



## مدل‌سازی و شبیه‌سازی عملکرد گذرای یک زنجیره غنی‌سازی اورانیم هنگام وقوع پدیده از کارافتادن ماشین‌های سانتریفیوژ گازی

علیرضا کشتکار\*<sup>۱</sup>، عباس رشیدی<sup>۲</sup>، جواد کریمی ثابت<sup>۱</sup>، علی نوروزی<sup>۳</sup>

۱. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران - ایران

۲. دانشکده مهندسی، دانشگاه مازندران، صندوق پستی: ۴۷۴۱۶-۱۳۵۳۴، بابلسر - ایران

۳. شرکت فن‌آوری‌های پیشرفته ایران، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۵۴۳۱، تهران - ایران

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۴/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۹/۱۲

### چکیده

یکی از پدیده‌های قابل توجه در شرایط عملیاتی زنجیره‌های غنی‌سازی، از کار افتادن تعدادی از ماشین‌های جداساز در طول زنجیره است. برای بررسی اثر از کار افتادن ماشین‌های سانتریفیوژ گازی بر عملکرد زنجیره، جداسازی زنجیره باید در حالت گذرا مدل‌سازی شود. در این پژوهش، عملکرد زنجیره‌های متقارن غنی‌سازی دوجزئی با استفاده از معادلات پایداری جرم جزئی در حالت گذرا مدل‌سازی شد. همچنین معادلات غیرخطی مدل با استفاده از روش تفاضل محدود کرنک نیکلسون گسسته‌سازی شدند و برای حل معادلات از روش تکرار  $q$  استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری زنجیره مدل برای غنی‌سازی اورانیم ۲۳۵ نشان داد در صورتی‌که از کار افتادن ماشین‌های سانتریفیوژ گازی در مراحل انتهایی زنجیره غنی‌سازی اتفاق بیفتد، غنای محصول به میزان بیش‌تری کاهش یافته و مدت زمان بیش‌تری طول می‌کشد تا زنجیره مجدداً به حالت تعادل برسد. برای زنجیره و شرایط استفاده شده در این پژوهش، مشاهده شد که با از کار افتادن یک ماشین، بیش‌ترین کاهش غنای محصول نسبت به حالت قبل از حادثه، ۰/۵٪ و بیش‌ترین افزایش غنای جریان پسماند نسبت به حالت قبل از حادثه ۰/۲٪ می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد عملکرد زنجیره‌ای که دارای ماشین‌هایی با فاکتور جداسازی بالاتری است، به میزان کم‌تری تحت تأثیر پدیده از کار افتادن ماشین قرار می‌گیرد. مطابق نتایج به دست آمده، موجودی گاز ماشین تأثیر کمی بر تغییرات غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول داشته و فقط زمان رسیدن به تعادل در زنجیره را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** زنجیره متقارن، غنی‌سازی دو جزئی، شبیه‌سازی حالت گذرا، از کار افتادن ماشین سانتریفیوژ گازی، فاکتور جداسازی

## Modeling and simulation of transient performance of uranium enrichment cascade in the event of a crash of gas centrifuge machines

A.R. Keshtkar\*<sup>1</sup>, A. Rashidi<sup>2</sup>, J. Karimi Sabet<sup>1</sup>, A. Noroozi<sup>3</sup>

1. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

2. Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, P.O.Box: 416, Babolsar - Iran

3. Advanced Technology Company of Iran, AEOI, P.O.Box:14399-55431, Tehran - Iran

### Research Article

Received 1.7.2019, Accepted 3.12.2019

### Abstract

One of the significant phenomena in the operational conditions of the enrichment cascades is the sudden crash of a number of separate machines along the cascade. In order to investigate the effect of gas centrifuge crash on cascade performance, separation of the cascade in a transient condition should be modeled. In this paper, the performance of two-component symmetric enrichment cascades was modeled, using partial mass balance equations in the transient condition. Nonlinear equations of the model were also discriminated against using Crank Nicholson's finite difference method and the  $q$  iteration method was used to solve the equations. The results of the computer simulation of the model cascade for the enrichment of uranium 235 showed that if the crash of gas centrifuge machines occurs at the end of the enrichment part of the cascade, the product concentration will decrease more and more, and it takes a longer time to reach new steady-state condition. For the cascade and the conditions used in this paper, with the crash of a machine, the greatest reduction in product concentration compared to the pre-incident state is, 0.5% percent and the highest increase in waste stream concentration compared to the pre-incident state is 0.2 percent. It was also observed that the cascade performance of machines with a higher separation factor is less affected by the crash of machines. The results showed that the gas hold up has a small effect on the variation of the 235 isotope concentration in the product stream and only affects the time to reach equilibrium in the cascade.

**Keywords:** Symmetric cascade, Two-component enrichment, Transient simulation, Gas centrifuge crash, Separation factor

\*Email: akeshtkar@aeoi.org.ir

## ۱. مقدمه

مورد مطالعه قرار نگرفته است. از این‌رو هدف در این پژوهش در گام اول، مدل‌سازی و شبیه‌سازی کامپیوتری عملکرد زنجیره‌های متقارن دو جزئی در حالت گذرا و سپس بررسی و تحلیل اثر از کار افتادن ماشین‌های جداساز بر عملکرد زنجیره غنی‌سازی اورانیم می‌باشد.

برای شبیه‌سازی زنجیره در حالت گذرا مجموعه معادلات پایستگی جرم کلی و جزئی به‌همراه معادلات مربوط به فاکتورهای جداسازی در مراحل مختلف زنجیره، باید به‌طور هم‌زمان حل شوند. در این مقاله برای یک زنجیره متقارن دو جزئی با فرض پایا بودن نرخ جریان‌های بین مراحل زنجیره‌ها، معادلات پایستگی جرم برای هر دو جزء در زنجیره در حالت گذرا نوشته شد و از روش تفاضل محدود کرنک نیکلسون برای گسسته‌سازی معادلات استفاده شد. هم‌چنین با توجه به غیرخطی بودن معادلات، از روش تکرار  $Q$  برای خطی‌سازی آن‌ها استفاده شد و با تشکیل دستگاه معادلات خطی و حل آن، شبیه‌سازی زنجیره در حالت گذرا صورت گرفت. برای راستی‌آزمایی کد نوشته شده، نتایج شبیه‌سازی یک زنجیره موجود در حالت پایا با نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته در حالت گذرا در زمان بی‌نهایت (رسیدن به حالت پایا) مقایسه شده است. هم‌چنین با استفاده از مدل مذکور و با در نظر گرفتن فاکتور جداسازی ماشین به‌صورت تابعی از جریان ورودی به ماشین، تأثیر از کار افتادن ماشین‌های جداساز در مراحل مختلف بر روی غلظت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵ در جریان محصول و پسماند زنجیره و هم‌چنین زمان به تعادل رسیدن زنجیره بررسی شد.

## ۲. تئوری و روش حل

## ۱.۲ معادلات حاکم

زنجیره‌ها بر اساس این‌که جریان غنی شده و تهی شده مراحل به کدام مرحله وارد شوند به دو حالت متقارن و نامتقارن دسته‌بندی می‌شوند. در زنجیره‌های متقارن، جریان غنی شده به یک مرحله بعد و جریان تهی شده به یک مرحله قبل وارد می‌شوند که با توجه به متداول بودن این نوع از زنجیره‌ها، در این مطالعه نوع زنجیره متقارن برای بررسی انتخاب شده است. در شبیه‌سازی گذرای زنجیره می‌بایست غلظت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵ در جریان ورودی، غنی شده و تهی شده هر مرحله با گذر زمان محاسبه شود. در این شبیه‌سازی جریان‌های ورودی و خروجی از مراحل به‌صورت پایا و مستقل از زمان در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مجهول بودن غلظت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵ در جریان ورودی، غنی شده و تهی شده هر مرحله، تعداد کل مجهولات سه برابر تعداد مراحل می‌باشد که برای انجام محاسبات آن، به همین تعداد معادله نیاز است.

