



**جداسازی ایزوتوپ‌های عنصر تنگستن با استفاده از زنجیره‌های ناپایدار NFSW**  
مرتضی ایمانی<sup>(۱)</sup>، علیرضا کشتکار<sup>(۱)</sup>، عباس رشیدی<sup>(۲)</sup>، سید جابر صفدری<sup>(۱)</sup>، جواد کریمی  
ثابت<sup>(۱)</sup>، علی نوروزی\*<sup>(۲)</sup>

(۱): سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده مواد و سوخت هسته‌ای

(۲): شرکت فناوری های پیشرفته ایران

**چکیده:**

جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار به منظور استفاده در پزشکی و سایر علوم مورد توجه می‌باشد. در این مقاله برای جداسازی ایزوتوپ‌های عنصر تنگستن که شامل پنج ایزوتوپ پایدار می‌باشد از زنجیره ناپایدار NFSW<sup>۱</sup> استفاده شده است. در ابتدا معادلات بقای جرم برای این نوع از زنجیره‌ها بصورت گذرا ارائه شده و نحوه حل به کمک روش تفاضل محدود کرنک نیکلسون و روش تکرار  $q$  به منظور خطی‌سازی معادلات، بیان شده است. برای صحت‌گذاری کد نوشته شده از نتایج زنجیره ناپایدار NFSW موجود برای عنصر زینان استفاده شده و در انتها برای جداسازی ایزوتوپ‌های عنصر تنگستن، نتایج یک زنجیره ناپایدار NFSW با تعداد پانزده مرحله ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** زنجیره ناپایدار NFSW، عنصر تنگستن، حالت گذرا، جداسازی ایزوتوپی، روش تکرار  $q$

**Separation of tungsten isotopes using NFSW unstable cascade**

Imani, morteza<sup>(1)</sup>; keshtkar, alireza<sup>(1)</sup>; rashidi, abbas<sup>(2)</sup>; safdari, seyed jaber<sup>(1)</sup>; karimi  
sabet, javad<sup>(1)</sup>; noroozi, ali\*<sup>(2)</sup>

(1): Atomic Energy Organization, Nuclear Science and Technology Research Institute, Nuclear Materials and Fuel Research Institute

(2): Advanced Technology Company of Iran

**Abstract:** The Separation of stable isotopes is important for use in medicine and other sciences. In this paper, NFSW unstable cascade is used to separate tungsten isotopes, which consist of five stable isotopes. At first, the conservation of mass equation for these types of cascade are presented in transient condition, and the solution is arranged using the finite difference method of Crank Nicholson and the  $q$  iteration method, in order to linearize the equations. To validate the code, the results of the unstable NFSW cascade for the Xenon element were used, and finally, for the separation of tungsten isotopes, the results of an unstable cascade with fifteen stages are presented.

**Key words:** NFSW unstable cascade, tungsten element, transient state, isotope separation,  $q$  iteration method

<sup>۱</sup> No Feed and Single Withdrawal



## مقدمه:

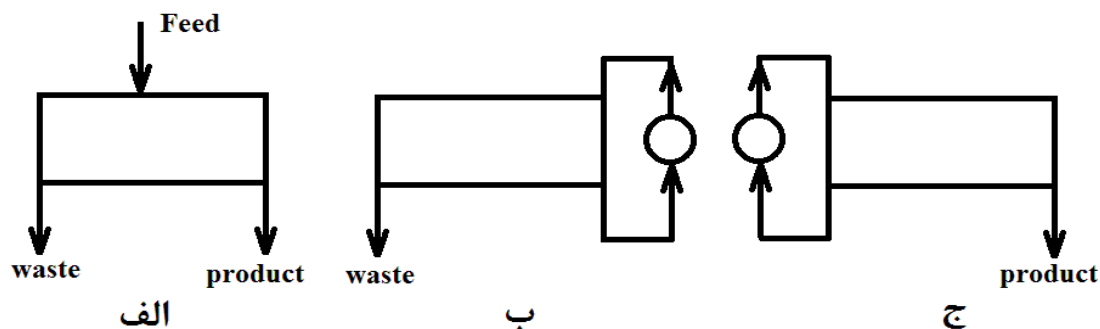
جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار به منظور استفاده در پزشکی، صنایع و کشاورزی مورد اهمیت می‌باشد، که جداسازی ایزوتوپی عناصر چند جزئی به تازگی در کشور مورد توجه قرار گرفته است. جداسازی ایزوتوپی عناصر در زنجیره‌هایی از ماشین‌های جداساز صورت می‌پذیرد که پرکاربردترین این زنجیره‌ها، زنجیره‌های غنی‌سازی با استفاده از ماشین سانتریفیوژ گازی می‌باشد. 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 متداول، 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 متداول، در سال ۲۰۰۴ زنجیره‌های ناپایدار NFSW که شامل تنها یک خروجی بوده و فاقد جریان خوراک می‌باشند برای اولین بار توسط زنگ و همکاران برای عنصر زینان پیشنهاد شدند [۱]. این زنجیره‌ها با هدف جداسازی ایزوتوپ‌های میانی عنصر زینان که جداسازی این ایزوتوپ‌ها توسط زنجیره‌های متداول و زنجیره‌های  $SW^2$  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 ایزوتوپ‌های عنصر تنگستن، نتایج یک زنجیره ناپایدار با تعداد پانزده

