مجله علوم و فنون هسته‌ای، جلد ۹۶، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 96, No. 3, 2021

بررسی تأثیر مرحله ورود خوراک و برش مرحله اول در عملکرد زنجیره مربعی جهت ارایه راهبرد مناسب جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم

فرزانه اعزازی[۱]، محمد حسن ملاح*[۱]، جواد کریمی ثابت[۱]، علی نوروزی[۲]، عادل محمودیان[۲]

۱. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران

۲. شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۵۹۳۱-۱۴۳۹۹۵، تهران- ایران

*Email: mmallah@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۱/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۴/۲۹

چکیده

در این پژوهش به بررسی عملکرد زنجیره مربعی در جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم پرداخته شده است. انتخاب مناسب مرحله ورود خوراک، برش مرحله اول زنجیره و برش زنجیره مربعی از جمله پارامترهای مؤثر در جداسازی ایزوتوپ‌ها در زنجیره مربعی هستند. نتایج نشان داد که در فاکتورهای جداسازی مختلف، انتخاب مرحله ورود خوراک در بخش‌های میانی زنجیره، منجر به نتایج مناسبی خواهد شد. هم‌چنین استنباط می‌گردد که اگر برش مرحله اول زنجیره به‌صورتی انتخاب شود که برش‌های مراحل در بخش تهی‌سازی یکسان به دست آید، به ازای این برش، دو گروهی شدن اجزاء از بالاترین مقدار ممکن برخوردار خواهد بود. بر اساس انتخاب این برش برای مرحله اول زنجیره، یکی از راهبردهای ممکن همراه با تهیه کدی به نام SQCASSIM جهت جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم تا غنای بیش از ۹۰ درصد ارایه شده است.

کلیدواژه‌ها: زنجیره مربعی، برش مرحله اول، ایزوتوپ پایدار، پارامتر دوگروهی، تلوریم

Investigation of the effect of feed stage and first stage cut on the squared cascade performance to offer an appropriate strategy for separation of tellurium stable isotopes

F. Ezazi[1], M.H. Mallah*[1], J. Karimi Sabet[1], A. Norouzi[2], A. Mahmoudian[2]

1. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran-Iran
2. Iran Advanced Technologies Compony, AEOI, P.O.Box: 143995-5931, Tehran-Iran

Research Article
Received 8.4.2020, Accepted 19.7.2020

Abstract

In the present work, the performance of a square cascade in the separation phase of tellurium stable isotopes is studied. In this cascade, the selection of an appropriate feed stage, the first stage cut, and the cut of the cascade are the effective parameters. The results showed that in the various separation factors, selection of the middle feed stage leads to appropriate results. Also, if the cut of the first stage is selected in such a way that the cuts of stripping section are obtained the same, it is one of the cut-offs for which the two grouping parameters of components will have the highest possible value. Based on the selection of this cut, one of the possible strategies available through using the code-named SQCASSIM for the separation of tellurium stable isotopes to the enrichment of more than 90% is presented.

Keywords: Squared cascade, First stage cut, Stable isotope, Two group separation parameter, Tellurium

۱. مقدمه

به دلیل کاربرد روزافزون ایزوتوپ‌های پایدار در حوزه‌های مختلف از جمله تولید رادیوداروها برای درمان و تشخیص بیماری‌ها و فعالیت‌های پژوهشی در زمینه فیزیک و سایر علوم مرتبط، نیاز مبرم جهت دست‌یابی به روش‌های مناسب در جداسازی و به‌عبارتی غنی‌سازی آن‌ها از مخلوط‌های چندجزیی به وجود آمده است. در این میان استفاده از سانتریفیوژ در قالب زنجیره‌های غنی‌سازی، برای ایزوتوپ‌های سنگین و نیمه‌سنگین از مزایای قابل‌توجهی برخوردار بوده و طی سالیان اخیر تمایل دانشمندان به توسعه در این حوزه متمرکز شده است [۳-۱]. به‌عنوان مثال در جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار عنصر زینان، پژوهش‌های جدیدی برای بهینه‌سازی زنجیره‌های متداول و هم‌چنین بررسی عملکرد برش در زنجیره مربعی انجام شده است [۷-۴]. ذکر این نکته ضروری است که در جداسازی ایزوتوپ‌ها در مخلوط‌های چندجزیی، دو جزء ابتدایی و انتهایی در مخلوط (از نظر جرم مولکولی) در طول زنجیره رفتار یکنواختی را از خود نشان می‌دهند و هر کدام به سمت خروجی خود افزایش می‌یابند، در حالی‌که غنی‌سازی اجزاء میانی به ترکیب درصد مخلوط و میزان غنای جزء مورد نظر نسبت به اجزاء اطراف خود وابسته بوده و معمولاً دارای یک بیشینه مقدار در مراحل میانی زنجیره است. این بدین‌معنی است که غنی‌سازی اجزاء میانی در یک زنجیره محدود است. اشاره به این نکته ضروری است که در صورتی‌که هدف، جداسازی ایزوتوپ‌های انتهایی باشد می‌توان تنها با یک زنجیره، غنای ایزوتوپ مطلوب را تا مقادیر بسیار بالا افزایش داد. اما در صورتی‌که هدف جداسازی ایزوتوپ‌های میانی باشد، برای این منظور حداقل به دو زنجیره نیاز است. با توجه به این مسایل، علاوه بر این‌که انتخاب یک مدل مناسب و پربازده برای مدل‌سازی جداسازی ایزوتوپی ضروری است، در عین‌حال نیاز به اتخاذ راهبردی مناسب خواهد بود تا بتوان با چیدن تعداد مناسبی از زنجیره‌ها پشت سرهم و یا استفاده از یک زنجیره با ورودی و خروجی‌های مختلف برای چندین مرتبه، جداسازی تمامی ایزوتوپ‌های یک عنصر را به انجام رساند. در این راهبردها مناسب‌تر است که برای هر عنصر، بسته به تعداد ایزوتوپ‌های آن و غنای موردنظر برای هر ایزوتوپ، زنجیره‌ای مخصوص طراحی شود؛ با این وجود ممکن است بتوان از زنجیره یک عنصر برای زنجیره عنصر دیگر نیز استفاده نمود. به این‌گونه زنجیره‌ها که قابلیت سوییچ بین عناصر مختلف و یا سوییچ بین ترکیب‌های مختلف جداسازی ایزوتوپ‌های یک عنصر را فراهم می‌آورند زنجیره‌های انعطاف‌پذیر[1] یا چندهدفه[2] می‌گویند.

