



طراحی و بهینه‌سازی زنجیره مخروطی به منظور جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار چند جزئی با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی و عملیاتی ماشین سانتریفیوژ

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: ۴۱۶، بابلسر - ایران

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

*Email: akeshtkar@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۶/۲

چکیده

در هنگام طراحی زنجیره‌های مخروطی به دلیل مشکلات هیدرودینامیکی، هر زنجیره‌ای قابلیت عملیاتی شدن ندارد. در این مقاله روش طراحی و بهینه‌سازی زنجیره مخروطی به منظور جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار چند جزئی با در نظر گرفتن ملاحظات عملیاتی ماشین سانتریفیوژ شرح داده می‌شود. در این روش طراحی زنجیره، در مرحله اول مشخصات هیدرولیکی و جداسازی ماشین سانتریفیوژ تعیین می‌شود و سپس با استفاده از این اطلاعات و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، زنجیره بهینه با کم‌ترین تعداد ماشین سانتریفیوژ طراحی می‌شود. در این مقاله برای یافتن زنجیره بهینه الگوریتم بهینه‌سازی گرگ خاکستری به کار گرفته شده و با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی ماشین سانتریفیوژ، عملیاتی بودن زنجیره بررسی می‌شود و قید عملیاتی بودن زنجیره از لحاظ هیدرولیکی به تابع هدف در بهینه‌سازی اضافه می‌شود. برای تعیین مشخصات هیدرولیکی ماشین با استفاده از شبیه‌سازی هیدرودینامیکی ماشین سانتریفیوژ در حالت گذرا، ارتباط مابین فشارهای خط محصول و پسماند، خوراک ورودی و ضریب برش ماشین سانتریفیوژ تعیین می‌شود. با استفاده از روش طراحی ارایه شده، یک زنجیره با قابلیت عملیاتی بودن از منظر هیدرودینامیکی با استفاده از ماشین سانتریفیوژ TC-۱۲ برای جداسازی ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵ از سوخت مصرف شده تا غنای ۴ درصد طراحی شده و نحوه تغییرات فشار در زنجیره ارایه شده است.

کلیدواژه‌ها: طراحی، زنجیره مخروطی، بهینه‌سازی، ماشین سانتریفیوژ، شیر کنترلی

Design and optimization of a tapered cascade for the separation of a multi-component mixture by consideration of the hydraulic and operational parameters of the gas centrifuge machine

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, Mazandaran University, P.O.BOX: 416, Babolsar - Iran

3. Advanced Technologies Company of Iran, AEOL, P.O. Box: 14399-55431, Tehran - Iran

Research Article

Received 16.5.2021, Accepted 24.8.2021

Abstract

In the design of tapered cascades, due to hydrodynamic problems, not every cascade can be operated. This paper describes the method of designing and optimizing a tapered cascade for the separation of stable multi-component mixtures by considering the operational parameters of the gas centrifuge machine. In this method, the hydraulic specifications and separation of the centrifuge machine are determined in the first stage. Then, using this information and optimization algorithms, the optimal cascade is designed with the least number of centrifugal machines. This paper uses the grey wolf optimization algorithm to find the optimal cascade. The cascade operation is checked using the hydraulic parameters of the gas centrifuge. The operational limitation of the cascade is added hydraulically to the fitness function in optimization. To determine the hydraulic characteristics of the gas centrifuge, a transient simulation of the gas centrifuge hydrodynamic is presented and the relationship between product and waste pressure lines, feed flow, and cut is determined. Using the proposed design method, an operational cascade is designed using a TC-12 centrifuge machine to separate the uranium 235 isotope from the reprocessed fuel to a 4% enrichment. And the pressure variation in the cascade is presented.

Keywords: Design, Tapered cascade, Optimization, Centrifuge machine, Control valve



۱. مقدمه

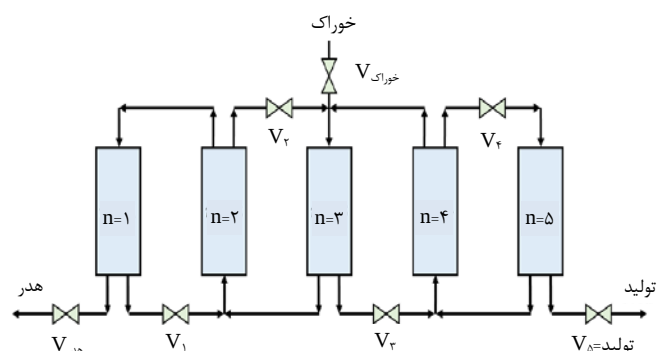
با توجه به تغییرات ضریب برش و شرایط هیدرولیکی در طول زنجیره، رفتار هیدرولیکی و جداسازی ماشین سانتریفیوژ در مراحل، متفاوت است. بنابراین در صورتی که پارامترهای فرایندی زنجیره بهینه از قبیل ضریب برش مراحل و میزان خوراک ورودی به ماشین در مراحل مطابق با رفتار ماشین سانتریفیوژ انتخاب شده برای زنجیره نباشد امکان عملیاتی کردن این زنجیره وجود ندارد و در هنگام طراحی زنجیره می‌بایست شرایط هیدرولیکی ماشین سانتریفیوژ لحاظ شود. بنابراین اولین قدم طراحی زنجیره برای جداسازی ایزوتوپ‌های عناصر چند جزئی، ارزیابی مشخصات هیدرولیکی و جداسازی ماشین‌های سانتریفیوژ می‌باشد، مشخصات جداسازی ماشین سانتریفیوژ شامل تعیین فاکتور جداسازی برای گاز مورد نظر بوده و مشخصات هیدرولیکی ماشین، شامل تغییرات پارامترهای فرایندی ماشین (ضریب برش و موجودی گاز درون ماشین) در شرایط مختلف کاری زنجیره می‌باشد. فاکتور جداسازی و پارامترهای هیدرولیکی یک ماشین سانتریفیوژ برای یک گاز مشخص، به صورت تجربی و تئوری تعیین می‌شوند. در آزمون‌های تجربی، ماشین سانتریفیوژ در مقادیر مختلف خوراک و فشارهای خطوط پسماند و محصول گازدهی شده و ضریب برش ماشین سانتریفیوژ تعیین می‌شود و با نمونه‌گیری از گاز و تعیین مقدار غلظت ایزوتوپ‌ها، فاکتور جداسازی تعیین می‌شود. در روش تئوری، محاسبه پارامترهای جداسازی با حل جریان داخل سانتریفیوژ و حل معادله غلظت در داخل آن امکان‌پذیر می‌شود.

برای تعیین نحوه تغییرات ضریب برش به منظور محاسبه پارامترهای فرایندی ماشین سانتریفیوژ باید هیدرودینامیک جریان به صورت گذرا حل شود. با توجه به این که در روش حل به صورت پایا، میزان موجودی گاز درون ماشین سانتریفیوژ محاسبه نمی‌شود، از روش حل گذرا استفاده شده و با محاسبه موجودی گاز در هر یک از حالت‌ها از نتایج محاسبه شده در زمان بی‌نهایت (حالت پایدار) برای طراحی استفاده می‌شود.

در تحقیقات انجام شده برای شبیه‌سازی رفتار هیدرودینامیکی یک ماشین سانتریفیوژ در سال ۱۹۸۶ ملیک و همکاران با شبیه‌سازی هیدرولیکی یک ماشین سانتریفیوژ اثر جریان در تولید ارتعاشات لوله پسماند ماشین سانتریفیوژ را بررسی کردند [۲]. ملیک و همکاران در سال ۱۹۹۸ مدل ریاضی برای شبیه‌سازی هیدرولیکی زنجیره‌ها را ارائه کردند [۳]. با استفاده از همین روش زنگ و همکاران در سال ۲۰۰۵ شبیه‌سازی هیدرولیکی یک زنجیره مربعی را انجام دادند [۱]. در تحقیقات انجام شده ارتباط پارامترها و تعیین مشخصات هیدرولیکی ماشین ارائه نشده است.

روش سانتریفیوژ گازی از متداول‌ترین روش‌ها برای جداسازی ایزوتوپ‌های عناصر چند جزئی است. در زنجیره‌های سانتریفیوژ گازی با تغییر جریان گاز در بین مراحل، ماشین‌های سانتریفیوژ در ساختارهای مربعی و مخروطی چیده می‌شوند. در هنگام طراحی این زنجیره‌ها برای رسیدن به غلظت ایزوتوپ هدف در محصول و پسماند زنجیره در ابتدا با استفاده از یکی از زنجیره‌های مدل از قبیل زنجیره Q، R و یا زنجیره Quasi تعداد مراحل، ضریب برش زنجیره و همچنین مقدار خوراک ورودی به زنجیره محاسبه می‌شود سپس با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی و این پارامترهای مشخص شده زنجیره بهینه با کم‌ترین جریان بین مراحل و یا کم‌ترین تعداد ماشین سانتریفیوژ طراحی می‌شود. در سیستم‌های چند جزئی پس از یافتن زنجیره بهینه برای ایجاد ساختار آن و دستیابی به یک غلظت مشخص محصول و پسماند، نسبت جریان محصول به خوراک مراحل (ضریب برش مراحل) در مقادیر معین، ثابت نگه داشته می‌شود. مطابق با شکل ۱ برای انجام این کار از شیرهای قرار داده شده در بین مراحل استفاده می‌شود. با تنظیم شیرهای موجود در بین مراحل امکان ایجاد شرایط زنجیره بهینه فراهم می‌آید [۱]. شیرهای کنترلی در بین مراحل، بر روی جریان سبک خروجی از مراحل قرار دارند و با استفاده از آن‌ها فشار قبل از شیر کنترل می‌شود.

