

توسعه یک کد محاسباتی برای تعیین استراتژی جداسازی ایزوتوپ‌های تنگستن در آبشار مربعی

فاطمه منصورزاده^۱، ولی اله غضنفری^۲، محمد مهدی شادمان^{۳*}

۱- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

۲- پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

چکیده:

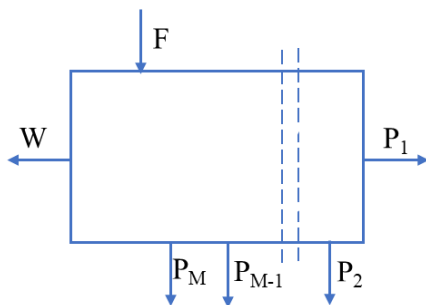
در سال‌های اخیر اهمیت، کاربرد و توسعه ایزوتوپ‌های پایدار در علوم مختلف بسیار چشم‌گیر و حائز اهمیت بوده است. یکی از مباحث مهم و کلیدی در جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار دستیابی به ایزوتوپ‌های یک عنصر با مقدار غلظت مورد نظر می‌باشد. برای این منظور تعیین تعداد گام‌های جداسازی و نیز پارامترهای آبشار در هر گام بسیار مهم است تا بتوان جداسازی را به بهترین نحو انجام داد. در این کار پژوهشی یک کد محاسباتی توسعه یافته است که با استفاده از آن استراتژی جداسازی ایزوتوپ هدف در جریان سبک و یا سنگین آبشار مشخص می‌شود. کد تهیه شده با تغییر پارامترهای آبشار مربعی و شبیه‌سازی آن در هر گام به جداسازی ایزوتوپ هدف می‌پردازد. در این مقاله به جداسازی پنج ایزوتوپ پایدار تنگستن از حالت طبیعی با استفاده از آبشار مربعی تا غنای بیش از ۹۰٪ پرداخته شده است. پس از آن به مقایسه نتایج جداسازی برای ایزوتوپ‌های میانی و انتهایی پرداخت شده است. در این بررسی غلظت ایزوتوپ‌های W-182، W-180، W-183، W-184 و W-186 به ترتیب از مقادیر طبیعی ۰/۰۰۱۲، ۰/۲۶۵۰، ۰/۱۴۳۱، ۰/۳۰۴۶ و ۰/۲۸۴۳ در خوراک به ۰/۹۱۷۷، ۰/۹۱۴۵، ۰/۹۱۰۰، ۰/۹۱۱۰ و ۰/۹۱۳۹ رسیده است. در این راستا ضریب بازیابی ایزوتوپ‌های هدف به ترتیب برابر با ۹۸/۵، ۹۲/۵، ۵۸/۶، ۸۹/۷ و ۹۹/۷ درصد شده است.

کلید واژه: ایزوتوپ‌های پایدار، جداسازی ایزوتوپی، تنگستن، آبشار مربعی، استراتژی جداسازی

۱- مقدمه

بسیاری از عناصر موجود در طبیعت دارای ایزوتوپهای مختلف بوده که هر یک از آنها خواص متفاوتی دارند. ایزوتوپهای عناصر با توجه به نیمه عمر آنها به دو دسته اصلی پایدار و ناپایدار تقسیم می شوند. ایزوتوپهای ناپایدار معمولاً نیمه عمر کمی داشته و با تابش پرتوهای هسته ای به سایر ایزوتوپ های دیگر تبدیل میشوند. اما ایزوتوپ های پایدار معمولاً نیمه عمر آن ها بسیار بیشتر زیاد بوده و عملاً ماهیت پرتودهی و تابش ندارند. اهمیت، کاربرد و توسعه ایزوتوپهای پایدار در صنعت، مهندسی، علوم پزشکی (شناسایی، تسکین و درمان بیماریها)، کشاورزی، زمین شناسی و غیره در سال های اخیر بسیار چشمگیر بوده است. لذا، کسب دانش فنی و تکنیک جداسازی ایزوتوپ-های پایدار در داخل کشور نیز بسیار مهم و حائز اهمیت است. برای جداسازی ایزوتوپهای پایدار متناسب با خواص فیزیکی و شیمیایی آنها واحدهای جداسازی مختلفی مانند ستونهای تقطیر، سانتریفیوژ، ستون نفوذ حرارتی، الکترومغناطیس و ... مورد استفاده قرار می گیرد. معمولاً متناسب با کاربرد ایزوتوپ هدف در بسیاری از موارد باید غنای ایزوتوپ هدف تا مقادیر بالا (به منظور کاهش تاثیر منفی سایر ایزوتوپهای یک عنصر معمولاً غنای بیشتر از ۹۰ درصد به ویژه برای کاربردهای پزشکی مورد نیاز است) افزایش یابد که این موضوع پیچیدگی کار و استفاده از آبشارهای جداسازی را دو چندان می کند زیرا علاوه بر اینکه برای رسیدن به یک سطحی از غنای معین نیاز به آبشاری از واحدهای جداسازی داریم، بلکه برای دسترسی به غنای بالا تنها استفاده از یک گام آبشار موجود جواب گو نیست. به منظور افزایش غنای ایزوتوپ مطلوب تا مقدار مورد نظر راهکارهای متفاوتی وجود دارد [۱].

در رویکرد اول استفاده از آبشار مدل با یک جریان خوراک و چند جریان محصول پیشنهاد می شود. تغییرات غلظت ایزوتوپهای میانی در طول آبشار به گونه ای است که تا یک مقدار معینی افزایش یافته و سپس کاهش می یابد. بنابراین می توان در مرحله ای از آبشار که غلظت ایزوتوپ میانی به حداکثر مقدار خود می رسد یک خروجی محصول ایجاد کرده و محصولی که با حداکثر غلظت از ایزوتوپ هدف ایجاد می شود را از آبشار خارج نمود. شکل (۱) نمایی از آبشار با یک خوراک، یک پسماند و M خط محصول را نشان می دهد [۲].

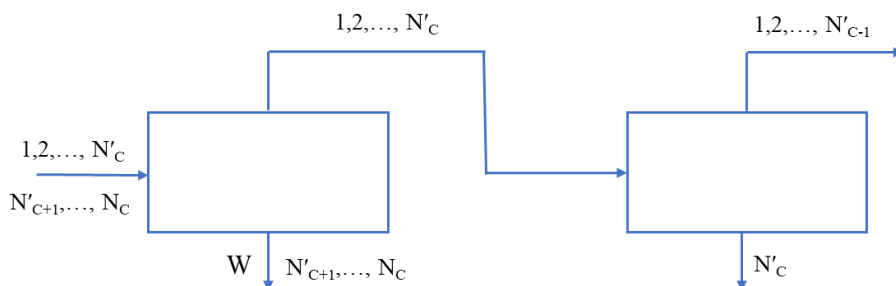


شکل ۱. نمایی از آبشار با یک خوراک، یک پسماند و M خط محصول

Figure 1. A view of a cascade with one feed, one waste, and M product lines

در رویکرد دوم از دسته بندی ایزوتوپها به دو گروه در آبشارهای مدل استفاده می شود. یعنی پس از عبور خوراک از آبشار تقریباً ایزوتوپها به دو گروه تقسیم می شوند که در محصول ایزوتوپ میانی به عنوان ایزوتوپ انتهایی مطرح می شود. پس از آن می توان یک آبشار دیگر برای خوراک با ترکیب درصد جدید طراحی نمود که در آن با ایزوتوپ میانی در مرحله قبل به عنوان ایزوتوپ انتهایی رفتار می شود و یا اینکه می توان با اعمال تغییراتی در آبشار اول مجدداً از آن استفاده نمود. شکل (۲) را می توان برای جداسازی جزء میانی با استفاده از دو آبشار ملاحظه نمود. همانطور که دیده می شود خوراک دارای N_c ایزوتوپ است و هدف، جدا کردن ایزوتوپ N'_c می باشد. با استفاده از آبشار اول اجزای خوراک به دو گروه $(1, 2, \dots, N'_c)$ و $(N'_c + 1, \dots, N_c)$ تقسیم می شوند. حال در گروه $(1, 2, \dots, N'_c)$ ایزوتوپ N'_c به عنوان

