ارزیابی عددی جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تلوریم در آبشارهای مربعی

چکیده

در این مقاله به ارزیابی عددی جداسازی ایزوتوپی تلوریم در آبشار مربعی پرداخته شده است. در این راستا یک کد محاسباتی در نرم‌افزار متلب توسعه داده شده است. بیشینه نمودن مقدار ضریب بازیابی محصول در مدت یکسال استفاده از آبشار با در نظر گرفتن بیشینه غلظت ایزوتوپ هدف در جریان محصول به عنوان تابع هدف، مورد ارزیابی و مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تابع D ابزاری مناسب جهت تعیین تعداد مراحل آبشار مربعی خواهد بود و از این طریق هزینه محاسباتی و زمان مصرف شده جهت تعیین ساختار آبشار مربعی بسیار کاهش خواهد یافت. با فرض اینکه از آبشار مربعی برای جداسازی ایزوتوپ سوم تلوریم (Te-۱۲۳) از میان ۸ ایزوتوپ خوراک طبیعی استفاده شود، استفاده از تابع D، آبشار با ۵۰ مرحله را پیشنهاد می‌دهد. براساس محاسبات بهینه‌سازی میزان بازیابی برای آبشار با ۵۰ مرحله برابر با ٪۸۶/۵ خواهد بود که مقدار آن برای آبشار با ٤۰ مرحله برابر با ٪۸۵/۳ می‌شود و این خود تاییدی برای انتخاب روش مناسب و استفاده از تابع D می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جداسازی ایزوتوپی، آبشار مربعی، بهینه‌سازی، تابع D

UNCORRECTED PROOF

۱- مقدمه

اهمیت، کاربرد و توسعه ایزوتوپ های پایدار در صنعت، علوم پزشکی، کشاورزی، زمین شناسی و مهندسی در سال‌های اخیر بسیار چشم‌گیر بوده است [۱]. یکی از مهمترین عناصر که ایزوتوپ‌های پایدار ارزشمندی دارد تلوریم است. این عنصر داری ۳۹ ایزوتوپ شناخته شده با جرم اتمی بین ۱۰٤ تا ۱٤۲ می‌باشد که از میان آنها ۸ عدد پایدار (ایزوتوپ پایدار عبارتست از ایزوتوپی که واپاشی هسته‌ای نداشته باشد) است. ایزوتوپ‌های پایدار آن عبارتند از Te–۱۲۰، Te–۱۲۲، Te–۱۲۳، Te–۱۲٤، Te–۱۲۵، Te–۱۲٦، Te–۱۲۸،Te–۱۳۰ که برای کاربردهای پزشکی و تحقیقاتی استفاده می‌شوند. به طور کلی ایزوتوپ‌های Te–۱۲۰ ، Te–۱۲۲ ، Te–۱۲۳ ، Te–۱۲٤ و Te–۱۳۰ جهت تولید رادیوایزوتوپ‌های ید از جمله I–۱۲۰ ، I–۱۲۲ ، I–۱۲۳ ، I–۱۲٤ و I–۱۳۰ به منظور استفاده به عنوان رادیودارو و یا در دستگاهی مانند PET برای رادیوگرافی پزشکی کاربرد دارند. یعنی جهت تشخیص و یا درمان برخی گونه‌های سرطان به کار می‌روند. سایر ایزوتوپ‌ها شامل Te–۱۲۵ ، Te–۱۲٦ ، Te–۱۲۸ و همچنین Te–۱۳۰ نیز در تحقیقات مختلف فیزیک هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در بسیاری از شرکت‌ها و مرکز تحقیقاتی معتبر دنیا در اروپا، آمریکا و روسیه ایزوتوپ‌های پایدار تلوریوم تا بیشترین غنای مورد نیاز تامین می‌شود. معمولاً ایزوتوپ‌هایی که مصرف پزشکی دارند باید تا سطح بسیار بالا غنی شوند. زیرا در صورت حضور ایزوتوپ‌های مجاور با غلظت بیش از حد مجاز، امکان تولید پرتوهای هسته‌ای مزاحم در طول فرایند درمان مشکل ایجاد کرده و ممکن است به بیماران آسیب وارد شود. در این تحقیق با توجه به اهمیت Te–۱۲۳ جهت تولید رادیوداروی I–۱۲۳ ، به مدل‌سازی آبشار مربعی و بهینه‌سازی آن جهت جداسازی این ایزوتوپ پرداخته شده است.

روش‌های مختلفی برای جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی نیز معرفی شده است که از میان آنها استفاده از آبشار مربعی [۲] با توجه به قابلیت بهره‌برداری در خوراک‌های پایین و همچنین ضریب برش‌های مختلف مناسب‌ترین گزینه به منظور جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار می‌باشد[۳،٤]. در این آبشارها می‌توان به طور متناوب خوراک ورودی به آبشار را تغییر داده و از محصول هرگام به عنوان خوراک تا رسیدن به غنای مورد نیاز استفاده نمود [۵]. بنابراین به منظور غنی نمودن ایزوتوپ مورد نظر تا مقادیر بالا، به استفاده از آبشارهای مجزا نیاز نیست. جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی برخلاف ایزوتوپ‌های دوجزیی مانند ایریدیم بسیار پیچیده است. در جدا

UNCORRECTED PROOF

کردن ایزوتوپ‌های میانی لازم است تا ترکیب چندجزئی در خوراک را به دو گروه دسته‌بندی نمود. با این روش می‌توان ایزوتوپ‌ها را تا حد ممکن از طریق تنظیم برش آبشار به دو گروه جدا نمود [٦،٧]. با تنظیم برش آبشار که یکی از پارامترهای اصلی در جداسازی می‌باشد، یک یا چند ایزوتوپ سبک‌تر یا سنگین‌تر در چند بار راه اندازی آبشار حذف شده و ایزوتوپ میانی به عنوان ایزوتوپ انتهایی مطرح می‌شود تا جایی که غلظت ایزوتوپ میانی به مقدار مورد نیاز برسد [٨]. با این وجود، لازم است تا اثر موقعیت ورود خوراک به آبشار، نرخ جریان خوراک در واحد جداسازی، نرخ جریان ورودی به آبشار و برش مراحل برای کنترل کات آبشار با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گیرد. پارامترهای یک آبشار برای جداسازی اجزاء یک ترکیب چند جزیی را می‌توان با استفاده از یک روش مناسب از میان روش‌های مختلف بهینه نمود. تحقیقاتی که تا کنون برای جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی مطرح شده است برای سطح غنای کمتر بوده که برای تعیین بهترین تعداد مراحل، از روش‌های بهینه‌سازی با هزینه محاسباتی بسیار زیاد استفاده شده است [٤،٩]. از اهداف مهم در جداسازی ایزوتوپی، توانایی ساخت آبشارهایی با بیشترین میزان بازیابی و در عین حال کمترین مقدار مصرف خوراک است که طراحان را به استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ترغیب می‌کند. از جمله روش‌های بهینه‌سازی که در حوزه جداسازی ایزوتوپی از آنها بهره برده شده است می‌توان به الگوریتم جستجوی هارمونی[١٠]، الگوریتم گرگ خاکستری [١١-١٣] و آموزش بر مبنای یادگیری اشاره نمود [٣]. مطابق نتایج ارائه شده در مراجع [١٠،١٣،١٤] الگوریتم PSO نه تنها زمان اجرای محاسباتی کمتری نیاز دارد بلکه در دستیابی به پاسخ‌های بهینه در حوزه جداسازی ایزوتوپی بسیار توانمند است. لذا با تمرکز بر الگوریتم PSO در انجام محاسبات باید راه حلی ارائه نمود که هزینه محاسباتی را کمتر کند. زیرا با افزایش تعداد گام‌های محاسباتی زمان همگرایی بیشتر شده و در صورت پیچیدگی تابع هدف احتمال دسترسی به جواب بهتر کم می‌شود. در مرجع [٤] افزایش مقدار D در تابع هدف نیز وجود داشت (تابع D معیاری از دو گروهی نمودن ایزوتوپ‌های خوراک جهت جداسازی است). اما با افزایش تعداد پارامترهای تابع چند هدفه هزینه محاسباتی بیشتر شده و احتمال دستیابی به پاسخ مناسب سخت‌تر می‌شود.

لذا در این مقاله یک راهکار ارائه شده است که ابتدا با ارزیابی تابع D برخی پارامترهای اولیه از گزینش نهایی حذف شده و ساختار نهایی آبشار تعیین می‌شود. پس از انتخاب چیدمان نهایی، بهینه‌سازی پارامترهای آبشار شامل نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار، برش مراحل، مرحله ورود خوراک و نرخ جریان ورودی به واحدهای

UNCORRECTED PROOF

جداسازی انجام می‌شود. به عبارتی دیگر در این مقاله از تابع D برای تعیین چیدمان مناسب آبشار استفاده شده و تنها بهینه‌سازی آن برای آبشار منتخب در گامهای متوالی جداسازی تا دستیابی به غنای مورد نظر انجام می‌گیرد. در این راستا یک کد کارآمد با استفاده از نرم افزار متلب تهیه شده که قابلیت مدل‌سازی آبشار مربعی برای جداسازی تمام ایزوتوپ‌های چندجزئی را دارد. توابع هدف مختلفی با استفاده از این کد قابل ارزیابی هستند که در این مقاله افزایش مقدار بازیابی محصول با در نظر گرفتن ماکزیمم غلظت ایزوتوپ سوم به عنوان قید انتخاب شده است. یافتن پارامترهای بهینه نیازمند محاسبات پیچیده و بسیار زیادی بوده که مراحل اجرای این کد را می‌توان به سه بخش اصلی تقسیم نمود:

الف: تعیین چیدمان آبشار برای تعداد مشخص واحد جداسازی با بهره‌گیری از تابع D

ب: محاسبات بهینه‌سازی برای یک آبشار مربعی شامل ۱. محاسبه نرخ جریان‌ها در مراحل مختلف، ۲. محاسبه غلظت اجزاء (ایزوتوپ‌ها) در جریان ورودی و خروجی هر مرحله.

