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

علیرضا کشتکار^{۱*}، عباس رشیدی^۲، جواد کریمی ثابت^۱، علی نوروزی^۳

۱. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، 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

*Email: akeshtkar@aepi.org.ir

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 پایستگی 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 اورانیوم ۲۳۵ نشان داد در صورتی که 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^{*1}, A. Rashidi², J. Karimi Sabet¹, A. Noroozi³

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

۱. مقدمه

فرایند غنی سازی ایزوتوپی دوجزیی که شناخته شده ترین و مهم ترین کاربرد آن در مورد غنی سازی اورانیم می باشد، از دیرباز مورد توجه بوده است. فرایند غنی سازی ایزوتوپی در زنجیره هایی از ماشین های جداساز صورت می پذیرد که پرکاربردترین این زنجیره ها، زنجیره های غنی سازی با استفاده از ماشین سانتریفیوژ گازی است. از مهم ترین مشکلات این زنجیره ها، از کار افتادن ماشین های سانتریفیوژ می باشد. از کار افتادن ماشین های سانتریفیوژ گازی به دلایل مختلف نظیر مونتاژ نامناسب ماشین و تغییر ناگهانی در دور ماشین می تواند رخ دهد. همه این عوامل باعث افزایش ارتعاشات ماشین و در نهایت از کار افتادن آن می شوند. 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 می شود که در نتیجه میزان جریان گاز ورودی به سایر ماشین ها در آن مرحله افزایش می یابد. با افزایش جریان ورودی به هر ماشین به دلیل فاصله گرفتن از نرخ جریان بهینه، با طی شدن یک فرایند گذرا، میزان غنی سازی ماشین ها دچار تغییر می شود [۱-۳]. برای محاسبه میزان تغییر در غنی سازی زنجیره و همچنین محاسبه زمان به تعادل رسیدن زنجیره در حالت جدید، شبیه سازی زنجیره باید در حالت گذرا صورت پذیرد. شبیه سازی های انجام شده بر روی زنجیره های غنی سازی دو جزیی عمده به صورت پایا می باشد و شبیه سازی زنجیره در حالت گذرا کمتر مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است؛ از کارهای انجام شده در این زمینه می توان به شبیه سازی گذرای زنجیره به صورت تحلیلی توسط کهن اشاره نمود [۴]. کهن در سال ۱۹۵۳ عملکرد زنجیره های مربعی با فاکتور جداسازی پایین در حالت گذرا، که در فرایندهای غنی سازی به روش نفوذ گازی کاربرد دارند، را مدل سازی 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 سیستم های چند جزیی به روش عددی را ابداع نمودند [۵] و با استفاده از این روش، عملکرد زنجیره های متقارن برای جداسازی ایزوتوپ های چند جزیی زنون را مورد بررسی قرار دادند [۶]. در سال های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳، میگیلورینی و وود مطالعاتی در زمینه شرایط نامتعارف استفاده از زنجیره ها و همچنین تخمین میزان افزایش غلظت در زمان راه اندازی آن ها انجام دادند. نتایج آن ها افزایش غلظت در شرایط راه اندازی زنجیره ها را اثبات نمود [۷-۱۰]. بررسی پژوهش های انجام گرفته نشان می دهد که تأثیر از کار افتادن ماشین های سانتریفیوژ گازی بر عملکرد زنجیره های غنی سازی دو جزیی از جمله غنی سازی اورانیم در حالت گذرا تاکنون

مورد مطالعه قرار نگرفته است. از این رو هدف در این پژوهش در گام اول، مدل سازی و شبیه سازی کامپیوتری عملکرد زنجیره های متقارن دو جزیی در حالت گذرا و سپس بررسی و تحلیل اثر از کار افتادن ماشین های جداساز بر عملکرد زنجیره غنی سازی اورانیم می باشد.

برای شبیه سازی زنجیره در حالت گذرا مجموعه معادلات پایستگی جرم کلی و جزیی به همراه معادلات مربوط به فاکتورهای جداسازی در مراحل مختلف زنجیره، باید به طور همزمان حل شوند. در این مقاله برای یک زنجیره متقارن دو جزیی با فرض پایا بودن نرخ جریان های بین مراحل زنجیره ها، معادلات پایستگی جرم برای هر دو جزء در زنجیره در حالت گذرا نوشته شد و از روش تفاضل محدود کرنک نیکلسون برای گسسته سازی معادلات استفاده شد. همچنین با توجه به غیرخطی بودن معادلات، از روش تکرار Q برای خطی سازی آن ها استفاده شد و با تشکیل دستگاه معادلات خطی و حل آن، شبیه سازی زنجیره در حالت گذرا صورت گرفت. برای راستی آزمایی کد نوشته شده، نتایج شبیه سازی یک زنجیره موجود در حالت پایا با نتایج شبیه سازی صورت گرفته در حالت گذرا در زمان بی نهایت (رسیدن به حالت پایا) مقایسه شده است. همچنین با استفاده از مدل مذکور و با در نظر گرفتن فاکتور جداسازی ماشین به صورت تابعی از جریان ورودی به ماشین، تأثیر از کار افتادن ماشین های 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