ایزوتوپ انتهایی می‌باشد. بنابراین خط محصول آبشار اول به عنوان خوراک به آبشار بعدی وارد می‌شود. از آنجا که ایزوتوپ N'_C در این خوراک جدید به عنوان جزء سنگین انتهایی می‌باشد می‌توان طراحی آبشار جدید را مجدداً به گونه‌ای انجام داد که ایزوتوپ‌ها به دو گروه (N'_C) و $(1, 2, \dots, N'_C - 1)$ تقسیم شده و ایزوتوپ N'_C از خط پسماند خارج شود [۲].



شکل ۲. جداسازی جزء میانی (N'_C) با استفاده از دو آبشار

Figure 2. Middle-component separation using two cascades

در رویکرد سوم که پرکاربردترین حالت می‌باشد می‌توان با اعمال تغییراتی در آبشار اول نیز مجدداً از آن استفاده نمود. در این حالت تنها از یک آبشار و در دفعات مختلف استفاده می‌شود و کافی است که برش آبشار را در مقدار مورد نیاز به منظور جداسازی ایزوتوپ مورد نظر تنظیم نمود [۴ و ۳]. یعنی می‌توان با تنظیم برش در مناسب‌ترین مقدار، از آبشار با بیشترین راندمان ممکن جهت جداسازی یک گستره زیادی از ایزوتوپ‌ها با جرم ایزوتوپی وسیعی استفاده نمود. به ویژه در شرایطی که مقدار ماده خوراک کم باشد دیگر نیاز به ساخت یک آبشار جدید نمی‌باشد.

از میان ساختارهای موجود استفاده از آبشار مربعی یکی از روش‌های متداول برای جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار می‌باشد. زیرا جریان‌های برگشتی در مراحل اول و آخر آبشارهای مربعی، قابلیت بهره‌برداری در خوراک‌های پایین و همچنین ضریب برش‌های مختلف را در آن فراهم کرده که اصطلاحاً از انعطاف‌پذیری بالایی در بهره‌برداری برخوردار هستند [۵ و ۱].

یکی از عناصر با کاربردهای مهم تنگستن با ۵ ایزوتوپ پایدار می‌باشد [۶] که از جمله کاربردهای مهم ایزوتوپ‌های آن می‌توان به استفاده در علوم پزشکی (به عنوان مثال W-186 برای تولید Re-188 جهت درمان و تسکین، ردیاب جهت تشخیص کاربرد دارد)، مطالعات فلزات از طریق طیف سنجی اشعه گاما (W-183 و W-180) و مطالعات زمین شناسی (W-182) اشاره نمود [۷-۹]. اما تحقیقات کمی به شکل ویژه در مورد جداسازی ایزوتوپ‌های تنگستن تا غنای بالا منتشر شده است. تنها در مرجع [۱۰] جداسازی ایزوتوپی تنگستن در یک زنجیره مربعی مورد بررسی قرار گرفته است. در مراجع [۱۱ و ۱۲] طراحی زنجیره مربعی با فرض استفاده از ایزوتوپ‌های تنگستن به عنوان خوراک مطرح شده است. همچنین در [۱۳] زمان پایداری زنجیره با حضور گاز هگزافلوراید تنگستن ارزیابی شده است. در مرجع [۱۴] نیز اسمیرنوف و همکاران روشی برای جداسازی ایزوتوپی با حضور گاز تنگستن ارائه کردند. بر اساس مطالعات انجام گرفته در هیچ یک از مراجع فوق تا کنون استراتژی مشخصی برای جداسازی ایزوتوپ‌های تنگستن با غنای ۹۰٪ منتشر نشده است. در مورد ایزوتوپ‌های سایر عناصر برخی نتایج تجربی بدون ذکر پارامترهای فنی و روش جداسازی آن در مراجع منتشر شده است. از جمله فعالیت‌هایی که در زمینه جداسازی سایر ایزوتوپ‌ها انجام شده است می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: جداسازی ایزوتوپ‌های کروم-۵۰ و کروم-۵۴ [۱۵ و ۱۶]،

جداسازی ایزوتوپ تلوریم-۲۳، تلوریم-۱۲۰ و تلوریم-۱۲۳ [۱۷و۱۸]، جداسازی ایزوتوپ‌های قلع-۱۱۶ و قلع-۱۱۸ [۱۹]، جداسازی ایزوتوپ‌های روی و سلیوم [۲۰و۲۱]، جداسازی کادمیوم-۱۱۶ [۲۲]، جداسازی ایزوتوپ‌های جیوه-۱۹۲، جیوه-۲۰۲، جیوه-۲۰۴ [۲۳]، جداسازی ایزوتوپ‌های گوگرد [۲۴] و جداسازی ایزوتوپ‌های نیکل [۲۵].

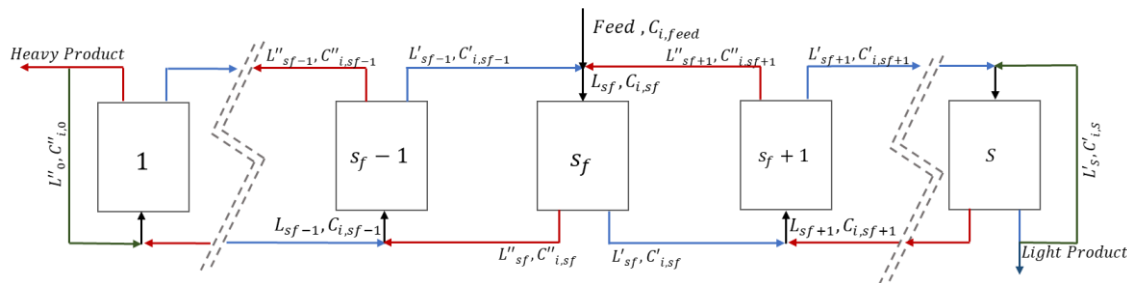
در این مقاله به بیان استراتژی جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار تنگستن تا غنای بیش از ۹۰٪ پرداخته شده و نتایج آن با یکدیگر مقایسه می‌شوند. در این راستا با تغییر برش یک آبشار (P/F)، مرحله ورود خوراک (Sf)، برش مراحل آن (θ) و مقدار نرخ خوراک ورودی به واحد جداسازی (f) در آبشار با ۲۵ مرحله بررسی‌ها انجام شده است. سپس نتایج جداسازی ایزوتوپ‌ها با یکدیگر مقایسه شده است.