ضریب برش ماشین سانتریفیوژ برای هر گاز، تابعی از دبی گاز ورودی و فشار گاز در خروجی جریان سبک می‌باشد. بر همین اساس برای تنظیم یک ضریب برش مشخص با توجه به میزان خوراک ورودی به مرحله، با استفاده از شیر کنترلی مقدار فشار جریان سبک تنظیم می‌شود.



شکل ۱. طرح‌واره یک زنجیره با ۵ مرحله و نحوه قرارگیری شیرها در زنجیره.



بهینه‌سازی گرگ خاکستری به کار گرفته شده و زنجیره‌ای بهینه با حداقل تعداد ماشین سانتریفیوژ برای رسیدن به غلظت ایزوتوپ هدف جستجو می‌شود، به‌طور هم‌زمان با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی ماشین سانتریفیوژ، عملیاتی بودن زنجیره بررسی می‌شود و قید عملیاتی بودن زنجیره از لحاظ هیدرولیکی به تابع هدف در بهینه‌سازی اضافه می‌شود. در نهایت برای زنجیره طراحی شده با استفاده از مشخصات هیدرولیکی ماشین نحوه تنظیم شیرهای بین مراحل برای ایجاد شرایط عملیاتی زنجیره ارایه می‌شود.

برای انجام شبیه‌سازی هیدرودینامیکی ماشین سانتریفیوژ، یک ماشین سانتریفیوژ همراه با خطوط محصول و پسماند شبیه‌سازی شده و با تغییر پارامترهای جریان و فشار، مشخصات هیدرولیکی ماشین تعیین می‌شود. سیستم در نظر گرفته شده شامل خطوط لوله، ماشین سانتریفیوژ، شیرهای کنترل جریان است که باید برای هر کدام شبیه‌سازی انجام شود. در الگوریتم بهینه‌سازی تابع هدف یافتن زنجیره با حداقل تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ می‌باشد، الگوریتم بهینه‌سازی میزان دبی خوراک ماشین‌ها در مراحل و ضریب برش مراحل برای زنجیره بهینه را تعیین می‌کند. با توجه به ضریب برش مراحل یافت شده و تابعیت ضریب برش از خوراک ورودی و فشارهای خروجی زنجیره، توزیع فشار در زنجیره به دست آمده و میزان افت فشار تنظیم شده در شیرهای بین مراحل تعیین می‌گردد.

۲. تئوری و معادلات حاکم

۱.۲ شبیه‌سازی هیدرودینامیک ماشین سانتریفیوژ

در آزمون‌های تجربی بر روی ماشین و هم‌چنین در زنجیره، یک ماشین سانتریفیوژ با المان لوله‌ها، اتصالات لوله‌ها و شیرهای کنترلی در ارتباط است و جریان گاز از این المان‌ها عبور می‌کند. بنابراین برای محاسبه رفتار هیدرودینامیکی ماشین سانتریفیوژ باید جریان گاز در هر یک از این اجزا شبیه‌سازی شود.

۱.۱.۲ شبیه‌سازی جریان در لوله

برای جریان گاز در حین عبور از لوله با فرض تک‌بعدی در نظر گرفتن جریان چهار معادله، پیوستگی، ممنتوم، انرژی و معادله حالت حاکم می‌باشد. با توجه به این‌که جریان گاز موجود در زنجیره هم‌دما است، می‌توان از معادله انرژی صرف‌نظر کرد. روابط پیوستگی و ممنتوم در برای گاز ایده‌آل در یک لوله به‌ترتیب زیر است [۸].

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{RT}{A} \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

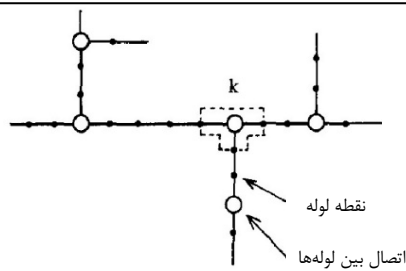
$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial t} + A \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{RT}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\dot{m}^2}{P} \right) + \frac{\gamma f_f RT \dot{m} |\dot{m}|}{DPA} = 0 \quad (2)$$

در گام دوم با استفاده از یک زنجیره مدل مقدار ضریب برش زنجیره، تعداد مراحل و نرخ خوراک ورودی به زنجیره تعیین می‌شود. زنجیره مدل انتخاب شده در این مقاله زنجیره Q است. در گام سوم برای طراحی زنجیره مخروطی بهینه در سیستم‌های چند جزئی با استفاده از مشخصات جداسازی تعیین شده برای ماشین سانتریفیوژ و پارامترهای حاصله از زنجیره مدل، زنجیره‌های مختلف برای رسیدن به حداقل تعداد ماشین سانتریفیوژ بررسی می‌شوند، که برای انجام این کار از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده می‌شود. در جداسازی سیستم‌های چند جزئی توسط زنجیره‌های سانتریفیوژ گازی یکی از معیارهای کلیدی برای تعیین راندمان جداسازی، حداقل ساختن هزینه‌های اقتصادی برای به دست آوردن محصول موردنظر است. در صنعت جداسازی نمی‌توان معیار هزینه‌های اقتصادی را در مطالعات تئوری بهینه‌سازی زنجیره‌ها به کار برد، و از پارامترهایی که به‌طور غیرمستقیم بر روی هزینه تأثیرگذارند استفاده می‌شود. یکی از این پارامترها، تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ مورد استفاده در زنجیره می‌باشد. تابع هدف انتخاب شده در این مقاله حداقل نمودن تعداد ماشین‌های زنجیره برای رسیدن به غلظت موردنظر می‌باشد. تعداد ماشین‌های زنجیره نشان‌دهنده میزان هزینه جداسازی می‌باشد.

در تحقیقات پیشین در زمینه بهینه‌سازی زنجیره‌ها، در سال ۲۰۱۱ نوروزی و همکاران با استفاده از الگوریتم PSO پارامترهای یک زنجیره متداول دو جزئی را جهت بهینه‌سازی تعداد ماشین‌ها و کار جداسازی به کار بردند [۴]. در سال ۲۰۱۳ پالکین با استفاده از فاکتور جداسازی متغییر زنجیره چند جزئی بهینه با حداقل تعداد ماشین سانتریفیوژ ارایه نمود [۵]. در سال ۲۰۱۷ صفدری و همکاران با استفاده از الگوریتم PSO پارامترهای یک زنجیره متداول چند جزئی را جهت بهینه‌سازی تعداد ماشین‌ها و کار جداسازی به کار برد [۶] و در سال ۲۰۱۸ منصورزاده و همکاران با استفاده از الگوریتم TLBO زنجیره متداول چند جزئی را در حالت بهینه مربعی و مخروطی مقایسه نمودند [۷].

در این مقاله هدف طراحی و بهینه‌سازی زنجیره با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی ماشین سانتریفیوژ می‌باشد. بنابراین در ابتدا مشخصات هیدرولیکی ماشین سانتریفیوژ از طریق شبیه‌سازی تعیین می‌شود. ماشین سانتریفیوژ TC-۱۲ برای شبیه‌سازی استفاده شده است و ضریب برش این ماشین برحسب فشارهای خروجی و جریان خوراک ورودی محاسبه می‌شود. در ادامه با استفاده از زنجیره Q که یک مدل تحلیلی از زنجیره می‌باشد می‌توان تعداد مراحل و ضریب برش زنجیره مورد نیاز برای رسیدن به غلظت ایزوتوپ هدف در جریان محصول و پسماند زنجیره را محاسبه کرد. سپس الگوریتم





شکل ۲. حجم کنترل نقطه اتصال بین خطوط لوله.

$$\frac{dP}{dt} + \frac{RT}{V_{node} + \sum_{k=1}^K \Delta x_k A_k} \sum_{k=1}^K \dot{m}_k = 0 \quad (۸)$$

در رابطه بالا، V حجم گره نقطه اتصال و ترم دوم مخرج، میزان حجم لوله‌ها در حجم کنترل است. K تعداد لوله‌ها در نقطه اتصال است.