ج: بهینه‌سازی آبشار مربعی در چند گام برای رسیدن به مقدار غلظت هدف.

ترکیب درصد اجزاء خوراک، فاکتور جداسازی برای اختلاف جرم واحد در مراحل، تعداد مراحل و تعداد گام‌ها پارامترهای معلوم در محاسبات هستند. پارامترهای زیر نیز باید تعیین شود: غلظت ایزوتوپ مورد نظر در جریان محصول و جریان پسماند، مقدار برش و نرخ جریانها در خطوط آبشار.

۲- تئوری

در این بخش به بیان معادلات و قوانین حاکم بر آبشار مربعی پرداخته می‌شود.

۲-۱- معادلات حاکم بر آبشارهای مربعی

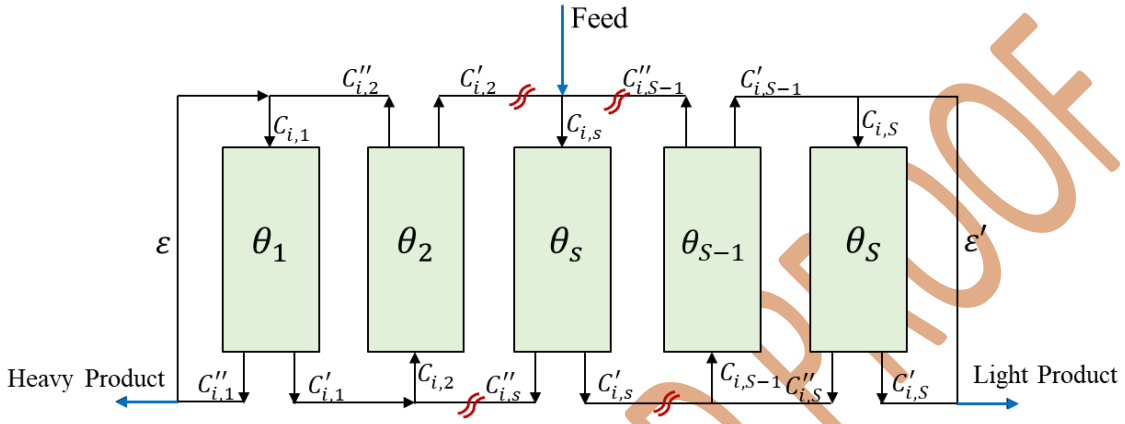
معادلات آبشار در دو بخش اصلی معادلات بقای جریان و غلظت مورد استفاده قرار می‌گیرند که در ادامه به شرح آن پرداخته می‌شود.

۲-۱-۱- معادلات جریان

در یک آبشار مربعی نرخ جریان ورودی به تمام مراحل و در نتیجه تعداد واحد جداسازی در هر مرحله ثابت می‌باشد (رابطه (۱)) و مقدار آن در طول آبشار تغییر نمی‌کند[۳،۱۵]. نمایی از آبشار مربعی در شکل (۱) آورده

UNCORRECTED PROOF

شده است که در آن جریان خوراک با نرخ F به آبشار وارد می‌شود. جریان‌های میان مرحله‌ای با نرخ جریان L' و L'' و ترکیب درصدهای $C'_{i,s}$ و $C''_{i,s}$ و جریان‌های پسماند و محصولW و P به ترتیب با ترکیب درصد $C'_{i,P}$ و $C''_{i,W}$ بیان می‌گردد (i=1, 2, …N_c). در ادامه به بیان معادلات و پارامترهای مربوطه پرداخته می‌شود. در این معادلات تعداد ایزوتوپ‌ها در جریان خوراک برابر N_c و تعداد کل مراحل آبشار برابر با S می‌باشد.



شکل ۱- نمایی از آبشار مربعی جریان برگشتی با یک جریان خوراک و دو جریان پسماند و محصول (محصول سنگین و سبک)

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 (٦) و (٧) برقرار خواهند بود. در این روابط θ_s، L'_s، L''_s و L_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. پارامترهای ε و ε' نیز به ترتیب بیانگر جریان‌های برگشتی در مراحل اول و آخر در آبشار مربعی می‌باشند.

$$L_1 = L_2 = \ldots = L_S = L \quad (۱)$$

$$L = L'_{s-1} + L''_{s+1} \quad , s \neq s_f \quad (۲)$$

$$L = L'_{s-1} + L''_{s+1} + F \quad , s = s_f \quad (۲)$$

$$L = L'_{S-1} + \varepsilon' \quad , \quad s = S \quad (۳)$$

$$L = L''_2 + \varepsilon \quad , \quad s = 1 \quad (٤)$$

$$L'_s = L\theta_s \quad (٦)$$

$$L''_s = L(1 - \theta_s) \quad (٧)$$

۲-۱-۲- معادلات غلظت

UNCORRECTED PROOF

معادله (۸) مربوط به بقای جرم برای جزء iام، در مرحله sام می‌باشد.

$$LC_{i,s} = L'_s C'_{i,s} + L''_s C''_{i,s} \qquad (۸)$$

معادلات (۹) تا (۱۲)، رابطه بقای جرم در نقاط اختلاط جریان‌ها را نشان می‌دهد.

$$LC_{i,s} = L'_{s-1} C'_{i,s-1} + L''_{s+1} C''_{i,s+1} + FC_{i,F} \quad , s = s_f \qquad (۹)$$

$$LC_{i,s} = L'_{s-1} C'_{i,s-1} + L''_{s+1} C''_{i,s+1} \quad , s \neq s_f \qquad (۱۰)$$

$$LC_{i,s} - L'_{s-1} C'_{i,s-1} - \varepsilon' C'_{i,P} = 0 \qquad , \quad s = S \qquad (۱۱)$$

$$Lc_{i,s} - L''_{s+1} C''_{i,s+1} - \varepsilon C''_{i,w} = 0 \qquad , \quad s = 1 \qquad (۱۲)$$

رابطه فاکتور جداسازی برای استفاده در آبشار جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی به فرم معادله (۱۳) می‌باشد و با کمک معادله (۱٤) نیز، شرط محدودیت غلظت ایزوتوپ‌ها در تمام مراحل اعمال می‌شود.

$$\alpha_{ij,s} = \frac{(C'_{i,s}/C'_{j,s})}{(C''_{i,s}/C''_{j,s})} = \alpha_{0,s}^{(M_j - M_i)} \quad , (i = j-1, \qquad j = 2, \dots, N_c) \qquad (۱۳)$$

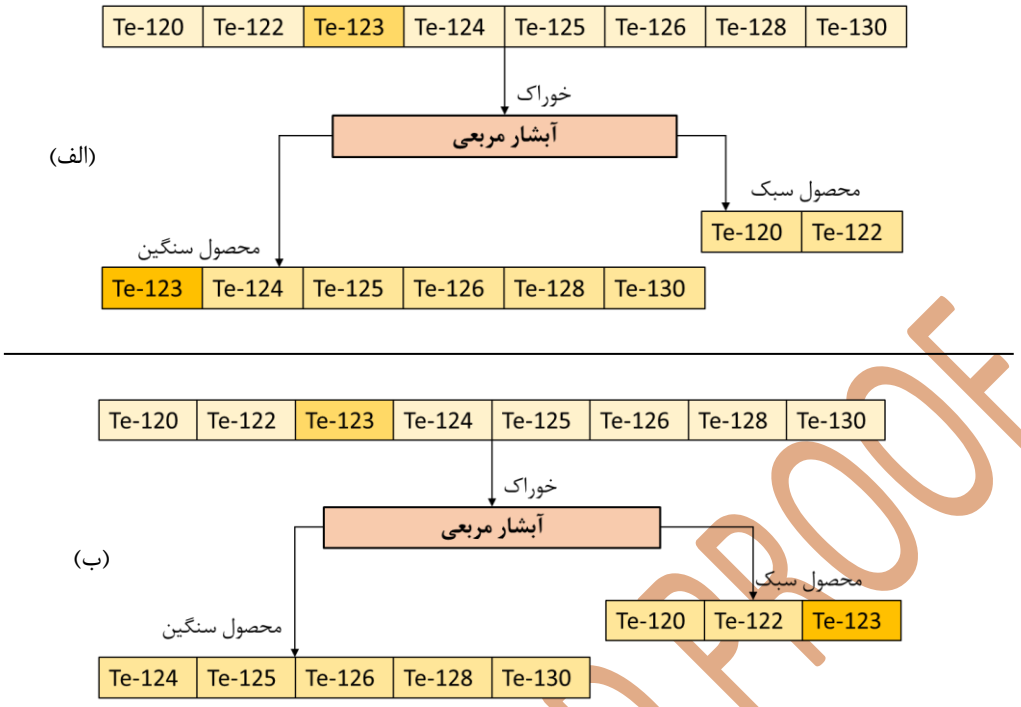
$$\sum_{i=1}^{N_c} C_{i,s} = \sum_{i=1}^{N_c} C'_{i,s} = \sum_{i=1}^{N_c} C''_{i,s} = 1 \qquad (۱٤)$$

۳-۲ پارامتر 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 و همکاران ارائه شده است [۷]. در صورتی که ایزوتوپ هدف در گروه سنگین قرار گیرد به عنوان سبکترین جزء در آن گروه می‌باشد اما اگر در گروه سبک قرار گیرد به عنوان سنگین‌ترین جزء در آن گروه درنظر گرفته می‌شود.