فرایند غنی‌سازی ایزوتوپی دوجزئی که شناخته شده‌ترین و مهم‌ترین کاربرد آن در مورد غنی‌سازی اورانیم می‌باشد، از دیرباز مورد توجه بوده است. فرایند غنی‌سازی ایزوتوپی در زنجیره‌هایی از ماشین‌های جداساز صورت می‌پذیرد که پرکاربردترین این زنجیره‌ها، زنجیره‌های غنی‌سازی با استفاده از ماشین سانتریفیوژ گازی است. از مهم‌ترین مشکلات این زنجیره‌ها، از کار افتادن ماشین‌های سانتریفیوژ می‌باشد. از کار افتادن ماشین‌های سانتریفیوژ گازی به دلایل مختلف نظیر مونتاژ نامناسب ماشین و تغییر ناگهانی در دور ماشین می‌تواند رخ دهد. همه این عوامل باعث افزایش ارتعاشات ماشین و در نهایت از کار افتادن آن می‌شوند. در یک زنجیره با تعداد مشخص ماشین سانتریفیوژ با یک آرایش معین، با از کار افتادن یک ماشین در یک مرحله مشخص، جریان گاز ورودی به ماشین قطع می‌شود که در نتیجه میزان جریان گاز ورودی به سایر ماشین‌ها در آن مرحله افزایش می‌یابد. با افزایش جریان ورودی به هر ماشین به دلیل فاصله گرفتن از نرخ جریان بهینه، با طی شدن یک فرایند گذرا، میزان غنی‌سازی ماشین‌ها دچار تغییر می‌شود [۱-۳]. برای محاسبه میزان تغییر در غنی‌سازی زنجیره و هم‌چنین محاسبه زمان به تعادل رسیدن زنجیره در حالت جدید، شبیه‌سازی زنجیره باید در حالت گذرا صورت پذیرد. شبیه‌سازی‌های انجام شده بر روی زنجیره‌های غنی‌سازی دو جزئی عمده‌تاً به‌صورت پایا می‌باشد و شبیه‌سازی زنجیره در حالت گذرا کم‌تر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است؛ از کارهای انجام شده در این زمینه می‌توان به شبیه‌سازی گذرای زنجیره به‌صورت تحلیلی توسط کهن اشاره نمود [۴]. کهن در سال ۱۹۵۳ عملکرد زنجیره‌های مربعی با فاکتور جداسازی پایین در حالت گذرا، که در فرایندهای غنی‌سازی به روش نفوذ گازی کاربرد دارند، را مدل‌سازی کرده و با استفاده از روش تحلیلی مورد بررسی قرار داد. در سال ۲۰۰۰ زنگ و همکاران روش تکرار  $Q$  برای محاسبه تغییرات غلظت در طول زنجیره برای سیستم‌های چند جزئی به روش عددی را ابداع نمودند [۵] و با استفاده از این روش، عملکرد زنجیره‌های متقارن برای جداسازی ایزوتوپ‌های چند جزئی زنون را مورد بررسی قرار دادند [۶]. در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳، میگلپورینی و وود مطالعاتی در زمینه شرایط نامتعارف استفاده از زنجیره‌ها و هم‌چنین تخمین میزان افزایش غلظت در زمان راه‌اندازی آن‌ها انجام دادند. نتایج آن‌ها افزایش غلظت در شرایط راه‌اندازی زنجیره‌ها را اثبات نمود [۷-۱۰]. بررسی پژوهش‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که تأثیر از کار افتادن ماشین‌های سانتریفیوژ گازی بر عملکرد زنجیره‌های غنی‌سازی دو جزئی از جمله غنی‌سازی اورانیم در حالت گذرا تاکنون

برای محاسبه غلظت‌ها در هر مرحله از زنجیره، قانون پایستگی جرم جزیی در حالت گذرا به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۲].

$$\frac{\partial H_n \bar{Z}_{n,t}}{\partial t} = N_{n+1} x_{n+1}(t) + M_{n-1} y_{n-1}(t) - N_n x_n(t) - M_n y_n(t) \quad (۴)$$

در این رابطه،  $H_n$  موجودی گاز مرحله،  $\bar{Z}_n$  متوسط غلظت گاز عبوری از مرحله،  $y_n$  غلظت ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ در جریان غنی‌شده،  $x_n$  غلظت ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ در جریان تهی‌شده،  $N_n$  نرخ جریان تهی‌شده و  $M_n$  نرخ جریان غنی‌شده خروجی از مرحله شماره  $n$  می‌باشند. در رابطه ۴ برای محاسبه متوسط غلظت در هر مرحله از تقریب زیر استفاده می‌شود:

$$(N_n + M_n) \bar{Z}_{n,t} = N_n x_n(t) + M_n y_n(t) \quad (۵)$$

در رابطه ۴، موجودی گاز مرحله و جریان‌های بین مراحل به صورت مستقل از زمان در نظر گرفته می‌شوند؛ این فرض به دلیل کوتاه بودن زمان به تعادل رسیدن جریان در برابر زمان به تعادل رسیدن غلظت‌های بین مراحل می‌باشد [۱۲-۱۳]. رابطه مورد استفاده دیگر، رابطه فاکتور جداسازی برای هر مرحله است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\alpha_n = \frac{y_n / (1 - y_n)}{x_n / (1 - x_n)} = f(F_n) \quad (۶)$$

فاکتور جداسازی متناسب با نرخ خوراک ورودی به ماشین بوده و به صورت تابعی از خوراک ورودی به ماشین سانتریفیوژ در نظر گرفته می‌شود. در انتها باید غلظت‌های محاسبه شده برای دو جزء شرط زیر را دارا باشند. به دلیل استفاده از رابطه پیوستگی از هر دو شرط زیر نمی‌توان استفاده نمود و تنها از یکی این روابط برای بررسی غلظت‌های محاسبه شده استفاده می‌شود.

$$x_{n,235} + y_{n,238} = 1 \quad x_{n,235} + x_{n,238} = 1 \quad (۷)$$

در جدول ۱ کلیه معلومات و مجهولات ارایه شده است.

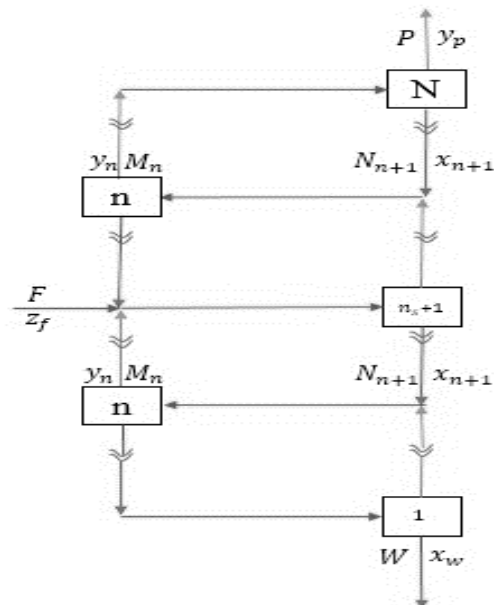
برای یک زنجیره متقارن همانند شکل ۱ با تعداد  $N$  مرحله، جریان‌های ورودی به هر مرحله در شکل ۲ نمایش داده شده است.

در ابتدای شروع محاسبه غلظت‌ها در حالت گذرا، می‌بایست جریان‌های بین مراحل با فرض پایا بودن در هر بازه زمانی، محاسبه شوند. برای این کار با مشخص بودن ضریب برش مراحل و استفاده از رابطه ضریب برش برای هر مرحله مطابق رابطه ۱، به کارگیری معادله پایستگی بر روی هر مرحله مطابق رابطه ۲، و نیز نوشتن معادله پایستگی بر روی نقطه ورود خوراک به هر مرحله مطابق رابطه ۳ می‌توان جریان‌های بین مراحل را در حالت پایا محاسبه نمود [۱۱].