در حالت کلی، زنجیره طراحی شده می‌تواند عملکرد پیوسته یا ناپیوسته داشته باشد. در حالت پیوسته، می‌توان از یک زنجیره یا چندین زنجیره استفاده نمود. در هنگام استفاده از زنجیره‌های متوالی، می‌توان از خروجی‌های زنجیره‌های قبلی و یا خوراک تازه به عنوان ورودی زنجیره‌های بعدی استفاده نمود. در حالت ناپیوسته، خوراک به زنجیره تزریق می‌شود و محصول جمع‌آوری شده و سپس محصول به دست آمده، مجدداً به عنوان خوراک به همان زنجیره تزریق می‌گردد. شایان ذکر است که محل تزریق در هر مرتبه، لزوماً ثابت نیست و با توجه به معیارهای موردنظر (مانند بیشینه‌شدن توان جداسازی و سایر پارامترها) می‌تواند تغییر کند. همان‌طور که پیش‌تر نیز بیان شد، غنی‌سازی ایزوتوپ‌های انتهایی (سبک‌ترین و سنگین‌ترین ایزوتوپ‌های موجود در مخلوط) تا هر غنای دلخواهی، به راحتی در یک بار استفاده از زنجیره قابل دست‌یابی است به شرطی‌که زنجیره مورد استفاده به اندازه کافی بلند باشد. اما برای جداسازی یک ایزوتوپ میانی نمی‌توان این‌گونه عمل نمود. برای جداسازی یک ایزوتوپ میانی، لازم است که مخلوط به دو قسمت تقسیم شود که ایزوتوپ میانی موردنظر، به یک ایزوتوپ انتهایی در یکی از این قسمت‌ها تبدیل گردد. در این صورت، در بهترین حالت حداقل دو بار استفاده از زنجیره لازم است تا ایزوتوپ میانی به غلظت موردنظر برسد. به‌منظور تبدیل یک ایزوتوپ میانی به ایزوتوپ انتهایی، روش‌های مختلفی از جمله استفاده از زنجیره‌های معمول مانند R[3] و Q [۱۰-۸]، به‌کارگیری یک زنجیره و قرار دادن خروجی در مرحله‌ای که غلظت ایزوتوپ هدف در آن بیشینه شده و هم‌چنین استفاده از زنجیره‌های متوالی به‌منظور جداسازی ایزوتوپ‌ها به‌صورت گام به گام از سبک‌ترین تا سنگین‌ترین یا برعکس را می‌توان به‌کار برد. روش اول به دلیل پیچیدگی، کم‌تر عملیاتی می‌شود. به‌عنوان مثال نرخ جریان‌ها مرحله به مرحله تغییر می‌کند. چنین زنجیره‌هایی در شرایطی مناسب هستند که یک جزء خاص از یک مخلوط جداسازی می‌شود و اگر جزء دیگری از آن مخلوط جدا شود و یا یک جزء از یک مخلوط جدید مدنظر باشد، باید یک زنجیره جدید طراحی شود. در روش دوم، تعیین مکان بیشینه شدن غلظت ایزوتوپ موردنظر چه به‌صورت تئوری و چه عملی، پیچیدگی‌هایی را در بهره‌برداری زنجیره به دنبال دارد. هم‌چنین جزء میانی موردنظر با هر غلظتی که جداسازی شود، باز یک جزء میانی باقی می‌ماند و بنابراین برای به دست آوردن غلظت به اندازه کافی زیاد، نیاز به استفاده چندین‌باره از زنجیره وجود دارد که در آن از خروجی میانی زنجیره فعلی، به‌عنوان خوراک زنجیره بعدی استفاده می‌شود. اگر غلظت جزء موردنظر در خوراک بالا باشد و یا غلظت نهایی بسیار بالایی نیاز نباشد،

1. Flexible Cascades
2. Multi-Purpose Cascades
3. Matched Abundance Ration Cascade

احتمالاً در یک بار استفاده از زنجیره بتوان به مقصود رسید. گزینه سوم، ساده‌ترین روش است و می‌توان چندین بار از زنجیره استفاده کرده و در هر بار، یکی از ایزوتوپ‌های انتهایی را جدا نموده و پس از چند بار، به ایزوتوپ میانی موردنظر دست یافت. روش‌های دوم و سوم قادر به جداسازی ایزوتوپ میانی در دو بار استفاده از زنجیره نمی‌باشند. اگرچه این روش‌ها در تعداد راه‌اندازی‌ها به کارآمدی روش اول نیستند، با این‌حال نیاز به زنجیره‌های خاص ندارند و ساده‌ترین زنجیره‌های مربعی می‌توانند به‌کار گرفته شوند. مطلوب است که زنجیره‌ای وجود داشته باشد که به اندازه زنجیره‌های روش اول کارآمد بوده و تنها در یک بار استفاده از زنجیره بتواند جزء میانی را به جزء انتهایی تبدیل کرده و هم‌چنین به اندازه زنجیره‌های مربعی ساده باشد؛ زیرا در بیش‌تر موارد، جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار در زنجیره‌های مربعی که در آن‌ها نرخ جریان خوراک ورودی به مراحل یکسان است به‌سادگی صورت می‌گیرد [۱۱]. در این رابطه، یکی از پارامترهای مهم که اصول انتقال جرم اجزاء در یک زنجیره را تعیین می‌کند، نسبت دو جریان خارجی (نرخ جریان سبک و نرخ جریان خوراک) زنجیره یا به‌عبارتی برش آن زنجیره می‌باشد. تغییر در این پارامتر برای یک زنجیره معین (تعداد مراحل، محل ورود خوراک، نرخ جریان خوراک زنجیره و توزیع نرخ جریان‌ها در طول زنجیره مشخص باشند) بر روی انتقال جرم اجزاء در طول زنجیره تأثیر می‌گذارد. به‌طور خلاصه اگر برش زنجیره برابر با مجموع غلظت‌های اجزاء با جرم مولی کم‌تر و مساوی جزء هدف در خوراک تنظیم شود، جزء موردنظر به‌همراه اجزاء سبک‌تر از آن در جریان سبک زنجیره جداسازی شده و بنابراین جزء موردنظر تبدیل به جزء انتهایی در گروه سبک‌ها خواهد شد و در استفاده بعدی از زنجیره به‌راحتی جداسازی می‌شود. بر عکس در صورتی‌که برش زنجیره برابر با مجموع غلظت‌های اجزاء با جرم مولی کم‌تر از جزء هدف در خوراک تنظیم شود، کلیه اجزاء سبک‌تر از جزء هدف، در جریان سبک زنجیره جدا شده و جزء موردنظر به‌همراه اجزاء سنگین‌تر از آن، در جریان سنگین زنجیره جداسازی شده و بنابراین جزء موردنظر تبدیل به جزء ابتدایی در گروه سنگین‌ها خواهد شد [۱۲]. علاوه بر تنظیم برش زنجیره، در جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار در زنجیره مربعی نیاز به انتخاب مقدار مناسبی برای برش مرحله اول زنجیره و هم‌چنین مرحله ورود خوراک به زنجیره وجود دارد. اتخاذ یک روش مناسب برای انتخاب این پارامترها می‌تواند در بازدهی دو گروهی نمودن ایزوتوپ‌ها در جریان‌های خروجی تأثیرگذار باشد.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، تاکنون از منظر تئوری و عملیاتی به بحث انتخاب راهبرد جهت جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم به کمک زنجیره‌های مربعی پایا پرداخته نشده است. به طوری‌که موارد مطرح شده در مراجع محدود بوده و به‌عنوان مثال جداسازی ایزوتوپ‌های تلوریم ۱۲۰ و ۱۲۲ در سال ۲۰۰۲ توسط ساسنین و همکاران تا غنای بالاتر از ۹۹ درصد با استفاده از زنجیره‌های گذرا از نوع بدون خوراک و با یک خروجی[1] پیشنهاد گردیده است [۱۳]. هم‌چنین در سال ۱۹۹۹ نیز جداسازی ایزوتوپ تلوریم ۱۲۳ توسط ساسنین و همکاران تا غنای بالاتر از ۹۹ درصد باز هم به کمک زنجیره‌های گذرا بررسی شده است. در مقاله آن‌ها، در ابتدا در یک راهبرد با چهار بار استفاده از زنجیره، غنای این ایزوتوپ از ۲٫۱۰ درصد به ۵۴٫۹ درصد رسیده است و سپس در یک سیستم زنجیره گذرا، به غنای بالاتر از ۹۹ درصد افزایش یافته است [۱۴]. در سال ۱۹۹۳ نیز تلوریم ۱۲۳ در یک راهبرد با سه بار استفاده از زنجیره توسط سوورو و همکاران به غنای بالای ۹۶ درصد رسانده شده است [۱۵]. در هیچ‌یک از مراجع نامبرده، اطلاعات زنجیره و نیز نحوه به‌کارگیری آن به‌منظور جداسازی، گزارش نشده و هم‌چنین در کلیه موارد، زنجیره‌های عملیاتی آزمایشی نصب و راه‌اندازی شده و شبیه‌سازی عملکرد زنجیره‌ها به انجام نرسیده است. نکته حایز اهمیت دیگر این است که مدل‌سازی و تحلیل عملکرد جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم، به‌دلیل تعداد ایزوتوپ‌های زیاد و گستره وسیع فراوانی طبیعی ایزوتوپ‌های آن، کار دشواری است و همان‌طور که گفته شد، در مراجع به تحلیل عملکرد زنجیره‌های مربعی تحت تأثیر پارامترهای عملیاتی مختلف در جداسازی ایزوتوپ‌های این عنصر پرداخته نشده است. در پژوهش حاضر، به بررسی نقش مرحله ورود خوراک، برش زنجیره و برش مرحله اول آن و اصول انتخاب مناسب آن‌ها در زنجیره مربعی جهت جداسازی کلیه ایزوتوپ‌های عنصر تلوریم و سپس معرفی یک راهبرد جهت رساندن غنای آن‌ها به مقادیر بالاتر از ۹۰ درصد پرداخته شده است. در این راستا کدی به نام SQCASSIM تهیه شده که توانایی شبیه‌سازی عملکرد زنجیره مربعی را دارا بوده و بررسی‌های مورد نیاز را امکان‌پذیر می‌سازد.