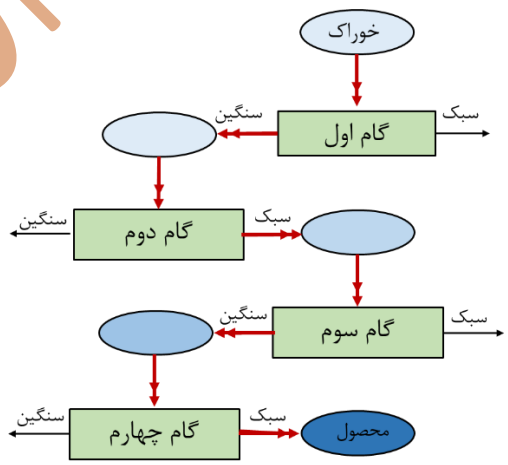
به منظور ارائه توضیحات تکمیلی در خصوص دو گروهی کردن ایزوتوپ‌ها و همچنین استفاده از گام‌های متوالی در مسیرهای جداسازی، شکل‌های (۲) و (۳) آورده شده است. مطابق شکل (۲)، ایزوتوپ سوم را می‌توان هم در جریان محصول سبک غنی نمود و هم در جریان محصول سنگین. به عبارتی دیگر می‌توان گروه بندی را به گونه‌ای انجام داد که ایزوتوپ سوم در گروه سنگین قرار بگیرد (شکل ۲-الف) و یا در گروه سبک (شکل ۲-ب). در صورتی که فاکتور جداسازی بسیار زیاد بوده و تعداد مراحل آبشار زیاد باشد در یک بار استفاده از آن می‌توان مخلوط ایزوتوپی را در دو گروه جدا نمود. اما در صورتی که پارامتر های ذکر شده کم باشند به ناچار جداسازی در گام‌های متوالی استفاده از آبشار نیاز دارد. فرایند جداسازی و انتخاب اینکه ایزوتوپ هدف از چه مسیری جدا گردد در محاسبات بهینه‌سازی مشخص می‌گردد.

UNCORRECTED PROOF



شکل ۲– جداسازی ایزوتوپ‌ها در دو گروه؛ الف) در صورتی که ایزوتوپ سوم در جریان محصول سنگین قرار گیرد، ب) در صورتی که ایزوتوپ سوم در جریان محصول سبک قرار گیرد

در شکل (۳) به عنوان نمونه، از آبشار مربعی در چهار گام جداسازی استفاده شده است. در گام اول و سوم ایزوتوپ هدف در جریان سنگین غنی شده و در گام‌های دوم و چهارم ایزوتوپ هدف در جریان سبک غنی شده است.



شکل ۳- استفاده از آبشار مربعی در گام‌های متوالی جداسازی

UNCORRECTED PROOF

بنابراین در صورتی که بتوان دو گروه را از یکدیگر جدا نمود ایزوتوپ میانی در گروه سبک یا سنگین به عنوان ایزوتوپ انتهایی مطرح می‌شود. بیان ریاضی تابع D به صورت زیر است:

$$D = \frac{P}{F}\sum_{i=1}^{k} C'_{i,P} + \frac{W}{F}\sum_{i=k+1}^{Nc} C''_{i,W} \qquad (۱۵)$$

زمانی که دو گروه سبک و سنگین به صورت کامل از یکدیگر جدا شوند:

$$\sum_{i=1}^{k} C'_{i,P} = 1.0\,,\ \sum_{i=k+1}^{N_c} C''_{i,W} = 1.0 \qquad (۱۶)$$

در نتیجه:

$$D = 1.0 \qquad (۱۷)$$

زمانی که دو گروه سبک و سنگین به صورت جزئی یا کامل جدا شوند مقدار تابع D همواره به صورت زیر خواهد بود و بهترین مقدار برای این تابع عدد یک است:

$$D \leq 1.0 \qquad (۱۸)$$

با توجه به مراجع موجود در صورتی که آبشار به اندازه کافی طولانی باشد [۶،۷] می‌توان با تنظیم مقدار برش به دو گروه ایزوتوپی را به طور کامل در یک بار استفاده از یکدیگر جدا کرد و مقدار این پارامتر به یک بسیار نزدیک است. اما اگر آبشار خیلی بلند نباشد لازم است تا بهینه‌سازی صورت گرفته و تا حد ممکن این پارامتر به بیشترین مقدار ممکن رسانده شود و این کار در چند بار استفاده از آبشار انجام گیرد که در این مقاله به آن پرداخته می‌شود. مطابق مرجع [۱۶] در صورتی که آبشار طویل نباشد مقدار برش برای افزایش غلظت ایزوتوپ مورد نظر باید با بهینه‌سازی و بررسی سایر پارامترهای آبشار تعیین شود.

۳- بهینه سازی

در این بخش شرح مختصری از الگوریتم بهینه‌سازی و تابع هدف مورد استفاده در این مقاله ارائه می‌شود.

UNCORRECTED PROOF

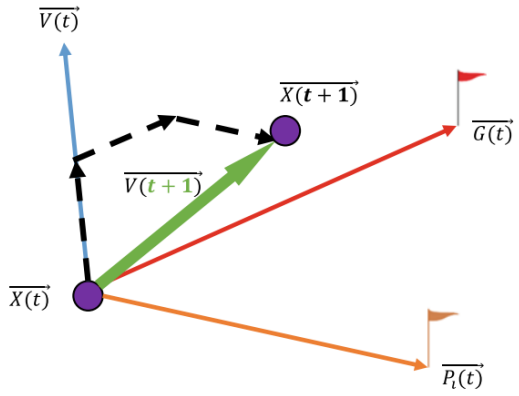
۱-۳- الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

در الگوریتم ازدحام ذرات هر ذره دارای یک سرعت خاص است. این ذرات در فضای جستجو با سرعتی که به‌صورت دینامیکی با توجه به رفتار گذشته‌شان تنظیم می‌شود، حرکت می‌کنند. در نتیجه ذرات تمایل دارند در حین جستجو به سمت بهترین و مناسب ترین منطقه جستجو بروند. هر ذره با توجه به مکان قبلی خود و یا با در مظر گرفتن مکان بهترین ذرات، مکان فعلی خود را به سمت هدف ترک می‌کند. شروع الگوریتم با انتخاب جمعیتی از ذرات در فضای جستجو که به هر ذره مکان، سرعت و مقدار برازندگی در تابع هدف تعلق می‌گیرد، آغاز می‌شود [۱۷]. کلیه ذرات بهترین مکان خود، بهترین مکان ذرات گروه و همچنین مقدار تابع هدف در مکان‌ها را می‌دانند. رفتار ذره در این الگوریتم متأثر از موقعیت قدیم ذره، فاصله ذره تا بهترین تجربه شخصی آن و فاصله ذره تا بهترین تجربه کل جمعیت می‌باشد (شکل (٤)). توصیف ریاضی حرکت فوق به صورت زیر است [۱۸]:

$$\overrightarrow{V_i(t+1)} = w.\overrightarrow{V_i(t)} + c_1 r_1.\left(\overrightarrow{P_i(t)} - \overrightarrow{X_i(t)}\right) + c_2 r_2.\left(\overrightarrow{G(t)} - \overrightarrow{X_i(t)}\right) \quad (۱۹\text{-الف})$$

که در آن:

$$\overrightarrow{X_i(t+1)} = \overrightarrow{X_i(t)} + \overrightarrow{V_i(t+1)} \quad (۱۹\text{-ب})$$



شکل ٤ – مسیر اصلاح شدن ذره در الگوریتم PSO [۱۸]

UNCORRECTED PROOF

ضرایب w، c_1 و c_2 به ترتیب نشان دهنده میزان اعتماد ذره به مکان فعلی خود، به تجربه قبلی خود و به ذرات مجاور می‌باشد. این ضرایب معمولا در هر مرحله بهینه‌سازی[1] بصورت تصادفی[2] انتخاب می‌شوند. در واقع در این روش هر ذره در فضای جستجو با یک سرعتی که متناسب است با بهترین مکان قبلی آن ذره و بهترین مکان در بین تمام ذرات حرکت می‌کند. مکان هر ذره بیانگر یک جواب کاندید فعلی (موقت) برای مسأله بهینه‌سازی است. به طور مشخص پارامترهای مورد استفاده در رابطه (۱۹) عبارتند از:

$\overrightarrow{V_i(t)}$: سرعت یک ذره در هر مرحله، $\overrightarrow{X_i(t)}$: مکان ذره در هر مرحله، c_1 و c_2 ثوابت شتاب که معمولاً به ترتیب ضریب یادگیری شخصی و ضریب یادگیری جمعی نامیده می‌شوند، r_1 و r_2 : اعداد تصادفی بین صفر ویک، w: ضریب اینرسی [3] در هر مرحله.