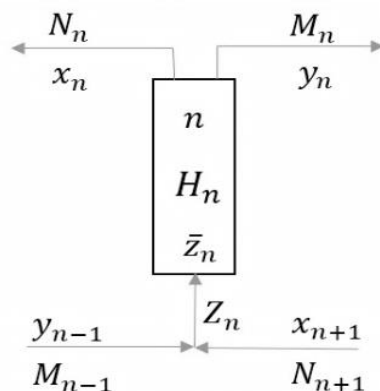
$$Z_n \theta_n - M_n = 0 \quad (۱)$$

$$Z_n (1 - \theta_n) - N_n = 0 \quad (۲)$$

$$Z_n - M_{n-1} - N_{n+1} = 0 \quad (۳)$$



شکل ۱. نمای یک زنجیره متقارن دو جزیی.



شکل ۲. نمایش جریان‌های ورودی و خروجی به مراحل.

جدول ۱. مجهولات و معادلات مسئله

پارامترهای ورودی مسئله		پارامترهای خروجی مسئله	
۱- تعداد مراحل	۲- مرحله ورود خوراک	۱- نرخ جریان محصول مراحل	۳- ضریب برش مراحل
۳- ضریب برش مراحل	۴- غلظت خوراک ورودی	۲- نرخ جریان پسماند مراحل	۵- نرخ خوراک ورودی
۵- نرخ خوراک ورودی	۶- فاکتور جداسازی	۳- نرخ جریان خوراک مراحل	۷- میزان موجودی گاز ماشین
۷- میزان موجودی گاز ماشین	۸- آرایش ماشین‌ها در مراحل	۴- غلظت جریان محصول مراحل بر حسب زمان	۹- بازه زمانی
۹- بازه زمانی	۱۰- شماره مرحله ماشین از کار افتاده	۵- غلظت جریان پسماند مراحل بر حسب زمان	
		۶- غلظت جریان خوراک مراحل بر حسب زمان	
زمان به تعادل رسیدن جریان در برابر زمان به تعادل رسیدن غلظت قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد.			
فرضیات		غلظت مراحل در شرایط اولیه مسئله برابر غلظت خوراک ورودی در نظر گرفته می‌شود.	
با از کار افتادن یک ماشین نرخ خوراک دیگر ماشین‌ها از نرخ خوراک بیشینه ماشین تجاوز نخواهد کرد.			
تعداد	معادلات	تعداد	مجهولات
$N$	رابطه ضریب برش مراحل (رابطه ۱)	$N$	نرخ جریان خوراک مراحل
$N$	رابطه پایستگی جریان مراحل (رابطه ۲)	$N$	نرخ جریان محصول مراحل
$N$	رابطه پایستگی جریان روی گره خوراک (رابطه ۳)	$N$	نرخ جریان پسماند مراحل
$2N$	معادله پیوستگی (رابطه ۴) برای هر دو جزء	$2N$	غلظت جریان محصول برای هر دو جزء
$N$	رابطه فاکتور جداسازی (رابطه ۶)	$2N$	غلظت جریان پسماند برای هر دو جزء
$N$	شرط محدودیت غلظت (رابطه ۷)	$2N$	
$7N$		$7N$	مجموع

۲.۲ روش تکرار  $q$

برای حل هم‌زمان معادلات ذکر شده در بخش قبل، باید از روش‌های حل دستگاه معادلات غیرخطی استفاده شود. یکی از راه‌کارهای حل دستگاه معادلات غیرخطی، استفاده از روش‌های تکرار می‌باشد. در این پژوهش برای حل معادلات توزیع غلظت از روش تکرار  $q$  استفاده شده است. در این روش پارامتر  $q$  به صورت نسبت غلظت ایزوتوپ مطلوب در جریان غنی شده به غلظت ایزوتوپ مطلوب در جریان تهی شده در هر مرحله تعریف می‌شود. این پارامتر برای ایزوتوپ‌های اورانیوم ۲۳۵ و اورانیوم ۲۳۸ به صورت زیر قابل تعریف است:

$$q_{235,n,(t)} = \frac{y_{235,n,(t)}}{x_{235,n,(t)}} \quad (۸)$$

$$q_{238,n,(t)} = \frac{y_{238,n,(t)}}{x_{238,n,(t)}} \quad (۹)$$

با به کارگیری این تعاریف در رابطه فاکتور جداسازی مرحله  $n$  رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$\alpha_n = \frac{\frac{y_{235,n,(t)}}{x_{235,n,(t)}}}{\frac{y_{238,n,(t)}}{x_{238,n,(t)}}} = \frac{q_{235,n,(t)}}{q_{238,n,(t)}} \quad (۱۰)$$

با ترکیب روابط ۸ و ۱۰، غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان غنی شده مرحله  $n$  را می‌توان برحسب غلظت همان جزء در جریان تهی شده نوشت:

$$y_{235,n,(t)} = \alpha_n q_{238,n,(t)} x_{235,n,(t)} \quad (۱۱)$$

با به کارگیری رابطه ۱۱ در رابطه ۴، غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ قابل محاسبه است. به طور مشابه می‌توان رابطه ۹ را در رابطه ۴ برای ایزوتوپ ۲۳۸ استفاده کرده و غلظت ایزوتوپ ۲۳۸ را محاسبه نمود. در این روش در ابتدا مقدار  $q_{238,n}$  برای تمامی مراحل حدس زده می‌شود. سپس با استفاده از رابطه‌های ۹ و ۱۱، معادلات ۴، ۵ و ۶ برای ایزوتوپ ۲۳۵ و ایزوتوپ ۲۳۸ حل می‌شوند. پس از محاسبه غلظت‌ها، باید غلظت‌های محاسبه شده در جریان غنی شده، تهی شده و خوراک برابر یک باشد که بر همین اساس می‌توان  $q_{238,n}$  را به صورت زیر برای تکرار بعد اصلاح نمود [۱۳]:

$$q_{238,n,(t)} = \frac{z_{235,n,(t)} + z_{238,n,(t)}}{\alpha_n x_{235,n,(t)} + x_{238,n,(t)}} \quad (۱۲)$$

شرط هم‌گرایی در این روش به صورت رابطه ۱۳، که در آن  $\varepsilon$  میزان خطا را نشان می‌دهد، می‌باشد:

$$\max((q_{238,n})_{iteration} - (q_{238,n})_{iteration-1}) \leq \varepsilon \quad (۱۳)$$

۲.۲ روش حل عددی معادلات

برای شروع فرایند حل عددی معادلات، در ابتدا سمت راست رابطه ۴ به صورت زیر نام‌گذاری می‌شود:

$$N_{n+1}x_{n+1,(t)} + M_{n-1}y_{n-1,(t)} - N_n x_{n,(t)} - M_n y_{n,(t)} = g \quad (۱۴)$$

برای حل رابطه ۴، ابتدا از روش تفاضل محدود کرنک نیکلسون جهت گسسته‌سازی استفاده می‌شود. با اعمال این روش بر روی یک معادله، جمله‌های دارای مشتق زمانی به صورت تفاضل محدود پیش رو<sup>۱</sup> و جمله‌های فاقد مشتق

1. Forward Difference

با قرار دادن رابطه ۱۹ به تعداد مراحل در یک دستگاه معادلات خطی و حل آن، مقادیر غلظت جریان تهی شده مراحل محاسبه می‌شود. با محاسبه غلظت جریان تهی شده مراحل و رابطه ۱۱، می‌توان مقادیر غلظت جریان‌های غنی شده مراحل را محاسبه نمود. برای شرط هم‌گرایی و تصحیح پارامتر  $q_{\text{تکرار},n}$  از روابط ۱۲ و ۱۳ استفاده می‌شود.