۲- تئوری و معادلات حاکم

در این بخش به بیان معادلات حاکم بر آبشار مربعی و تئوری مورد استفاده جهت جداسازی پرداخته می‌شود.

۲-۱- آبشار مربعی

در یک آبشار مربعی نرخ جریان ورودی به تمام مراحل و در نتیجه تعداد المان‌های جداسازی در هر مرحله ثابت می‌باشد (رابطه (۱)) و مقدار آن در طول آبشار تغییر نمی‌کند [۲۶]. نمایی از آبشار مربعی در شکل (۱) آورده شده است که در آن جریان خوراک با نرخ F در مرحله Sf با غنای $G_{i,F}$ وارد آبشار می‌شود. جریان‌های میان مرحله‌ای با نرخ L'_s و L''_s و ترکیب درصدی‌های $C'_{i,s}$ و $C''_{i,s}$ و جریان‌های پسماند و محصول W و P به ترتیب با ترکیب درصد $C'_{i,P}$ و $C''_{i,W}$ بیان می‌گردد. 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. اطلاعات کامل مربوط به معادلات حاکم بر آبشار مربعی در مرجع [۲۷] آورده شده است.



شکل ۳. شمایی از یک آبشار مربعی

Figure 3. Schematic view of a square cascade

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 ، L'_s و L_s به ترتیب به برش مرحله s، نرخ جریان پیشرونده، پسرونده و نرخ جریان ورودی به مرحله S اشاره دارند [۵۴]. پارامترهای ε و ε' نیز به ترتیب بیانگر جریان‌های برگشتی در مراحل اول و آخر آبشار مربعی می‌باشند.

$$L_1 = L_2 = \dots = L_S = L \quad (1)$$

$$L = L'_{s-1} + L''_{s+1} \quad , s \neq s_f \quad (2)$$

$$L = L'_{s-1} + L''_{s+1} + F \quad , s = s_f \quad (3)$$

$$L = L'_{s-1} + \varepsilon' \quad , s = S \quad (4)$$

$$L = L''_2 + \varepsilon \quad , s = 1 \quad (5)$$

$$L'_s = L\theta_s \quad (6)$$

$$L''_s = L(1 - \theta_s) \quad (7)$$

معادله (۸) مربوط به بقای جرم برای جزء α_m ، در مرحله k ام می‌باشد.

$$LC_{i,s} = L'_s C'_{i,s} + L''_s C''_{i,s} \quad (8)$$

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

$$LC_{i,s} = L'_{s-1} C'_{i,s-1} + L''_{s+1} C''_{i,s+1} + FC_{i,F} \quad , s = s_f \quad (9)$$

$$LC_{i,s} = L'_{s-1} C'_{i,s-1} + L''_{s+1} C''_{i,s+1} \quad , s \neq s_f \quad (10)$$

$$LC_{i,s} - L'_{s-1} C'_{i,s-1} - \varepsilon' C'_{i,P} = 0 \quad , s = S \quad (11)$$

$$LC_{i,s} - L''_{s+1} C''_{i,s+1} - \varepsilon C''_{i,W} = 0 \quad , s = 1 \quad (12)$$

رابطه فاکتور جداسازی برای استفاده در آبشار جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی به فرم معادله (۱۳) می‌باشد و با کمک معادله (۱۴) نیز، شرط محدودیت غلظت ایزوتوپ‌ها در تمام مراحل اعمال می‌شود.

$$\alpha_{ij,s} = \frac{(C'_{i,s}/C'_{j,s})}{(C''_{i,s}/C''_{j,s})} = \alpha_{0,s}^{(M_j - M_i)} \quad , (i = j - 1, \quad j = 2, \dots, N_c) \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{N_c} C_{i,s} = \sum_{i=1}^{N_c} C'_{i,s} = \sum_{i=1}^{N_c} C''_{i,s} = 1 \quad (14)$$

۲-۲- تئوری جداسازی

یکی از پارامترهای اصلی در جداسازی اجزای یک ترکیب چند جزئی در آبشارهای متداول، برش آبشار است که نسبت نرخ جریان محصول به نرخ جریان خوراک (P/F) می‌باشد [۱۸]. با تنظیم برش آبشار می‌توان تا حد امکان ایزوتوپ‌ها را به دو گروه دسته‌بندی نمود. در این شرایط بسته به اینکه کدام ایزوتوپ مورد نظر است در صورتی که ایزوتوپ هدف در گروه سنگین قرار گیرد به عنوان سبک‌ترین جزء در آن گروه و اگر در گروه سبک قرار گیرد به عنوان سنگین‌ترین جزء در آن گروه مطرح می‌شود. برای غنی‌سازی جزء میانی با شماره k ، حداکثر غلظت قابل استحصال در جریان محصول و یا جریان پسماند، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۸ و ۲۸]:

$$(C'_{k,P})_{lim} = \frac{C_{k,F}}{\sum_{i=1}^k C_{i,F}} \quad (15)$$

$$(C''_{k,W})_{lim} = \frac{C_{i,F}}{\sum_{i=k}^{N_c} C_{i,F}} \quad (16)$$

در صورتی که مخلوط چند جزئی در دو گروه سبک و سنگین به صورت کامل از یکدیگر جدا شوند، اجزای $1, 2, \dots, k$ در جریان سبک و اجزای $k, k+1, k+2, \dots, N_c$ در جریان سنگین قرار می‌گیرند. به عبارت دیگر:

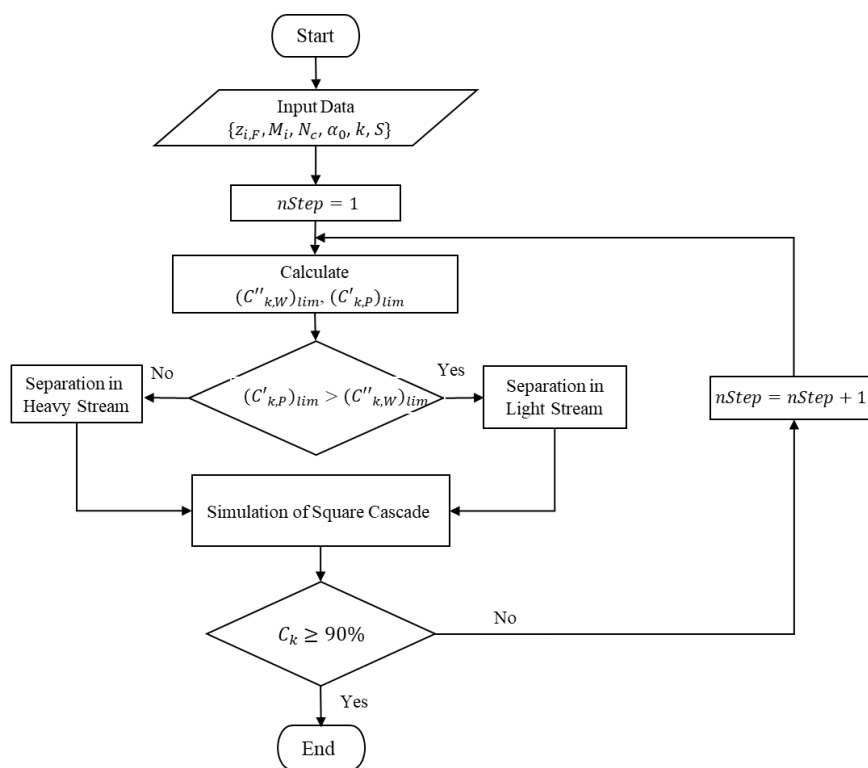
$$\sum_{i=1}^k C'_{i,P} \rightarrow 1, \sum_{i=1}^k C''_{i,W} \rightarrow 0 \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^k C'_{i,P} \rightarrow 0, \sum_{i=1}^k C''_{i,W} \rightarrow 1 \quad (18)$$