به‌منظور تنظیم مناسب رفتار جستجو و تضمین همگرایی، پارامترهای الگوریتم مطابق توصیه‌های مطالعات پایه و پژوهش‌های معتبر انتخاب شدند. اندازه جمعیت برابر ۳۰ ذره در نظر گرفته شد که مقدار استاندارد در بسیاری از پیاده‌سازی‌های PSO بوده و تعادل مطلوبی میان دقت و هزینه محاسباتی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، حداکثر تعداد تکرارهای الگوریتم برابر ۱۰۰ انتخاب گردید تا فرصت کافی برای همگرایی و تثبیت موقعیت بهترین جواب فراهم شود [۱۹] . ضریب اینرسی به‌صورت کاهش خطی از ۰/۹ در ابتدای الگوریتم به ۰/٤ در انتهای **آن** تنظیم شد؛ این رویکرد نخستین‌بار توسط شی و ابراهارت پیشنهاد شده و سبب می‌شود الگوریتم در مراحل اولیه جستجوی گسترده‌تری انجام داده و در مراحل پایانی بر نواحی امیدبخش متمرکز گردد [۲۰]. ضرایب شتاب فردی و جمعی برابر با ۲ در نظر گرفته شدند که بر اساس نسخه canonical PSO و تحلیل‌های تئوریک ارائه شده توسط کلرک وکندی، تعادل بهینه‌ای بین استفاده از بهترین تجربه فردی ذره $(\overrightarrow{P_i(t)})$ و بهترین تجربه جمعی $(\overrightarrow{G(t)})$ ایجاد می‌کنند [۲۱]. پارامترهای تصادفی r_1 و r_2 نیز در هر تکرار از توزیع یکنواخت [۰و۱] نمونه‌برداری شدند تا رفتار تصادفی، تنوع حرکتی و قابلیت فرار از بهینه‌های محلی حفظ شود. انتخاب این مجموعه پارامترها که ریشه در ادبیات استاندارد PSO دارد، موجب پایداری جستجو، جلوگیری از همگرایی زودرس و دستیابی به پاسخ‌های قابل اعتماد در فرآیند بهینه‌سازی می‌شود.

[1] Time step
[2] Randomly
[3] Inertia weight at time step t

UNCORRECTED PROOF

۳-۳- تابع هدف

میزان بازیابی کل ($\frac{y_{k,P}TotalProduct}{z_{k,F}TotalFeed}$) از پارامترهای مهم در طراحی آبشار است که به مقدار محصول ایزوتوپ هدف با غنای مورد نظر نسبت به مقدار آن در خوراک اولیه اشاره دارد. هر اندازه که این پارامتر افزایش یابد بدین معناست که از مقدار خوراک مشخص، بیشترین میزان محصول بدست آید.

$$Object_Function = f(\frac{y_{k,P}TotalProduct}{z_{k,F}TotalFeed}, TotalProduct) \quad (۲۰)$$

تابع هدف در نظر گرفته شده در این تحقیق مطابق رابطه (۲۱) می‌باشد. در این رابطه ضرایب a و b متناسب با شرایط مسأله انتخاب می‌شوند.

$$Object_{Function} = a.\langle\left(\frac{y_{k,P1}TotalProduct}{z_{k,F}TotalFeed}\right)_{step1} \dots \times \left(\frac{y_{k,P}TotalProduct}{z_{k,Fn}TotalFeed}\right)_{stepn}\rangle + b.TotalProduct \quad (۲۱)$$

٤- روش کار

مراحل اصلی در این تحقیق به دو بخش تقسیم می‌شوند:

الف) تعیین چیدمان آبشار مربعی با تعداد مشخص واحد جداسازی

ب) بهینه‌سازی آبشار متنخب جهت دستیابی به غنای بالا با تابع هدف مورد نظر

روش کار به این ترتیب است که ابتدا با کمک تابع D بهترین ساختار آبشار جداسازی به‌دست می‌آید. سپس با تعیین برش مناسب برای آبشار، انتخاب مرحله ورود خوراک، برش مراحل، نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار و نیز نرخ جریان خوراک ورودی به مراحل کلیه پارامترهای آبشار در هر گام جداسازی بهینه می‌شود. پس از آن متناسب با غلظت ایزوتوپ مورد نظر در جریان محصول یا پسماند مجدداً پارامترهای فوق بهینه شده و تا زمانی که غنای ایزوتوپ تلوریم مورد نظر به مقدار هدف برسد محاسبات و استفاده از آبشار در گامهای متوالی انجام می‌شود.

در ادامه نیز نحوه تعیین تعداد مراحل و نیز بهینه‌سازی در این مقاله شرح داده می‌شود.

٤-۱- تعیین تعداد مراحل

در این مقاله ابتدا با استفاده از تابع D و بررسی آن برای ساختارهای مختلف، آبشار مربعی تعیین می‌گردد. بدین منظور، فاکتور جداسازی (α_0)، تعداد مراحل آبشار(S) و نسبت نرخ جریان ورودی به مراحل به نرخ جریان خوراک آبشار (Z/F) به ترتیب در محدوده "۱/٤ – ۱/۰۵"، "۱۰۰–۲۰"، " ۱۸–۲" تغییر داده شده و تأثیر آن‌ها

UNCORRECTED PROOF

بر پارامتر D جهت جداسازی ایزوتوپ Te-۱۲۳ بررسی می‌شود. سپس با ارزیابی اطلاعات بدست آمده، تعداد مراحل آبشار در حالتی که تغییرات پارامترهای مذکور کمترین تأثیر را در مقدار تابع D ایجاد کنند تعیین می‌شود. در این مقاله فرض بر آن است که تعداد واحدهای جداسازی برابر با ۲۰۰ باشد. بنابراین نخستین گام، تعیین ساختار و چیدمان‌های موجود است.

جدول ۱ – تعداد مراحل و واحدهای جداسازی برای آبشار مربعی با ۲۰۰ واحد جداسازی

تعداد مراحل	۱۰	۲۰	۲۵	٤۰	۵۰	۱۰۰
تعداد واحد جداسازی در هر مرحله	۲۰	۱۰	۸	۵	٤	۲

همان‌طور که از جدول (۱) ملاحظه می‌شود ٦ ساختار مختلف قابل بررسی است. در چیدمان آخر تعداد مراحل بسیار زیاد بوده که از نظر تامین شرایط اقتصادی و نصب سیستم‌های کنترلی اجرای آن صحیح نیست. از طرفی دیگر تنها دو ماشین در هر مرحله وجود دارد که در صورت خراب شدن یکی از آنها فاکتور جداسازی مرحله مربوط به آن به شدت کاهش پیدا کرده و عملکرد آبشار را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین چیدمان اول بسیار کوتاه بوده و عملاً جداسازی زیادی نخواهد داشت. همچنین در صورت استفاده با توجه به راندمان جداسازی کم باید تعداد دفعات بیشتری از زنجیره استفاده شود که این موضوع باعث هدر رفتن مقدار زیادی از خوراک فرایندی می‌شود. به ویژه در مورد ایزوتوپ‌هایی مانند Te-۱۲۳ که در خوراک غنای بسیار کمی دارند این موضوع مصداق دارد. بنابراین مطالعات پارامتریک فوق برای تعیین تعداد مراحل از روی ارزیابی مقدار تابع D برای آبشار با مراحل ۲۰، ۲۵، ٤۰ و ۵۰ بررسی می‌شود. از این طریق تعداد مرحله مناسب برای بهینه‌سازی آبشار مربعی جهت جداسازی ایزوتوپ سوم تعیین می‌شود.

٤-۲- بهینه سازی

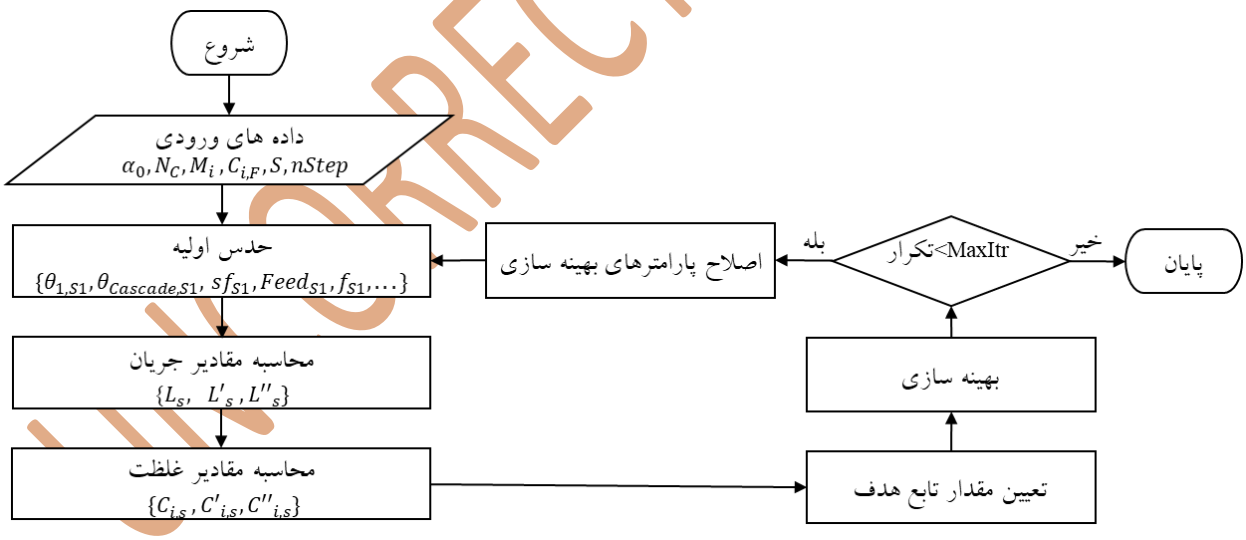
برای یک آبشار با S مرحله یک بردار ذره شامل $5 \times nStep$ درایه قابل تعریف می‌باشد که عدد ۵ مربوط به پارامترهای بهینه‌سازی در یک آبشار مربعی است و زمانی که برای جداسازی ایزوتوپ هدف به بیش از ۱ گام نیاز باشد تعداد متغیرها متناسب با تعداد گام‌ها افزایش می‌یابد. مقادیر درایه‌های این بردار در طی محاسبات بهینه سازی به شکل تصادفی در محدوده تعریف شده برای آنها تولید می‌شوند.