۲.۱. معادلات حاکم

زنجیره ها بر اساس این که جریان غنی شده و تهی شده مراحل به کدام مرحله وارد شوند به دو حالت متقارن و نامتقارن دسته بندی می شوند. در زنجیره های متقارن، جریان غنی شده به یک مرحله بعد و جریان تهی شده به یک مرحله قبل وارد می شوند که با توجه به متداول بودن این نوع از زنجیره ها، در این مطالعه نوع زنجیره متقارن برای بررسی انتخاب شده است. در شبیه سازی گذرای زنجیره می بایست غلظت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵ در جریان ورودی، غنی شده و تهی شده هر مرحله با گذر زمان محاسبه شود. در این شبیه سازی جریان های ورودی و خروجی از مراحل به صورت پایا و مستقل از زمان در نظر گرفته می شود. 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 می باشد که برای انجام محاسبات آن، به همین تعداد معادله نیاز است.

برای محاسبه غلظت‌ها در هر مرحله از زنجیره، قانون پایستگی جرم جزیی در حالت گذرا به صورت زیر نوشته می شود [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 غنی شده، x_n غلظت ایزوتوپ اورانیوم ۲۳۵ در جریان تهی شده، N_n نرخ جریان تهی شده و M_n نرخ جریان غنی شده خروجی از مرحله شماره n می باشند. در رابطه ۴ برای محاسبه متوسط غلظت در هر مرحله از تقریب زیر استفاده می شود:

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

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

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

فاکتور جداسازی متناسب با نرخ خوراک ورودی به ماشین بوده و به صورت تابعی از خوراک ورودی به ماشین سانتریفیوژ در نظر گرفته می شود. 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 نمی توان استفاده نمود و تنها از یکی این روابط برای بررسی غلظت‌های محاسبه شده استفاده می شود.

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

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، می بایست 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 می توان 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 ۳- ضریب برش مراحل ۵- نرخ خوراک ورودی ۷- میزان موجودی گاز ماشین ۹- بازه زمانی	۱- نرخ جریان محصول مراحل ۲- نرخ جریان پسماند مراحل ۳- نرخ جریان خوراک مراحل ۴- غلظت جریان محصول مراحل بر حسب زمان ۵- غلظت جریان پسماند مراحل بر حسب زمان ۶- غلظت جریان خوراک مراحل بر حسب زمان
۲- مرحله ورود خوراک ۴- غلظت خوراک ورودی ۶- فاکتور جداسازی ۸- آرایش ماشین ها در مراحل ۱۰- شماره مرحله ماشین از کار افتاده	زمان به تعادل رسیدن جریان در برابر زمان به تعادل رسیدن غلظت قابل صرف نظر کردن می باشد. غلظت مراحل در شرایط اولیه مسئله برابر غلظت خوراک ورودی در نظر گرفته می شود. با از کار افتادن یک ماشین نرخ خوراک دیگر ماشین ها از نرخ خوراک بیشینه ماشین تجاوز نخواهد کرد.
مجهولات	معادلات
نرخ جریان خوراک مراحل	رابطه ضریب برش مراحل (رابطه ۱)
نرخ جریان محصول مراحل	رابطه پایستگی جریان مراحل (رابطه ۲)
نرخ جریان پسماند مراحل	رابطه پایستگی جریان روی گره خوراک (رابطه ۳)
غلظت جریان محصول برای هر دو جزء	معادله پیوستگی (رابطه ۴) برای هر دو جزء
غلظت جریان پسماند برای هر دو جزء	رابطه فاکتور جداسازی (رابطه ۶)
	شرط محدودیت غلظت (رابطه ۷)
مجموع	