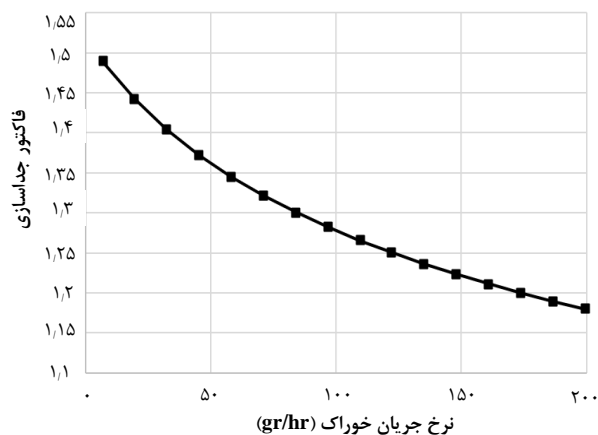
### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳ تأیید کد نوشته شده

برای تأیید کد توزیع غلظت نوشته شده در حالت گذرا، از نتایج شبیه‌سازی حالت پایای یک زنجیره غنی‌سازی اورانیم با ماشین سانتریفیوژ ایگاو<sup>۱</sup> مطابق مرجع [۱۴] استفاده شد. مشخصات زنجیره موردنظر در جدول ۲ بیان شده است. هم‌چنین نرخ خوراک ورودی به زنجیره برابر  $240 \text{ g.h}^{-1}$ ، مرحله ورود خوراک ۶ و غلظت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵ در خوراک ورودی  $0.072$  می‌باشد. میزان موجودی گاز در این ماشین  $0.8 \text{ g}$  بوده و فاکتور جداسازی به صورت زیر تابع جریان ورودی به ماشین می‌باشد [۱۵]:

$$\alpha_{(f)} = 2.2943(F_n / 3.6 + 13.79)^{-0.157} \quad (22)$$

در این رابطه،  $F_n$  نرخ جریان خوراک ورودی به ماشین برحسب  $\text{g.h}^{-1}$  است. نحوه تغییرات فاکتور جداسازی با خوراک ورودی در شکل ۳ نمایش داده شده است [۱۵]. هم‌چنین مقدار نرخ خوراک بهینه این ماشین  $103.7 \text{ g.h}^{-1}$  می‌باشد [۱۵]. پس از اعمال پارامترهای فوق به برنامه نوشته شده، انجام فرایند شبیه‌سازی و رسیدن به حالت پایا، نتایج برنامه با نتایج شبیه‌سازی گزارش شده در مرجع [۱۴] در جدول ۳ با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل ۳. نحوه تغییر فاکتور جداسازی با نرخ جریان خوراک ورودی به ماشین Iguacu.

به صورت میانگین زمانی گسسته می‌شوند. ابتدا جهت گسسته‌سازی، با اعمال این روش به سمت چپ رابطه ۴ و فرض مستقل از زمان بودن موجودی مراحل، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial H_n \bar{Z}_{n,(t)}}{\partial t} = \frac{H_n}{\Delta t} (\bar{z}_n^{(t)} - \bar{z}_n^{(t-1)}) \quad (15)$$

هم‌چنین با اعمال این روش به سمت راست رابطه ۴، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$g = \frac{1}{2} (g^{(t)} + g^{(t-1)}) \quad (16)$$

با جای‌گذاری روابط ۱۴، ۱۵ و ۱۶ در رابطه ۴، در نهایت رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} & -\frac{M_{n-1}}{2} y_{n-1,(t)} + \left( \frac{H_n}{\Delta t} \frac{M_n}{M_n + N_n} + \frac{M_n}{2} \right) y_{n,(t)} + \\ & \left( \frac{H_n}{\Delta t} \frac{N_n}{M_n + N_n} + \frac{N_n}{2} \right) x_{n,(t)} - \frac{N_{n+1}}{2} y_{n-1,(t)} = \\ & -\frac{M_{n-1}}{2} y_{n-1,(t-1)} + \left( \frac{H_n}{\Delta t} \frac{M_n}{M_n + N_n} - \frac{M_n}{2} \right) y_{n,(t-1)} + \\ & \left( \frac{H_n}{\Delta t} \frac{N_n}{M_n + N_n} - \frac{N_n}{2} \right) x_{n,(t-1)} + \left( \frac{N_{n+1}}{2} x_{n+1,(t-1)} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

سمت راست معادله بالا در بازه زمانی  $t$  و سمت چپ معادله در بازه زمانی  $t-1$  می‌باشد. با نام‌گذاری ضرایب معادله بالا، فرم ساده زیر به دست می‌آید:

$$-\bar{\varphi}_{n-1} y_{n-1,(t)} + \bar{\omega}_n y_{n,(t)} + \delta_n x_{n,(t)} - \mu_{n+1} x_{n+1,(t)} = r_{n,(t-1)} \quad (18)$$

در رابطه بالا، مجهولات در سمت چپ و معلومات مسئله، که مقادیر غلظت‌ها در بازه زمانی قبل هستند، در سمت راست قرار دارند. حال اگر در رابطه ۱۸ به جای مقادیر غلظت جریان‌های غنی شده مراحل، از رابطه ۱۱ که از روش تکرار  $q$  حاصل شد، جای‌گذاری شود، تعداد مجهولات سمت چپ از چهار به سه کاهش پیدا می‌کند.

$$-\varphi_{n-1} x_{n-1,(t)} + \omega_n x_{n,(t)} - \mu_{n+1} x_{n+1,(t)} = r_{n,(t-1)} \quad (19)$$

مقادیر ضرایب معادله بالا به صورت زیر می‌باشد.

$$\varphi_{n-1} = \bar{\varphi}_{n-1} \alpha_{n-1} q_{\text{تکرار},n-1} \quad (20)$$

$$\omega_n = \bar{\omega}_n \alpha_n q_{\text{تکرار},n} + \delta_n \quad (21)$$

1. Iguacu

جدول ۲. مشخصات زنجیره ذکر شده در مرجع [۱۴] جهت راستی‌آزمایی کد برنامه

شماره مراحل	تعداد ماشین در مراحل	ضریب برش مراحل	نرخ خوراک ورودی به هر ماشین در مراحل (g.h <sup>-1</sup> )
۱	۶	۰/۴۷۰	۶۷,۲۸۹
۲	۱۱	۰/۴۷۰	۶۹,۲۵۱
۳	۱۶	۰/۴۷۰	۶۷,۴۵۳
۴	۲۰	۰/۴۷۰	۶۸,۰۴۰
۵	۲۳	۰/۴۷۰	۷۰,۰۲۱
۶	۲۷	۰/۴۷۰	۶۷,۸۴۸
۷	۲۳	۰/۴۷۰	۶۸,۵۲۸
۸	۲۰	۰/۴۷۰	۶۷,۴۶۸
۹	۱۷	۰/۴۷۰	۶۷,۵۴۴
۱۰	۱۴	۰/۴۷۰	۶۹,۲۷۸
۱۱	۱۲	۰/۴۷۱	۶۷,۷۷۲
۱۲	۱۰	۰/۴۷۱	۶۷,۵۶۴
۱۳	۸	۰/۴۷۱	۶۹,۱۳۹
۱۴	۶	۰/۴۷۱	۷۴,۰۰۲
۱۵	۵	۰/۴۷۱	۶۹,۳۷۶
۱۶	۴	۰/۴۷۱	۶۵,۰۹۸
۱۷	۳	۰/۴۷۱	۶۱,۱۳۰
۱۸	۲	۰/۴۷۲	۵۷,۵۲۴
۱۹	۱	۰/۴۷۲	۵۴,۳۰۲

جدول ۳. مقایسه غلظت‌های اورانیوم ۲۳۵ محاسبه شده توسط برنامه در شرایط پایا و شبیه‌سازی موجود در مرجع [۱۴]