بردار ذرات حدس اولیه شامل برش مرحله اول، برش آبشار، شماره محل ورود خوراک، نرخ جریان ورودی به واحد جداسازی و نیز نرخ جریان ورودی به آبشار در هر گام است. در طی محاسبات بهینه‌سازی مقدار تابع

UNCORRECTED PROOF

هدف و برازندگی آن برای ذرات جدید محاسبه شده و با مقادیر قبلی مقایسه می‌شود. در نهایت، مقادیر بهینه جدید با مقادیر بهنیه در مرحله قبلی جایگزین می‌شوند. به عبارت دیگر در هر تکرار، پارامترهای متغیر آبشار به شکل تصادفی انتخاب و دیگر پارامترها بر مبنای آن تعیین می‌شود. سپس اندازه غلظت ایزوتوپ‌ها در جریان‌های غنی‌شده و تهی‌شده از جزء مورد نظر برای هر مرحله آبشار محاسبه شده و مقدار تابع هدف آن تولید می‌شود. در این مقاله از رابطه فرضی $\alpha_0 = 2.506 * f^{-0.229}$ به عنوان فاکتور جداسازی استفاده می‌شود. در این رابطه f (mg/s) نرخ جریان خوراک ورودی به واحد جداسازی می‌باشد [٤].

مطابق الگوریتم شکل (۲) در آبشار مربعی با حدس اولیه برای مقادیر بردار متغیرها، می‌توان نرخ تمام جریان‌ها را با استفاده از روابط (۱) تا (۷) محاسبه نمود. سپس بر اساس معادلات (۸) تا (١٤) مقدار غلظت ایزوتوپ‌ها در تمام مراحل با توجه به نرخ جریان‌های بدست آمده از حدس اولیه تعیین می‌شود. روش‌های مختلفی برای تعیین غلظت ایزوتوپ‌ها ارائه شده است [۲۲،۲۳] که در این تحقیق از روش تکرار Q استفاده می‌شود [۲٤]. پس از محاسبه نرخ جریان و غلظت تمام ایزوتوپ‌ها در مراحل مختلف با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO پارامترهای بهینه آبشار جهت تعیین کمترین مقدار تابع هدف تعیین می‌شوند (شکل۵). این محاسبات در یک تعداد تکرار معین تا زمانی که بهینه‌سازی پایان یابد انجام می‌شود.



شکل ۵ – مسیر الگوریتم بهینه‌سازی پارامترهای آبشار به روش PSO

٤-۳- مشخصات خوراک

UNCORRECTED PROOF

در این تحقیق از گاز هگزافلوراید تلوریم طبیعی (TeF_6) با ۸ ایزوتوپ پایدار به عنوان خوراک جهت جداسازی ایزوتوپ سوم آن استفاده شده است. غلظت ایزوتوپ‌های آن در حالت طبیعی در جدول (۲) آورده شده است. در این جدول اجزاء بر حسب جرم ایزوتوپی آنها از ایزوتوپ ۱۲۰ تا ۱۳۰ شماره گذاری می‌شوند.

جدول ۲- غلظت ایزوتوپ‌های تلوریم در خوراک طبیعی

شماره ایزوتوپ	۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷	۸
نام ایزوتوپ	Te-۱۲۰	Te-۱۲۲	Te-۱۲۳	Te-۱۲٤	Te-۱۲٥	Te-۱۲٦	Te-۱۲۸	Te-۱۳۰
غلظت	۰/۰۰۰۹۰	۰/۰۲٥٥۰	۰/۰۰۸۹۰	۰/۰٤۷٤۰	۰/۰۷۰۷۰	۰/۱۸۸٤۰	۰/۳۱۷٤۰	۰/۳٤۰۸۰

مطابق جدول (۲) در میان ایزوتوپ‌های میانی جداسازی ایزوتوپ سوم پیچیده‌تر است. زیرا علاوه بر اینکه یک ایزوتوپ میانی است، بلکه در بین ایزوتوپ های دوم و چهارم با غلظت بسیار بیشتر قرار گرفته است که این امر جداسازی آن را دشوارتر می‌کند.

٤-٤- آنالیز حساسیت و بررسی عدم قطعیت در انجام محاسبات

به منظور اطمینان از نتایج و بررسی خطای احتمالی از مقادیر ورودی نرخ جریان خوراک در واحد جداسازی که به تبع آن فاکتور جداسازی نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد، نرخ جریان خوراک از یک تا ۵ رقم اعشار تغییر داده شده و تاثیر آن بر مقادیر غلظت ایزوتوپ هدف آمده است. همانطور که پیشتر اشاره شد از رابطه* $\alpha_0 = 2.506 f^{-0.229}$ جهت تعیین فاکتور استفاده شده است. مطابق این رابطه، فاکتور جداسازی تابعی از نرخ جریان واحد جداسازی ($f(mg/s)$) است. بنابراین تنها آنالیز حساسیت برای نرخ جریان انجام گرفته است که تاثیر آن بر مقدار فاکتور جداسازی نیز آمده است.

براساس جدول (۳)، با اعمال تغییرات در بازه خطای ۰/۱ تا ۰/۰۰۰۰۱ حداکثر تغییرات در مقدار فاکتور جداسازی به مقدار ناچیزی در رقم سوم اعشار است. این موضوع تأثیری بر مقادیر غلظت ایزوتوپ هدف در جریان‌های پسماند و محصول ایجاد نمی‌کند.

بنابراین محاسبات انجام شده تا حد زیادی قابلیت پیاده‌سازی در عمل و اجرای واقعی را دارند و باید هم‌خوانی بسیاری با یکدیگر داشته باشند. زیرا تنها ابزار کنترل در آبشار جهت رسیدن به غنای مورد نظر شیرهای کنترل جریان هستند که مقدار دبی سیال را تحت تاثیر قرار می‌دهند. بیشترین خطای قابل قبول از آنها حدود دو رقم اعشار است که جهت دستیابی به غنای مورد نظر کفایت می‌کند.

UNCORRECTED PROOF

جدول ۳- تاثیر خطای جریان بر نتایج غلظت ایزوتوپی

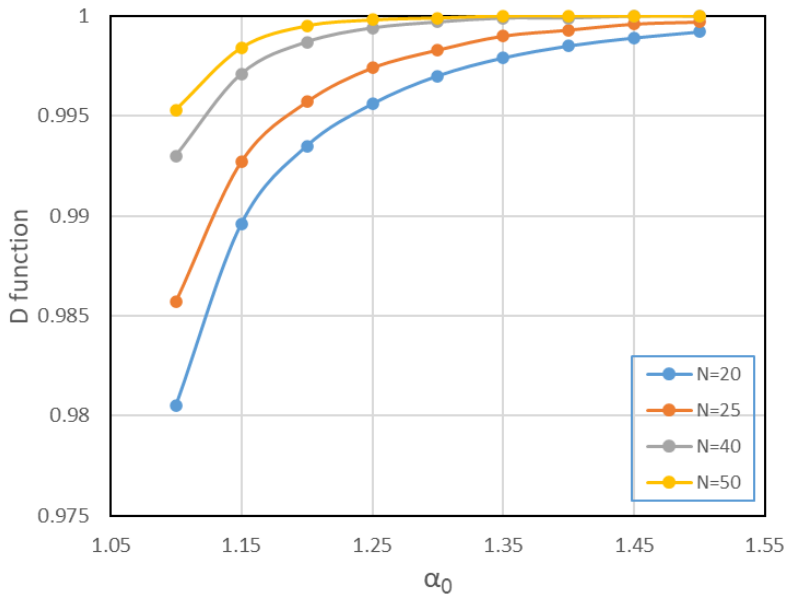
$f(mg/s)$	α_0	c_p	c_w
۲۵/۱	۱/۱۹۸۰۰	۰/۰۱۱۹۱۸	۰/۰۰۰۰۰
۲۵/۰۱	۱/۱۹۸۹۸	۰/۰۱۱۹۱۸	۰/۰۰۰۰۰
۲۵/۰۰۱	۱/۱۹۹۰۸	۰/۰۱۱۹۱۸	۰/۰۰۰۰۰
۲۵/۰۰۰۱	۱/۱۹۹۰۹	۰/۰۱۱۹۱۸	۰/۰۰۰۰۰
۲۵/۰۰۰۰۱	۱/۱۹۹۰۹	۰/۰۱۱۹۱۸	۰/۰۰۰۰۰
۲۵/۰۰۰۰۰	۱/۱۹۹۰۹	۰/۰۱۱۹۱۸	۰/۰۰۰۰۰

۵- نتایج و بحث

در بخش اول تعداد مراحل مناسب جهت جداسازی ایزوتوپ هدف تعیین می‌گردد و در بخش دوم نتایج بهینه-سازی آبشار مربعی در چند گام برای آبشار منتخب ارائه می‌شود.

