



## جداسازی ایزوتوپ نیکل ۶۰ با استفاده از زنجیره های ناپایدار NFSW

ایمانی، مرتضی<sup>۱\*</sup> - کشتکار، علیرضا<sup>۱</sup> - رشیدی، عباس<sup>۲</sup> - کریمی ثابت، جوادی<sup>۱</sup> - نوروزی، علی<sup>۳</sup> - فرزانه اعزازی<sup>۱</sup>

۱: سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای، تهران - ایران

۲: دانشگاه مازندران، دانشکده مهندسی، بابلسر - ایران

۳: سازمان انرژی اتمی، شرکت فناوری‌های پیشرفته ایران، تهران - ایران

**چکیده:** جداسازی ایزوتوپ های پایدار به منظور استفاده در پزشکی و سایر علوم مورد توجه می باشد. در این مقاله برای جداسازی ایزوتوپ نیکل ۶۰ که برای تولید رادیو ایزوتوپ کبالت ۶۱ کاربرد دارد از زنجیره های ناپایدار NFSW<sup>۱</sup> استفاده شده است. در ابتدا معادلات بقای جرم برای این نوع از زنجیره ها به صورت گذرا ارائه شده و نحوه حل به کمک روش تفاضل محدود کرنک نیکلسون و روش تکرار q به منظور خطی سازی معادلات بیان شده است. برای صحت گذاری کد نوشته شده از نتایج زنجیره ناپایدار NFSW موجود برای عنصر زنون استفاده می شود و در انتها برای جداسازی ایزوتوپ نیکل ۶۰، در جریان خروجی زنجیره NFSW با ۱۵ مرحله، غلظت ۹۹ درصد حاصل می شود.

**واژه‌های کلیدی:** نیکل ۶۰، زنجیره نامتداول، حالت گذرا، تک خروجی بدون جریان خوراک

**مقدمه:** جداسازی ایزوتوپ های پایدار به منظور استفاده در پزشکی، صنایع و کشاورزی مورد اهمیت می باشد، که جداسازی ایزوتوپی عناصر چند جزئی به تازگی در کشور مورد توجه قرار گرفته است. جداسازی ایزوتوپی عناصر در زنجیره‌هایی از ماشین‌های جداساز صورت می پذیرد که پرکاربردترین این زنجیره‌ها، زنجیره‌های غنی - سازی با استفاده از ماشین سانتریفیوژ گازی می باشد. این زنجیره‌ها بصورت متداول شامل یک جریان ورودی و

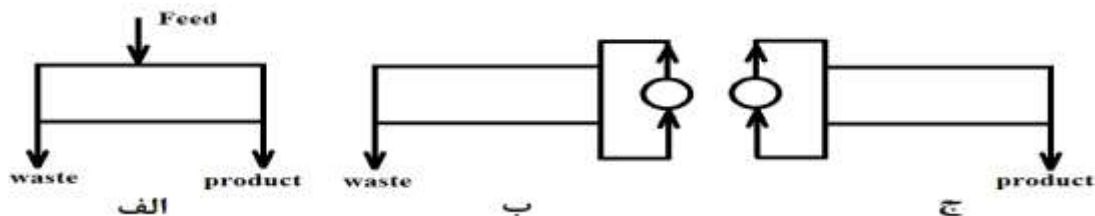


دو جریان خروجی (یک جریان محصول و یک جریان پسماند) بوده و در شرایط پایا کار می‌کنند. به منظور جداسازی عناصر چند جزئی با غلظت خوراک ورودی پایین برای ایزوتوپ هدف در این زنجیره‌ها، می‌بایست از چندین زنجیره بصورت متوالی استفاده کرد تا غلظت مورد نیاز برای ایزوتوپ هدف حاصل شود. استفاده از این زنجیره‌های متدوال، نیازمند هزینه ساخت چندین زنجیره و تامین خوراک برای این زنجیره‌ها می‌باشد. همچنین مشکلات تنظیم ضریب برش بین مراحل و ضریب برش زنجیره نیز وجود خواهد داشت. با توجه به وجود این مشکلات و هزینه‌های زیاد برای استفاده از زنجیره‌های متدوال، در سال ۲۰۰۴ زنجیره‌های ناپایدار NFSW که شامل تنها یک خروجی بوده و فاقد جریان خوراک می‌باشند برای اولین بار توسط یانفنگ و همکاران برای عنصر زینان پیشنهاد شدند و مقایسه بین زنجیره‌های متدوال و زنجیره‌های گذرا صورت پذیرفت و نتایج نشان دهنده برتری این زنجیره‌ها بود [۱]. این زنجیره‌ها با هدف جداسازی ایزوتوپ‌های میانی عنصر زینان که جداسازی این ایزوتوپ‌ها توسط زنجیره‌های متدوال و زنجیره‌های SW<sup>۲</sup> مشکل می‌باشد، ارائه شدند [۲]. در این زنجیره‌ها خوراک زنجیره از یک مخزن که در سمت پسماند و یا محصول زنجیره قرار گرفته است تامین شده و یکی از خروجی‌های زنجیره حذف می‌شود. جریان حذف شده پس از ورود به مخزن مجدد به همان مرحله باز می‌گردد. این زنجیره‌ها مربعی بوده و جریان ورودی به هر مرحله یکسان می‌باشد. جریان‌ها بصورت پایا و غلظت‌ها با گذر زمان تغییر می‌کنند. در این زنجیره با بررسی غلظت جریان خروجی از زنجیره بر حسب زمان مشاهده می‌شود که در ابتدا ایزوتوپ‌های سبک از زنجیره خارج می‌شوند سپس ایزوتوپ‌های میانی، و در انتها ایزوتوپ‌های سنگین که در