در حالت پایا رابطه (۸) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sum \dot{m}_{out} = \sum \dot{m}_{in} \quad (۹)$$

برای گسسته‌سازی معادله (۸) به صورت زیر عمل می‌شود:

$$\frac{P_i^{m+1} - P_i^m}{\Delta t} + \frac{RT / \gamma}{V + \sum_{k=1}^K \Delta x_k A_k} (\sum_{k=1}^K \dot{m}_k^{m+1} + \sum_{k=1}^K \dot{m}_k^m) = 0 \quad (۱۰)$$

با مرتب کردن رابطه بالا به نحوی که ترم‌های گام زمانی $m+1$ در سمت چپ معادله قرار بگیرند. رابطه (۱۱) حاصل می‌شود:

$$P_i^{m+1} - \frac{\Delta t RT / \gamma}{V + \sum_{k=1}^K \Delta x_k A_k} \sum_{k=1}^K \dot{m}_k^{m+1} = P_i^m + \frac{\Delta t RT / \gamma}{V + \sum_{k=1}^K \Delta x_k A_k} \sum_{k=1}^K \dot{m}_k^m \quad (۱۱)$$

با بازنویسی رابطه (۱۱):

$$P_i^{m+1} - C_i \sum_{k=1}^K \dot{m}_k^{m+1} = P_i^m + C_i \sum_{k=1}^K \dot{m}_k^m \quad (۱۲)$$

که در رابطه (۱۲):

$$C_i = \frac{\Delta t RT / \gamma}{V + \sum_{k=1}^K \Delta x_k A_k} \quad (۱۳)$$

در معادله ۲ ترم سوم فقط در جریان‌های با سرعت بالا و نزدیک به سرعت صوت دارای اهمیت است و در سایر موارد می‌توان از آن صرف‌نظر کرد. برای حل معادلات ۱ و ۲ از روش تفاضل محدود ضمنی استفاده می‌شود. در روش تفاضل محدود کاملاً ضمنی نحوه گسسته‌سازی به صورت زیر است:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_i^{m+1} - u_i^m}{\Delta t} \quad (۳)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1}^{m+1} - u_{i-1}^{m+1}}{2 \Delta x} \quad (۴)$$

در معادلات بالا اندیس m نمایش‌دهنده‌ی شماره بازه زمانی و اندیس پایین i نمایش‌دهنده‌ی شماره گره مکانی است. با استفاده از روش تفاضل محدود کاملاً ضمنی برای گسسته‌سازی معادلات پیوستگی و ممنوم، روابط زیر به ترتیب حاصل می‌شود:

$$-\dot{m}_{i-1}^{m+1} + \frac{\gamma A \Delta x}{RT \Delta t} P_i^{m+1} + \dot{m}_{i+1}^{m+1} = \frac{\gamma A \Delta x}{RT \Delta t} P_i^m \quad (۵)$$

$$-P_{i-1}^{m+1} + \left(\frac{\gamma \Delta x}{BA \Delta t} + \frac{\gamma RT f_f |\dot{m}_i^{m+1}|}{A^2 BDP_i^{m+1}} \right) \dot{m}_i^{m+1} + P_{i+1}^{m+1} = \frac{\gamma \Delta x}{BA \Delta t} \dot{m}_i^m \quad (۶)$$

سمت راست معادلات بالا از بازه زمانی قبل حاصل شده است و معلوم مسئله است. سمت چپ معادلات، دبی و فشار در بازه زمانی جاری هستند که مجهولات مسئله هستند. ترم دوم سمت چپ معادله (۶)، غیرخطی است و برای خطی کردن این ترم از الگوریتم تکرار استفاده می‌شود به این صورت که مقادیر ضرب m_i^{m+1} در یک بازه زمانی با الگوریتم تکرار اصلاح می‌شود [۹].

$$-P_{i-1}^{m+1} + \left(\frac{\gamma \Delta x}{BA \Delta t} + \frac{\gamma RT f_f |\dot{m}_i^*|}{A^2 BDP_i^* + P_{i+1}^*} \right) \dot{m}_i^{m+1} + P_{i+1}^{m+1} = \frac{\gamma \Delta x}{BA \Delta t} \dot{m}_i^m \quad (۷)$$

اندیس * نمایش‌دهنده مقادیر از تکرار مرحله قبل و پارامتر f ضریب اصطکاک فنینگ است.

۲.۱.۲ شبیه‌سازی اتصال لوله‌ها

در نقطه اتصال لوله‌ها به یک‌دیگر باید رابطه پیوستگی برآورده شود.

برای حجم کنترل در نظر گرفته شده در شکل ۲ معادله پیوستگی به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۰].



در صورتی که نسبت فشار کمتر از نسبت فشار بحرانی باشد، در این حالت خفه‌گی رخ داده و جریان عبوری تابع فشار بعد از شیر نخواهد بود. بیش‌ترین میزان دبی عبوری در یک میزان سطح مقطع ثابت شیر در حالت خفه‌گی رخ خواهد داد. جریان عبوری در این حالت مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود [۱۱]:

$$\dot{m} = C_d A_t P_1 \sqrt{\frac{\gamma}{RT} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}}} \quad (17)$$

نسبت فشار بحرانی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{P_r}{P_1} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{(\gamma)}{(\gamma-1)}} \quad (18)$$

در روابط بالا γ نسبت گرمایی ویژه و A_t سطح مقطع گلویی شیر است.

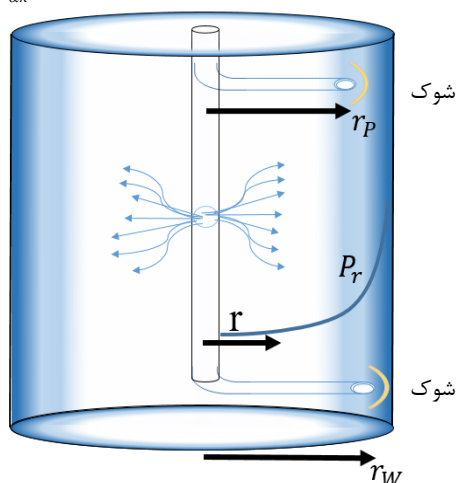
۴.۱.۲ ماشین سانتریفیوژ

برای مدل‌سازی ماشین سانتریفیوژ در زنجیره دو عملکرد برای آن در نظر گرفته می‌شود: عملکرد به صورت مخزن و عملکرد به صورت پمپ. برای ماشین سانتریفیوژ به عنوان یک مخزن ذخیره‌ساز معادله پیوستگی به صورت زیر نوشته می‌شود [۳].

$$\frac{dP_{av}}{dt} + \frac{RT}{V_r} (\sum \dot{m}) = 0 \quad (19)$$

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است توزیع فشار درون ماشین به صورت نمایی است. در معادله (۱۹) برای فشار ماشین سانتریفیوژ مقدار متوسط در نظر گرفته می‌شود، زیرا فشار به صورت نمایی در راستای شعاع تغییر می‌کند.

$$P_r = P_{ax} e^{Zr^2} \quad (20)$$



شکل ۳. طرح‌واره ماشین سانتریفیوژ و توزیع فشار در داخل ماشین.

حال با توجه به رابطه (۱۲) تابع خطا به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E(P_i^{n+1}) = P_i^{n+1} - C_i \sum_{k=1}^K \dot{m}_k^{n+1} - P_i^n - C_i \sum_{k=1}^K \dot{m}_k^n = 0 \quad (14)$$

فشاری که بتواند رابطه (۱۴) را ارضا کند، فشار نقطه اتصال لوله‌ها به یکدیگر است. در این رابطه، جریان‌ها نیز از طریق روابط پیوستگی و ممنوم تابع P_i^{n+1} می‌باشد، بنابراین تابع خطا تابعی غیرخطی از P_i^{n+1} می‌باشد.

برای حل رابطه (۱۴) از روش حل سکانت که تعمیم یافته روش نیوتن است، استفاده می‌شود. در این روش نیاز به دو حدس اولیه فشار نقطه است و با استفاده از فشارهای حدس زده شده، مقدار خطا محاسبه می‌گردد. با استفاده از مقادیر حدس زده شده می‌توان فشار را از طریق رابطه زیر به روش سکانت محاسبه نمود [۳].

$$P_i^{ite+1} = P_i^{ite} - E(P_i^{ite}) \frac{P_i^{ite} - P_i^{ite-1}}{E(P_i^{ite}) - E(P_i^{ite-1})} \quad (15)$$

روش سکانت همان روش نیوتن است، با این تفاوت که فرم مشتق معادله به صورت تفاضل محدود به کار می‌رود که از همین رو به دو حدس اولیه نیاز است. حدس اول را می‌توان فشار اولیه و حدس دوم را یک تغییر ناچیز از فشار اولیه در نظر گرفت. مزیت استفاده از روش سکانت در این است که نیازی به مشتق-گیری روابط که فرم پیچیده‌ای دارند، وجود ندارد.

۳.۱.۲ جریان در شیرهای کنترلی

شبیه‌سازی جریان در هنگام عبور از شیرهای کنترلی همانند شبیه‌سازی جریان در هنگام عبور از نازل‌های همگرا-واگرا است. در هنگام عبور جریان از نازل‌ها، میزان دبی عبوری از شیر تابع فشار قبل و بعد شیر و میزان سطح مقطع گلویی شیر است. از شیرهای کنترلی در ابتدا و انتهای زنجیره استفاده می‌شود. در صورتی که اختلاف فشار قبل و بعد از شیر بیش‌تر از نسبت فشار بحرانی باشد، جریان زیر صوت بوده و دبی عبوری از شیر طبق رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$\dot{m} = C_d A_t P_1 \sqrt{\frac{\gamma}{RT} \left(\frac{2}{\gamma-1} \right) \left[\left(\frac{P_r}{P_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_r}{P_1} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{\gamma}} \right]} \quad (16)$$



برای شبیه‌سازی جریان در این لوله در انتهای آن و هنگام ورود گاز به ماشین سانتریفیوژ از شرط مرزی عدد ماخ استفاده می‌شود. در شکل ۴ این مسأله به صورت طرح‌واره نمایش داده شده است.