۲. تئوری

در شکل ۱ طرح‌واره‌ای از یک زنجیره مربعی نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مشخص است که تفاوت زنجیره مربعی با زنجیره‌های مخروطی، وجود دو جریان برگشتی از جریان‌های سبک و سنگین زنجیره در مراحل اول و آخر می‌باشد که به‌ترتیب با نمادهای L'_{N+1} و L'_0 نشان داده می‌شوند. این دو جریان برگشتی امکان برابر شدن نرخ جریان ورودی به کلیه مراحل را فراهم می‌آورند که اساس زنجیره مربعی است. تعداد اجزاء مخلوط برابر با N_c و تعداد مراحل

1. NFSW (No Feed Single Withdrawal) or Remainder Reduction

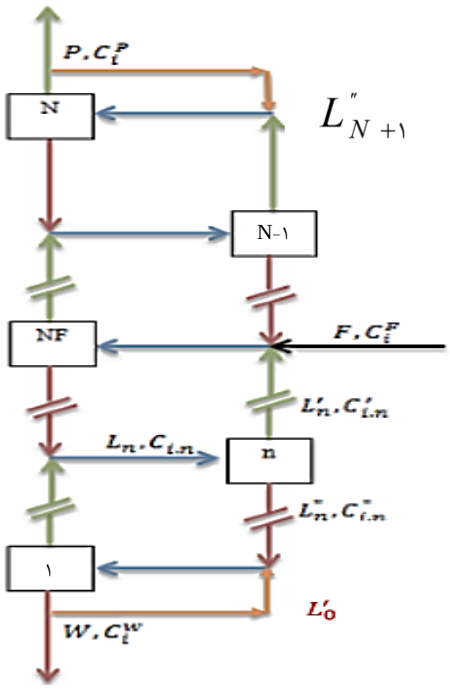
زنجیره برابر با N می‌باشد. جریان خوراک با نرخ F در مرحله N_F با غنای C_i^F وارد زنجیره شده و جریان‌های سبک و سنگین با نرخ P و W و ترکیب درصدهای به‌ترتیب C_i^p و C_i^w از دو انتهای زنجیره خارج می‌گردند. نرخ جریان خوراک، محصول و پسماند مراحل میانی نیز به‌ترتیب با L_n، L'_n و L''_n نشان داده می‌شوند که اندیس n نمایانگر شماره مرحله می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشخص شده است، غلظت‌های متناظر برای هر ایزوتوپ در هر مرحله نیز با $C_{i,n}$، $C'_{i,n}$ و $C''_{i,n}$ نشان داده می‌شود و اندیس i شماره ایزوتوپ را بیان می‌کند.

۱.۲ نحوه تعیین برش مراحل در زنجیره مربعی

برابری نرخ جریان ورودی به مراحل به کمک دو جریان برگشتی در دو انتهای زنجیره مربعی، منجر به برش‌های خاصی برای مراحل زنجیره می‌گردد. از معادله موازنه جرم کلی در نقاط گره، به‌ترتیب به جز در مرحله ورود خوراک و در گره مربوط به مرحله ورود خوراک روابط ۱ و ۲ برقرار خواهند بود. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، با استفاده از موازنه جرم کلی در گره مربوط به مرحله ورود خوراک، برش مراحل قبل و بعد از ورود خوراک از رابطه ۲ پیروی خواهد کرد.

$$L\theta_1 + L(1-\theta_2) = L \Rightarrow L\theta_i + L(1-\theta_{i+2}) = L \Rightarrow \theta_i + (1-\theta_{i+2}) = 1 \Rightarrow \theta_i = \theta_{i+2} \quad (1)$$

$$F + L\theta_{NF-1} + L(1-\theta_{NF+1}) = L \Rightarrow \frac{F}{L} + \theta_{NF-1} + (1-\theta_{NF+1}) = 1 \Rightarrow \theta_{NF-1} = \theta_{NF+1} - \frac{F}{L} \quad (2)$$



شکل ۱. طرح‌واره‌ای از یک زنجیره مربعی.

با استفاده از روابط به دست آمده و در نظر گرفتن زوج یا فرد بودن تعداد مراحل و مرحله ورود خوراک، روابط ۳ تا ۱۰ برقرار خواهند بود.

- اگر مرحله ورود خوراک فرد و تعداد مراحل زنجیره زوج باشند، روابط ۳ و ۴ برقرار خواهند بود:

$$\theta_1 = \theta_3 = \theta_5 = \cdots = \theta_{N-1} \quad (3)$$

$$\theta_2 = \theta_4 = \cdots = \theta_{NF-1} = \theta_{NF+1} - \frac{F}{L} = \theta_{NF+3} - \frac{F}{L} = \cdots = \theta_N - \frac{F}{L} \quad (4)$$

- اگر مرحله ورود خوراک فرد و تعداد مراحل زنجیره فرد باشند، روابط ۵ و ۶ برقرار خواهند بود:

$$\theta_1 = \theta_3 = \theta_5 = \cdots = \theta_N \quad (5)$$

$$\theta_2 = \theta_4 = \cdots = \theta_{NF-1} = \theta_{NF+1} - \frac{F}{L} = \theta_{NF+3} - \frac{F}{L} = \cdots = \theta_{N-1} - \frac{F}{L} \quad (6)$$

- اگر مرحله ورود خوراک زوج و تعداد مراحل زنجیره زوج باشند، روابط ۷ و ۸ برقرار خواهند بود:

$$\theta_2 = \theta_4 = \theta_6 = \cdots = \theta_N \quad (7)$$

$$\theta_1 = \theta_3 = \cdots = \theta_{NF-1} = \theta_{NF+1} - \frac{F}{L} = \theta_{NF+3} - \frac{F}{L} = \cdots = \theta_{N-1} - \frac{F}{L} \quad (8)$$