<sup>۲</sup> Single Withdrawal

مرحله با قرار گیری مخزن خوراک در سمت پسماند زنجیره ارائه شده است و مشاهده می‌شود با استفاده از یک زنجیره می‌توان غلظت تمامی ایزوتوپ‌های عنصر تنگستن به غیر از سبک‌ترین ایزوتوپ آن را که دارای غلظت پایین در مخزن خوراک می‌باشد را به غلظت بالا رساند.

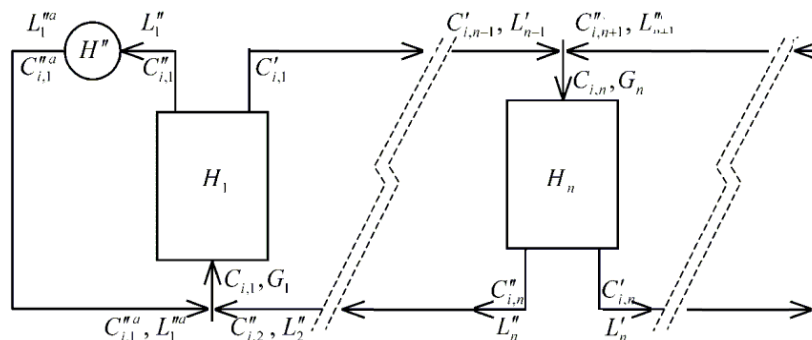
### مواد و روش کار:

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 زمانی 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 NFW 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 غنی‌شده،  $C''_{i,n}$  غلظت ایزوتوپ  $i$  در جریان تهی‌شده،  $L''_n$  نرخ جریان تهی‌شده و  $L'_n$  نرخ جریان غنی‌شده 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 [۱،۳،۴] شرح داده شده است.

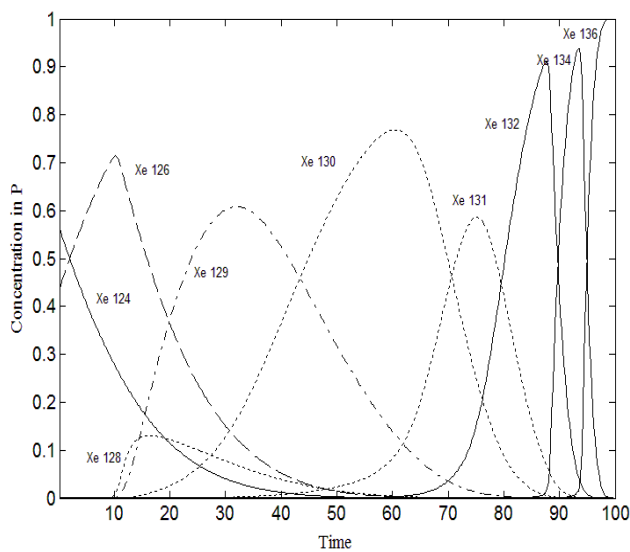
### نتایج:

برای صحنه‌گذاری 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].

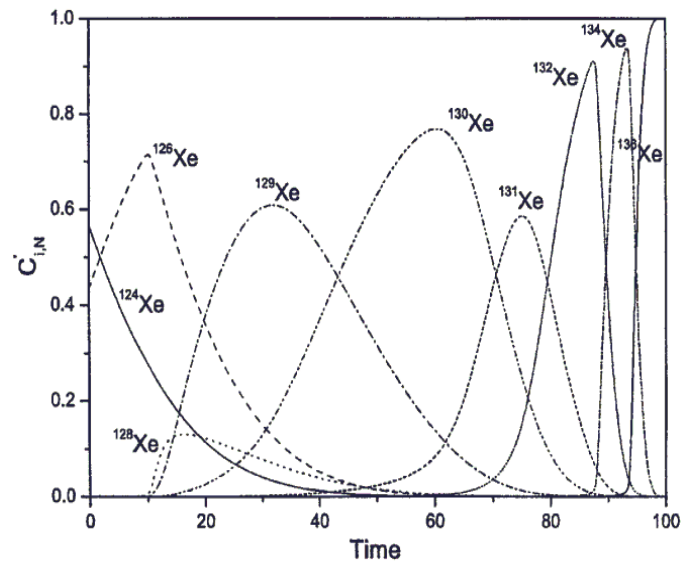
جدول ۱: مشخصات زنجیره مورد استفاده برای عنصر زینان [۱]

P=1		$H'' = 100$			$\alpha_0=1.4$		$L_{n=1,\dots,N}$		N=11
غلظت جریان خوراک									
Xe 124	Xe 126	Xe 128	Xe 129	Xe 130	Xe 131	Xe 132	Xe 134	Xe 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 تنگستن 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