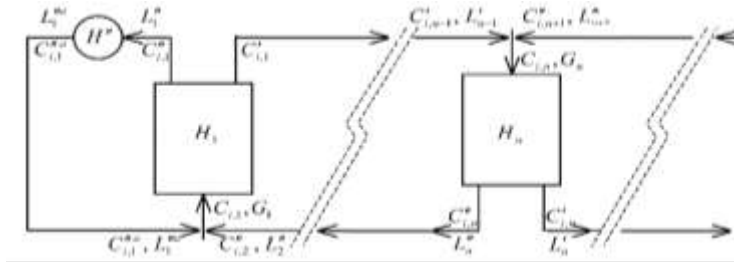
هر زمان غلظت ایزوتوپ‌ها دارای مقدار بیشینه بوده و از همین رو می‌توان از این ویژگی استفاده کرده و در زمان‌های خاص جریان محصول را جدا نمود و تمامی ایزوتوپ‌ها را با غلظت بالا استخراج نمود. در این مقاله در ابتدا معادلات این زنجیره‌ها نوشته شده سپس با روش تفاضل محدود کرنک نیکلسون گسسته‌سازی شده و با استفاده از روش تکرار  $q$  خطی می‌شوند. برای صحنه‌گذاری کد نوشته شده از نتایج زنجیره ناپایدار NFSW موجود برای عنصر زینان استفاده شده و در انتها برای جداسازی ایزوتوپ نیکل  $^{60}$ ، نتایج یک زنجیره ناپایدار با تعداد پانزده مرحله با قرار گیری مخزن خوراک در سمت پسماند زنجیره ارائه شده است و مشاهده می‌شود با استفاده از یک زنجیره می‌توان غلظت ایزوتوپ نیکل  $^{60}$  را به غلظت بالا ۹۹ درصد رساند.

**مواد و روش کار:** در شکل ۱ در قسمت الف شمای زنجیره‌های متداول نمایش داده شده است. این زنجیره‌ها شامل دو خروجی بوده و عملکرد آنها در شرایط پایای جریان‌ها و غلظت‌ها می‌باشد. در قسمت ب و ج شکل ۱ زنجیره ناپایدار NFSW بدون داشتن جریان خوراک و داشتن تنها یک خروجی نمایش داده شده است در قسمت ب، مخزن خوراک در سمت محصول قرار گرفته است، بنابراین در این زنجیره از خروجی ابتدا ایزوتوپ‌های سنگین، سپس ایزوتوپ‌های میانی و در انتها ایزوتوپ‌های سبک خارج می‌شوند، در قسمت ج، مخزن خوراک در سمت پسماند قرار گرفته، پس بطور عکس در این زنجیره از خروجی ابتدا ایزوتوپ‌های سبک سپس ایزوتوپ‌های میانی و در انتها ایزوتوپ‌های سنگین خارج می‌شوند. در این زنجیره‌ها خوراک زنجیره از مخزن متصل به زنجیره تامین می‌شود، جریان خروجی از مخزن بیشتر از جریان ورودی به مخزن می‌باشد بنابراین مخزن بتدریج تخلیه می‌شود، میزان اختلاف جریان ورودی و خروجی به مخزن برابر جریان خروجی از زنجیره می‌باشد. با توجه به مطالب بیان شده مدت زمان عملیاتی بودن این زنجیره‌ها به میزان موجودی مخزن خوراک و نرخ تخلیه آن بستگی خواهد داشت.