۳- روش جداسازی

در این مقاله یک کد محاسباتی تهیه شده است که شامل دو بخش اصلی است. در یک بخش آبشار مربعی شبیه‌سازی می‌شود و در بخش دیگر استراتژی جداسازی ایزوتوپ هدف تا غنای بالا پیاده شده است. در استراتژی پیشنهادی، مسیر جداسازی ایزوتوپ هدف در جریان سبک و یا سنگین به بهترین حالت ممکن تعیین می‌شود. شکل (۴) الگوریتم کد محاسباتی تهیه شده برای جداسازی هر ایزوتوپ در گام-های مختلف جداسازی را نشان می‌دهد. این الگوریتم علاوه بر ایزوتوپ‌های تنگستن قابلیت جداسازی هر ایزوتوپ و تا هر مقدار غنایی را دارد. لذا جداسازی هر جزء در خوراک به این ترتیب انجام می‌شود که با استفاده از تجربیات طراح نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار در هر گام، مرحله ورود خوراک به آبشار، برش آبشار و برش تمام مراحل تعیین می‌شود.

در شبیه‌سازی آبشار مربعی از معادلات (۱) تا (۷) برای تعیین نرخ جریان مراحل استفاده می‌شود و با استفاده از روش خطی‌سازی و تکرار مقدار غلظت هر ایزوتوپ در تمام مراحل برای معادلات (۸) تا (۱۴) تعیین می‌گردد. بدین ترتیب که با استفاده از پارامترهای ورودی نرخ جریان مراحل تعیین می‌شود. سپس دسته معادلات غیر خطی غلظت با داشتن نرخ جریان مراحل و بهره‌گیری از روش‌های تکرار قابل محاسبه خواهد بود [۲۶ و ۲۷].



شکل ۴. الگوریتم کد محاسباتی به منظور جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی در آبشار مربعی

Figure 4. Algorithm of the computational code for the separation of multi-component isotope in a square cascade

در این کد چگونگی قرار گرفتن هر ایزوتوپ در جریان سبک یا سنگین و تعیین مسیر جداسازی براساس روابط (۱۵) و (۱۶) انجام می‌شود. هنگامی که ایزوتوپ k در جریان سبک آبشار غنی می‌شود، حداکثر غلظت قابل استحصال در آن از رابطه (۱۵) ارزیابی می‌شود. زمانی که

ایزوتوپ k در جریان پسماند آبشار غنی می‌شود، برای ارزیابی حداکثر غلظت قابل استحصال در آن می‌توان رابطه (۱۶) را مبنا قرار داد. پس از جداسازی ایزوتوپی در آبشار متناسب با غلظت جزء هدف مجدداً با استفاده از روابط (۱۵) و (۱۶) مشخص می‌شود که آیا بهتر است ایزوتوپ k در جریان محصول و یا در جریان پسماند غنی شود. در ادامه مقدار برش آبشار و پارامترهای فرایندی بر اساس تجربه طراح اعمال می‌شود که در هر گام جداسازی متفاوت خواهد بود. پارامتر C_k در این الگوریتم به مقدار غنای نهایی ایزوتوپ هدف در جریان مورد نظر اشاره دارد. در این مقاله به جداسازی ایزوتوپهای اول تا سوم تنگستن تا غنای بیش از ۹۰٪ پرداخته شده و در نهایت نتایج بدست آمده با یکدیگر مقایسه شده است.

۳-۱- پارامترهای ورودی

در جدول (۱) مقدار غنای ایزوتوپهای تنگستن در خوراک طبیعی آورده شده است.

جدول ۱. غلظت ایزوتوپهای تنگستن در جریان خوراک

Table 1. The concentration of tungsten isotopes in the feed stream

Isotope	W-180	W-182	W-183	W-184	W-186
Concentration	۰/۰۰۱۲	۰/۲۶۵۰	۰/۱۴۳۱	۰/۳۰۴۶	۰/۲۸۴۳

مشخصات آبشار مربعی فرضی مورد بررسی نیز در جدول (۲) آمده است. این آبشار دارای ۲۵ مرحله (S) است و مقدار خوراک واحد جداسازی (f) برابر با ۲۵mg/s در نظر گرفته شده است. همچنین تعداد واحد جداسازی در هر مرحله ۸ (n) می‌باشد. مقدار فاکتور جداسازی نیز مطابق مرجع [۱] از رابطه ارائه شده در جدول استفاده می‌شود که در آن f نرخ جریان خوراک ورودی به واحد جداسازی است.

جدول ۲. پارامترهای اصلی ورودی در شبیه سازی آبشار مربعی

Table 2. Input parameters for the square cascade simulation

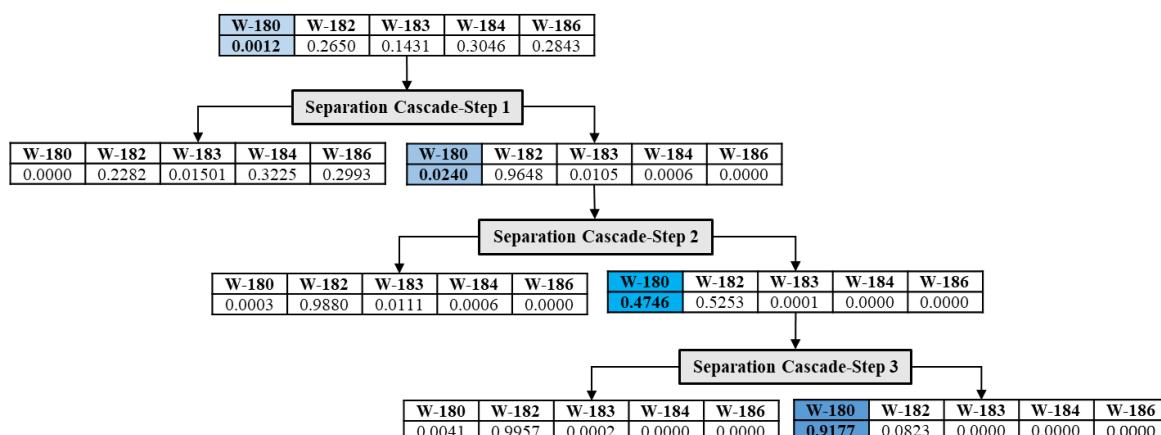
S	α_0	$f(mg/s)$	n
25	$2.5 \times f^{0.229}$	25	8

همانطور که پیشتر ارائه شده پارامترهای ارائه شده در جدول فوق فرضی است و در این مقاله تنها روش کار و استراتژی جداسازی ارائه می‌شود که مستقل از تعداد مراحل و تعداد واحد جداسازی است.