شماره مراحل	$x_i$ محاسبه شده توسط کد	$x_i$ محاسبه شده در مرجع ۱۴	خطای نسبی در محاسبه $x_i$ برحسب درصد	$y_i$ محاسبه شده توسط کد	$y_i$ محاسبه شده در مرجع ۱۴	خطای نسبی در محاسبه $y_i$ برحسب درصد
۱	۰/۰۰۳۵۰۲	۰/۰۰۳۵۰۰	۰/۰۰۵۷	۰/۰۰۴۴۶۵	۰/۰۰۴۴۰۰	۱,۳۹۱
۲	۰/۰۰۳۹۵۴	۰/۰۰۳۹۰۰	۱,۳۹۱	۰/۰۰۵۰۲۶	۰/۰۰۵۰۰۰	۱,۳۰۱
۳	۰/۰۰۴۴۵۵	۰/۰۰۴۴۰۰	۱,۲۴۷	۰/۰۰۵۶۷۶	۰/۰۰۵۶۰۰	۰,۵۹۰
۴	۰/۰۰۵۰۳۲	۰/۰۰۵۰۰۰	۰/۶۴۰	۰/۰۰۶۴۰۲	۰/۰۰۶۳۰۰	۱,۳۹۸
۵	۰/۰۰۵۶۷۹	۰/۰۰۵۶۰۰	۱,۴۰۶	۰/۰۰۷۲۰۱	۰/۰۰۷۱۰۰	۱,۴۹۵
۶	۰/۰۰۶۳۸۶	۰/۰۰۶۳۰۰	۱,۳۶۱	۰/۰۰۸۱۲۵	۰/۰۰۸۰۰۰	۱,۴۷۰
۷	۰/۰۰۷۲۰۹	۰/۰۰۷۱۰۰	۱,۵۳۱	۰/۰۰۹۱۵۸	۰/۰۰۹۰۰۰	۱,۵۶۶
۸	۰/۰۰۸۱۲۲	۰/۰۰۸۰۰۰	۱,۵۳۱	۰/۰۱۰۳۳۳	۰/۰۱۰۲۰۰	۱,۸۳۶
۹	۰/۰۰۹۱۷۳	۰/۰۰۹۰۰۰	۱,۹۲۴	۰/۰۱۱۶۵۶	۰/۰۱۱۵۰۰	۱,۴۲۱
۱۰	۰/۰۱۰۳۵۰	۰/۰۱۰۲۰۰	۱,۴۶۷	۰/۰۱۳۱۱۵	۰/۰۱۲۹۰۰	۱,۳۱۰
۱۱	۰/۰۱۱۶۳۱	۰/۰۱۱۵۰۰	۱,۱۳۸	۰/۰۱۴۷۷۵	۰/۰۱۴۶۰۰	۱,۶۲۷
۱۲	۰/۰۱۳۱۰۰	۰/۰۱۲۹۰۰	۱,۵۴۸	۰/۰۱۶۶۴۸	۰/۰۱۶۴۰۰	۱,۱۵۳
۱۳	۰/۰۱۴۷۶۵	۰/۰۱۴۶۰۰	۱,۱۳۰	۰/۰۱۸۷۱۹	۰/۰۱۸۵۰۰	۱,۳۴۹
۱۴	۰/۰۱۶۵۹۳	۰/۰۱۶۴۰۰	۱,۱۷۵	۰/۰۲۰۹۰۷	۰/۰۲۰۵۰۰	۱,۵۸۵
۱۵	۰/۰۱۸۴۲۵	۰/۰۱۸۲۰۰	۱,۲۳۸	۰/۰۲۳۴۲۶	۰/۰۲۳۰۰۰	۱,۵۸۱
۱۶	۰/۰۲۰۵۵۴	۰/۰۲۰۳۰۰	۱,۲۵۲	۰/۰۲۶۳۳۱	۰/۰۲۵۸۰۰	۱,۳۲۴
۱۷	۰/۰۲۳۰۳۷	۰/۰۲۲۷۰۰	۱,۴۸۲	۰/۰۲۹۶۸۷	۰/۰۲۹۱۰۰	۱,۵۵۹
۱۸	۰/۰۲۵۹۴۳	۰/۰۲۵۶۰۰	۱,۳۴۰	۰/۰۳۳۵۶۳	۰/۰۳۳۰۰۰	۱,۳۵۳
۱۹	۰/۰۲۹۳۴۸	۰/۰۲۹۰۰۰	۱,۲۰۰	۰/۰۳۸۰۵۲	۰/۰۳۷۶۰۰	۱,۴۱۱

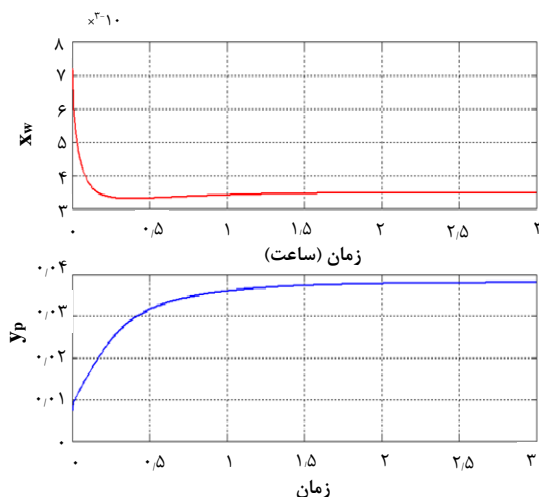
همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، کد محاسبه توزیع غلظت در حالت گذرا، نتایج یکسانی در حالت پایا با نتایج شبیه‌سازی در مرجع [۱۴] داشته است. بنابراین با توجه به تأیید برنامه نوشته شده، از این برنامه برای شبیه‌سازی اثرات از کار افتادن ماشین‌های سانتریفیوژ گازی در حالت گذرا می‌توان استفاده نمود. برای بررسی تأثیر از کار افتادن ماشین‌های سانتریفیوژ بر عملکرد زنجیره‌های غنی‌سازی اورانیوم، از مشخصات همان زنجیره معرفی شده در مرجع [۱۴] به عنوان زنجیره مدل در بررسی‌های بعدی استفاده شده است.

۲.۳ توزیع غلظت اورانیوم ۲۳۵ در زنجیره مدل در حالت گذرا در یک زنجیره غنی‌سازی، غلظت ایزوتوپ‌ها با گذشت زمان در طول زنجیره تغییر می‌کند تا در نهایت با رسیدن به زمان تعادل غلظت‌ها به یک شرایط پایا برسند. بنابراین پیشگویی زمان رسیدن به تعادل و نحوه تغییرات غلظت ایزوتوپ‌ها در طول زنجیره در حالت گذرا اهمیت زیادی در طراحی زنجیره و مسایل مربوط به حسابرسی‌های پادمانی دارد. بدین‌منظور عملکرد گذرای زنجیره مدل برای غنی‌سازی ایزوتوپ‌های اورانیوم ۲۳۵ از خوراک طبیعی هگزافلوراید اورانیوم با استفاده از



در شکل ۶ مشاهده می‌شود با از کار افتادن یکی از دو ماشین سانتریفیوژ در حال کار در مرحله شماره ۱۸، که از مراحل انتهایی زنجیره مدل می‌باشد، غنای محصول به سرعت کاهش پیدا می‌کند و با گذشت زمان و ادامه فرایند غنی‌سازی، غنای محصول در نهایت به حالت پایای جدیدی می‌رسد که مقدار آن کم‌تر از میزان غنای محصول در حالت بدون حادثه از کار افتادن ماشین‌ها می‌باشد. با کاهش غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول زنجیره، به دلیل برقرار بودن قانون پایستگی جرم، می‌بایست با گذشت زمان غنای جریان پسماند زنجیره افزایش پیدا کند؛ این فرایند در شکل ۷ مشاهده می‌شود. با از کار افتادن یک ماشین، بیش‌ترین کاهش غنای محصول نسبت به حالت قبل از حادثه، ۰.۱۵٪ و بیش‌ترین افزایش غنای جریان پسماند نسبت به حالت قبل از حادثه ۰.۲٪ می‌باشد.