شکل ۱: نمایش زنجیره‌های مرسوم و زنجیره‌های NFSW

در زنجیره‌های ناپایدار NFSW جریان ورودی به هر مرحله یکسان می‌باشد و زنجیره ساختار مربعی خواهد داشت. جریان‌ها در این زنجیره بصورت پایا در نظر گرفته شده و تنها معادلات بقای جرم ایزوتوپ مطلوب در حالت گذرا حل می‌شوند.



شکل ۲: نمایش ساختار زنجیره NFSW با قرار گرفتن مخزن خوراک در سمت پسماند زنجیره [۱]

برای محاسبه غلظت‌ها، قانون بقای جرم برای ایزوتوپ  $i$  در مرحله شماره  $n$  در حالت گذرا بصورت زیر نوشته می‌شود [۳].

$$\frac{\partial H_n[\theta_n C'_{i,n} + (1 - \theta_n) C''_{i,n}]}{\partial t} = L''_{n+1} C''_{i,n+1} + L'_{n-1} C'_{i,n-1} - L''_n C''_{i,n} - L'_n C'_{i,n} \quad (1)$$

در معادله (۱)  $H_n$  موجودی گاز مرحله،  $\theta_n$  ضریب برش مرحله،  $C'_{i,n}$  غلظت ایزوتوپ  $i$  در جریان غنی شده،  $C''_{i,n}$  غلظت ایزوتوپ  $i$  در جریان تهی شده،  $L''_n$  نرخ جریان تهی شده و  $L'_n$  نرخ جریان غنی شده خروجی از مرحله شماره  $n$  می‌باشد. برای مخزن  $H''$  در نظر گرفته شده نیز معادله بقای جرم ایزوتوپ  $i$  و معادله بقا برای جریان‌ها بصورت زیر نوشته می‌شود [۴].

$$\frac{\partial H'' C''_{i,n}^a}{\partial t} = L''_1 C''_{i,1} - L''_1^a C''_{i,1}^a \quad (2)$$

$$\frac{\partial H''}{\partial t} = L''_1 - L''_1^a = -P \quad (3)$$

در معادله (۲) بالا نویس  $a$  نشان دهنده جریان و غلظت پس از مخزن می‌باشد و در معادله (۳)  $P$  نرخ جریان خروجی از زنجیره می‌باشد. بطور مشابه معادله (۲) را می‌توان برای حالتی که مخزن خوراک در سمت محصول قرار دارد نوشت. با کمک رابطه فاکتور جداسازی مراحل و شرط اینکه مجموع غلظت ایزوتوپ‌ها در تمامی جریان‌ها برابر یک می‌باشد و با بکارگیری روش تفاضل محدود کرنک نیکلسون برای گسسته‌سازی معادلات و استفاده از روش تکرار  $q$  برای خطی‌سازی، معادلات (۱)، (۲) و (۳) حل شده، و غلظت ایزوتوپ‌ها بر حسب زمان محاسبه می‌شود. نحوه گسسته‌سازی و الگوریتم حل معادلات در مراجع [۴، ۳، ۱] شرح داده شده است.

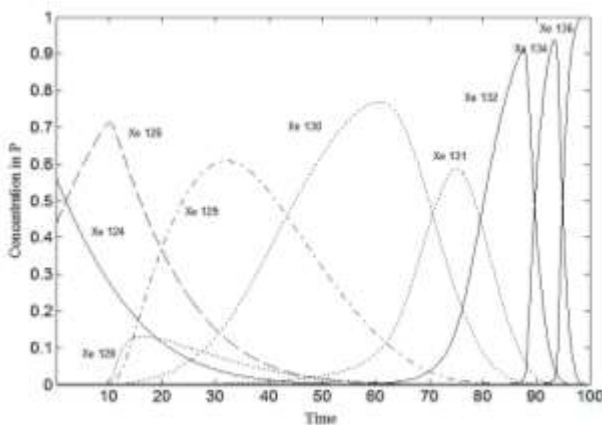
برای صحت‌گذاری روش و شبیه‌سازی انجام شده از نتایج موجود در مرجع ۱ برای جداسازی عنصر زینان با

مشخصات زنجیره که در جدول ۱ ارائه شده، استفاده شده است [۱].