- اگر مرحله ورود خوراک زوج و تعداد مراحل زنجیره فرد باشند، روابط ۹ و ۱۰ برقرار خواهند بود:

$$\theta_2 = \theta_4 = \theta_6 = \cdots = \theta_{N-1} \quad (9)$$

$$\theta_1 = \theta_3 = \cdots = \theta_{NF-1} = \theta_{NF+1} - \frac{F}{L} = \theta_{NF+3} - \frac{F}{L} = \cdots = \theta_N - \frac{F}{L} \quad (10)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نکته مهم در مورد رابطه بین برش‌ها در مراحل قبل و بعد از ورود خوراک، اختلاف به اندازه $\frac{F}{L}$ می‌باشد و می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با معلوم بودن برش‌های مراحل اول و دوم، برش سایر مراحل زنجیره قابل محاسبه خواهند بود. هم‌چنین با برقراری موازنه جرم کلی در مرحله اول زنجیره، با توجه به این‌که مقدار نرخ جریان سنگین زنجیره نمی‌تواند مقدار صفر باشد ($W \neq 0$) رابطه ۱۱ برقرار بوده و با برقراری موازنه جرم کلی در مرحله آخر زنجیره، با توجه به این‌که مقدار نرخ جریان سبک زنجیره نمی‌تواند مقدار صفر باشد ($P \neq 0$)، رابطه ۱۲ برقرار است.

$$\theta_1 + \theta_2 < 1 \quad (11)$$

$$\theta_1 + \theta_2 > 1 - \frac{F}{L} \quad (12)$$

اگر مرحله ورود خوراک، مرحله اول زنجیره باشد، به‌جای روابط ۱۱ و ۱۲، رابطه ۱۳ برقرار خواهد بود:

$$1 < \theta_1 + \theta_2 < 1 + \frac{F}{L} \quad (13)$$

با توجه به موارد مطرح شده در بخش‌های پیشین، واضح است که با معین کردن برش‌های مراحل اول و دوم زنجیره مربعی می‌توان برش‌های سایر مراحل را نیز محاسبه نمود. از طرف دیگر با تعیین برش مرحله اول و نیز برش کلی زنجیره مربعی نیز می‌توان به این هدف دست یافت. بنابراین دو حالت کلی وجود خواهد داشت که در ادامه بیان می‌گردند.

برش‌های مراحل اول و دوم زنجیره مربعی معلوم باشند که در این‌صورت نرخ جریان سنگین زنجیره از رابطه ۱۴ قابل محاسبه خواهد بود:

$$W = L(1-\theta_1-\theta_2) \qquad (14)$$

با محاسبه مقدار جریان W از رابطه ۱۳ و هم‌چنین معلوم بودن نرخ جریان خوراک زنجیره، می‌توان به نرخ جریان محصول، P و برش کلی زنجیره دست یافت.

برش مرحله اول زنجیره مربعی و نرخ جریان سبک یا سنگین زنجیره معلوم باشند. این مورد متناظر با حالتی است که برش مرحله اول زنجیره و برش زنجیره معلوم باشند. برای محاسبه برش مرحله دوم از رابطه ۱۵ استفاده می‌شود.

$$\theta_2 = 1-\theta_1-\frac{W}{L} \qquad (15)$$

لازم به ذکر است که در هر دو حالت فوق، نرخ جریان خوراک زنجیره، نرخ جریان ورودی به مراحل (که مقداری ثابت و یکسان است)، تعداد مراحل زنجیره و محل ورود خوراک به زنجیره جزء معلومات مسئله می‌باشند.

هم‌چنین گفتنی است که در مورد زنجیره مربعی، با توجه به نیاز برای یکسان بودن نرخ جریان مراحل، باید از الگوی خاصی در تعیین برش مراحل مورد نیاز استفاده گردد که در روابط ریاضی ۳ تا ۱۰ گزارش شده‌اند. بنابراین حتی به‌منظور به‌کارگیری الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیز ابتدا باید هر یک از مجموعه برش‌های مراحل در جمعیت، به روش فوق محاسبه شده و سپس وارد الگوریتم بهینه‌سازی گردد.

در این‌جا بحث دیگری مطرح می‌گردد و آن این‌که چه موقع برش مراحل با یک‌دیگر برابر خواهد بود. به‌منظور برابری برش مراحل در بخش تهی‌سازی لازم است که برش مرحله اول زنجیره از رابطه ۱۶ به دست آید.

$$\theta_1 = \frac{1}{2}\left(1-\frac{W}{L}\right) \qquad (16)$$

۲.۲ نحوه تعیین نرخ جریان مراحل در زنجیره مربعی

در روابط قبل، نحوه تعیین برش مراحل در زنجیره مربعی بیان گردید. در این مرحله با نوشتن قوانین موازنه جرم کلی در کلیه مراحل زنجیره می‌توان نرخ جریان‌ها در مراحل را به‌دست آورد؛ به این‌ترتیب که با اعمال برش‌های به‌دست آمده از روابط پیشین و استفاده از یکی از روش‌های حل دستگاه معادلات خطی، در معادلات پایستگی و برش مراحل، به‌راحتی مقادیر نرخ جریان‌های متناظر با آن برش‌ها به‌دست می‌آیند.

۳.۲ تغییرات غلظت در طول زنجیره مربعی

در ادامه به‌منظور تعیین توزیع غلظت اجزاء مخلوط در طول زنجیره از روش تکرار q استفاده می‌شود [۱۶].

۴.۲ راهبرد جداسازی ایزوتوپ‌های یک مخلوط

یکی از ایده‌های جداسازی در مخلوط‌های ایزوتوپی چندجزیی، جداسازی بر اساس دو گروهی نمودن ایزوتوپ‌ها در زنجیره مربعی می‌باشد. بدین‌صورت که گروه سبک‌تر در جریان غنی از اجزاء سبک زنجیره و گروه سنگین‌تر در جریان غنی از اجزاء سنگین زنجیره جمع‌آوری گردد. اگر فاکتور جداسازی به اندازه کافی بزرگ باشد، تفکیک دو گروهی به‌طور کامل صورت می‌گیرد و در غیر این‌صورت، با یک ضریب مشخص، دو گروهی شدن انجام می‌شود که با معیاری به نام پارامتر D معین می‌گردد. تعریف این پارامتر در رابطه ۱۷ نشان داده شده است. در $D=1$، این جدایش به‌طور کامل محقق می‌گردد؛ به این معنی که در صورت دو گروهی شدن کامل ایزوتوپ‌ها روابط ۱۸ و ۱۹ وجود دارند که منجر به برابر یک شدن رابطه ۱۷ خواهد شد [۱۲].

$$D(\mathrm{k}) = \frac{P}{F}\sum_{j=1}^{k} C_j^P + \frac{W}{F}\sum_{j=k+1}^{N_c} C_j^W \qquad (17)$$

$$\sum_{j=1}^{k} C_j^W \to 0 \qquad (18)$$

$$\sum_{j=1}^{k} C_j^P \to 1 \qquad (19)$$

همان‌طور که در روابط بالا ملاحظه می‌شود، دوگروهی شدن ایزوتوپ‌ها براساس ایزوتوپ میانی k انجام می‌شود و برای محقق شدن این جداسازی لازم است برش زنجیره بر روی مقدار نشان داده شده در رابطه ۲۰ تنظیم گردد.