شرط عدد ماخ در انتهای لوله به صورت زیر اعمال می‌شود [۲].

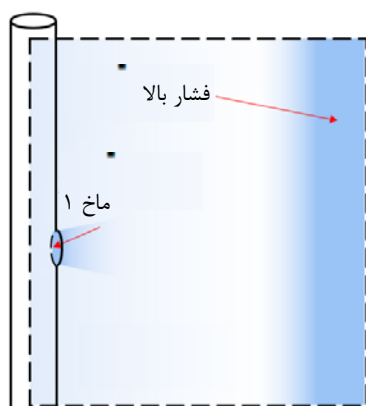
$$\text{Mach} = \frac{v}{v_{\text{sound}}} = \frac{\frac{\dot{m}}{\rho A}}{\sqrt{\gamma RT}} = 1 \quad (28)$$

با جایگذاری رابطه گاز ایده‌آل به جای چگالی در رابطه بالا می‌توان رابطه‌ای مابین دبی و فشار در نقطه انتهای لوله به صورت زیر به دست آورد و از رابطه حاصله می‌توان به عنوان شرط مرزی در حل جریان لوله خوراک ورودی به ماشین استفاده نمود.

$$P = \frac{RT}{A\sqrt{\gamma RT}} \dot{m} \quad (29)$$

۵.۱.۲ الگوریتم شبیه‌سازی

الگوریتم شبیه‌سازی هیدرودینامیک در حالت گذرا در شکل ۵ نمایش داده شده است. در این کد در ابتدا پارامترهای ورودی خوانده شده و سپس شرایط اولیه اجزاء اعمال می‌شود.



شکل ۴. نمایش طرح‌واره ورود گاز به داخل ماشین.

که در این رابطه مقدار Z عبارت است از:

$$Z = \frac{\omega^2}{2RT} \quad (21)$$

در رابطه (۲۱)، ω سرعت چرخش ماشین و r فاصله شعاعی از محور می‌باشد. مقدار فشار متوسط به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$P_{av} = \frac{\int P_{\gamma} dv}{V_{\gamma}} = \frac{\int P_{\gamma} dv}{\int dv} = \frac{P_{ax} (e^{Z\gamma_1^*} - 1)}{Z\gamma_1^*} \quad (22)$$

رابطه (۲۲) را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$P_{ax} = P_{av} \frac{Z\gamma_1^*}{(e^{Z\gamma_1^*} - 1)} \quad (23)$$

بنابراین به علت عملکرد پمپ‌کردن ماشین سانتریفیوژ فشار در اسکوپ‌های محصول و پسماند به صورت زیر است [۸].

$$P_p = P_{av} \frac{Z\gamma_p^* C_p e^{Zr_p^*}}{e^{Z\gamma_p^*} - 1} \quad (24)$$

$$P_w = P_{av} \frac{Z\gamma_w^* C_w e^{Zr_w^*}}{e^{Z\gamma_w^*} - 1} \quad (25)$$

در این روابط مقادیر C_P و C_W به صورت زیر هستند:

$$C_p = \frac{1}{\gamma+1} (4Z\gamma_p^* - (\gamma-1)) \quad (26)$$

$$C_w = \frac{1}{\gamma+1} (4Z\gamma_w^* - (\gamma-1)) \quad (27)$$

γ_w فاصله شعاعی اسکوپ پسماند و γ_p فاصله شعاعی اسکوپ محصول است. ضرایب C_P و C_W برای در نظر گرفتن اثر شوک به وجود آمده در لحظه ورود گاز به اسکوپ پسماند و محصول اعمال می‌شوند. پس از ارایه نحوه محاسبه فشارها در ورودی لوله‌های اسکوپ نکته مهم دیگر در رابطه با شبیه‌سازی ماشین سانتریفیوژ نحوه ورود خوراک به ماشین سانتریفیوژ است. با توجه به این‌که در ماشین سانتریفیوژ فشار مرکز ماشین بسیار پایین است (کم‌تر از ۱ پاسکال) و جریان گاز از مرکز ماشین وارد ماشین سانتریفیوژ می‌شود در هنگام ورود گاز به ماشین سانتریفیوژ با توجه به اختلاف فشار شوک رخ خواهد داد، و عدد ماخ در انتهای لوله خوراک ماشین برابر ۱ خواهد بود، بنابراین



پارامترها مفید هستند. به عنوان مثال، زنجیره ایده‌آل در سیستم دو جزیی، نمونه شناخته‌شده‌ای از زنجیره جریان پیوسته می‌باشد. زنجیره جریان پیوسته Q به طور گسترده برای سیستم‌های چند جزیی استفاده می‌شود. این زنجیره به این دلیل Q نامیده می‌شود که برای هر ایزوتوپ در مخلوط چند جزیی، پارامتری به نام Q به صورت یک تابع تعریف می‌شود $(Q_i = \exp(\alpha_i)(M - M_i))$ و در معادلات به جای پارامتر غلظت به کار برده می‌شود. همانند زنجیره ایده‌آل، زنجیره Q قادر است پروفایل توزیع جریان زنجیره را به ازای یک غلظت مشخص از ایزوتوپ هدف در جریان محصول و پسماند زنجیره، محاسبه کند و اطلاعات اولیه و مهمی پیرامون طراحی زنجیره در اختیار طراح قرار می‌دهد. در زیر روابط زنجیره Q برای بخش غنی‌سازی و تهی‌سازی زنجیره ارائه شده است [۱۲].

$$C_i^W = \frac{1 - \exp(-Q_i S_p)}{\exp(Q_i S_w) - \exp(-Q_i S_p)} \frac{C_i^F}{1 - \theta} \quad (30)$$

$$1 - \theta = \frac{W}{F} = \sum_{j=1}^{N_c} \frac{1 - \exp(-Q_j S_p)}{\exp(Q_j S_w) - \exp(-Q_j S_p)} C_j^F \quad (31)$$

$$C_i^P = \frac{\exp(Q_i S_w) - 1}{\exp(Q_i S_w) - \exp(-Q_i S_p)} \frac{C_i^F}{\theta} \quad (32)$$

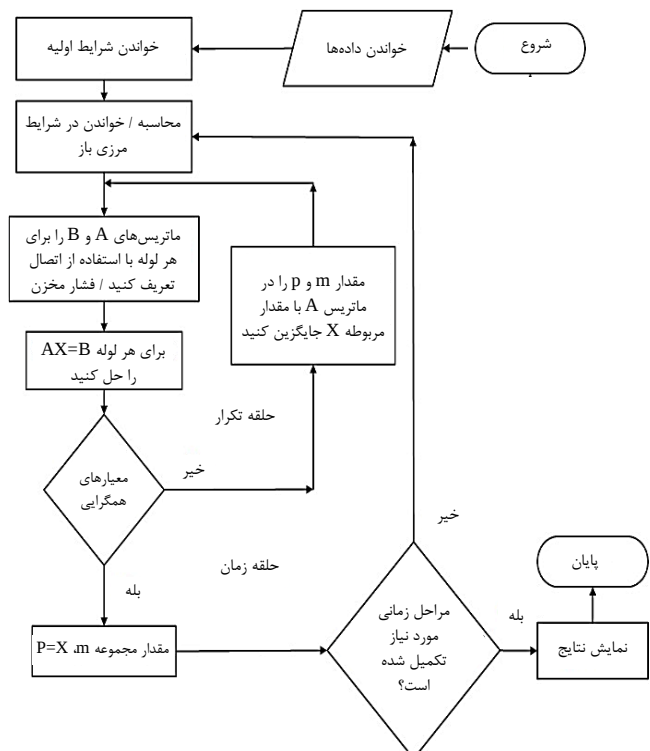
$$\theta = \frac{P}{F} = \sum_{j=1}^{N_c} \frac{\exp(-Q_j S_w) - 1}{\exp(Q_j S_w) - \exp(-Q_j S_p)} C_j^P \quad (33)$$

با استفاده از روابط بالا با مشخص بودن C_i^W و C_i^P که به ترتیب غلظت ایزوتوپ هدف در جریان محصول و پسماند زنجیره هستند، می‌توان تعداد مراحل بخش غنی‌سازی S_p و تهی‌سازی S_w و همچنین ضریب برش زنجیره را مشخص نمود [۱۳].

۴. بهینه‌سازی زنجیره با الگوریتم گرگ خاکستری

این نکته در تئوری جداسازی زنجیره‌ها به اثبات رسیده است که اگر فاکتور جداسازی ماشین سانتریفیوژ تنها به میزان خوراک ورودی ماشین بستگی داشته باشد، استفاده از حداقل تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ و یا استفاده از حداقل جریان بین مرحله‌ای کل، نتیجه یکسانی دربر خواهد داشت. اما در صورتی که فاکتور جداسازی تابعی از ضریب برش و جریان خوراک باشد، کم‌ترین تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ نتایج بهتری دربر خواهد داشت.

در بهینه‌سازی، پارامتر ضریب برش مراحل و خوراک ورودی به ماشین‌های سانتریفیوژ در هر مرحله تغییر داده شده تا کم‌ترین میزان تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ حاصل شود. برای بهینه‌سازی زنجیره به این روش، از الگوریتم فراابتکاری گرگ خاکستری با قابلیت حل این نوع از مسایل استفاده می‌شود. الگوریتم گرگ خاکستری توسط میرجلیلی و همکاران در سال



شکل ۵. الگوریتم شبیه‌سازی هیدرودینامیک جریان در حالت گذرا [۲].