۲.۲ روش تکرار q

برای حل هم زمان معادلات ذکر شده در بخش قبل، باید از روش های حل دستگاه معادلات غیرخطی استفاده شود. یکی از راه کارهای حل دستگاه معادلات غیرخطی، استفاده از روش های تکرار می باشد. 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 می شود. این پارامتر برای ایزوتوپ های اورانیوم ۲۳۵ و اورانیوم ۲۳۸ به صورت زیر قابل تعریف است:

$$q_{235,n,(t)} = \frac{y_{235,n,(t)}}{x_{235,n,(t)}} \quad (8)$$

$$q_{238,n,(t)} = \frac{y_{238,n,(t)}}{x_{238,n,(t)}} \quad (9)$$

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

$$\alpha_n = \frac{y_{235,n,(t)} / x_{235,n,(t)}}{y_{238,n,(t)} / x_{238,n,(t)}} = \frac{q_{235,n,(t)}}{q_{238,n,(t)}} \quad (10)$$

با ترکیب روابط ۸ و ۱۰، غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان غنی شده مرحله n را می توان بر حسب غلظت همان جزء در جریان تهی شده نوشت:

$$y_{235,n,(t)} = \alpha_n q_{238,n,(t)} x_{235,n,(t)} \quad (11)$$

با به کارگیری رابطه ۱۱ در رابطه ۴، غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ قابل محاسبه است. به طور مشابه می توان 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 می شود. سپس با استفاده از رابطه های ۹ و ۱۱، معادلات ۴، ۵ و ۶ برای ایزوتوپ ۲۳۵ و ایزوتوپ ۲۳۸ حل می شوند. پس از محاسبه غلظت ها، باید غلظت های محاسبه شده در جریان غنی شده، تهی شده و خوراک برابر یک باشد که بر همین اساس می توان $q_{238,n}$ را به صورت زیر برای تکرار بعد اصلاح نمود [۱۳]:

$$q_{238,n,(t)} = \frac{z_{235,n,(t)} + z_{238,n,(t)}}{\alpha_n x_{235,n,(t)} + x_{238,n,(t)}} \quad (12)$$

شرط هم گرایی در این روش به صورت رابطه ۱۳، که در آن ε میزان خطا را نشان می دهد، می باشد:

$$\max((q_{238,n})_{iteration} - (q_{238,n})_{iteration-1}) \leq \varepsilon \quad (13)$$

۳.۲ روش حل عددی معادلات

برای شروع فرایند حل عددی معادلات، در ابتدا سمت راست رابطه ۴ به صورت زیر نام گذاری می شود:

$$N_{n+1}x_{n+1,(t)} + M_{n+1}y_{n+1,(t)} - N_n x_{n,(t)} - M_n y_{n,(t)} = g \quad (14)$$

برای حل رابطه ۴، ابتدا از روش تفاضل محدود کرنک نیکلسون جهت گسسته سازی استفاده می شود. با اعمال این روش بر روی یک معادله، جمله های دارای مشتق زمانی به صورت تفاضل محدود پیش رو^۱ و جمله های فاقد مشتق

1. Forward Difference

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

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 $q_{\text{تران},n}$ 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 ایگاجو^۱ مطابق مرجع [۱۴] استفاده شد. مشخصات زنجیره موردنظر در جدول ۲ بیان شده است. هم‌چنین نرخ خوراک ورودی به زنجیره برابر 240 g.h^{-1} ، مرحله ورود خوراک و غلظت ایزوتوپ اورانیم 235 در خوراک ورودی 0.0072 می‌باشد. میزان موجودی گاز در این ماشین 0.8 g بوده و فاکتور جداسازی به‌صورت 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 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 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.

به‌صورت 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:

$$(15)$$

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

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

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

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

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

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 به‌صورت زیر می‌باشد.

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

1. Iguaçu

شکل ۳. نحوه تغییر فاکتور جداسازی با نرخ جریان خوراک ورودی به ماشین Iguazu. جدول ۲. مشخصات زنجیره ذکر شده در مرجع [۱۴] جهت راستی آزمایی کد برنامه