$$Cut_{\text{cascade}} = \sum_{j=1}^{k} C_j^F \qquad (20)$$

در مورد زنجیره‌هایی مانند زنجیره‌های غلظت تطبیق‌یافته، شبه‌ایده‌آل و غیره، در هر مرحله تعداد $3N_c+3$ مجهول وجود دارد که تعداد $3N_c$، مربوط به غلظت‌های N_c جزء در سه جریان خوراک، جریان بالاسری و جریان پایین‌دستی آن مرحله ($C_{i,n}$ و $C'_{i,n}$، $C''_{i,n}$) بوده و ۳ مجهول دیگر نیز مربوط به نرخ جریان خوراک، نرخ جریان بالاسری و نرخ جریان پایین‌دستی در آن مرحله (L_n و L''_n، L'_n) است. بنابراین تعداد مجهولات در کل زنجیره $N(3N_c+3)$ است و از این‌رو به

همین تعداد معادله نیاز است تا تمام مجهولات زنجیره مشخص شود. اما در مجموع تعداد $N(3N_c+2)$ معادله برای کل زنجیره حاصل می‌گردد که N معادله کم‌تر از تعداد مجهولات است. پس تعداد N معادله دیگر، یعنی یک معادله اضافی برای هر مرحله، نیاز است. اما در زنجیره مربعی، نرخ جریان خوراک ورودی به مراحل مشخص بوده و بنابراین تعداد مجهولات به تعداد N کم‌تر است و از طرفی نیز دو نرخ جریان مجهول به تعداد مجهولات اضافه می‌شود که مرتبط با جریان‌های برگشتی مراحل اول و آخر زنجیره است. بنابراین تعداد مجهولات زنجیره مربعی برابر با $N(3N_c+2)+2$ است. تعداد $N(3N_c)$ مجهول، مربوط به غلظت کلیه ایزوتوپ‌ها در تمامی جریان‌های خوراک، بالاسری و پایین‌دستی مراحل است. هم‌چنین تعداد $2N$ مجهول مرتبط با نرخ جریان‌های بالاسری و پایین‌دستی مراحل و دو مجهول باقی‌مانده مربوط به نرخ جریان‌های برگشتی L''_{N+1} و L'_0 هستند. پس تعداد مجهولات از معادلات ۲ واحد بیش‌تر بوده و بنابراین ملاحظه می‌شود که جهت حل دستگاه معادلات حاکم بر مسئله، نیاز به معلوم بودن دو مجهول است. در روش استفاده شده در راهبرد این مقاله، برش مرحله اول زنجیره و برش زنجیره، با توجه به داده‌های مسئله به‌عنوان معلومات وارد می‌شوند. نکته قابل ذکر دیگر این است که بیشینه غلظت قابل‌دست‌یابی برای ایزوتوپ k در جریان سبک زنجیره از رابطه ۲۱ و بیشینه غلظت قابل دست‌یابی برای ایزوتوپ k در جریان سنگین زنجیره نیز از رابطه ۲۲ به دست می‌آید.

$$(C_k^P)_{\text{limiting}} = \frac{C_k^F}{\sum_{j=1}^{k} C_j^F} \tag{۲۱}$$

$$(C_k^W)_{\text{limiting}} = \frac{C_k^F}{\sum_{j=k}^{N_C} C_j^F} \tag{۲۲}$$

به کمک دو رابطه بالا می‌توان تصمیم‌گیری کرد که در گام موردنظر، ایزوتوپ هدف k بهتر است در جریان سبک غنی شود یا در جریان سنگین. اگر مقدار $(C_k^P)_{\text{limiting}}$ بیش‌تر از $(C_k^W)_{\text{limiting}}$ به دست آید، نتیجه این خواهد بود که غنی‌سازی ایزوتوپ k در جریان سبک زنجیره انجام گیرد و در نتیجه برش زنجیره بر روی مقدار موجود در رابطه ۲۰ تنظیم می‌شود. برعکس، اگر مقدار $(C_k^P)_{\text{limiting}}$ کم‌تر از $(C_k^W)_{\text{limiting}}$ به دست آید، نتیجه این خواهد بود که غنی‌سازی ایزوتوپ k در جریان سنگین زنجیره انجام گیرد و در نتیجه برش زنجیره بر روی مقدار موجود در رابطه ۲۳ تنظیم می‌شود.

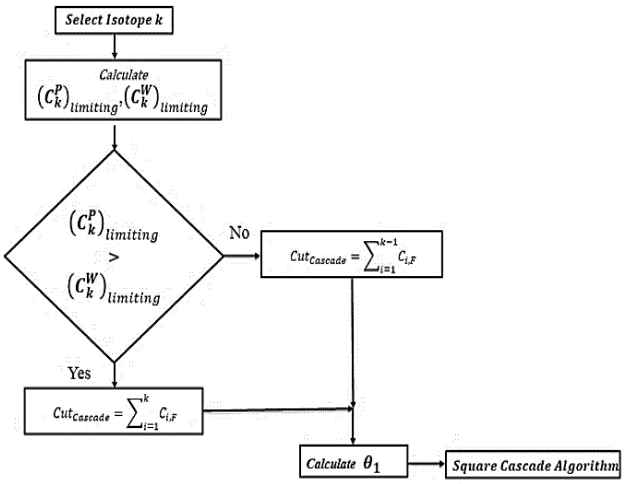
$$Cut_{\text{cascade}} = \sum_{j=1}^{k-1} C_j^F \tag{۲۳}$$

به‌طور کلی الگوریتم راهبرد جداسازی مورد استفاده در هر بار استفاده از زنجیره مربعی در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳. یافته‌ها و بحث

۱.۳ انتخاب مرحله ورود خوراک و برش مرحله اول زنجیره مربعی

همان‌طور که در بخش قبلی مطرح شد، انتخاب مرحله ورود خوراک و برش مرحله اول زنجیره می‌تواند در جداسازی دوگروهی ایزوتوپ‌های مخلوط تأثیرگذار باشد. در این بخش به بررسی تأثیر این پارامترها در جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم پرداخته شده و بر این اساس یکی از راهبردهای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم تا غنای بالاتر از ۹۰ درصد ارایه می‌گردد. بدین منظور کد SQCASSIM مورد استفاده قرار گرفت. در این کد ابتدا معلومات مسئله از قبیل نرخ جریان خوراک زنجیره و نرخ جریان خوراک ورودی به مراحل، تعداد مراحل و مرحله ورود خوراک زنجیره، فاکتور جداسازی واحد، برش مرحله اول، برش زنجیره و هم‌چنین مشخصات خوراک از کاربر دریافت می‌گردد. سپس براساس معادلات ۳ تا ۱۰، برش کلیه مراحل محاسبه می‌شود. پس از آن به کمک معادلات پایستگی و برش‌های حاصله، نرخ جریان‌های مجهول و پس از آن، غلظت جریان‌ها به دست می‌آیند. سپس به کمک این داده‌ها، پارامترهای موردنیاز دیگر از قبیل مقدار D محاسبه می‌شود. به‌منظور انجام مطالعه پارامتریک بر روی متغیرهایی از قبیل مرحله ورود خوراک و برش مرحله اول، این محاسبات برای مراحل ورود خوراک و برش‌های مرحله اول مختلف به کمک حلقه‌های تکرار در بازه‌های موردنظر انجام می‌پذیرد. مشخصات خوراک ورودی به زنجیره و ترکیب درصد اجزاء آن در جدول ۱ گزارش شده است.