پارامترهای ورودی شامل:

- مشخصات طول، قطر و ارتباط لوله‌ها به یکدیگر
 - مشخصات گاز از قبیل: جرم مولی، ویسکوزیته، ظرفیت گرمایی ویژه
 - مشخصات ماشین سانتریفیوژ: سرعت خطی، طول، قطر
 - مشخصات شیرها، سطح مقطع گلولی، ضریب تخلیه شیر
- سپس در مرحله بعد شرایط مرزی برای تمام لوله‌ها اعمال می‌شود. در صورتی که لوله بعد از ماشین سانتریفیوژ باشد، طبق روابط در بخش ۴.۱.۲، فشارها تعیین می‌شوند. در مرحله بعد فشار نقاط اتصال و مخازن (از جمله فشار متوسط ماشین سانتریفیوژ) حدس زده می‌شود و با فشارهای حدس زده شده دستگاه معادلات خطی برای تمامی لوله‌ها حل می‌شوند، با توجه به مقادیر دبی و فشار محاسبه شده، دستگاه معادلات خطی اصلاح شده و روند تا همگرایی نتایج ادامه می‌یابد. با همگرا شدن دبی و فشار فرایند حل برای یک بازه زمانی به پایان رسیده و مقادیر شرایط مرزی و اولیه برای بازه زمانی بعد تا رسیدن به حالت پایا ادامه می‌یابد.

۳. تعیین تعداد مراحل و ضریب برش زنجیره با استفاده از زنجیره مدل Q

زنجیره‌های مدل جریان پیوسته زنجیره‌هایی هستند که توزیع جریان خوراک ورودی به مراحل پیوسته بوده و این زنجیره‌ها برای مطالعه جداسازی ایزوتوپ‌های چندجزیی و ارزیابی



بردار $\overrightarrow{X_1}$ ، $\overrightarrow{X_r}$ و $\overrightarrow{X_{\alpha}}$ سه جواب بهینه الگوریتم، در تکرار شماره t هستند. بردار $\overrightarrow{A}$ مقدار تصادفی در بین -2α تا 2α دارد. زمانی که $|\overrightarrow{A}| < 1$ باشد، گرگ‌ها حمله می‌کنند و زمانی $|\overrightarrow{A}| > 1$ گرگ‌ها مجبور به تغییر موقعیت، جهت یافتن شکار هستند (برای جزییات بیشتر مرجع [۱۴] مشاهده شود).

برای یافتن زنجیره بهینه توسط الگوریتم GWO^۱ در ابتدا جمعیتی از گرگ‌ها (جواب‌ها) به صورت تصادفی تولید می‌شوند. هر گرگ به صورت برداری به طول $2n$ است. n درایه اول این بردار، ضرایب برش زنجیره و n درایه دوم خوراک ورودی به ماشین‌ها در مراحل است.

$$T = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n, f_1, f_2, \dots, f_n\} \quad (41)$$

مقدار ضرایب برش و خوراک ماشین که به صورت تصادفی تعریف می‌شود، در یک بازه تعریف شده است. با استفاده از پارامترهای بردار T و معادلات زیر، توزیع جریان در زنجیره محاسبه می‌شود.

$$T = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n, f_1, f_2, \dots, f_n\}, \quad \theta_n = \frac{(L'_n)}{(L''_n + L'_n)} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \circ &= L''_n + L'_n - \delta F_n - L'_{n-1} - L''_{n+1} \\ (\delta &= \circ \text{ if } n = nf, \delta = 1 \text{ if } n \neq nf) \end{aligned} \quad (43)$$

با استفاده از توزیع جریان و استفاده از روابط زیر، معادله بقای جرم جزیی و فاکتور جداسازی، و استفاده از روش تکرار q ، توزیع غلظت در زنجیره محاسبه می‌شود [۱۷].

$$\frac{C'_{i,n} / C''_{i,n}}{C'_{j,n} / C''_{j,n}} = \alpha_o^{M_j - M_i} \quad (44)$$

$$\circ = L''_{n+1} \alpha C''_{i,n+1} + L'_{n-1} \alpha C'_{i,n-1} + \delta F_n C^F_{i,n} - (L''_n) C''_{i,n} - (L'_n) C'_{i,n} \quad (45)$$

در روابط (۴۴-۴۵) پارامتر L'_n و $C'_{i,n}$ به ترتیب جریان و غلظت جریان سبک، L''_n و $C''_{i,n}$ به ترتیب جریان و غلظت جریان سنگین، F_n جریان خوراک ورودی به زنجیره، $C^F_{i,n}$ غلظت خوراک ورودی و θ ضریب برش مراحل است.

۲۰۱۴ بر مبنای شکار دسته‌جمعی آن‌ها ارایه شده است. روش شکار گرگ‌های خاکستری به صورت ریاضی مدل‌سازی شده و بهترین روش حل آلفا، دوم جواب بهینه بتا و سومین جواب بهینه دلتا نام دارد و بقیه جواب‌ها که اهمیتی ندارند، امگا نامیده می‌شوند. فرایند شکار توسط گرگ‌های آلفا بتا و دلتا نظارت می‌شود. گرگ‌های امگا دنباله روی گرگ‌های آلفا بتا و دلتا هستند. گرگ‌های خاکستری اساساً سه مرحله را برای شکار دنبال می‌کنند. مرحله اول، ردگیری شکار، مرحله دوم محاصره شکار و در نهایت حمله به شکار است. مرحله محاصره کردن شکار توسط معادلات (۳۰-۳۱) معرفی می‌شود [۱۴]:

$$\vec{D} = \left| \vec{C} \cdot \overrightarrow{X_p}(t) - \overrightarrow{X_p}(t) \right| \quad (34)$$

$$\overrightarrow{X}(t+1) = \overrightarrow{X_p}(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (35)$$

در این معادلات $\vec{A}$ و $\vec{C}$ بردار ضرایب، $\overrightarrow{X_p}$ و $\vec{X}$ به ترتیب موقعیت شکار و گرگ‌های خاکستری، $\vec{D}$ بردار تعیین‌کننده موقعیت جدید گرگ‌ها هستند. پارامتر t نشان‌دهنده شماره حلقه تکرار می‌باشد. $\overrightarrow{X}(t+1)$ نشان‌دهنده موقعیت گرگ‌ها در تکرار بعدی است. بردارهای $\vec{A}$ و $\vec{C}$ به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۵]:

$$\vec{A} = 2a \cdot \vec{r_1} - a \quad (36)$$

$$\vec{C} = 2r_2 \quad (37)$$

در روابط بالا، بردار a به صورت از خطی از ۲ تا صفر در طول حلقه تکرار تغییر می‌کند. در اولین تکرار برابر ۲ و در تکرار آخر برابر صفر می‌باشد. بردارهای $\vec{r_1}$ و $\vec{r_2}$ بردارهای تصادفی در بازه صفر تا ۱ هستند. در مدل‌سازی رفتار شکار گرگ‌های خاکستری، گرگ آلفا، بتا و دلتا با فرض این که اطلاعات بیش تری از موقعیت شکار دارند، استفاده می‌شوند، بنابراین موقعیت گرگ‌های امگا براساس این سه گرگ (جواب‌های بهینه) مطابق با روابط زیر به روز رسانی می‌شود [۱۶].

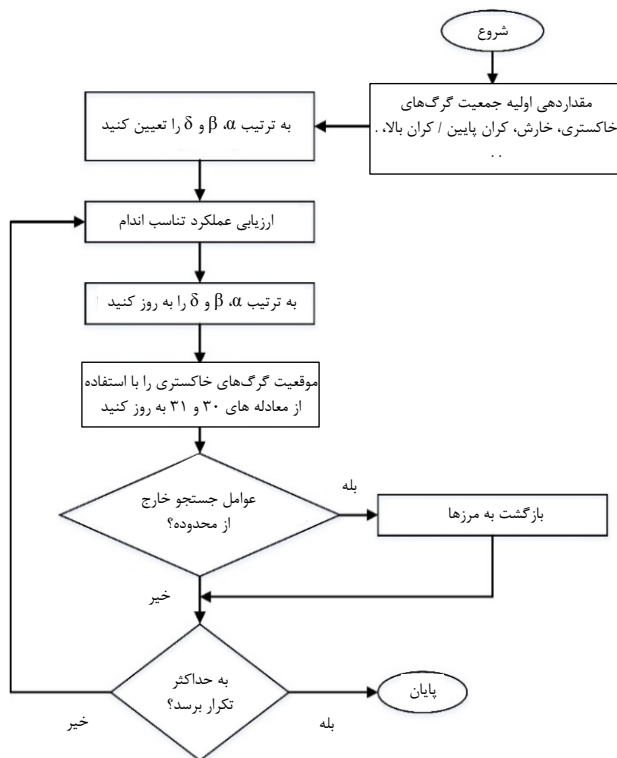
$$\overrightarrow{X}(t+1) = \frac{\overrightarrow{X_1} + \overrightarrow{X_r} + \overrightarrow{X_{\alpha}}}{3} \quad (38)$$

$$\overrightarrow{X_1} = \left| \overrightarrow{X_{\alpha}} - \overrightarrow{A_{\alpha}} D_{\alpha} \right|, \quad \overrightarrow{X_r} = \left| \overrightarrow{X_B} - \overrightarrow{A_r} D_B \right|, \quad \overrightarrow{X_{\alpha}} = \left| \overrightarrow{X_{\delta}} - \overrightarrow{A_{\delta}} D_{\delta} \right| \quad (39)$$