با توجه به موارد مطرح شده ورودی های اصلی و ثابت کد عبارتند از مشخصات خوراک (شامل تعداد ایزوتوپ و غلظت هر یک در خوراک طبیعی)، تعداد مراحل آبشار، تعداد واحد جداسازی در هر مرحله، فاکتور جداسازی و نرخ جریان خوراک بهینه در هر واحد جداسازی. اما سایر پارامترهای ورودی مورد نیاز عبارتند نرخ جریان خوراک ورودی به آبشار، برش آبشار و برش مراحل و نرخ جریان ورودی به مراحل که توسط طراح در گامهای زمانی مختلف بهینه می‌شود.

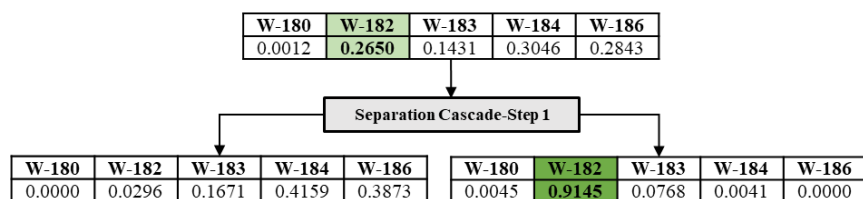
در نهایت جداسازی در چند گام جداسازی انجام می‌شود که در هر گام مقدار غنا محاسبه شده و محصول سبک و یا سنگین هر مرحله به عنوان خوراک در گام بعدی وارد آبشار می‌شود تا در نهایت غنای ایزوتوپ مورد نظر مطابق الگوریتم ارائه شده به بیش از ۹۰ درصد برسد.

همانطور که از جدول (۳) و شکل‌های (۵-۹) ملاحظه می‌شود، تعداد گام‌های جداسازی به ترتیب برای ایزوتوپ‌های اول تا پنجم برابر با سه، یک، چهار، دو و یک می‌باشد. معمولاً در جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار غنی کردن ایزوتوپ‌های انتهایی نسبت به ایزوتوپ میانی چالش کمتری دارد. در این مورد می‌توان به جداسازی W-186 اشاره نمود که غنای آن از ۲۸٪ در خوراک در یک گام جداسازی به ۹۱٪ می‌رسد. اما برخلاف انتظار تنها میانی یا انتهایی بودن ایزوتوپ هدف در جداسازی ایزوتوپی تأثیر گذار نیست. بلکه غلظت ایزوتوپ هدف در جریان خوراک نیز بسیار حائز اهمیت است. مثلاً ایزوتوپ W-180 با توجه به غنای بسیار کم آن در خوراک باید در ۳ گام جداسازی از زنجیره عبور داده شود تا غنای آن به مقدار مورد نظر برسد. همچنین ایزوتوپ دوم تنگستن (W-182) با توجه به اینکه غلظت بسیار بیشتری نسبت به ایزوتوپ اول دارد، به عنوان ایزوتوپ انتهایی عمل کرده و بسیار سریعتر از ایزوتوپ اول به غنای مورد نظر می‌رسد. اما برای ایزوتوپ چهارم (W-184) که از نظر جایگاه معادل ایزوتوپ دوم (W-182) در نظر گرفته می‌شود یک گام جداسازی بیشتر نسبت به آن نیاز است. علت این موضوع نیز مربوط به غنای ایزوتوپ‌های ابتدایی و انتهایی است. با توجه به اینکه غنای ایزوتوپ آخر در کنار ایزوتوپ چهارم بیشتر از ایزوتوپ اول در کنار ایزوتوپ دوم است، لذا در مقادیر بالای غنی‌سازی برای ایزوتوپ مجاور خود مزاحمت ایجاد کرده و چالش جداسازی بیشتر می‌شود. بنابراین برای ایزوتوپ چهارم نیاز به استفاده از دو گام جداسازی نسبت به ایزوتوپ اول است. در مورد ایزوتوپ اول تذکر این نکته لازم است که برخلاف این موضوع که این ایزوتوپ انتهایی است اما غلظت آن در خوراک بسیار کمتر بوده و با توجه به غلظت بسیار بیشتر ایزوتوپ دوم، جداسازی پیچیده‌ای دارد. زیرا غلظت ایزوتوپ دوم مقدار غلظت کم ایزوتوپ اول را تحت تأثیر قرار داده و مانع از افزایش غنای ایزوتوپ اول در یک گام می‌شود. سخت‌ترین جداسازی ایزوتوپی پس از ایزوتوپ اول، مربوط به ایزوتوپ سوم است. همانطور که ملاحظه می‌شود این ایزوتوپ علاوه بر اینکه یک ایزوتوپ میانی است، بلکه در میان ایزوتوپ‌های دوم و چهارم با غنای بیشتر قرار گرفته است که این مسئله جداسازی را پیچیده‌تر می‌کند. بنابراین بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد هر اندازه غنای ایزوتوپ در خوراک کمتر شود و یا اینکه ایزوتوپ میانی‌تر باشد علاوه بر پیچیدگی‌های بیشتر جهت جداسازی، تعداد گام‌های بیشتری برای رسیدن به غنای بالا لازم است.