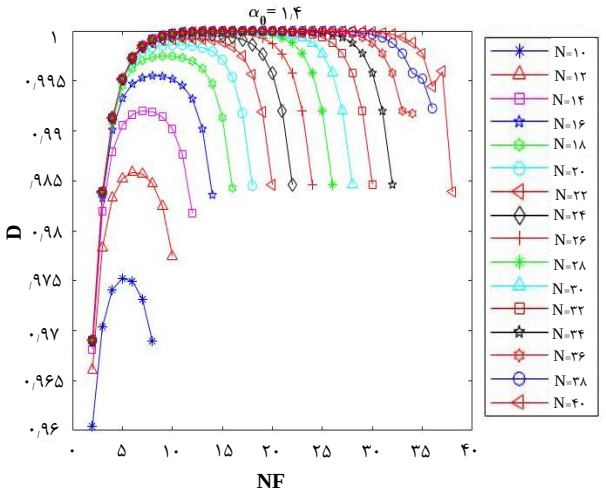
شکل ۲. الگوریتم راهبرد جداسازی مورد استفاده در هر بار استفاده از زنجیره مربعی.

جدول ۱. مشخصات خوراک ورودی به زنجیره و ترکیب درصد اجزاء

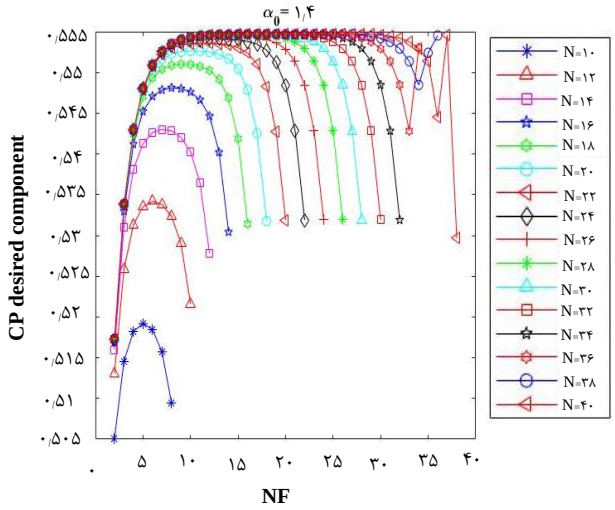
ترکیب درصد خوراک								
ایزوتوپ	$^{۱۳۰}TeF_۶$	$^{۱۲۸}TeF_۶$	$^{۱۲۶}TeF_۶$	$^{۱۲۵}TeF_۶$	$^{۱۲۴}TeF_۶$	$^{۱۲۳}TeF_۶$	$^{۱۲۲}TeF_۶$	$^{۱۲۰}TeF_۶$
جرم مولی (گرم بر مول)	۲۴۴	۲۴۲	۲۴۰	۲۳۹	۲۳۸	۲۳۷	۲۳۶	۲۳۴
غلظت (درصد وزنی)	۰٫۳۴۴۷	۰٫۳۱۷۹	۰٫۱۸۷۲	۰٫۰۶۹۹	۰٫۰۴۶۱	۰٫۰۰۸۷	۰٫۰۲۴۶	۰٫۰۰۰۸۹

در آزمون انجام گرفته در این پژوهش، جزء k ام، ایزوتوپ ششم، به‌عنوان هدف درنظر گرفته شده و پارامتر دوگروهی بر این اساس محاسبه می‌گردد. بدین‌معنی که هدف، غنی‌سازی ایزوتوپ‌های اول تا ششم در جریان سبک و غنی‌سازی ایزوتوپ‌های هفتم و هشتم در جریان سنگین زنجیره می‌باشد. بنابراین مقدار برش زنجیره برابر با ۰٫۳۳۷۳ درنظر گرفته می‌شود. با درنظر گرفتن نرخ جریان خوراک زنجیره برابر با ۲٫۸۵۷ mg/s و مقدار $\frac{L}{F}$ برابر با ۷، به‌منظور برابر شدن برش‌های مراحل در بخش تهی‌سازی زنجیره، برش مرحله اول زنجیره بر روی مقدار ۰٫۴۵۲۶ تنظیم می‌گردد. با درنظر گرفتن این برش برای مرحله اول زنجیره، می‌توان تعداد برش‌های قابل‌تنظیم برای زنجیره را کاهش داده و بدین‌ترتیب عملیاتی کردن آن راحت‌تر خواهد بود. حال باید دید با انتخاب این برش برای مرحله اول زنجیره، پارامتر دوگروهی نمودن چه مقداری به خود گرفته و آیا برش بهینه‌ای می‌باشد یا خیر. بدین‌منظور، برای فاکتور جداسازی واحد ۱٫۴ و مراحل زنجیره بین ۱۰ الی ۴۰ مرحله، مقدار پارامتر D در مراحل ورود خوراک مختلف محاسبه شده و در شکل ۳ نتایج آن نشان داده شده است. برای هر یک از تعداد مراحل زنجیره، ملاحظه می‌شود که مقدار پارامتر دوگروهی در مرحله ورود خوراک وسط زنجیره بیشینه مقدار خواهد بود. هم‌چنین با افزایش تعداد مراحل در زنجیره، افزایش پارامتر D مشاهده می‌شود.

هم‌چنین برای فاکتور جداسازی واحد ۱٫۴ و مراحل زنجیره بین ۱۰ الی ۴۰ مرحله، مقدار غلظت ایزوتوپ مطلوب در جریان سبک زنجیره برای مراحل ورود خوراک مختلف محاسبه شده و در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برای هر یک از تعداد مراحل زنجیره، ملاحظه می‌شود که این غلظت در مرحله ورود خوراک وسط زنجیره بیشینه مقدار خواهد بود. هم‌چنین با افزایش تعداد مراحل در زنجیره، افزایش غلظت دیده می‌شود.



شکل ۳. تغییرات پارامتر D برحسب تعداد مراحل و مرحله ورود خوراک مختلف در فاکتورهای جداسازی معین.

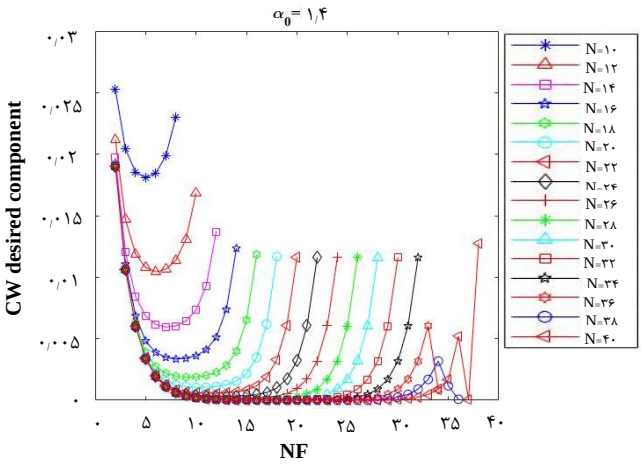


شکل ۴. تغییرات غلظت ایزوتوپ مطلوب در جریان سبک زنجیره برحسب تعداد مراحل و مرحله ورود خوراک مختلف در فاکتور جداسازی ۱٫۴.