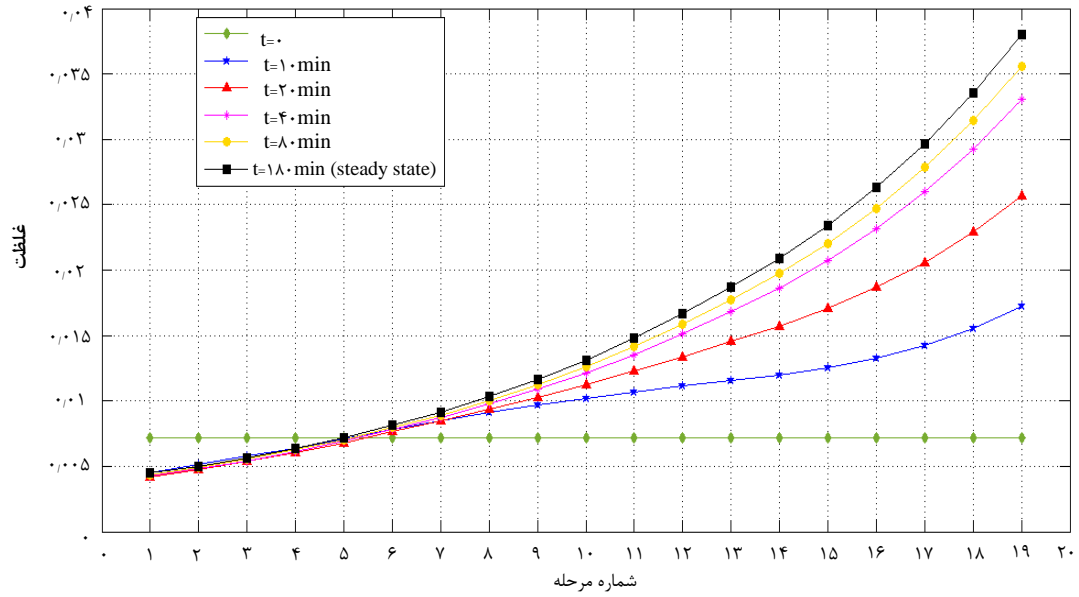
وجود نقطه کمینه در شکل ۶ به این دلیل است که با از کار افتادن یک ماشین در مرحله ۱۸ و افزایش جریان ورودی به دیگر ماشین موجود در مرحله، فاکتور جداسازی مرحله ۱۸ طبق شکل ۳ کاهش پیدا می‌کند. بر همین اساس در لحظات ابتدایی حادثه، مطابق شکل ۸ ابتدا غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان غنی شده مرحله ۱۸، یعنی  $y_{18}$ ، کاهش پیدا کرده که در پی آن غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در محصول یعنی  $y_p$  نیز کاهش پیدا می‌کند. اما به دلیل برقراری قانون پایستگی جرم در مرحله ۱۸ با کاهش  $y_{18}$  غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان پسماند مرحله ۱۸، یعنی  $x_{18}$  افزایش پیدا می‌کند. این افزایش به مرور زمان باعث افزایش غلظت جریان ورودی به مرحله ۱۷ شده و در نتیجه باعث افزایش غلظت  $y_{17}$  می‌شود. این افزایش باعث افزایش غلظت جریان ورودی به مرحله ۱۸ شده و در پی آن  $y_p$  نیز مجدداً افزایش پیدا می‌کند.



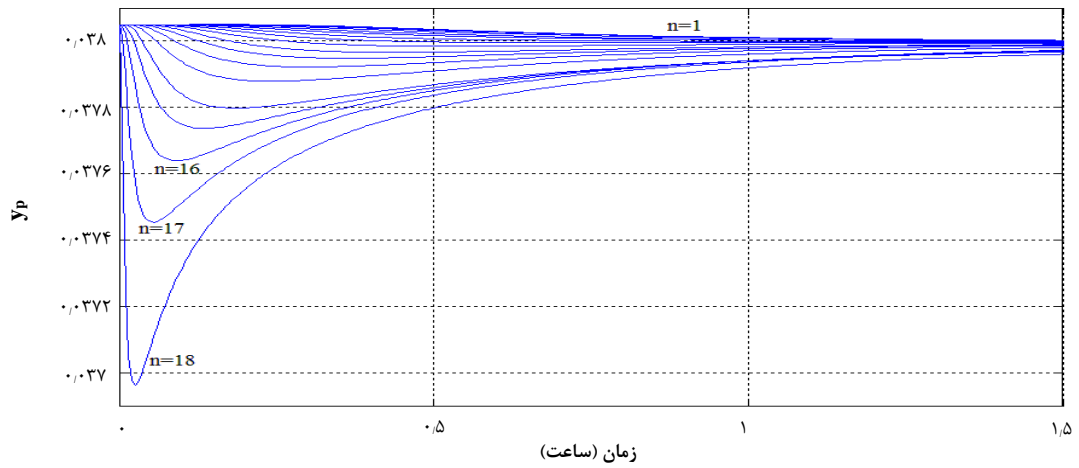
شکل ۴. تغییرات غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول و پسماند زنجیره مدل بر حسب زمان.

شبیه‌سازی کامپیوتری بررسی شد. در این شبیه‌سازی فرض شده است که غلظت اولیه ایزوتوپ ۲۳۵ در تمامی مراحل زنجیره مدل برابر غلظت خوراک بوده و مرحله ورود خوراک نیز برابر ۶ می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی تغییرات غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول و جریان پسماند زنجیره مدل بر حسب زمان در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول و پسماند در نیم ساعت اول ابتدا با شیب تند تغییر می‌کند و سپس به تدریج و پس از گذشت ۳ ساعت از شروع فرایند غنی‌سازی، غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول و پسماند زنجیره به حالت پایا می‌رسد. هم‌چنین نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری تغییرات گذرای غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان غنی شده مراحل مختلف زنجیره مدل در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ با زمان در بخش غنی‌سازی زنجیره، یعنی مراحل ۷ تا ۱۹، بسیار بیش‌تر از تغییرات غلظت در بخش تهی‌سازی زنجیره (مراحل ۱ تا ۵) است. دلیل این امر وجود تعداد بسیار بیش‌تر مراحل و هم‌چنین تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ در بخش غنی‌سازی نسبت به بخش تهی‌سازی، که برای دستیابی به غنی‌سازی بالاتر از ۳ درصدی خوراک در این بخش ضروری است، می‌باشد. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد با نزدیک‌تر شدن از مرحله ورود خوراک به مراحل انتهایی زنجیره، زمان رسیدن به تعادل در آن مرحله افزایش می‌یابد.