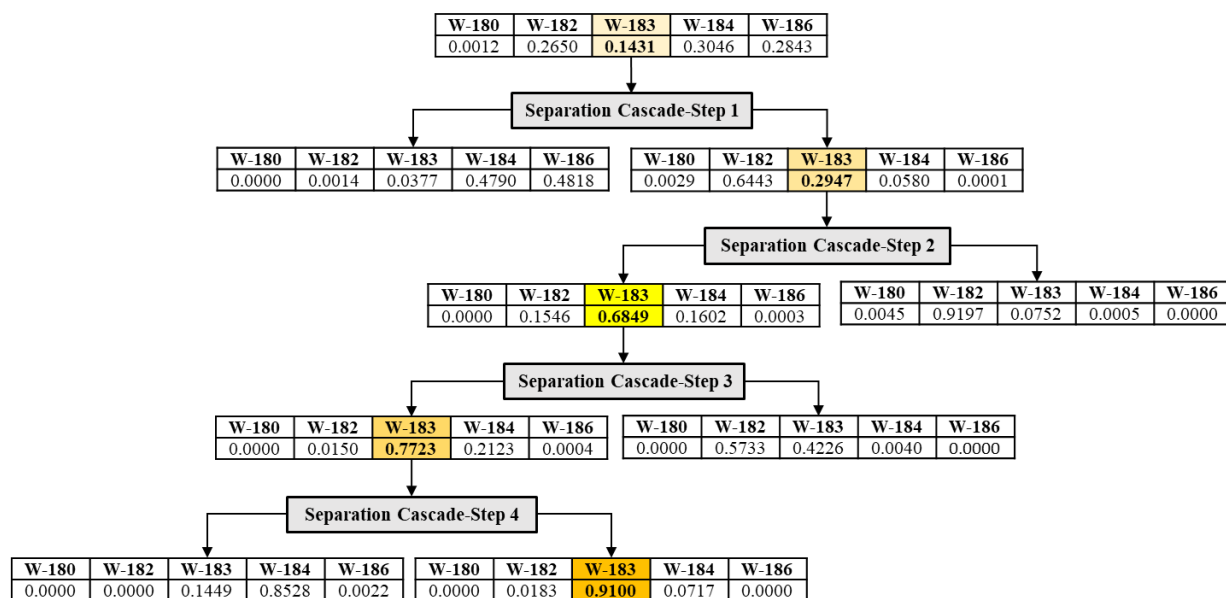
شکل ۵. مراحل جداسازی ایزوتوپ W-180

Figure 5. Separation steps for W-180



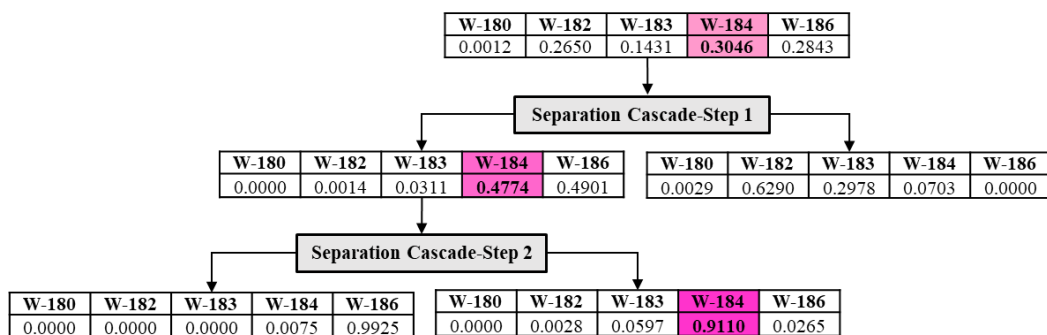
شکل ۶. مراحل جداسازی ایزوتوپ W-182

Figure 6. Separation steps for W-182



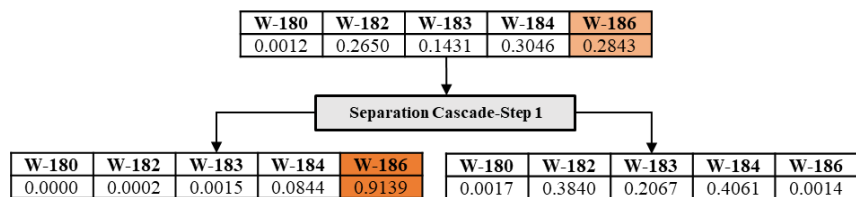
شکل ۷. مراحل جداسازی ایزوتوپ W-183

Figure 7. Separation steps for W-183



شکل ۸. مراحل جداسازی ایزوتوپ W-184

Figure 8. Separation steps for W-184



شکل ۹. مراحل جداسازی ایزوتوپ W-186

Figure 9. Separation steps for W-186

در جدول (۳) پارامترهای اصلی محاسبه شده در هر گام جداسازی ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود در جداسازی ایزوتوپ‌های انتهایی امکان تزریق خوراک به زنجیره بیشتر می‌باشد اما در گام‌های مربوط به ایزوتوپ‌های میانی این امکان فراهم نیست. همچنین توجه به این نکته لازم است که مقدار نرخ خوراک مورد نیاز در گام‌های مختلف برای هر ایزوتوپ متفاوت از سایر ایزوتوپ‌هاست. علاوه بر آن همان‌طور که برای ایزوتوپ‌های ۱، ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، مقدار نرخ جریان خوراک زنجیره در گام‌های متوالی به ترتیب کاهش می‌یابد. علت کاهش یافتن نرخ جریان خوراک را می‌توان این‌گونه توجیه نمود که با افزایش غنا در هر گام جداسازی مقدار محصول به ترتیب کاهش می‌یابد زیرا خوراک هر گام برابر است با نرخ جریان از گام قبل که به تدریج کاهش می‌یابد. علت تفاوت در مقدار نرخ جریان خوراک در جداسازی ایزوتوپ‌های مختلف نیز به مقدار غنای آنها در خوراک و برش زنجیره و سایر پارامترهای فرایندی می‌باشد.

جدول ۳. پارامترهای اصلی آبشار مربعی در هر گام جداسازی

Table 3. the main parameters of the square cascade at each separation steps

Isotope	W-180			W-182	W-183				W-184		W-186
Separation Steps	1	2	3	1	1	2	3	4	1	2	1
Cascade Feed (mg/s)	7.0	4.5	4.9	4.0	6.0	5.4	4.5	3.8	5.5	4.0	10.0
Cascade Cut	0.05	0.05	0.52	0.27	0.41	0.64	0.23	0.81	0.42	0.52	0.69
s_f	11	12	11	14	10	12	17	17	12	12	11

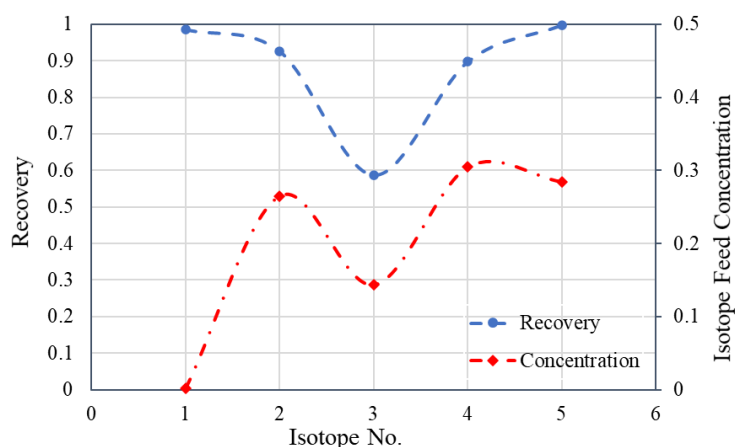
مطابق جدول (۴) ضریب بازیابی به ترتیب برای جداسازی ایزوتوپ‌های تنگستن برابر با ۹۸/۵٪، ۹۲/۵٪، ۵۸/۶٪، ۸۹/۷٪ و ۹۹/۷٪ می‌باشد. یعنی اگر مقدار خوراک اولیه برابر با ۱۰۰ کیلوگرم فرض شود، مقدار جرم محصول به ترتیب برابر با ۱۱۸ گرم، ۲۴/۵ کیلوگرم، ۸/۴ کیلوگرم، ۲۷/۳ کیلوگرم و ۲۸/۳ کیلوگرم خواهد شد.