۵-۱- تعیین تعداد مراحل

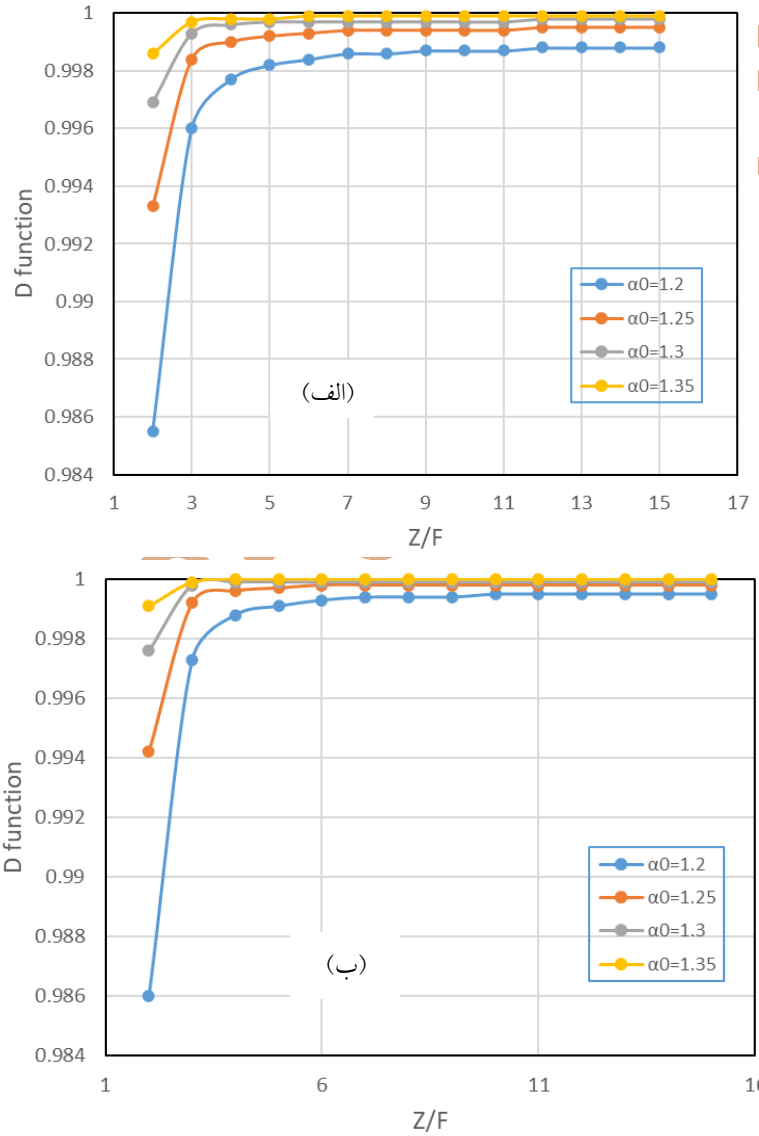
شکل (٦) تغییرات تابع D را بر حسب فاکتور جداسازی برای تعداد مراحل مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد مراحل، مقدار D افزایش یافته و در صورتی که تعداد مراحل برابر با ۵۰ در نظر گرفته شود تغییر چندانی در مقدار D برحسب فاکتور جداسازی از مقدار بیشتر از ۱/۲۵ وجود ندارد.



شکل ٦ – تغییرات مقدار تابع D بر حسب α_0 در یک آبشار مربعی با تعداد مراحل مختلف

UNCORRECTED PROOF

شکل (۷) نیز تغییرات تابع D را بر حسب مقدار Z/F برای آبشار با تعداد مراحل ٤٠ و ٥٠ نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در صورتی که تعداد مراحل برابر با ٥٠ انتخاب شود، در نسبت‌های مختلف Z/F، تفاوت چشم‌گیری بین مقدار D برای فاکتورهای جداسازی ۱/۲۵ تا ۱/۳۵ وجود ندارد. اما در صورتی که تعداد مراحل برابر با ٤٠ در نظر گرفته شود مطابق شکل ۷-الف، مقادیر D برای فاکتورهای جداسازی کمتر از ۱/۳۰ در نسبت‌های مختلف Z/F با یکدیگر متفاوت است.



شکل ۷ –تغییرات مقدار تابع D بر حسب Z/F در یک آبشار مربعی با الف)٤٠ مرحله، ب) ٥٠ مرحله در α_0 های مختلف

بنابراین براساس نتایج به‌دست آمده از شکل‌های ٦ و ٧ در صورتی که برای جداسازی ایزوتوپ هدف، تعداد ماشین‌های قابل استفاده برابر با ٢٠٠ عدد در مشخصات مذکور باشد، بهتر است از آبشار با ٥٠ مرحله استفاده گردد. زیرا در این حالت نه تنها پارامتر D به بیشینه مقدار ممکن خود می‌رسد بلکه در این حالت برای اکثر پارامترهای بررسی شده مقدار D مستقل از آنها می‌شود.

این عدد دقیقا با نتایج ارائه شده در مرجع [٤] که تعداد مراحل در آن براساس بهینه‌سازی در تمام چیدمان‌های موجود و ارزیابی آنها نسبت یکدیگر انجام شده بود، مطابقت دارد. چیدمان پیشنهادی در این پژوهش تنها با ارزیابی پارامتر D در چیدمان‌های مختلف زنجیره مربعی برابر با ٥٠ مرحله تعیین شده است. در مرجع مذکور نیز این عدد پیشنهاد شده اما پس از بهینه‌سازی و ارزیابی تمام ٦ چیدمان موجود. بنابراین در این پژوهش بدون نیاز به بهینه‌سازی تمام چیدمان‌ها و صرف زمان زیاد برای آن تنها با ارزیابی پارامتر D متأثر از پارامترهای اصلی فرایندی می‌توان چیدمان مناسب را پیشنهاد نمود.

٢-٥- نتایج بهینه سازی آبشار مربعی انعطاف پذیر

در این بخش نتایج بهینه‌سازی برای جداسازی ایزوتوپ هدف تا خلوص بالا برای آبشار مربعی با ٥٠ مرحله ارائه می‌شود. در این آبشار جداسازی ایزوتوپ هدف در ٤ گام انجام شده است. مطابق نتایج بدست آمده، مقدار خوراک مورد نیاز برابر با ٣٤١kg/yr خواهد بود که میزان بازیابی آن برابر ٨٦/٥٪ می‌باشد.

در جدول (٤) غلظت تمام ایزوتوپ‌ها در جریان‌های ورودی و خروجی آبشار در تمام گام‌ها ارائه شده است. همچنین جدول (٥) مقادیر مربوط به پارامترهای اصلی آبشار در تمام گام‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ٤- غلظت ایزوتوپ‌های تلوریم در چهار گام جداسازی

ایزوتوپ		Te-١٢٠	Te-١٢٢	Te-١٢٣	Te-١٢٤	Te-١٢٥	Te-١٢٦	Te-١٢٨	Te-١٣٠
گام اول	CP	٠/٠١١٠٥٥	٠/٢٩٨٨١	٠/١٠٤١٨	٠/٥٤٧٠٥	٠/٠٣٩٣٩	٠/٠٠٠٠٢	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠
	CF	٠/٠٠٠٩٠	٠/٠٢٥٥٠	٠/٠٠٨٩٠	٠/٠٤٧٤٠	٠/٠٧٠٧٠	٠/١٨٨٤٠	٠/٣١٧٤٠	٠/٣٤٠٨٠
	CW	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٥٢	٠/٠٧٣١٥	٠/٢٠٦٢٤	٠/٣٤٧٣٢	٠/٣٧٢٩٦
گام دوم	CP	٠/٠٢٣٢٩	٠/٦٥٩٤٨	/٢١٨٧٨٠	٠/٠٩٨٣٧	٠/٠٠٠٠٧	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠
	CF	٠/٠١٠٥٥	٠/٢٩٨٨١	٠/١٠٤١٨	٠/٥٤٧٠٥	٠/٠٣٩٣٩	٠/٠٠٠٠٢	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠
	CW	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٩٠٣	٠/٩١٨٩٩	٠/٠٧٢٠٥	٠/٠٠٠٠٣	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠
گام سوم	CP	٠/٠٣٣٨٩	٠/٩٥٦٩٣	٠/٠٠٩١٦	٠/٠٠٠٠٢	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠
	CF	٠/٠٢٣٢٩	٠/٦٥٩٤٨	٠/٢١٨٧٨	٠/٠٩٨٣٧	٠/٠٠٠٠٧	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠	٠/٠٠٠٠٠

UNCORRECTED PROOF

	CW	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۲	۰/٦٨۰۹۰	۰/۳۱۸٦۷	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
گام چهارم	CP	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳۱	۰/۹۹۹۰٦	۰/۰۰۰٦۳	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
	CF	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۲	۰/٦٨۰۹۰	۰/۳۱۸٦۷	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
	CW	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۹۰۷۸	۰/۹۰۸۵۸	۰/۰۰۰٦٤	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰

جدول ۵– پارامترهای اصلی آبشار در چهار گام جداسازی

پارامتر	گام اول	گام دوم	گام سوم	گام چهارم
نرخ خوراک آبشار (mg/s)	١٤/۰۰	١٢/٣٦	٣/٢١	٥/٤٤
برش آبشار	۰/۰۹	۰/٤٥	۰/٦٩	۰/٦٥
مرحله ورود خوراک	١٧	٣٥	٣٧	١٥
نرخ جریان برگشتی به مرحله آخر (mg/s)	٥۰/١٦	٣٢/٩٨	٣٨/١٨	٢٩/١٩
نرخ جریان برگشتی به مرحله اول (mg/s)	٣٧/٣٧	٢٦/٢٢	٣٧/١٩	٢٧/٢٨
نرخ جریان خوراک واحد جداسازی (mg/s)	٢١/٣١	١٥/٤٧	١٥/۰۰	١٥/۰۰