شماره مراحل	تعداد ماشین در مراحل	ضریب برش مراحل	نرخ خوراک ورودی به هر ماشین در مراحل (g.h^{-1})
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 غلظت های اورانیم ۲۳۵ محاسبه شده توسط برنامه در شرایط پایا و شبیه سازی 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 بر حسب درصد	Y_i محاسبه شده توسط کد	Y_i محاسبه شده در مرجع ۱۴	خطای نسبی در محاسبه Y_i بر حسب درصد
۱	۰/۰۳۵۰۲	۰/۰۳۵۰۰	۰/۰۵۷	۰/۰۴۴۶۵	۰/۰۴۴۰۰	۱/۳۹۱
۲	۰/۰۳۹۵۴	۰/۰۳۹۰۰	۱/۳۹۱	۰/۰۵۰۲۶	۰/۰۵۰۰۰	۱/۳۰۱
۳	۰/۰۴۴۵۵	۰/۰۴۴۰۰	۱/۲۴۷	۰/۰۵۶۷۶	۰/۰۵۶۰۰	۰/۵۹۰
۴	۰/۰۵۰۳۲	۰/۰۵۰۰۰	۰/۶۴۰	۰/۰۶۴۰۲	۰/۰۶۳۰۰	۱/۳۹۸
۵	۰/۰۵۶۷۹	۰/۰۵۶۰۰	۱/۴۰۶	۰/۰۷۲۰۱	۰/۰۷۱۰۰	۱/۴۹۵
۶	۰/۰۶۳۸۶	۰/۰۶۳۰۰	۱/۳۶۱	۰/۰۸۱۲۵	۰/۰۸۰۰۰	۱/۴۷۰
۷	۰/۰۷۲۰۹	۰/۰۷۱۰۰	۱/۵۳۱	۰/۰۹۱۵۸	۰/۰۹۰۰۰	۱/۵۶۶
۸	۰/۰۸۱۲۲	۰/۰۸۰۰۰	۱/۵۳۱	۰/۱۰۳۳۳	۰/۱۰۲۰۰	۱/۸۳۶
۹	۰/۰۹۱۷۳	۰/۰۹۰۰۰	۱/۹۲۴	۰/۱۱۶۵۶	۰/۱۱۵۰۰	۱/۴۲۱
۱۰	۰/۱۰۳۵۰	۰/۱۰۲۰۰	۱/۴۶۷	۰/۱۳۱۱۵	۰/۱۲۹۰۰	۱/۳۱۰
۱۱	۰/۱۱۶۳۱	۰/۱۱۵۰۰	۱/۱۳۸	۰/۱۴۷۷۵	۰/۱۴۶۰۰	۱/۶۲۷
۱۲	۰/۱۳۱۰۰	۰/۱۲۹۰۰	۱/۵۴۸	۰/۱۶۶۴۸	۰/۱۶۴۰۰	۱/۱۵۳
۱۳	۰/۱۴۷۶۵	۰/۱۴۶۰۰	۱/۱۳۰	۰/۱۸۷۱۹	۰/۱۸۵۰۰	۱/۳۴۹
۱۴	۰/۱۶۵۹۳	۰/۱۶۴۰۰	۱/۱۷۵	۰/۲۰۹۰۷	۰/۲۰۵۰۰	۱/۵۸۵
۱۵	۰/۱۸۴۲۵	۰/۱۸۲۰۰	۱/۲۳۸	۰/۲۳۴۲۶	۰/۲۳۰۰۰	۱/۵۸۱
۱۶	۰/۲۰۵۵۴	۰/۲۰۳۰۰	۱/۲۵۲	۰/۲۶۳۳۱	۰/۲۵۸۰۰	۱/۳۲۴
۱۷	۰/۲۳۰۳۷	۰/۲۲۷۰۰	۱/۴۸۲	۰/۲۹۶۸۷	۰/۲۹۱۰۰	۱/۵۵۹
۱۸	۰/۲۵۹۴۳	۰/۲۵۶۰۰	۱/۳۴۰	۰/۳۳۵۶۳	۰/۳۳۰۰۰	۱/۳۵۳
۱۹	۰/۲۹۳۴۸	۰/۲۹۰۰۰	۱/۲۰۰	۰/۳۸۰۵۲	۰/۳۷۶۰۰	۱/۴۱۱

اورانیم، از مشخصات همان زنجیره معرفی شده در مرجع [۱۴] به عنوان زنجیره مدل در بررسی های بعدی استفاده شده است. ۲۰۳ توزیع غلظت اورانیم ۲۳۵ در زنجیره مدل در حالت گذرا در یک زنجیره غنی سازی، غلظت ایزوتوپ ها با گذشت زمان در طول زنجیره تغییر می کند تا در نهایت با رسیدن به زمان تعادل غلظت ها به یک شرایط پایا برسند. بنابراین پیشگویی زمان رسیدن به تعادل و نحوه تغییرات غلظت ایزوتوپ ها در طول زنجیره در حالت گذرا اهمیت زیادی در طراحی زنجیره و

همان طور که در جدول ۳ مشاهده می شود، کد محاسبه توزیع غلظت در حالت گذرا، نتایج یکسانی در حالت پایا با نتایج شبیه سازی در مرجع [۱۴] داشته است. بنابراین با توجه به تأیید برنامه نوشته شده، از این برنامه برای شبیه سازی اثرات از کار افتادن ماشین های سانتریفیوژ گازی در حالت گذرا می توان استفاده نمود. برای بررسی تأثیر از کار افتادن ماشین های سانتریفیوژ بر عملکرد زنجیره های غنی سازی

است که وقوع این رخداد در مرحله ۱۸ زنجیره مدل اتفاق افتاده باشد.