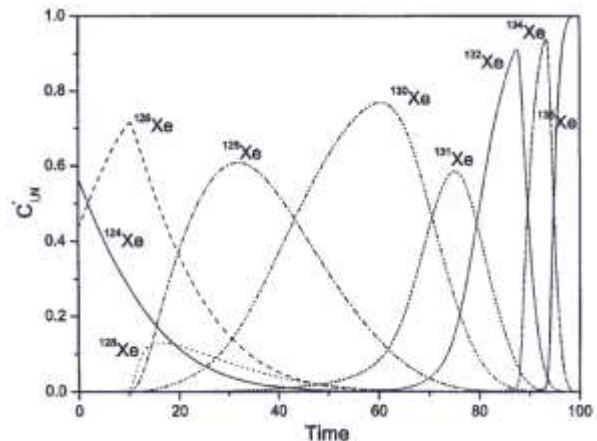
جدول ۱: مشخصات زنجیره مورد استفاده برای عنصر زینان [۱]

|                  |           |             |           |                 |           |                        |           |           |  |
|------------------|-----------|-------------|-----------|-----------------|-----------|------------------------|-----------|-----------|--|
| P=1              |           | $H'' = 100$ |           | $= 1.4\alpha_0$ |           | $L_{n=1,\dots,N} = 10$ |           | N=11      |  |
| غلظت جریان خوراک |           |             |           |                 |           |                        |           |           |  |
| Xe<br>124        | Xe<br>126 | Xe<br>128   | Xe<br>129 | Xe<br>130       | Xe<br>131 | Xe<br>132              | Xe<br>134 | Xe<br>136 |  |
| 0.07             | 0.15      | 0.03        | 0.2       | 0.25            | 0.1       | 0.1                    | 0.05      | 0.05      |  |

با مقایسه نتایج در شکل ۳ مشاهده می‌شود که نتایج یکسانی برای محاسبه غلظت ایزوتوپ‌های زینان در جریان خروجی بر حسب زمان توسط کد و مرجع ۱ حاصل شده است، بنابراین در ادامه از این کد برای جداسازی ایزوتوپ‌های نیکل استفاده می‌شود.



ب: نتایج حاصل از کد نوشته شده



الف: نتایج مرجع ۱

شکل ۳: مقایسه نتایج غلظت ایزوتوپ‌های زینان در جریان خروجی توسط کد و مرجع ۱

برای جداسازی ایزوتوپ‌های عنصر نیکل از زنجیره NFSW با مشخصات موجود در جدول ۲ استفاده می‌شود.

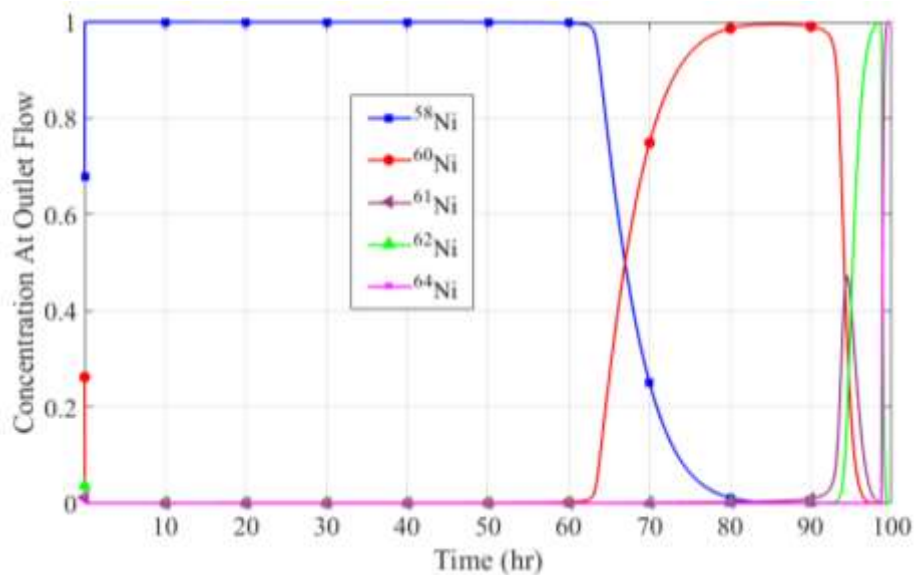
همانطور که طبق شکل ۴ مشاهده می‌شود ایزوتوپ‌های نیکل در جریان خروجی به ترتیب با یک غلظت بیشینه به مرور زمان خارج می‌شوند. همانطور که مشاهده می‌شود از ساعت صفر تا ساعت ۶۰ متوسط غلظت ایزوتوپ



نیکل ۵۸ در جریان خروجی برابر ۹۹ درصد و از ساعت ۸۰ تا ۹۰ متوسط غلظت ایزوتوپ نیکل ۶۰ در جریان خروجی زنجیره برابر ۹۹ درصد می‌باشد. با جمع آوری جریان خروجی در طول این مدت از ۱۰۰ گرم نیکل طبیعی موجود در مخزن خوراک متصل به زنجیره، ۱۰ گرم نیکل ۶۰ با غلظت ۹۹ درصد و ۶۰ گرم نیکل ۵۸ با غلظت ۹۹ درصد حاصل می‌شود.