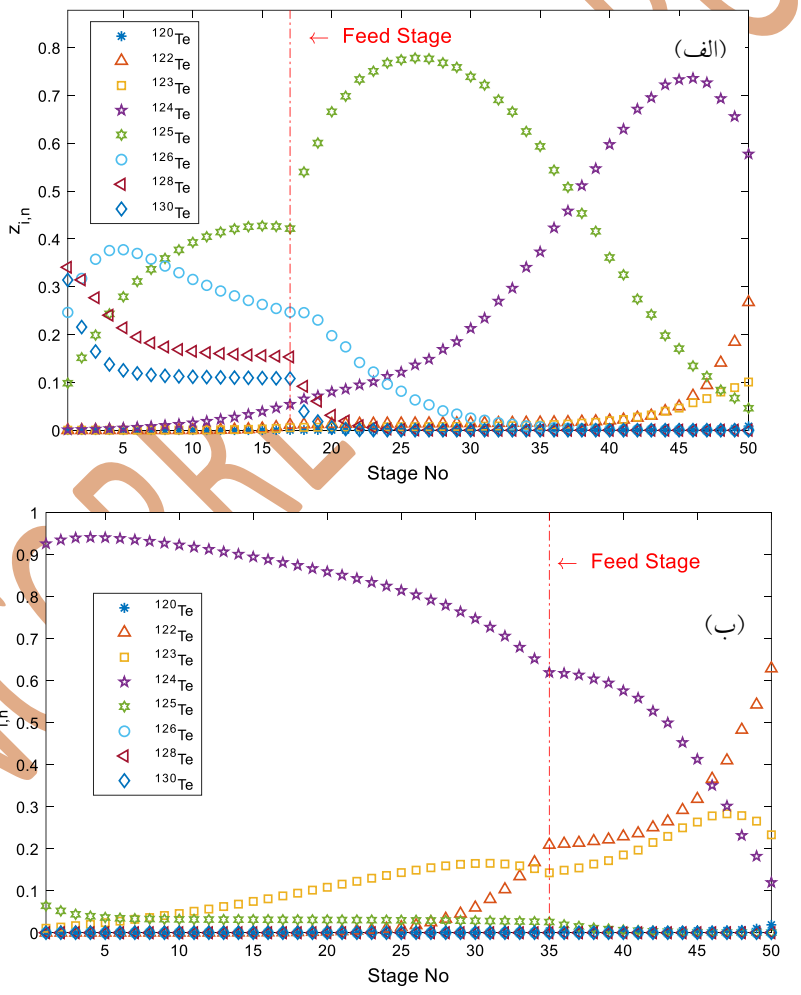
در شکل (۸) نیز غلظت ایزوتوپ‌ها در تمام مراحل آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود ابتدا غلظت ایزوتوپ هدف در جریان محصول سبک تا ٪۱۰ افزایش یافته است. پس از آن مجدداً در گام دوم جداسازی در جریان محصول سبک آبشار به غنای ٪۲۲ رسیده است. اما در گام سوم جداسازی در جریان محصول سنگین آبشار تا ٪٦۸ غنی شده است. در نهایت در گام چهارم جداسازی غنای آن به مقدار مورد نظر در جریان محصول سبک رسیده است.

مطابق شکل ۸–الف، ایزوتوپ های اول و دوم نیز با ایزوتوپ سوم افزایش غلظت پیدا کرده و همچنین ایزوتوپ چهارم به عنوان مزاحم عمل می‌کند. زیرا ایزوتوپ‌های اول و دوم غلظتی مشابه با ایزوتوپ سوم دارند و با توجه به اینکه این ایزوتوپ‌ها انتهایی‌تر هستند، در فرایند جداسازی بیشتر تمایل به جدا شدن دارند. از طرفی، با توجه به اینکه غلظت ایزوتوپ چهارم در خوراک خیلی بیشتر است عملاً در گام اول جداسازی مانع از افزایش غلظت سایر ایزوتوپ‌ها می شود. لذا همان‌طور که ملاحظه می‌شود جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزیی بسیار پیچیده‌تر

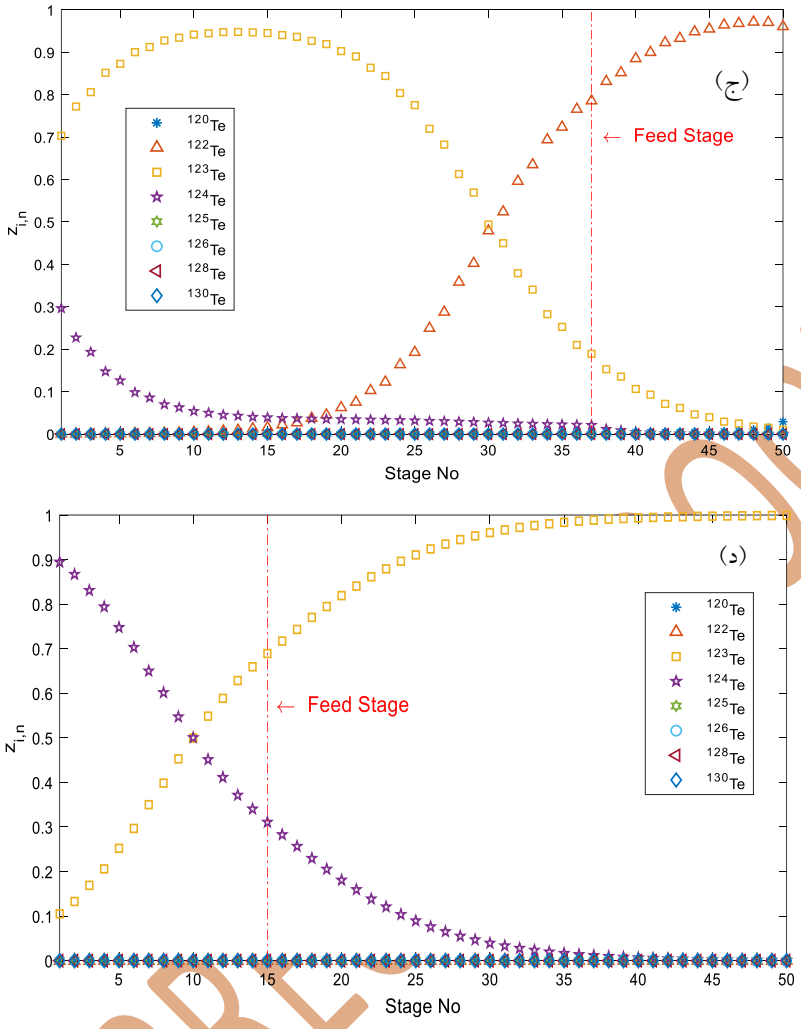
UNCORRECTED PROOF

از ایزوتوپ‌های دو جزیی است که لازمه جداسازی ایزوتوپ هدف در درجه اول شناخت و توانایی طراح آبشار نسبت به شرایط واقعی طراحی است که خود متأثر از تجربه صحیح او می‌باشد.

در ادامه با توجه به اینکه ایزوتوپ چهارم سنگین‌تر از ایزوتوپ سوم است و به منظور رهایی از آن، ایزوتوپ چهارم طی فرایند جداسازی به جریان سنگین ارسال شده و به این ترتیب در جریان سبک تنها سه ایزوتوپ اول غنی می‌شوند (شکل ۸–ب). بدین ترتیب در گام سوم ایزوتوپ هدف نسبت به دو ایزوتوپ اول سنگین‌تر بوده و لذا در جریان سنگین جدا می‌شود. در ادامه ایزوتوپ سوم به عنوان سبک‌ترین ایزوتوپ در گروه باقیمانده ایزوتوپی است که در گام آخر از جریان محصول سبک غنی می‌شود (شکل ۸–د).



UNCORRECTED PROOF



شکل ۸ – غلظت ایزوتوپ‌ها در تمام مراحل، الف) گام اول، ب) گام دوم، ج) گام سوم، د) گام چهارم

به‌منظور مقایسه و نتیجه‌گیری بهتر در پیوست الف نیز نتایج بهینه‌سازی آبشار مربعی برای جداسازی Te-۱۲۳ تا خلوص مورد نظر برای آبشار انعطاف پذیر مربعی با ٤٠ مرحله ارائه شده است. در این آبشار جداسازی ایزوتوپ هدف در ٤ گام انجام شد و مطابق نتایج بدست آمده میزان بازیابی از مقدار خوراک ۲۸۲kg/yr برابر با ۸۵/۸٪ می‌باشد.

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

UNCORRECTED PROOF

۵-جمع بندی

به منظور طراحی یک آبشار جهت جداسازی ایزوتوپ مورد نظر در بهترین شکل ممکن، نیاز به تعیین پارامترهای بهینه آن می‌باشد. بدین منظور یک کد محاسباتی توسعه داده شد و از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌دلیل کاربرد چندگانه و توانایی زیاد برای حل مسائل بهینه‌سازی، جهت یافتن پارامترهای بهینه در جداسازی ایزوتوپ-های چندجزئی استفاده شد. در این کد بیشترین مقدار بازیابی همراه با ماکزیمم غلظت از ایزوتوپ هدف در جریان محصول به عنوان هدف در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه استفاده از محاسبات بهینه‌سازی جهت تعیین تعداد مراحل آبشار بسیار هزینه بر بوده و صرف زمان زیادی را به خود اختصاص می‌دهد، در این تحقیق استفاده از تابع D برای تعیین تعداد مراحل آبشار و چیدمان آن پیشنهاد شده است. پس از تعیین تعداد مراحل آبشار، می‌توان با استفاده از محاسبات بهینه‌سازی در آبشار با ساختار معین به بهترین نتیجه مطلوب دست یافت. نتایج برای ایزوتوپ هدف نمونه نشان می‌دهد که با فاکتور جداسازی مورد نظر، آبشار با ۵۰ مرحله که ٤ ماشین در هر مرحله دارد بهترین گزینه خواهد بود.

با توجه به بررسی‌های به عمل آمده، استفاده از پارامتر D برای تعیین چیدمان مناسب از آبشارهای مربعی که تعداد واحد جداسازی در آنها معین است بسیار مفید به نظر می‌رسد. زیرا مثلا برای ۲۰۰ و یا ۱٦۰ واحد جداسازی حداکثر ٦ ساختار و چیدمان قابل بررسی است. اما آیا در صورتی که بخواهیم از چیدمان مربعی شده استفاده کنیم استفاده از تابع D مفید خواهد بود؟ در پژوهش‌های آتی این موضوع مورد بررسی قرار خواهد گرفت. ممکن است علاوه بر پارامتر D روش‌های تکمیلی یا مناسب‌تری وجود داشته باشد که لازمه دستیابی به آن مطالعات و بررسی‌های بیشتر است که در تحقیقات آتی به آنها پرداخته خواهد شد.