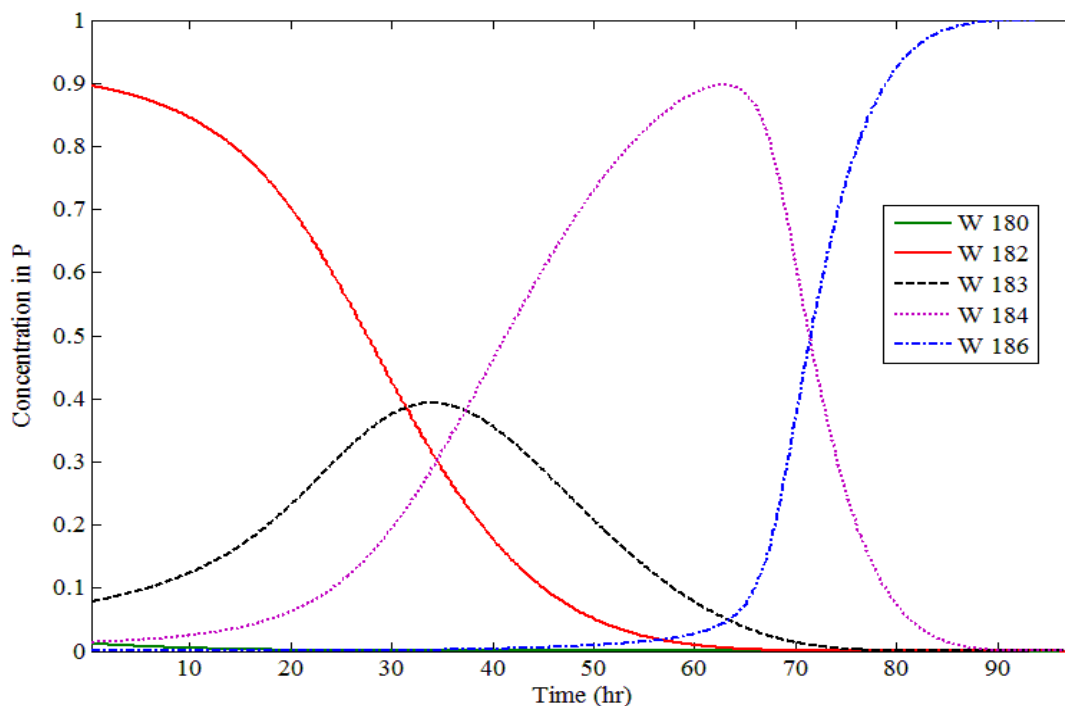
برای جداسازی ایزوتوپ‌های عنصر تنگستن از زنجیره NFSW با مشخصات موجود در جدول ۲ استفاده می‌شود. همانطور که طبق شکل ۴ مشاهده می‌شود ایزوتوپ تنگستن ۱۸۰ به دلیل غلظت پایین در مخزن خوراک در جریان خروجی هم افزایش قابل توجهی نخواهد داشت و برای جداسازی این ایزوتوپ می‌بایست از زنجیره‌های SW استفاده نمود، اما سایر ایزوتوپ‌های تنگستن در جریان خروجی به ترتیب با یک



غلظت بیشینه به مرور زمان خارج می‌شوند. همانطور که مشاهده می‌شود از ساعت صفر تا ساعت ۲۰ متوسط غلظت ایزوتوپ ۱۸۲ برابر ۷۵/۳ درصد، از ساعت ۲۰ تا ۴۰ متوسط غلظت ایزوتوپ ۱۸۳ برابر ۳۳/۴ درصد، از ساعت ۴۰ تا ۷۰ متوسط غلظت ایزوتوپ ۱۸۴ برابر ۶۸/۱ درصد و در انتها از ساعت ۷۰ تا ساعت ۱۰۰ متوسط غلظت ایزوتوپ ۱۸۶ برابر ۸۸/۱ درصد در جریان خروجی می‌باشد.

جدول ۲: مشخصات زنجیره مورد استفاده برای عنصر تنگستن

$H''_1$	$L_{n=1,\dots,N}$	P	$\theta_{n=1,\dots,N}$	$\alpha_0$	n
100 gr	10 gr/hr	1 gr/hr	0.526	1.2	15
غلظت مخزن خوراک					
W 180	W 182	W 183	W 184	W 186	
0.0012	0.2650	0.1431	0.3064	0.2843	



شکل ۴: نمایش غلظت جریان خروجی بر حسب زمان

### بحث و نتیجه گیری:

با استفاده از زنجیره‌های NFSW می‌توان تمامی ایزوتوپ‌های عنصر تنگستن به غیر از ایزوتوپ ابتدایی که غلظت خوراک طبیعی آن بسیار پایین می‌باشد را با غنای بالا از خروجی زنجیره استخراج نمود. برای





ایزوتوپ ابتدایی عنصر تنگستن که غنای خوراک پایین می‌باشد می‌بایست از زنجیره‌های ناپایدار SW با قرار گیری مخزن در سمت محصول استفاده نمود.

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
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.