جدول ۴. تعداد گام‌های جداسازی، مقدار محصول و ضریب بازیابی برای جداسازی ایزوتوپ‌های تنگستن

Table 4. Number of separation steps, the amount of product, and the recovery factor for the separation of tungsten isotopes

Isotope	Separation Steps	Product	Recovery
W-180	3	118gr	98.5%
W-182	1	24.5kg	92.5%
W-183	4	8.4kg	58.6%
W-184	2	27.3kg	89.7%
W-186	1	28.3kg	99.7%

به منظور جمع‌بندی و بیان تاثیر شماره ایزوتوپ و غنای آن بر میزان جداسازی، شکل (۱۰) ارائه شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود ایزوتوپ W-180 که یک ایزوتوپ انتهایی است علی‌رغم تعداد گام جداسازی بالا اما ضریب بازیابی بالایی دارد زیرا در گام‌های مختلف تنها از جریان محصول سبک جدا می‌شود و بنابراین دور ریز زیادی ندارد. ایزوتوپ دوم چون غنای بسیار بیشتری نسبت به ایزوتوپ اول دارد سریعتر افزایش غنا را داشته و با یک بار عبور از زنجیره به غنای هدف می‌رسد که بر خلاف آن مقداری از ضریب بازیابی آن نسبت به ایزوتوپ اول کاسته می‌شود زیرا با اعمال پارامترهای فرایندی، افزایش غنای ایزوتوپ دوم در نهایت منجر به افزایش غنای ایزوتوپ اول خواهد شد. همچنین مقداری از ایزوتوپ دوم در جریان محصول سنگین قرار می‌گیرد که این موضوع تابع تعداد مراحل زنجیره و فاکتور جداسازی آن بوده و در عمل قابل حذف نیست. در نهایت ایزوتوپ سوم W-183 با توجه به اینکه میانی بوده و غنای آن نسبت به ایزوتوپ-های مجاور کمتر است به راحتی جدا نشده و نیاز به ۴ گام جداسازی دارد و این موضوع دور ریز ایزوتوپ هدف را بیشتر کرده و در نهایت مقدار ضریب بازیابی آن کاهش می‌یابد. در میان این پنج ایزوتوپ، بیشترین ضریب بازیابی به ایزوتوپ آخر اختصاص دارد که دور از ذهن نبود. زیرا علاوه بر اینکه ایزوتوپ انتهایی است بلکه غنای بالایی نیز در خوراک دارد. ضریب بازیابی ایزوتوپ چهارم نیز نسبت به ایزوتوپ دوم کمتر است و این موضوع به تعداد دفعات کمتر استفاده از زنجیره و غنای ایزوتوپ مجاور آن‌ها بستگی دارد. مطابق نتایج بدست آمده و همان‌گونه که انتظار می‌رود، با افزایش تعداد گام‌های جداسازی که متاثر از غنای ایزوتوپ در خوراک و میانی و یا انتهایی بودن آن است در حالت کلی مقدار ضریب بازیابی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰. ضریب بازیابی ایزوتوپ‌های تنگستن در مقایسه با میزان غنای آن‌ها در جریان خوراک

Figure 10. Recovery factor of tungsten isotopes in comparison to their concentration in the feed stream

در تایید نتایج بدست آمده برای جداسازی ایزوتوپ‌های تنگستن می‌توان به مرجع [۱۴] مراجعه نمود. این مرجع جداسازی ایزوتوپی تنگستن را در یک زنجیره طویل با ۸۰ مرحله بررسی کرده و غنی سازی را تا مقادیر بالا برای هر ایزوتوپ انجام نداده و تنها به بررسی تاثیر برش زنجیره و اهمیت انتخاب مقدار آن بر جداسازی ایزوتوپ هدف پرداخته است. اما در آن مقاله نیز اشاره شده است که جداسازی ایزوتوپ اول و دوم برخلاف انتظار بوده که به مقدار غنای آنها در خوراک مربوط است.

۵- بحث و نتیجه گیری

در این کار تحقیقاتی یک کد محاسباتی تهیه شده است که با استفاده از آن استراتژی جداسازی ایزوتوپ هدف در جریان سبک و یا سنگین آبشار مشخص می‌شود. کد تهیه شده با تغییر پارامترهای آبشار مربعی به مدل‌سازی آن در هرگام و جداسازی ایزوتوپ‌های تنگستن طبیعی متناسب با ترکیب درصد ایزوتوپ‌ها می‌پردازد. در این مقاله به مقایسه نتایج جداسازی پنج ایزوتوپ پایدار تنگستن با استفاده از آبشار مربعی پرداخته شد. در این راستا از یک آبشار مربعی با ۲۵ مرحله استفاده شد. تعداد دفعات استفاده از آبشار جهت جداسازی ایزوتوپ‌های تنگستن تا غنای بیش از ۹۰٪ به ترتیب برابر با ۳، ۱، ۴، ۲ و ۱ گام می‌باشد. همچنین ضریب بازیابی برای ایزوتوپ‌ها به ترتیب برابر با ۹۸/۵، ۹۲/۵، ۵۸/۶، ۸۹/۷ و ۹۹/۷ درصد می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که علاوه بر میانی یا انتهایی بودن ایزوتوپ‌ها در خوراک، غلظت آنها نیز در خواک بسیار مهم می‌باشد که این امر تعداد دفعات استفاده از آبشار و گام‌های جداسازی را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد. این استراتژی برای غنی‌سازی تمام ایزوتوپ‌های پایدار قابل استفاده بوده و در صورتی که بتوان از آبشار با تعداد مراحل بیشتر استفاده کرد و یا اینکه واحد جداسازی با فاکتور جداسازی بالا در دسترس باشد، تعداد گام‌های جداسازی کمتر و در نتیجه مقدار محصول به دست آمده بیشتر شده و به عبارت دیگر ضریب بازیابی آبشار بیشتر می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Khooshechin, S., Mansourzadeh, F., Imani, M., Safdari, J., & Mallah, M. H. (2021). Optimization of flexible square cascade for high separation of stable isotopes using enhanced PSO algorithm. *Progress in Nuclear Energy*, 140, 103922.
- [2] Sulaberidze, G. A., & Borisevich, V. D. (2001). Cascades for separation of multicomponent isotope mixtures. *Separation science and technology*, 36(8-9), 1769-1817.
- [3] Zeng, S., & Ying, C. (2000). A method of separating a middle component in multicomponent isotope mixtures by gas centrifuge cascades. *Separation science and technology*, 35(14), 2173-2186.
- [4] Raichura, R., Al-Janabi, M., & Langbein, G. (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), 327-356.
- [5] Mansourzadeh, F., Ghorbanpour Khamseh, A., Safdari, J., Norouzi, A., & Khajenouri, M. (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.
- [6] Aydisheh, H. m., Rostami, R., & Hamaneh, M. M. M. (2025). Electrochemical Plating of Selenium Nanoparticles on Titanium Oxide Nanotubes Modified with Tungsten by Simultaneous Anodizing Method for Application in Solar Supercapacitors. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(141), 77-88, In Persian.
- [7] Wang, G., Yang, Z., Xu, Y., Zeng, Y., & Xu, J. (2026, 2026/01/01/). A novel method for high-precision tungsten isotope measurements on small-size samples. *Talanta*, 297, 128684. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.talanta.2025.128684>
- [8] Jalbert, M., Munro, J. J., & Medich, D. (2024, 2024/08/01/). Feasibility of a Tungsten-181 HDR brachytherapy source: Analysis of isotope production and source dosimetry. *Applied Radiation and Isotopes*, 210, 111365. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2024.111365>