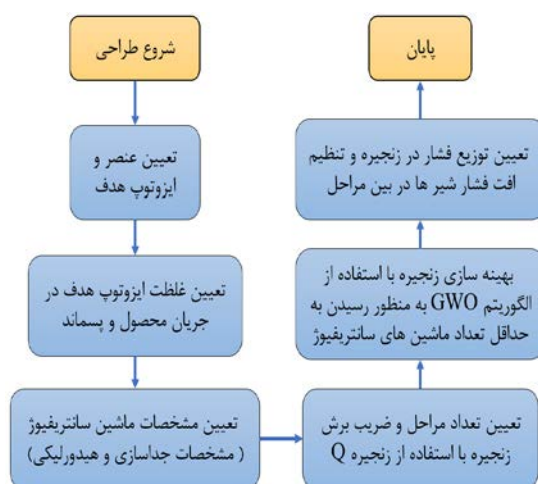
$$\overrightarrow{D_{\alpha}} = \left| \overrightarrow{C_1} \cdot \overrightarrow{X_{\alpha}} - \overrightarrow{X} \right|, \quad \overrightarrow{D_B} = \left| \overrightarrow{C_r} \cdot \overrightarrow{X_B} - \overrightarrow{X} \right|, \quad \overrightarrow{D_{\delta}} = \left| \overrightarrow{C_{\delta}} \cdot \overrightarrow{X_{\delta}} - \overrightarrow{X} \right| \quad (40)$$



با تغییر ضریب برش مراحل و جریان خوراک ورودی به ماشین‌ها یک زنجیره شبیه‌سازی می‌شود. با معلوم بودن ضریب برش و جریان خوراک ماشین‌ها می‌توان با استفاده از گراف مشخصات ماشین، فشار خطوط را محاسبه کرد. در قسمت محاسبه تابع برازندگی، با بررسی قید غلظت و عملیاتی‌بودن زنجیره (از مقایسه فشار خط خوراک و محصول)، در زنجیره‌های واجد شرایط تابع برازندگی محاسبه می‌شود. پس از پایان بهینه‌سازی، زنجیره‌ای با کم‌ترین تعداد ماشین سانتریفیوژ و رعایت قیدهای تعیین شده، یافت می‌شود.



شکل ۶. الگوریتم بهینه‌سازی گرگ‌های خاکستری [۱۳].



شکل ۷. روال طراحی ارایه شده برای زنجیره مخروطی.

با استفاده از پارامترهای محاسبه شده، جمع تعداد ماشین‌های سانتریفیوژ زنجیره (N) حاصل می‌شود، و تابع برازندگی مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$F.F = \frac{1}{N} \quad \begin{cases} \text{ضابطه اول} & \begin{cases} |C_{p,Des} - C_{p,Cal}| < \varepsilon \\ \text{and } |C_{w,Des} - C_{w,Cal}| < \varepsilon \\ \text{sum}(P.F_i - P.P_{i-1}) < \varepsilon \end{cases} \\ \text{ضابطه دوم} & F.F = +\infty \end{cases} \quad (47)$$

در رابطه (۴۷)، برای ضابطه اول دو قید اعمال شده است که در صورت برقراری این دو قید از این ضابطه استفاده می‌شود. قید اول، رسیدن غلظت‌های محاسبه شده برای زنجیره به غلظت‌های هدف در جریان محصول و پسماند است. در صورتی که این قید برقرار نباشد، از رابطه دوم استفاده می‌شود، به عبارتی این زنجیره از محاسبات کنار گذاشته می‌شود. در صورت برقراری قید اول، قید دوم بررسی می‌شود. در قید دوم اختلاف فشار خط خوراک مرحله i و فشار خط محصول ما قبل بررسی می‌شود. در صورتی که فشار خوراک مرحله i از فشار خط محصول ما قبل بیشتر محاسبه شود، نشان‌دهنده معکوس شدن جریان در آن مرحله است، به عبارتی زنجیره عملیاتی نیست. در این صورت قید دوم برقرار نبوده و از ضابطه دوم استفاده می‌شود که به معنی کنار گذاشتن این زنجیره از روال محاسبات است. در صورتی که برای یک زنجیره قید غلظت و قید فشار برقرار باشد، تابع برازندگی از رابطه اول محاسبه شده و از بین زنجیره‌هایی که واجد این شرایط باشند، زنجیره‌ای با کم‌ترین تعداد ماشین سانتریفیوژ انتخاب می‌شود. در شکل ۶، الگوریتم GWO برای یافتن جواب بهینه نمایش داده شده است.

۵. الگوریتم طراحی زنجیره مخروطی

در شکل ۷ روال طراحی زنجیره نمایش داده شده است. در گام اول مشخصات عنصر و ایزوتوپ هدف تعیین می‌شود. در گام دوم غلظت ایزوتوپ هدف در جریان محصول و پسماند تعیین می‌شود. در گام سوم با استفاده از شبیه‌سازی هیدرودینامیک گذرا (الگوریتم بخش ۵.۱.۲)، مشخصات ماشین سانتریفیوژ تعیین می‌شود. مشخصات هیدرولیکی ماشین به صورت گراف ضریب برش ماشین سانتریفیوژ بر حسب فشار و جریان خوراک ورودی است که از این گراف در قسمت بهینه‌سازی استفاده می‌شود. پس از تعیین مشخصات با استفاده از غلظت ایزوتوپ هدف در جریان محصول و پسماند و استفاده از زنجیره q می‌توان تعداد مراحل زنجیره را محاسبه نمود. با محاسبه تعداد مراحل گام بهینه‌سازی زنجیره را می‌توان آغاز نمود. در این گام



۶. نتایج و بحث

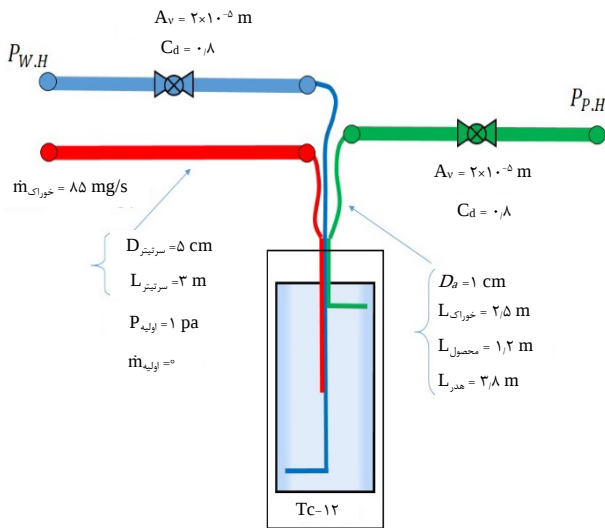
۱.۶ تعیین مشخصات هیدرولیکی ماشین سانتریفیوژ

در این بخش تمامی شبیه‌سازی‌های انجام شده براساس ماشین سانتریفیوژ TC-۱۲ است. ماشین در نظر گرفته شده دارای ارتفاع ۳ متر و شعاع ۱۰۰ میلی‌متر است. سرعت خطی دیواره ماشین مورد نظر ۶۲۰ متر بر ثانیه است [۱۸].

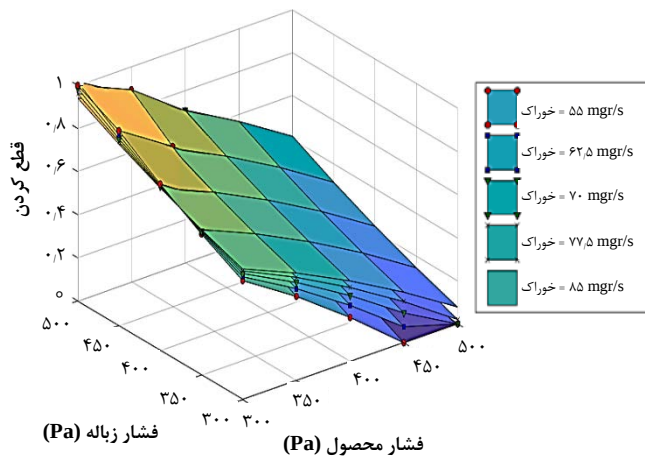
ماشین سانتریفیوژ مطابق با هندسه نمایش داده شده در شکل ۸ به لوله‌های بالادست متصل است. میزان فشار لوله‌های بالایی^۱ خط محصول و پسماند و دبی خط خوراک، شرایط مرزی مسأله هستند.

