123 تا خلوص ۷۵٪ برای زنجیره انعطاف پذیر مربعی با ۵۰ مرحله ارائه می‌شود. این زنجیره قادر به جداسازی ایزوتوپ هدف در ۳ گام شده است. مطابق نتایج بدست آمده، میزان بازیابی آن در ۳ بار استفاده از زنجیره برابر با ۹۴٪ می‌باشد. براساس نتایج جدول (۲)، این زنجیره نیاز به استفاده از ۲۷۳kg خوراک TeF_6 طبیعی دارد که مقدار محصول آن برابر با ۳kg در غنای ۷۵٪ می‌باشد. همچنین جدول (۲) مقادیر مربوط به پارامترهای اصلی طراحی زنجیره در تمام گام‌ها برای تولید محصول را نشان می‌دهد. در شکل (۵) نیز غلظت ایزوتوپ‌ها در تمام مراحل برای سه گام جداسازی آورده شده است.

جدول ۲. پارامترهای اصلی زنجیره در سه گام جداسازی Te-123

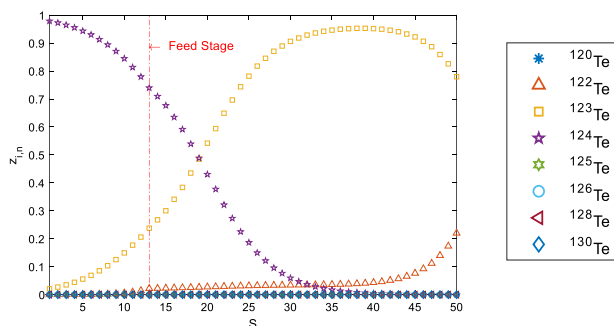
شماره گام	گام اول	گام دوم	گام سوم
نرخ خوراک آبشار (mg/s)	10	10	4
برش آبشار	0.055	0.428	0.351
مرحله‌ی ورود خوراک	18	13	13
نرخ خوراک ماشین (mg/s)	19.95	18.57	15.00
تابع D	0.980	0.950	0.988
درصدبازیابی	99	99	95
غلظت در محصول	0.1603	0.2789	0.7559



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵. غلظت ایزوتوپ‌ها در تمام مراحل، الف) گام اول، ب) گام دوم، ج) گام سوم



بنابراین می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری نمود با توجه به اهمیت تابع D جهت تعیین تعداد مراحل لازم است که ابتدا با بررسی پارامترهای مختلف بر روی آن تعداد مراحل تعیین شده و پس از آن برای زنجیره منتخب محاسبات بهینه‌سازی انجام گیرد. در این صورت با صرف هزینه محاسباتی کمتر جواب درست نیز جهت طراحی بدست می‌آید.

۳. جمع بندی

به منظور طراحی یک آبشار باید پارامترهای بهینه آن تعیین شود تا بتوان جداسازی ایزوتوپ مورد نظر را به بهترین شکل ممکن انجام داد. بدین منظور یک کد محاسباتی توسعه داده شد و از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات جهت یافتن پارامترهای بهینه آبشار مربعی استفاده شد. در این تحقیق پس از تعیین تعداد مراحل زنجیره با بررسی پارامتر D ، به منظور بیان قابلیت کد بهینه‌سازی تهیه شده، نتایج برای جداسازی ایزوتوپ میانی تلوریم مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که تابع D ابزاری مناسب جهت تعیین تعداد مراحل آبشار می‌باشد. برای جداسازی $Te-123$ ، آبشار با تعداد مراحل ۵۰ مناسب‌ترین گزینه بوده و جهت افزایش غنای این ایزوتوپ از مقدار طبیعی تا ۰/۷۵، از آبشار مربعی در ۳ گام استفاده می‌شود که میزان بازیابی کل آن برابر با ۹۴٪ خواهد بود.

مراجع

1. Mol, C. A. and Rakhorst, H., "Production of stable isotopes at Urenco: 10 years of progress," Rad. Anal. Nuc. Chem, 257(1): 165, (2003).
2. Villani, S., Enrichment of Uranium, Springer-Verlag, N.Y, (1979).
3. Zeng, S., Chuntong Y., "A method of separating a middle component in multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge cascades," Sep. Sci. Tech., 35(14), 2173, (2000).
4. Mansourzadeh, F., Safdari, J., Khamseh, A., Norouzi, A., Khajenouri, M., 2019, "Investigation of Cut for the Separation of Xenon Middle Components in the Square Cascade", Iranian journal of nuclear science and technology.
5. Sulaberidze, G.A., Borisevich, V.D., 2001. Cascade for Separation of Multicomponent Isotope Mixtures. J. Sep. Sci. Tech, 36(8-9), 1769.
6. Wu, H.J., Ying, C, Liu, G., 1998. Calculation methods for determining the distribution of components in a separation cascade for multicomponent mixture. J. Sep. Sci. Technol. 33 (6), 887.
7. Zeng, S., Ying, C., 2000. A robust and efficient calculation procedure for determining concentration distribution of multicomponent mixtures. . J. Sep. Sci. Technol. 35 (4), 613.