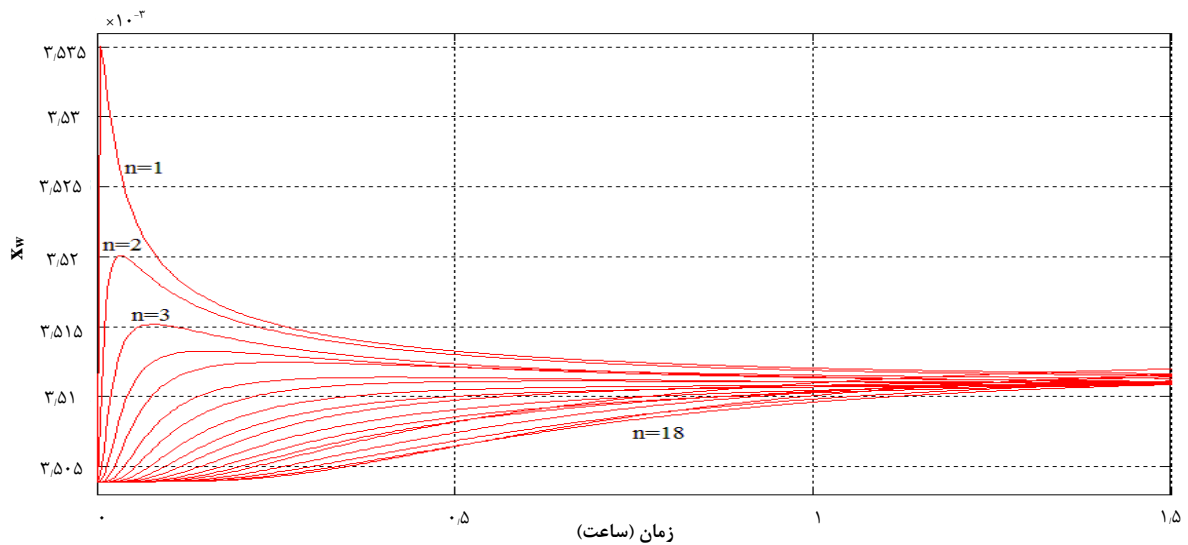
۳.۲ تأثیر از کار افتادن ماشین سانتریفیوژ بر عملکرد زنجیره مدل یکی از اتفاقات متداول در زنجیره‌های غنی‌سازی، از کار افتادن یک یا تعدادی از ماشین‌های سانتریفیوژ است که منجر به خارج شدن زنجیره از حالت پایا شده و مدت زمان جدیدی طول می‌کشد که زنجیره دوباره به شرایط پایای جدید برسد. بنابراین شبیه‌سازی عملکرد زنجیره‌های غنی‌سازی هنگام وقوع این پدیده و پیشگویی اثراتی که این پدیده بر روی شرایط عملکردی جدید زنجیره می‌گذارد، حایز اهمیت است. در این پژوهش، تأثیر از کار افتادن ماشین بر عملکرد زنجیره مدل برای غنی‌سازی اورانیم ۲۳۵ با استفاده از شبیه‌سازی بررسی شد. در این شبیه‌سازی فرض می‌شود یک ماشین سانتریفیوژ در یکی از مراحل زنجیره مدل به‌طور ناگهانی از کار بیفتد. تأثیر این رخداد بسته به این‌که در کدام مرحله اتفاق بیفتد، بر تغییرات غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ با زمان به‌ترتیب برای جریان محصول و جریان پسماند زنجیره مدل در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها مشاهده می‌شود، بیش‌ترین تأثیر بر عملکرد زنجیره مدل در شرایطی است که وقوع این رخداد در مرحله ۱۸ زنجیره مدل اتفاق افتاده باشد.



شکل ۵. تغییرات گذرای غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان غنی‌شده مراحل مختلف زنجیره مدل.



شکل ۶. تغییرات غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول زنجیره مدل بر حسب زمان با از کار افتادن یک ماشین از یکی از مراحل ۱۸ گانه.



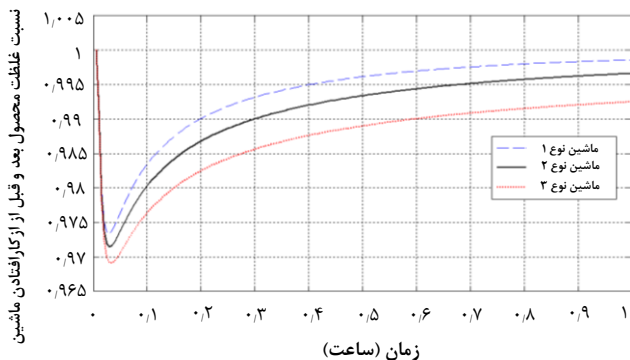
شکل ۷. تغییرات غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان پسماند زنجیره مدل بر حسب زمان با از کار افتادن یک ماشین از یکی از مراحل ۱۸ گانه.



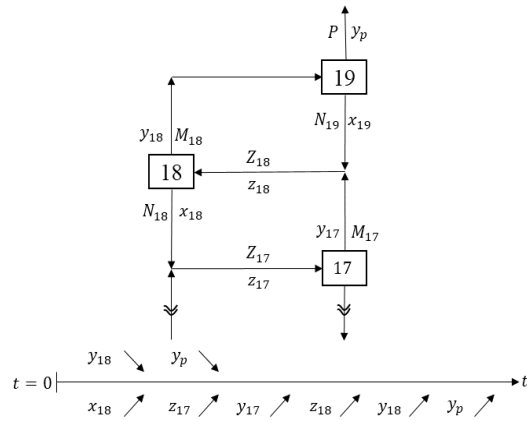
سوم به ترتیب معادل با ۱۰٪ بیش تر و ۱۰٪ کم تر از فاکتور جداسازی ماشین نوع دوم انتخاب شدند. به عبارت دیگر در این مطالعه، برای ماشین نوع اول بالاترین فاکتور جداسازی و برای ماشین نوع سوم کمترین فاکتور جداسازی در تمامی بازه تغییرات نرخ جریان خوراک در زنجیره انتخاب شده است. برای این سه نوع ماشین سانتریفیوژ، نتایج شبیه سازی کامپیوتری تغییرات نسبت غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول بعد از حادثه به قبل از حادثه از کار افتادن یک ماشین از مرحله ۱۸ برای زنجیره مدل بر حسب زمان در شکل ۹ نشان داده شده است. همان طور که از این شکل مشاهده می شود، تغییرات نسبت غلظت برای ماشین نوع سوم بیش تر از دو ماشین دیگر می باشد. همچنین مشاهده می شود که مدت زمان رسیدن به شرایط پایا در ماشین نوع سوم که کمترین فاکتور جداسازی را دارد، بیش تر از ماشین های دیگر است. بنابراین می توان نتیجه گرفت هرچه ماشین های سانتریفیوژ استفاده شده در زنجیره غنی سازی اورانیم دارای فاکتور جداسازی کمتری باشند و یا به عبارت دیگر دارای عملکرد ضعیفتری باشند، عملکرد زنجیره هنگام وقوع از کار افتادن ماشین از نظر مدت زمان رسیدن مجدد به شرایط پایا و همچنین دستیابی به مقدار طراحی شده غنای محصول، بیش تر تحت تأثیر قرار خواهد گرفت.

#### ۵.۳ تأثیر موجودی گاز ماشین بر عملکرد زنجیره مدل هنگام از کار افتادن ماشین ها

شبیه سازی کامپیوتری تأثیر موجودی گاز ماشین های سانتریفیوژ بر عملکرد گذرای زنجیره مدل برای غنی سازی اورانیم ۲۳۵ هنگام از کار افتادن ماشین های سانتریفیوژ در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این شکل، موجودی گاز ماشین های زنجیره مدل به ترتیب برابر ۰/۵، ۰/۸ و ۱ g در نظر گرفته شده و تأثیر موجودی گاز هنگام از کار افتادن یک ماشین از مرحله ۱۸ زنجیره مدل بر تغییرات غلظت بدون بعد ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول (نسبت غلظت بعد از وقوع حادثه به غلظت قبل از وقوع حادثه) بر حسب زمان بررسی شده است.



شکل ۹. تأثیر فاکتور جداسازی ماشین بر تغییرات غلظت بدون بعد ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول بر حسب زمان، هنگام وقوع پدیده از کار افتادن ماشین.



شکل ۸. نمایش یک برش از زنجیره مدل و نحوه تغییرات غلظت ها در طول زمان.

از مقایسه شکل های ۶ و ۷ مشاهده می شود به دلیل نزدیک بودن مرحله ای که یکی از ماشین های آن از کار افتاده است (مرحله ۱۸) به مرحله آخر (مرحله ۱۹)، غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در مرحله آخر به سرعت تحت تأثیر این رخداد قرار می گیرد و پس از طی حدود ۱/۵ ساعت، غنای محصول مجدداً به حالت پایا می رسد. اما در سوی دیگر زنجیره به علت دور بودن از مرحله وقوع حادثه، غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان پسماند پس از حدود ۰/۲ ساعت از وقوع حادثه دچار تغییر شده و رو به افزایش می رود و پس از حدود ۲ ساعت غنای پسماند نیز مجدداً به حالت پایای جدید خود می رسد.