جدول ۲: مشخصات زنجیره مورد استفاده برای عنصر نیکل

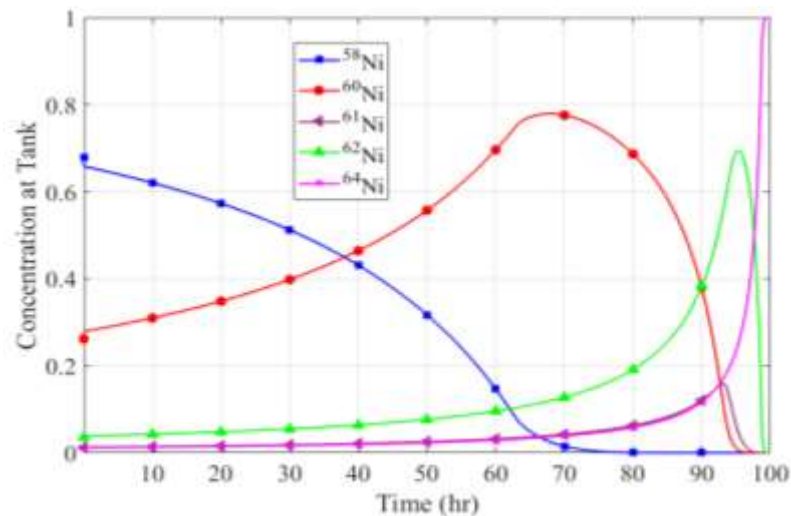
| $H''_1$          | $\frac{P}{(L'_N + P)}$ | P                | $\theta_{n=1,\dots,N}$ | $\alpha_0$       | n  |
|------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------|----|
| 100 gr           | 0.35                   | 1 gr/hr          | 0.50                   | 1.4              | 15 |
| غلظت مخزن خوراک  |                        |                  |                        |                  |    |
| $^{58}\text{Ni}$ | $^{60}\text{Ni}$       | $^{61}\text{Ni}$ | $^{62}\text{Ni}$       | $^{64}\text{Ni}$ |    |
| 0.679            | 0.262                  | 0.012            | 0.036                  | 0.011            |    |



شکل ۴: نمایش غلظت جریان خروجی بر حسب زمان

در شکل ۵ غلظت ایزوتوپ های نیکل موجود در مخزن خوراک بر حسب زمان نمایش داده شده است. در این

شکل باید به این نکته توجه کرد که در طول زمان موجودی مخزن بصورت خطی تخلیه می شود.



شکل ۴: نمایش غلظت جریان خروجی بر حسب زمان

### بحث و نتیجه گیری:

با استفاده از زنجیره‌های NFSW می‌توان ایزوتوپ نیکل ۵۸ و نیکل ۶۰ را با غلظت ۹۹ درصد از خروجی

زنجیره استخراج نمود و بر خلاف زنجیره‌های متداول که نیاز به چندین بار استفاده از زنجیره است تنها با یک

بار استفاده از زنجیره به غلظت بالا دست یافت. در یک زنجیره NFSW با ۱۵ مرحله و ظرفیت مخزن خوراک

طبیعی ۱۰۰ گرم، با جمع آوری جریان خروجی در ساعت ۸۰ الی ۹۰، ۱۰ گرم ایزوتوپ نیکل ۶۰ با غلظت ۹۹

درصد حاصل می‌شود.

مراجع:

1. Yanfeng Cao, Shi Zeng, Zengguang Lei & Chuntong Ying (2004) "Study of a Nonstationary Separation Method with Gas Centrifuge Cascade", Sep. Sci. Technol., 39:14, 3405-3429



بیست و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸ و ۷ اسفندماه ۱۳۹۸ - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



2. Zeng, S.; Ying, C. "Separating isotope components of small abundance". Sep. Sci. Technol. 2002, 37 (15), 3577–3598.
3. Zeng, S.; Ying, C. "A robust and efficient calculation procedure for determining concentration distribution of multicomponent mixture". Sep. Sci. Technol. 2000, 35 (4), 613–622.
4. Zeng, S.; Ying, C. "A second-order time-accurate method for determining the distribution of concentration distribution of multicomponent mixtures in separation cascades". Sep. Sci. Technol. 2000, 35 (5), 729–741.