- [9] Ragheb, M. (2015). Isotopic separation and enrichment. *Nuclear, plasma and radiation science. Inventing the future*. https://www.researchgate.net/publication/242126786_ISOTOPIC_SEPARATION_AND_ENRICHMENT. Accessed, 15.
- [10] Kholpanov, L. P., Tsyuan'sin', S., Sulaberidze, G. A., & Borisevich, V. D. (2008, 2008/01/01). Calculation of a square cascade with losses of the working material in the steps and pipelines during separation of multicomponent isotopic mixtures. *Atomic Energy*, 104(1), 23-32. <https://doi.org/10.1007/s10512-008-0005-y>
- [11] Smirnov, A. Y., Sulaberidze, G. A., Xie, Q., & Borisevich, V. D. (2015, 2015/03/01/). Design of cascade with locally enlarged flow for enrichment of intermediate components of multi-isotope mixtures. *Chemical Engineering Research and Design*, 95, 47-54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.12.012>
- [12] Potapov, D. V., Sulaberidze, G. A., & Kholpanov, L. P. (2000, 2000/03/01). Designing a rectangular sectioned cascade by approximating the separation factor. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 34(2), 129-133. <https://doi.org/10.1007/BF02757829>
- [13] Orlov, A. A., A., U. A., P., S. V., & and Mymrina, D. F. (2018, 2018/03/24). Modeling of nonstationary processes during separation of multicomponent isotope mixtures. *Separation science and technology*, 53(5), 796-806. <https://doi.org/10.1080/01496395.2017.1399910>
- [14] Smirnov, A. Y., & Sulaberidze, G. (2014). Features of mass transfer of intermediate components in square gas centrifuge cascade for separating multicomponent mixtures. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 48, 629-636.
- [15] Szady, A. J. (1989, 1989/10/01/). Enrichment of chromium isotopes by gas centrifugation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 282(1), 277-280. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)90152-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-9002(89)90152-6)
- [16] Popov, G. E., Prusakov, V. N., Rudnev, A. I., Tikhomirov, A. V., & Voronin, A. V. (1995, 1995/08/15/). Centrifugal enrichment of chromium-50 for experiments on detecting solar neutrinos. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 362(2), 532-537. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-9002\(95\)00301-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0168-9002(95)00301-0)
- [17] Suvorov, I. A., & Tchel'tsov, A. N. (1993, 1993/09/15/). Enrichment of tellurium isotopes for pure ¹²³I production using gas ultra-centrifuges. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 334(1), 33-36.
- [18] Sosnin, L. Y., Tchel'tsov, A. N., Kuchelev, A. P., Remin, G. V., & Hobotov, A. A. (2002, 2002/03/11/). Centrifugal extraction of highly enriched ¹²⁰Te and ¹²²Te using the non-steady state method of separation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 480(1), 36-39. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)02044-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)02044-7)
- [19] Suvorov, I. A., Tchel'tsov, A. N., Sosnin, L. Y., Sazikin, A. A., & Rudnev, A. I. (2002, 2002/03/11/). Centrifugal extraction of highly enriched tin isotopes and increase of specific activity of the radionuclide ^{119m}Sn on the gas centrifuge cascade. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 480(1), 22-28. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(01\)02042-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0168-9002(01)02042-3)
- [20] Tchel'tsov, A. N., & Sosnin, L. Y. (2004, 2004/03/21/). Centrifugal enrichment of selenium isotopes and their application to the development of new technologies and to the experiments on physics of weak interaction. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 521(1), 156-160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nima.2003.11.383>
- [21] Tchel'tsov, A. N., Sosnin, L. Y., Shipilov, Y. D., Zaozersky, Y. P., Khamylov, V. K., & Pochekutova, T. S. (2006, 2006/05/15/). Centrifugal enrichment of zinc isotopes, their application in medicine and in increasing radiation safety in nuclear power plants. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators,*

- [22] Borisevich, V. D., Litvin, Y. V., & Sulaberidze, G. A. (2007, 2007/12/01). Calculational study of the enrichment of cadmium isotopes in gas centrifuges. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 41(6), 851-858. <https://doi.org/10.1134/S0040579507060103>
- [23] Babaev, N. S., Cheltsov, A. N., Sazykin, A. A., Sosnin, L. Y., & Kuchelev, A. P. (2010, 2010/02/11/). Centrifugal enrichment of mercury isotopes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 613(3), 473-476. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.10.006>
- [24] Cheltsov, A. N., Babaev, N. S., Sosnin, L. Y., Shipilov, Y. D., Bepalov, A. V., Mochalov, P. V., & Khamylov, V. K. (2014, 2014/02/01). Centrifugal enrichment of sulfur isotopes. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 299(2), 989-993. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2650-4>
- [25] Cheltsov, A. N., Sosnin, L. Y., & Khamylov, V. K. (2014, 2014/02/01). Centrifugal enrichment of nickel isotopes and their application to the development of new technologies. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 299(2), 981-987. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2755-9>
- [26] Mansourzadeh, F., Safdari, J., Khamseh, A. G., Norouzi, A., & Khajenouri, M. (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), 2074-2087.
- [27] Mansourzadeh, F., Shadman, M. M., Sabet, J. K., & Ghazanfari, V. (2023, 2023/05/13). 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. <https://doi.org/10.1007/s41365-023-01217-z>
- [28] Mansourzadeh, F., Safdari, J., Ghorbanpour Khamseh, A., & Mallah, M. (2022). Separation of xenon stable isotopes using square cascade. *Journal of Nuclear Science and Technology (JONSAT)*, 43(4), 109-117.

Development of a Computational Code for Determining the Separation Strategy of Tungsten Isotopes in a Square Cascade

Fatemeh Mansourzadeh¹, Valiyollah Ghazanfari², Mohammad Mahdi Shadman^{1*}

1. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran.

2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Isfahan, Iran

*Corresponding author: mshademan@aeoi.org.ir

Abstract

In recent years, the importance, applications, and development of stable isotopes in various scientific fields have been remarkably significant. A key challenge in stable isotope separation is achieving the maximum desired concentration of the target isotope of an element. To this end, determining the number of separation passes (i.e., the number of times the cascade is reused) and the corresponding cascade parameters for each pass is crucial for optimal separation. In this research, a computational code has been developed to determine the separation strategy of the target isotope in either the light or heavy stream of the cascade. The code performs the separation of the target isotope by adjusting the parameters of a square cascade and simulating it through consecutive passes. This paper addresses the separation of the first, second, and third isotopes of natural tungsten using a square cascade to enrichments exceeding 91%. Subsequently, the separation results for intermediate and end isotopes are compared. In this investigation, the concentrations of W-180, W-182, W-183, W-184, and W-186 were increased from their natural feed values of 0.0012, 0.2650, 0.1431, 0.3046, and 0.2843 to 0.9177, 0.9145, 0.9100, 0.9110, and 0.9139, respectively. Accordingly, the recovery factors for the target isotopes reached 98.5%, 92.5%, 58.6%, 89.7%, and 99.7%, respectively.

Keywords: Stable isotopes, Isotope separation, Tungsten, Square cascade, Separation strategy