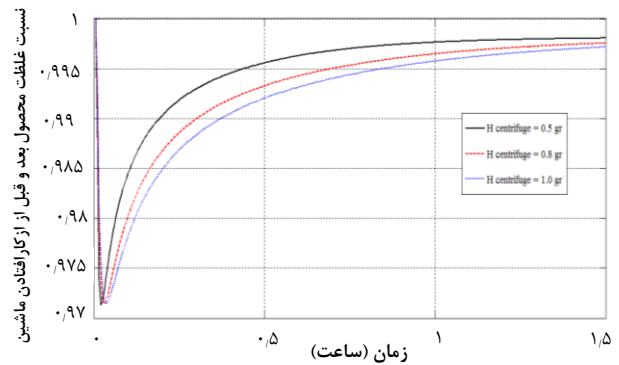
همچنین با توجه شکل های ۶ و ۷، مشاهده می شود هر چه ماشین سانتریفیوژ حذف شده به مراحل انتهایی زنجیره نزدیک تر باشد، در طی یک مدت زمان کوتاه تأثیر بیشتری را بر روی غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول زنجیره خواهد گذاشت و به طور عکس، در یک مدت زمان طولانی تأثیر کمتری بر روی غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان پسماند خواهد گذاشت. دلیل وجود نقاط بیشینه در شکل ۷ را می توان همانند فرایند طی شده برای وجود نقاط کمینه در شکل ۶ ذکر نمود.

#### ۴.۳ تأثیر نوع ماشین سانتریفیوژ گازی بر عملکرد زنجیره مدل هنگام از کار افتادن ماشین ها

فاکتور جداسازی از مهم ترین مشخصه های هر ماشین سانتریفیوژ گازی می باشد. فاکتور جداسازی ماشین های سانتریفیوژ گازی عمده تابعی از نرخ جریان خوراک ورودی به ماشین بوده و با افزایش نرخ جریان خوراک کاهش می یابد. شکل تابع جداسازی به طراحی و نوع ماشین سانتریفیوژ گازی بستگی دارد. به منظور بررسی تأثیر فاکتور جداسازی بر عملکرد زنجیره مدل برای غنی سازی اورانیم ۲۳۵، سه نوع ماشین سانتریفیوژ فرضی با فاکتور جداسازی مختلف در نظر گرفته شد. در این بررسی فاکتور جداسازی ماشین نوع دوم مشابه همان فاکتور جداسازی ماشین های زنجیره مدل مطابق رابطه ۲۲ در نظر گرفته شد و فاکتور جداسازی ماشین نوع اول و

## مراجع

1. A. de la Garza, G.A. Garrett, J.E. Murphy, *Multicomponent Isotope Separation in Cascades*. *Chemical Engineering Science*, **15**(3-4), 188–209 (1961).
2. P.G. Rousseau, et al, *Dynamic Simulation of a Centrifuge Cascade Plant with the Aid of a Flow Network Simulation Code*, In *Proceedings of the 12th Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases*, June 3-8, (2012).
3. J.F.A. Delbeke, et al, *The Real Time Mass Evaluation System as a Tool for Detection of Undeclared Cascade Operation at GCEPs*. In *Proceedings of the 8th International Conference on Facility Operations-Safeguards Interface*, Portland, OR, USA, (2008).
4. Cohen, *The theory of separation as applied to the large-scale production of U235*, (1951).
5. S. Zeng, C. Ying, *A robust and efficient calculation procedure for determining concentration distribution of multicomponent mixture*, *Sep. Sci. Technol.* **35**(4), 613–622 (2000).
6. S. Zeng, C. Ying, *Separating isotope components of small abundance*, *Sep. Sci. Technol.* **37**(15), 3577–3598 (2002).
7. P.J. Migliorini, H.G. Wood, *A Study of Multicomponent Streams in Off-Design Centrifuge Cascades*, *Separation Science and Technology*, **47**(7), 921–928 (2012).
8. P.J. Migliorini, H.G. Wood, *Transient Operation of a Gas Centrifuge Cascade to Determine Proliferation Time Frames*. In *Proceedings of the 12th Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases*, Paris, France, June 3-8, (2012).
9. P.J. Migliorini, H.G. Wood, *Transient Fluid Dynamics Modeling of Gas Centrifuge Enrichment Plants*. In *Proceedings of the 52nd Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management*, Palm Desert, CA, USA, July 17-21, (2011).
10. P.J. Migliorini, H.G. Wood, *Transient Isotope Separation Modeling of Gas Centrifuge Enrichment Plants*. In *Proceedings of the 53rd Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management*, Orlando, FL, USA, July 15-19, (2012).
11. T.H. Benedict, *Nuclear Chemical Engineering*, New York: McGraw-Will book Co., (1981).
12. S. Zeng, C. Ying, *Transient process in gas centrifuge cascades for separation of multicomponent isotope mixtures*, *Sep. Sci. Technol.* **36** (15), 3439–3457 (2001).
13. S. Zeng, C. Ying, *A second-order time-accurate method for determining the distribution of concentration distribution of multicomponent mixtures in separation cascades*, *Sep. Sci. Technol.* **35** (5), 729–741 (2000).
14. P.J. Migliorini, *Modeling and Simulation of Gas Centrifuge Cascades for Enhancing the Efficiency of IAEA Safeguards*, May (2013).
15. V.D. Borisevich, S. Zeng, *On ideal and optimum cascades of gas centrifuges with variable overall separation factors*, *Chem Eng Sci.* (114), 465-472 (2014).



شکل ۱۰. تأثیر موجودی گاز ماشین بر تغییرات غلظت بدون بعد ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول بر حسب زمان، هنگام وقوع پدیده از کار افتادن ماشین.

همان‌طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، موجودی گاز در ماشین سانتریفیوژ تأثیر کمی بر میزان کاهش غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول در حالت پایا در هنگام از کار افتادن ماشین‌ها در زنجیره مدل را دارد و این پارامتر تنها زمان رسیدن به تعادل در غلظت‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش موجودی گاز ماشین، زمان رسیدن به شرایط پایای جدید هنگام از کار افتادن ماشین‌ها در زنجیره مدل افزایش می‌یابد.

## ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد زنجیره‌های متقارن دو جزیی در حالت گذرا مدل‌سازی شد. هم‌چنین نتایج کد کامپیوتری تهیه شده با نتایج شبیه‌سازی حالت پایای یک زنجیره غنی‌سازی اورانیم با ماشین سانتریفیوژ ایگچو موجود در مراجع بررسی و تأیید شد. نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری زنجیره مدل برای غنی‌سازی اورانیم ۲۳۵ هنگام وقوع پدیده از کار افتادن ماشین‌های سانتریفیوژ در حالت گذرا نشان داد که هر چه ماشین‌های از کار افتاده مربوط به مراحل انتهایی زنجیره باشند، تأثیر بیشتری بر روی غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول زنجیره خواهند گذاشت و زمان رسیدن به تعادل در زنجیره نیز بیشتر خواهد بود. با بررسی روند تغییرات غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول زنجیره در طول زمان، مشاهده شد هر چه ماشین‌های از کار افتاده به مراحل آخر زنجیره نزدیک‌تر باشند میزان کاهش در نقطه کمینه نمودار غلظت جریان محصول بیشتر خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری نشان داد هر چه فاکتور جداسازی ماشین کاهش پیدا کند، میزان تأثیر از کار افتادن ماشین‌ها بر روی غلظت جریان خروجی زنجیره و زمان رسیدن به شرایط پایای مجدد بیشتر خواهد بود. هم‌چنین بررسی تأثیر پارامتر موجودی گاز ماشین سانتریفیوژ بر عملکرد زنجیره مدل هنگام از کار افتادن ماشین نشان داد که این پارامتر تنها زمان رسیدن به تعادل در زنجیره را تحت تأثیر قرار می‌دهد و بر روی غلظت محصول تأثیر کمی دارد.

## استناد به این مقاله

علیرضا کشتکار، عباس رشیدی، جواد کریمی‌نابت، علی نوروزی (۱۳۹۹)، مدل‌سازی و شبیه‌سازی عملکرد گذرای یک زنجیره غنی‌سازی اورانیم هنگام وقوع پدیده از کار افتادن ماشین‌های سانتریفیوژ گازی، ۹۴، ۴۵-۵۴