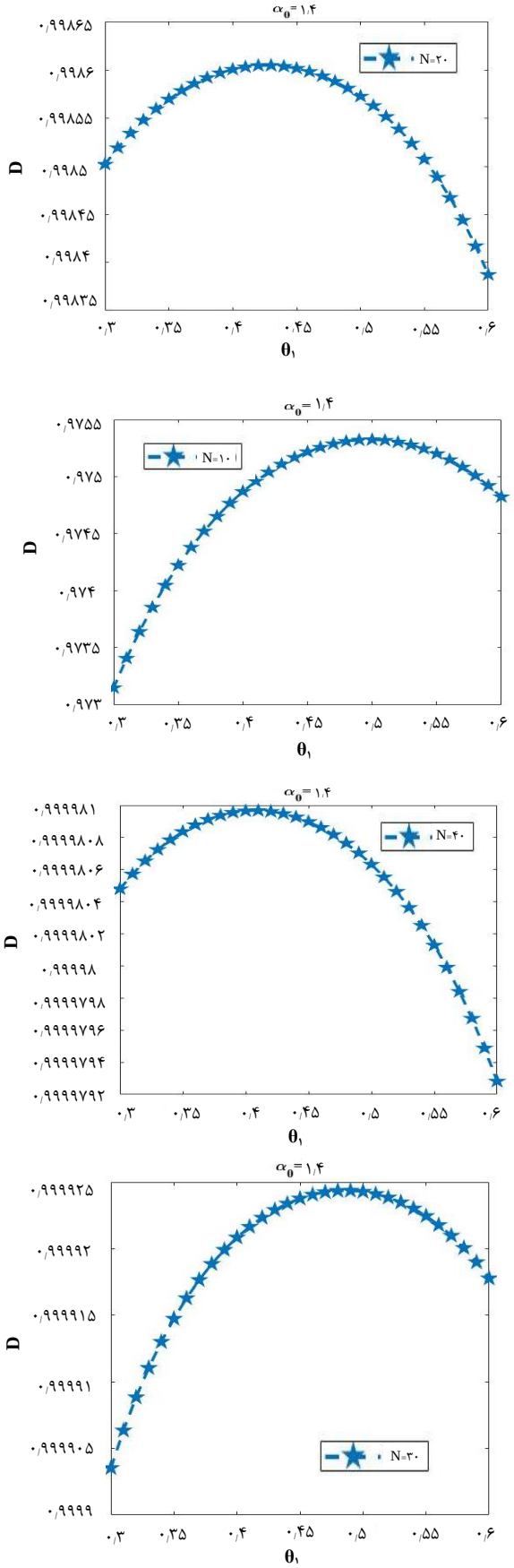
در مورد غلظت ایزوتوپ هدف در جریان سنگین زنجیره نیز برای فاکتور جداسازی واحد ۱٫۴ و مراحل زنجیره بین ۱۰ تا ۴۰ مرحله، مقدار غلظت ایزوتوپ مطلوب در جریان سنگین زنجیره برای مراحل ورود خوراک مختلف محاسبه شده و در شکل ۵ نشان داده شده است. برای هر یک از تعداد مراحل زنجیره، ملاحظه می‌شود که این غلظت، در مرحله ورود خوراک

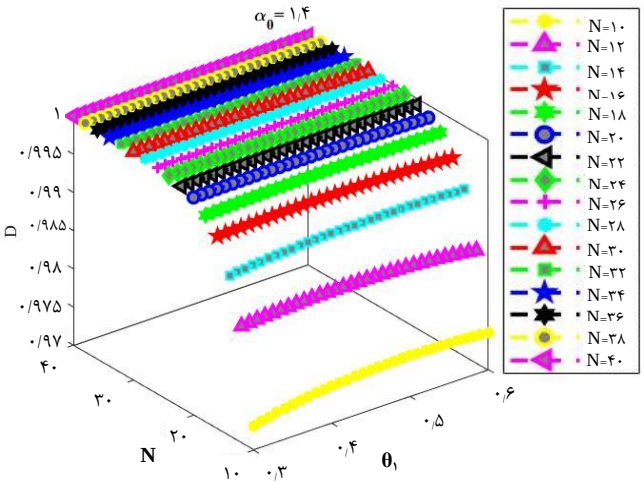
وسط زنجیره کم‌ترین مقدار را خواهد داشت. هم‌چنین با افزایش تعداد مراحل در زنجیره، کاهش غلظت مشاهده خواهد شد.

بنابراین با توجه به شکل‌های ۳، ۴ و ۵ و توجه به این نکته که بیشینه شدن پارامتر D به همراه افزایش غلظت ایزوتوپ هدف در جریان سبک زنجیره و حداقل شدن غلظت این ایزوتوپ در جریان سنگین زنجیره، نتایج مطلوب ما هستند، در گام بعدی، برای تعداد مراحل مختلف زنجیره، مرحله ورود خوراک در وسط زنجیره درنظر گرفته و مقدار برش مرحله اول زنجیره بین مقادیر ۰٫۳ الی ۰٫۶ تغییر داده و مقدار پارامتر D رصد می‌شود. بدین‌ترتیب می‌توان برش مناسب مرحله اول را یافت. در شکل ۶، نتایج موردنظر برای تغییرات پارامتر D برحسب تعداد مراحل و برش‌های مرحله اول مختلف در فاکتور جداسازی ۱٫۴نمایش داده شده‌اند. به‌دلیل وضوح بیش‌تر مقادیر پارامتر D، نمودارها برای تعداد مراحل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ به‌صورت جداگانه نشان داده شده و در نهایت برای کلیه تعداد مراحل نیز شکل جداگانه‌ای ارایه گردیده است. همان‌طور که از این شکل‌ها نتیجه می‌شود، پارامتر D در مقادیر برش مرحله اول بالاتر از ۰٫۴۵ و کم‌تر از ۰٫۵، مقدار بیشینه خود را خواهد داشت که برش مرحله اول برابر با ۰٫۴۵۲۶ در این بازه قرار دارد. با افزایش تعداد مراحل مقدار پارامتر D روند صعودی دارد.



شکل ۵. تغییرات غلظت ایزوتوپ مطلوب در جریان سنگین زنجیره برحسب تعداد مراحل و مرحله ورود خوراک مختلف در فاکتور جداسازی ۱٫۴.





شکل ۶. تغییرات پارامتر D برحسب تعداد مراحل و برش‌های مرحله اول مختلف در فاکتور جداسازی ۱/۴.

۲.۳ جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم تا غنای ۹۰ درصد با استفاده از یکی از راهبردهای جداسازی

با توجه به محاسبات بخش قبل می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب برش مرحله اول زنجیره در حالتی‌که برش‌های مراحل تهی‌سازی زنجیره با هم برابر باشند، انتخاب مناسبی خواهد بود. چرا که در عین‌حال که در این حالت، پارامترهای D و غلظت ایزوتوپ هدف در جریان‌های سبک و سنگین مقادیر مناسبی خواهند داشت، تعداد برش‌های مراحل که باید تنظیم شوند کاهش می‌یابد. هم‌چنین مرحله ورود خوراک نیز اگر مراحل میانی زنجیره در نظر گرفته شوند، نتایج مناسبی در عملکرد جداسازی زنجیره حاصل خواهد شد. بر این اساس یکی از راهبردهای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم در ادامه ارایه می‌گردد. مشخصات زنجیره مربعی به‌کار رفته در راهبرد مورد استفاده در این مقاله، در جدول ۲ گزارش شده است. این زنجیره دارای ۲۰ مرحله است که خوراک به مرحله ۱۱ وارد می‌شود. مقدار $\frac{L}{F}$ برابر با ۷ انتخاب شده است و مقدار خوراک بهینه ماشین سانتریفیوژ برابر با ۲ mg/s درنظر گرفته شده است. در صورتی‌که تعداد ماشین سانتریفیوژ در هر مرحله برابر ۱۰ باشد، می‌توان نرخ جریان خوراک زنجیره را برابر ۲/۸۵۷ mg/s به دست آورد. هم‌چنین مقدار فاکتور جداسازی واحد برابر با ۱/۲ در نظر گرفته می‌شود.

لازم به یادآوری است که هر چه نسبت L به F بزرگ‌تر باشد، بازه تغییرات برش مراحل کوچک‌تر شده و مقادیر این برش‌ها به یک‌دیگر نزدیک می‌گردند و برعکس. در این‌جا نرخ خوراک ورودی به مراحل ثابت درنظر گرفته شده و نرخ جریان خوراک زنجیره تغییر داده می‌شود. در این مقاله نسبت $\frac{L}{F}$ برابر با ۷ به‌عنوان نمونه انتخاب شده است.