UNCORRECTED PROOF

پیوست الف

در جدول (الف–۱) غلظت تمام ایزوتوپ‌ها در جریان‌های ورودی و خروجی آبشار در تمام گام‌ها برای آبشار ٤٠ مرحله‌ای ارائه شده است. همچنین جدول (الف–۲) مقادیر مربوط به پارامترهای اصلی آبشار در تمام گام‌ها را برای آبشار ٤٠ مرحله‌ای نشان می‌دهد.

جدول الف–۱– غلظت ایزوتوپ‌های تلوریم در چهار گام جداسازی

ایزوتوپ		Te-۱۲۰	Te-۱۲۲	Te-۱۲۳	Te-۱۲٤	Te-۱۲٥	Te-۱۲٦	Te-۱۲۸	Te-۱۳۰
گام اول	CP	۰/۰۱۰٥٥	۰/۲۹۸۸۰	۰/۱۰٤۱۸	۰/٥۳٤۱۲	۰/۰٤۸٤۱	۰/۰۰۳۸۹	۰/۰۰۰۰٤	۰/۰۰۰۰۰
	CF	۰/۰۰۰۹۰	۰/۰۲٥٥۰	۰/۰۰۸۹۰	۰/۰٤۷٤۰	۰/۰۷۰۷۰	۰/۱۸۸٤۰	۰/۳۱۷٤۰	۰/۳٤۰۸۰
	CW	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۷۱۲	۰/۰۷۲٥۱	۰/۲۰٥٦۰	۰/۳٤۷۲٥	۰/۳۷۲۹۲
گام دوم	CP	۰/۰۲۳۲۰	۰/٦٥٦۷٥	۰/۲۱۹٤٦	۰/۱۰۰٥۰	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
	CF	۰/۰۱۰٥٥	۰/۲۹۸۸۰	۰/۱۰٤۱۸	۰/٥۳٤۱۲	۰/۰٤۸٤۱	۰/۰۰۸۳۹	۰/۰۰۰۰٤	۰/۰۰۰۰۰
	CW	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۷۸۰	۰/۸۹٦۱٤	۰/۰۸۸۸۳	۰/۰۰۷۱٤	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۰۰
گام سوم	CP	۰/۰۳۳۲۲	۰/۹۳٥٥۲	۰/۰۳۱۰۸	۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
	CF	۰/۰۲۳۲۰	۰/٦٥٦۷٥	۰/۲۱۹٤٦	۰/۱۰۰٥۰	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
	CW	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱۹	۰/٦٥٤٤۱	۰/۳٤٥۰۸	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
گام چهارم	CP	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۳۱	۰/۹۹۹۰۱	۰/۰۰۰٦۸	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
	CF	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱۹	۰/٦٥٤٤۱	۰/۳٤٥۰۸	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰
	CW	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۷۳۳۱	۰/۹۲٥۸٤	۰/۰۰۰۸٦	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰۰

جدول الف۲– پارامترهای اصلی آبشار در چهار گام جداسازی

پارامتر	گام اول	گام دوم	گام سوم	گام چهارم
نرخ خوراک آبشار (mg/s)	۱٤/۰۰	۱٤/۰۰	۱/۲٤	۳/٦۱
برش آبشار	۱۲/۷۹	۷/٦۲	۰/۷	۰/٦٥
مرحله ورود خوراک	۲۹	۲٦	۳٤	۱۲
نرخ جریان برگشتی به مرحله آخر (mg/s)	٥۸/۲٦	۲۸/۸۸	٤۱/۹٥	۳۳/٥۷
نرخ جریان برگشتی به مرحله اول (mg/s)	٤٥/٤٦	۳٥/۲٦	٤۲/۸۳	۳٥/۸۳
نرخ جریان خوراک واحد جداسازی (mg/s)	۱٥/۰۰	۱٥/۰۰	۱٥/۰۰	۱٥/۰۰

UNCORRECTED PROOF

مراجع

[1] Sulaberidze, Georgy A, and Valentin D Borisevich. 2001. "Cascades for Separation of Multicomponent Isotope Mixtures." *Separation science and technology* 36 (8-9):1769-817.
[2] Villani, Stelio. 1979. "Uranium Enrichment."
[3] Mansourzadeh, Fatemeh, Jaber Safdari, Ali GH Khamseh, Ali Norouzi, and Majid Khajenouri. 2018. "Comparison of Optimum Tapered Cascade and Optimal Square Cascade for Separation of Xenon Isotopes Using Enhanced Tlbo Algorithm." *Separation science and technology* 53 (13):2074-87.
[4] Khooshechin, Sajad, Fatemeh Mansourzadeh, Morteza Imani, Jaber Safdari, and Mohammad Hassan Mallah. 2021. "Optimization of Flexible Square Cascade for High Separation of Stable Isotopes Using Enhanced Pso Algorithm." *Progress in Nuclear Energy* 140:103922.
[5] Mansourzadeh, F, J Safdari, AA Ghorbanpour Khamseh, and MH Mallah. 2022. "Separation of Xenon Stable Isotopes Using Square Cascade." *Journal of Nuclear Science and Technology (JONSAT)* 43 (4):109-17.
[6] Smirnov, A Yu, and GA Sulaberidze. 2014. "Features of Mass Transfer of Intermediate Components in Square Gas Centrifuge Cascade for Separating Multicomponent Mixtures." *Theoretical Foundations of Chemical Engineering* 48:629-36.
[7] Zeng, Shi, and Chuntong Ying. 2000. "A Method of Separating a Middle Component in Multicomponent Isotope Mixtures by Gas Centrifuge Cascades." *Separation science and technology* 35 (14):2173-86.
[8] Raichura, RC, MAM Al-Janabi, and GM Langbein. 1991. "The Effects of the 'Key'molar Mass on the Design of a Cascade Handling a Multi-Isotopic Mixture." *Annals of Nuclear Energy* 18 (6):327-56.
[9] Ezazi, Farzaneh, Morteza Imani, Jaber Safdari, Mohammad Hasan Mallah, and Seyedeh Leila Mirmohammadi. 2022. "An Application of Nature-Inspired Paradigms in the Overall Optimization of Square and Squared-Off Cascades to Separate a Middle Isotope of Tellurium." *Annals of Nuclear Energy* 171:109033. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109033.
[10] Mansourzadeh, F, AA Gh Khamseh, J Safdari, and A Norouzi. 2019. "Utilization of Harmony Search Algorithm to Optimize a Cascade for Separating Multicomponent Mixtures." *Progress in Nuclear Energy* 111:165-73.
[11] Imani, M, and M Aghaei. 2023. "Application of the Grey Wolf Optimization Algorithm to Separate Middle Components in Multicomponent Mixtures." *Journal of Nuclear Research and Applications* 3 (2):1-14.
[12] Imani, Morteza, M. Aghaie, and Mohammademad Adelikhah. 2021. "Introducing Optimum Parameters of Separation Cascades for 123te Using Gwo Based on Ann." *Annals of Nuclear Energy* 163:108545. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108545.
[13] Mansourzadeh, Fatemeh, Valiyollah Ghazanfari, and Mohammad Mahdi Shadman. 2024. "Optimization of Multicomponent Isotopes Separation Cascades Parameters Using Improved Grey Wolf Optimizer Algorithm." *Nuclear Engineering and Design* 417:112865.
[14] Mansourzadeh, Fatemeh, Shadman, Mohammad, Ghazanfari, Valiyollah. 2025. "A Comparative Study of Pso and Igwo Algorithms for Optimizing Gas Centrifuge Cascades." *Separation science and technology* 60 https://doi.org/10.1080/01496395.2025.2502752.
[15] Mansourzadeh, Fatemeh, Mohammad Mahdi Shadman, Javad Karimi Sabet, and Valiyollah Ghazanfari. 2023. "Procedure for Determining the Number of Thermal Diffusion Columns in Square Cascade for Separation of Ne Stable Isotopes." *Nuclear Science and Techniques* 34 (5):68.

UNCORRECTED PROOF

[16] Mansourzadeh, F, AA Ghorbanpour Khamseh, J Safdari, A Norouzi, and M Khajenouri. 2021. "Investigation of the Cut on the Separation of Xenon Stable Isotopes in the Square Cascade." *Journal of Nuclear Science and Technology (JONSAT)* 42 (1):73-81.
Robinson, Jacob, Seelig Sinton, and Yahya Rahmat-Samii. 2002. *Particle Swarm, Genetic Algorithm, and Their Hybrids: Optimization of a Profiled Corrugated Horn Antenna*. Vol. 1. IEEE.
Seyedali Mirjalili, Jin Song Dong, Andrew Lewis. 2020. *Nature-Inspired Optimizers*. Edited by Seyedali Mirjalili, Jin Song Dong, Andrew Lewis. Springer Cham.
[19] Eberhart, Russell C., and James Kennedy. 1995. "A New Optimizer Using Particle Swarm Theory." *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*:39-43.
Shi, Yuhui, and Russell C. Eberhart. 1998. *Parameter Selection in Particle Swarm Optimization*. Springer Berlin Heidelberg.
[21] Clerc, M., and J. Kennedy. 2002. "The Particle Swarm - Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space." *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6 (1):58-73. https://doi.org/10.1109/4235.985692.
[22] Filippov, IG, GA Sulaberidze, and VA Chuzhinov. 1992. "Orthogonal-Collocation Calculation of Fractionation Cascades." *Atomic Energy (New York)* 72 (1):29-34.
[23] Wu, Hongjiang, Chuntong Ying, and Guangjun Liu. 1998. "Calculational Methods for Determining the Distribution of Components in a Separation Cascade for Multicomponent Mixture."
[24] Zeng, SHI, and Chuntong Ying. 2000. "A Robust and Efficient Calculation Procedure for Determining Concentration Distribution of Multicomponent Mixtures." *Separation science and technology* 35 (4):613-22.

UNCORRECTED PROOF