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 ^{235}U 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، 0.5% و بیش‌ترین افزایش غنای جریان پسماند نسبت به حالت قبل از حادثه 0.2% 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 ^{235}U در جریان غنی شده مرحله ۱۸، یعنی y_{18} ، کاهش پیدا کرده که در پی آن غلظت ایزوتوپ ^{235}U 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 ^{235}U 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 ^{235}U در جریان محصول و پسماند زنجیره مدل بر حسب زمان.

مسائل مربوط به حسابرسی‌های پادمانی دارد. بدین‌منظور عملکرد گذرای زنجیره مدل برای غنی‌سازی ایزوتوپ‌های اورانیم ^{235}U از خوراک طبیعی هگزافلوراید اورانیم با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری بررسی شد. در این شبیه‌سازی فرض شده است که غلظت اولیه ایزوتوپ ^{235}U در تمامی مراحل زنجیره مدل برابر غلظت خوراک بوده و مرحله ورود خوراک نیز برابر ۶ می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی تغییرات غلظت ایزوتوپ ^{235}U در جریان محصول و جریان پسماند زنجیره مدل بر حسب زمان در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، غلظت ایزوتوپ ^{235}U 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 ^{235}U در جریان محصول و پسماند زنجیره به حالت پایا می‌رسد. هم‌چنین نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری تغییرات گذرای غلظت ایزوتوپ ^{235}U در جریان غنی شده مراحل مختلف زنجیره مدل در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییرات غلظت ایزوتوپ ^{235}U 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.

۳.۳ 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 ^{235}U 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 ^{235}U 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

شکل ۵. تغییرات گذرای غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان غنی شده 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٪ کمتر 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 ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول بر حسب زمان، هنگام وقوع پدیده از کار افتادن ماشین.

همان طور که از شکل ۱۰ مشاهده می شود، موجودی گاز در ماشین سانتریفیوژ تأثیر کمی بر میزان کاهش غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول در حالت پایا در هنگام از کار افتادن ماشین ها در زنجیره مدل را دارد و این پارامتر تنها زمان رسیدن به تعادل در غلظت ها را تحت تأثیر قرار می دهد. همان طور که از این شکل مشاهده می شود، با افزایش موجودی گاز ماشین، زمان رسیدن به شرایط پایای جدید هنگام از کار افتادن ماشین ها در زنجیره مدل افزایش می یابد.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله عملکرد زنجیره های متقارن دو جزیی در حالت گذرا مدل سازی شد. هم چنین نتایج کد کامپیوتری تهیه شده با نتایج شبیه سازی حالت پایای یک زنجیره غنی سازی اورانیم با ماشین سانتریفیوژ ایگاوچو موجود در مراجع بررسی و تأیید شد. نتایج شبیه سازی کامپیوتری زنجیره مدل برای غنی سازی اورانیم ۲۳۵ هنگام وقوع پدیده از کار افتادن ماشین های سانتریفیوژ در حالت گذرا نشان داد که هر چه ماشین های 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 بیش تر خواهد بود. با بررسی روند تغییرات غلظت ایزوتوپ ۲۳۵ در جریان محصول زنجیره در طول زمان، مشاهده شد هر چه ماشین های از کار افتاده به مراحل آخر زنجیره نزدیک تر باشند میزان کاهش در نقطه کمینه نمودار غلظت جریان محصول بیش تر خواهد بود. نتایج شبیه سازی کامپیوتری نشان داد هر چه فاکتور جداسازی ماشین کاهش پیدا کند، میزان تأثیر از کار افتادن ماشین ها بر روی غلظت جریان خروجی زنجیره و زمان رسیدن به شرایط پایای مجدد بیش تر خواهد بود. هم چنین 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 می دهد و بر روی غلظت محصول تأثیر کمی دارد.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

استناد به این مقاله

علیرضا کشتکار، عباس رشیدی، جواد کریمی ثابت، علی نوروزی (۱۳۹۹)، مدل سازی و شبیه سازی عملکرد گذرای یک زنجیره غنی سازی اورانیم هنگام وقوع پدیده از کار افتادن ماشین های سانتریفیوژ گازی، ۹۴-۴۵

DOI: 10.24200/nst.2021.1169

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1169.html