برای بررسی تأثیر فشار جریان بالایی بر روی ضریب برش و عملکرد ماشین سانتریفیوژ میزان فشار جریان بالایی به ازای جریان‌های خوراک ورودی مختلف در شبکه ارایه شده بخش قبل، تغییر داده می‌شود. در حالتی که فشار جریان بالایی پسماند بیش‌تر از فشار جریان بالایی محصول باشد، ضریب برش افزایش پیدا می‌کند. با توجه به این‌که جریان گاز براساس اختلاف فشار شکل می‌گیرد، زمانی که فشار خط پسماند بیش‌تر باشد، حرکت مولکول‌ها به این سمت سخت‌تر شده و خروج از سمت محصول ترجیح داده می‌شود. به همین دلیل، جریان محصول افزایش پیدا کرده و ضریب برش افزایش پیدا می‌کند. به‌طور عکس، زمانی که فشار جریان بالایی محصول بیش‌تر از فشار جریان بالایی پسماند باشد، با توجه به این‌که ترجیح مولکول گاز حرکت به سمت فشار پایین‌تر است، جریان پسماند افزایش و ضریب برش محصول کاهش می‌یابد. در شکل ۹ طیف‌های ضریب برش ماشین به ازای مقادیر فشار جریان بالایی مختلف و در جریان‌های خوراک ورودی ۶۲/۵، ۷۰، ۷۷/۵ و ۸۵ میلی‌گرم بر ثانیه ارایه شده است. در دبی ۶۲/۵ گرم بر ساعت، با تغییر میزان فشار جریان بالایی محصول و پسماند تغییرات ضریب برش از ۰ تا ۱ است در صورتی‌که در دبی ۷۰ گرم بر ساعت با تغییر رنج فشار جریان بالایی محصول و پسماند ضریب برش از ۰ تا ۰/۹ تغییر می‌کند. با افزایش دبی ورودی به ماشین، تغییرات ضریب برش نسبت به فشار جریان بالایی محصول و پسماند کاهش می‌یابد.

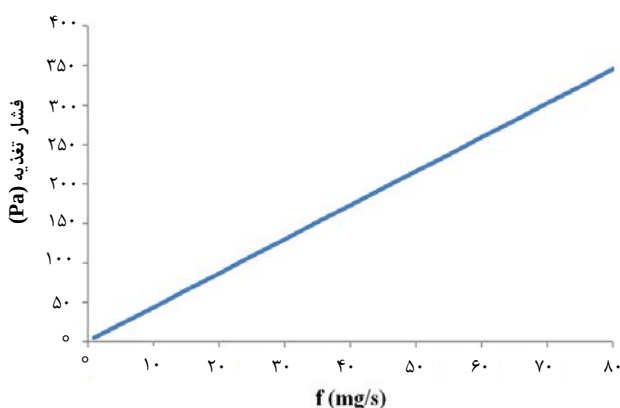
در شکل ۱۰ تابعیت فشار ورودی گاز به ماشین برحسب دبی خوراک ماشین نمایش داده شده است. با توجه به برقراری شرایط خفه‌گی در ورودی ماشین، رابطه فشار و دبی به‌صورت خطی است.



شکل ۸. مشخصات و هندسه شبیه‌سازی هیدرولیک ماشین سانتریفیوژ.



شکل ۹. نمایش صفحات تغییرات ضریب برش برحسب دبی خوراک و فشارهای خروجی ماشین.



شکل ۱۰. نمایش تابعیت فشار گاز در ورودی ماشین برحسب دبی خوراک.



- ❖ الگوریتم شبیه‌سازی گرگ خاکستری ابزاری مناسب برای یافتن زنجیره بهینه است.
- ❖ میزان افت فشار در شیرهای کنترلی ما بین مراحل جهت عملیاتی نمودن زنجیره بهینه توسط نتایج شبیه‌سازی هیدرودینامیک محاسبه گردید.

جدول ۱. مشخصات مورد نیاز برای بهینه‌سازی

ضریب جداسازی واحد	$\exp(1+\theta-\theta^2-\ln(f))^{1/3}$		
پارامتر	خوراک	محصول	هدر
جریان gr/sec	۱۵/۹	۲/۱	۱۳/۸
تمرکز %			
^{235}U	۰/۸۵	۴/۴	۰/۳
^{234}U	۰/۰۱۶	۰/۰۹۹	۰/۰۰۳
^{232}U	۱/۵e-۷	۱/۱e-۷	۷/۷e-۹
^{236}U	۰/۳۵	۱/۲۹	۰/۲
^{238}U	۹۸/۷۸۴	۹۴/۲۱۱	۹۹/۴۹۷

جدول ۲. مقایسه نتایج بهینه‌سازی توسط الگوریتم GWO و پالکین

شماره مرحله	$N, 10^{-2}$ (Palkin)	$N, 10^{-2}$ (GWO)	$f, \text{mg/sec}$ (Palkin)	$f, \text{mg/sec}$ (GWO)	θ (Palkin)	θ (GWO)
۱	۰/۴	۰/۳۶۵	۶۴/۳	۶۸/۶۲	۰/۴۷	۰/۴۵۴۶
۲	۰/۷	۰/۵۹۴	۶۷/۷	۷۳/۰۱	۰/۴۶	۰/۴۲۲۳
۳	۰/۹۴	۰/۸۴۹	۶۹/۵	۷۳/۵۳	۰/۴۶	۰/۴۸۷۷
۴	۱/۱۴	۱/۰۵۷	۷۰/۶	۷۲/۰۶	۰/۴۶	۰/۴۲۱۱
۵	۱/۲۹	۱/۲۳۱	۷۱/۸	۷۰/۷۰	۰/۴۶	۰/۴۷۲۲
۶	۱/۰۱	۱/۰۱۳	۷۳/۲	۷۲/۹۵	۰/۴۶	۰/۴۷۰۲
۷	۰/۷۸	۰/۸۵۰	۷۳/۸	۷۲	۰/۴۵	۰/۴۶۶۷
۸	۰/۶	۰/۶۷۲	۷۴/۲	۶۸/۲۳	۰/۴۶	۰/۴۲۲۵
۹	۰/۴۴	۰/۴۷۹	۷۴/۶	۶۹/۹۴	۰/۴۶	۰/۴۸۴۲
۱۰	۰/۳۲	۰/۳۵۸	۷۵/۱	۷۲/۱۷	۰/۴۶	۰/۴۵۴۵
۱۱	۰/۲۱	۰/۲۳۹	۷۵/۹	۶۹/۶۷	۰/۴۶	۰/۴۲۰۷
۱۲	۰/۱۳	۰/۱۳۴	۷۷/۴	۷۲/۱۳	۰/۴۶	۰/۴۹۰۷
۱۳	۰/۰۶	۰/۰۷۲	۸۰/۵	۶۵/۶۱	۰/۴۷	۰/۴۴۳۸
مجموع	۸۰/۲	۷/۹۱۲				

جدول ۳. نتایج توزیع فشار در زنجیره

شماره مرحله	خوراک P (Pa)	محصول P (Pa)	هدر P (Pa)	شیرفلکه ΔP (Pa)
۱	۳۰۰	۳۴۹/۲۲	۲۹۶/۴۶	۳۳/۸۳
۲	۲۹۶/۴۶	۳۶۵/۱۶	۳۱۵/۳۹	۴۷/۵۱
۳	۱۳۵/۳۹	۳۵۱/۸۰	۳۱۷/۶۵	۴۰/۵۱
۴	۳۱۷/۶۵	۳۷۵/۳۴	۳۱۱/۲۹	۶۹/۹۳
۵	۳۱۱/۲۹	۳۵۱/۰۸	۳۰۵/۴۱	۳۵/۹۵
۶	۳۰۵/۴۱	۳۵۲/۱۴	۳۱۵/۱۳	۴۱/۱۱
۷	۳۱۵/۱۳	۳۵۷/۶۰	۳۱۱/۰۳	۶۲/۸۶
۸	۳۱۱/۰۳	۳۶۵/۷۹	۲۹۴/۷۵	۶۳/۶۵
۹	۲۹۴/۷۵	۳۳۷/۲۵	۳۰۲/۱۴	۲۵/۴۹
۱۰	۳۰۲/۱۴	۳۵۵/۱۹	۳۱۱/۷۵	۵۴/۲۲
۱۱	۳۱۱/۷۵	۳۶۸/۸۸	۳۰۰/۹۷	۵۷/۳۰
۱۲	۳۰۰/۹۷	۳۴۰/۹۰	۳۱۱/۵۹	۵۷/۴۷
۱۳	۳۱۱/۵۹	۳۵۵/۱۹	۲۸۳/۴۲	۵۵/۱۹

۲۰۶ یافتن زنجیره بهینه با استفاده از الگوریتم گرگ خاکستری در این قسمت برای بهینه‌سازی از مثال ارایه شده توسط پالکین استفاده می‌شود. هدف از بهینه‌سازی یافتن یک زنجیره بهینه برای جداسازی اورانیم ۲۳۵ است. در این زنجیره، غلظت ایزوتوپ اورانیم ۲۳۵ در جریان محصول ۴/۴ درصد و در پسماند ۰/۳ درصد در نظر گرفته شده است و ۱۳ مرحله دارد. زنجیره بهینه باید دارای حداقل تعداد ماشین‌های جداساز باشد. در جدول ۱ مشخصات مورد نیاز برای بهینه‌سازی ارایه شده است. محدوده‌ی تغییرات ضریب برش در الگوریتم بهینه‌سازی، ۰/۴ تا ۰/۵ و محدوده تغییرات جریان خوراک ماشین‌ها ۵۵ الی ۸۵ میلی‌گرم بر ثانیه در نظر گرفته شده است. در جدول ۲ نتایج حاصله از الگوریتم گرگ خاکستری و نتایج پالکین با یک دیگر مقایسه شده‌اند. زنجیره بهینه پالکین ۸۰۲۰ و زنجیره بهینه محاسبه شده ۷۹۱۲ ماشین سانتریفیوژ دارد.