جدول ۲. مشخصات زنجیره مربعی به کار رفته در راهبرد مورد استفاده

مشخصات زنجیره						
تعداد مراحل	مرحله ورود خوراک	خوراک بهینه ماشین	نرخ جریان خوراک زنجیره	تعداد ماشین در هر مرحله	α_0	$\frac{L}{F}$
۲۰	۱۱	۲ mg/s	۲/۸۵۷ mg/s	۱۰	۱/۲	۷

با توجه به موارد مطرح شده در بخش‌های قبلی، جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم به کمک زنجیره معرفی شده و خوراک تلوریم طبیعی با ترکیب درصد مندرج در جدول ۱ صورت پذیرفت. در راهبرد به‌کار رفته، خوراک وارد زنجیره مربعی شده و برحسب نکات ذکر شده در بخش‌های قبلی، جریان سبک و یا سنگین زنجیره به عنوان خوراک، در گام بعدی به زنجیره با همان مشخصات وارد می‌گردد. این کار آن‌قدر انجام می‌شود تا غنای کلیه ایزوتوپ‌ها به بالاتر از ۹۰ درصد برسد. در حالتی‌که فاکتور جداسازی واحد ماشین سانتریفیوژ برابر با ۱/۲ باشد، تعداد کل گام‌های مورد نیاز برای جداسازی کلیه ایزوتوپ‌ها تا غنای بالاتر از ۹۰ درصد برابر با ۳۹ گام به دست آمد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مطالعه‌ای بر روی عملکرد زنجیره مربعی در فاکتورهای جداسازی، تعداد مراحل، مرحله ورود خوراک و برش‌های مرحله اول مختلف انجام پذیرفت. برای دست‌یابی به این هدف، کد SQCASSIM جهت شبیه‌سازی زنجیره مربعی توسعه داده شد. نتایج نشان داد که با افزایش تعداد مراحل، در بخش‌های مرتبط با ورود خوارک میانی زنجیره و در برش‌های نزدیک به ۰/۴۵ الی ۰/۵، مقدار پارامتر دوگروهی D و غلظت ایزوتوپ هدف در جریان سبک زنجیره، بیشینه و در جریان سنگین زنجیره، کمینه خواهد بود. هم‌چنین مشاهده شد که با افزایش نسبت L به F در هر یک از برش‌های زنجیره درنظر گرفته شده، اختلاف مقادیر برش مراحل کاهش یافته و به یک‌دیگر نزدیک می‌شوند. بنابراین به‌منظور عملیاتی کردن و برپایی زنجیره‌های مربعی، هرچه این نسبت افزایش یابد، اعمال برش‌های مراحل زنجیره بهتر صورت خواهد پذیرفت. هم‌چنین در ادامه با استفاده از نتایج به دست آمده، راهبردی برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم تا غنای بالاتر از ۹۰ درصد ارایه گردید. در این بخش نشان داده شده که برای فاکتور جداسازی واحد ۱/۲، تعداد مراحل ۲۰ و مرحله ورود خوراک ۱۱، با محدودیت بیش‌ترین تعداد ماشین ۲۰۰ عدد، ۳۹ گام و به‌عبارتی ۳۹ بار استفاده از زنجیره موردنیاز خواهد بود و مقدار کل بازیابی ایزوتوپ‌ها ۷۵ درصد می‌باشد. هم‌چنین

نتیجه‌گیری شد که جداسازی ایزوتوپ‌های انتهایی در تعداد گام‌های کم‌تر و بازیابی بیش‌تری نسبت به ایزوتوپ‌های میانی انجام می‌پذیرد.

مراجع

1. A.G. Kudziev, *Production and Application of Stable Enriched Isotopes in the USSR*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **282**, 267-270 (1989).
2. D.E. Armstrong, et al, *A Carbon-13 Production Plant Using Carbon Monoxide Distillation*, Los Alamos Scientific Laboratory Report (1968).
3. E.I. Abbakumov, *Development and Industrial Use of Gas Centrifuge for Uranium Enrichment in the Soviet Union*, Atomic Energy, **67**(4), 255-257 (1989).
4. F. Mansourzadeh, et al, *Comparison of Optimum Tapered Cascade and Optimal Square Cascade for Separation of Xenon Isotopes Using Enhanced TLBO Algorithm*, Sep. Sci. Technol., **53**(**13**), 2074–2087 (2018).
5. F. Mansourzadeh, et al, *Utilization of Harmony Search Algorithm to Optimize a Cascade for Separating Multicomponent Mixtures*, Prog. Nucl. Energy, 111, 165-173 (2019).
6. F. Mansourzadeh, *Performance comparison of match abundance ratio cascade with optimal conditions for the separation of stable xenon isotopes*, J. of Nucle. Sci. and Tech., **94**(**4**), 74-83 (2021) (In Persian).
7. F. Mansourzadeh, *Investigation of the cut on the separation of xenon stable isotopes in the square cascade*, J. of Nucle. Sci. and Tech., **95**(**1**), 73-81 (2021) (In Persian).
8. A. De La Garza, G.A. Garret, J.E. Murphy, *Multicomponent Isotope Separation in Cascade*, Chem. Eng. Sci. **15**, 188-209 (1961).
9. R.M.V. Kucherov, *Theory of cascade for separating multi-component isotope mixtures*, At. Energy, **19**(**4**), 1290–1300 (1965).
10. Y. Zhang, S. Zeng, *Comparison of Three Model Cascades*, At. Energ. Sci. Tech., **48**(**11**), 1921-1927 (2014).
11. S. Zeng, C. Ying, *A Method of Separating a Middle Component in Multicomponent Isotope Mixtures by Gas Centrifuge Cascades*, Sep. Sci. Technol., **35**(**14**), 2173–2186 (2000).
12. A.Y. Smirnov, G.A. Sulaberidze, *Features of Mass Transfer of Intermediate Components in Square Gas Centrifuge Cascade for Separating Multicomponent Mixtures*, Theor. Found. Chem. Eng., **48**(**5**), 629-636 (2014).
13. L.Y. Sosnin, et al, *Centrifugal Extraction of Highly Enriched ^{120}Te and ^{122}Te Using the Non-Steady State Method of Separation*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **480**, 36-39 (2002).
14. L.Y. Sosnin, A.N. Tcheltsov, *Centrifugal Extraction of Highly Enriched ^{123}Te for the Production of ^{123}I at A Cyclotron, Nucl*, Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **438**, 14-19 (1999).
15. I.A. Suvorov, A.N. Tcheltsov, *Enrichment of Tellurium Isotopes for Pure ^{123}I Production Using Gas Ultra-Centrifuges*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, **334**, 33-36 (1993).
16. S. Zeng, G. Ying, *A robust and efficient calculation Procedure for Determining Concentration Distribution of Multicomponent Mixtures*, Sep. Sci. Tech, **35**(**4**), 613-622 (2000).

COPYRIGHTS
©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

استناد به این مقاله

فرزانه اعزازی، محمدحسن ملاح، جواد کریمی ثابت، علی نوروزی، عادل محمودیان، (۱۴۰۰)، بررسی تأثیر مرحله ورود خوراک و برش مرحله اول در عملکرد زنجیره مربعی جهت ارایه راهبرد مناسب جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم، ۹۶، ۹-۱۸

DOI: 10.24200/nst.2021.1195
Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1195.html