۳۰۶ تعیین مشخصات هیدرولیکی زنجیره

در این قسمت با توجه به مشخصات ماشین سانتریفیوژ TC-۱۲ و ضرایب برش مراحل و همچنین جریان‌های خوراک ورودی به ماشین سانتریفیوژ، توزیع فشار در زنجیره محاسبه می‌شود. با توجه به این‌که جریان خوراک ورودی به مراحل زنجیره در حالت خفه‌گی است، با تعیین جریان خوراک، فشار ورودی به ماشین‌ها و فشار پسماند مراحل تعیین می‌شود (با فرض صرف‌نظر کردن از افت فشار درون لوله‌ها). برای محاسبه فشار در سمت محصول، قبل از شیرهای کنترل جریان، از نتایج شبیه‌سازی هیدرودینامیک ماشین استفاده می‌شود. با شروع فرایند گازدهی به زنجیره و تنظیم فشار در پشت شیرهای محصول V و هدر $V_{\text{در}}$ بر روی ۳۰۰ پاسکال، فشارهای محاسبه شده برای زنجیره بهینه در جدول ۳ ارایه شده است. شیرفلکه ΔP میزان افت فشاری است که باید توسط شیرهای به‌وجود آمده، تا ضرایب برش بین مراحل تولید شود. در شکل ۱۱ میزان فشار خطوط به‌طور کامل نمایش داده شده است.

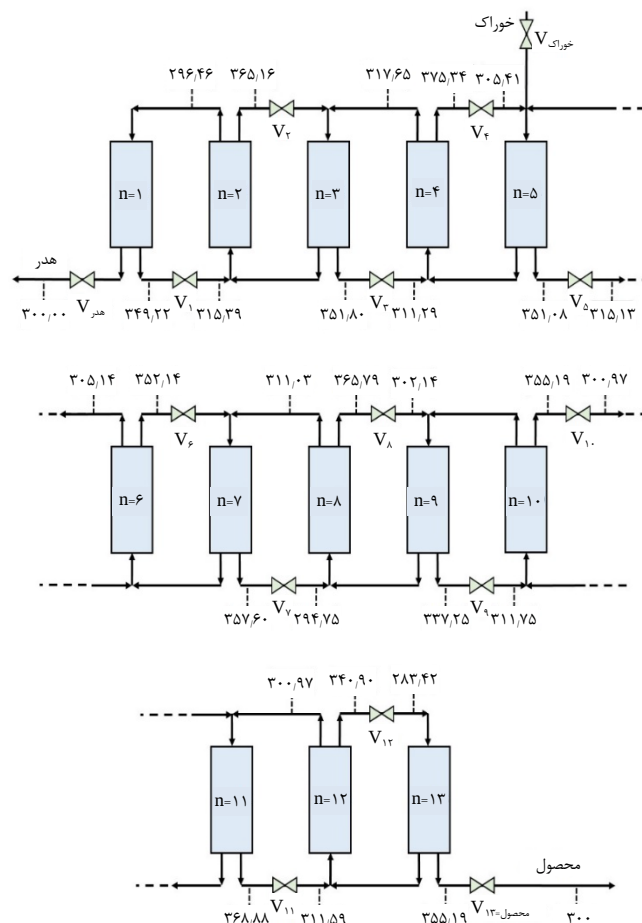
۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله مراحل طراحی یک زنجیره مخروطی برای سیستم‌های چند جزیی شرح داده شد و نتایج زیر استخراج گردید.

- ❖ در یک ماشین سانتریفیوژ پارامترهای فشار خروجی، دبی خوراک و ضریب برش به یک‌دیگر وابسته هستند. با افزایش دبی خوراک به ماشین سانتریفیوژ تغییرات ضریب برش نسبت به تغییرات فشار جریان‌های خروجی کاهش می‌یابد.
- ❖ با به‌دست آوردن ارتباط بین فشارهای خروجی، ضریب برش و خوراک ورودی به ماشین سانتریفیوژ، محاسبه فشار در طول زنجیره امکان‌پذیر می‌شود.



6. J. Safdari, A. Norouzi, R. Tumari, *Using a real coded PSO algorithm in the design of a multi-component counter-current cascade*, *Sep. Sci. Technol.*, **52**, (Sep. 2017), doi: 10.1080/01496395.2017.1375524.
7. F. Mansourzadeh, et al, *Comparison of optimum tapered cascade and optimal square cascade for separation of xenon isotopes using enhanced TLBO algorithm*, *Sep. Sci. Technol.*, **53**, 1–14, (Mar. 2018), doi: 10.1080/01496395.2018.1443135.
8. M. Nazeer, et al, *Global solution algorithm with some assisting techniques for modeling of unsteady flow in centrifuge cascade pipe network*, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, -*Comput Method Appl Mech Eng*, **173**, 257–269, (Apr. 1999), doi: 10.1016/S0045-7825(98)00250-3.
9. E. Bender, *Simulation of dynamic gas flows in networks including control loops*, *Comput. Chem. Eng.*, **3**(1), 611–613, (1979), doi: https://doi.org/10.1016/0098-1354(79)80109-X.
10. T. Kiuchi, *An implicit method for transient gas flows in pipe networks*, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 378–383, (1994).
11. P. Thomas, *Simulation of Industrial Processes for Control Engineers*, *Elsevier Science & Technology Books*.
12. S. Zeng, G.A. Sulaberidze, V. Borisevich, *The Q-Cascade Explanation Separation Science and Technology The Q-Cascade Explanation*, no. November 2014, (2012), doi: 10.1080/01496395.2012.661826.
13. S. Zeng, G.A. Sulaberidze, V. Borisevich, *Isotopically Selective Mass Transfer in the Q-Cascade with Losses of Working Separation Science and Technology Isotopically Selective Mass Transfer in the Q-Cascade with Losses of Working Substance*, no. November 2014, 13–21, (2012), doi: 10.1080/01496395.2012.676139.
14. S. Mirjalili, S. Mirjalili, A. Lewis, *Grey Wolf Optimizer*, *Adv. Eng. Softw.*, **69**, 46–61, (Mar. 2014), doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
15. A. Jaafari, et al., *Meta optimization of an adaptive neuro-fuzzy inference system with grey wolf optimizer and biogeography-based optimization algorithms for spatial prediction of landslide susceptibility*, *Catena*, (Dec. 2018), doi: 10.1016/j.catena.2018.12.033.
16. M. Pradhan, P. Roy, T. Pal, *Oppositional based grey wolf optimization algorithm for economic dispatch problem of power system*, *Ain Shams Eng. J.*, **9**, (Feb. 2017), doi: 10.1016/j.asej.2016.08.023.
17. S. Zeng, C. Ying, *A Robust and Efficient Calculation Procedure for Determining Concentration Distribution of Multicomponent Mixtures*, *Sep. Sci. Technol.*, **35**(4), 613–622, (Jan. 2000), doi: 10.1081/SS-100100179.
18. A. Glaser, *Characteristics of the Gas Centrifuge for Uranium Enrichment and Their Relevance for Nuclear Weapon Proliferation*, *Sci. Glob. Secur.*, **16**, (Oct. 2008), doi: 10.1080/08929880802335998.



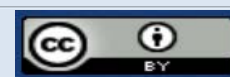
شکل ۱۱. نمایش توزیع فشار قبل و بعد از شیرهای کنترلی.

مراجع

1. Y. Fu, Y. Zeng, S. Hou, *Simulation of the hydraulic status in gas centrifuge cascades*, *Qinghua Daxue Xuebao/Journal Tsinghua Univ.*, (2005).
2. M. Alam, et al, *Flow induced vibrations in gas tube assembly of centrifuge*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **23**, 819–827, (Mar. 2012), doi: 10.1080/18811248.1986.9735059.
3. M. Nazeer, et al, *Mathematical modeling and computer simulation of transient flow in centrifuge cascade pipe network with optimizing techniques*, *Comput. Math. with Appl.*, **36**, 63–76, (Aug. 1998), doi: 10.1016/S0898-1221(98)00141-2.
4. A. Norouzi, et al, *Parameters optimization of a counter-current cascade based on using a real coded genetic algorithm*, *Sep. Sci. Technol.*, - *Separ. Sci. Technol*, **46**, (Sep. 2011), doi: 10.1080/01496395.2011.595473.
5. V. Palkin, *Optimization of a centrifuge cascade for separating a multicomponent mixture of isotopes*, *At. Energy*, **115**, (Dec. 2013), doi: 10.1007/s10512-013-9757-0.

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 (۱۴۰۱)، طراحی و بهینه‌سازی زنجیره مخروطی به منظور جداسازی ایزوتوپ‌های پایدار چندجزیی با در نظر گرفتن پارامترهای هیدرولیکی و عملیاتی ماشین سانتریفیوژ، ۸۳-۷۲، ۱۰۱.

DOI: 10.24200/nst.2022.1449

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1449.html

