



## مدل‌سازی و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی کندانسورهای واحد جداسازی اورانیم هگزاfluorاید

هادی شارع محمدی، سیدمحمد قریشی\*، فاطمه محمدی

دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، کدپستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، اصفهان - ایران

**چکیده:** این پژوهش به منظور مدل‌سازی و بهینه‌سازی شرایط عملیاتی دو کندانسور از نوع پوسته‌ی لوله‌ی واحد جداسازی  $UF_6$  با آرایش سری در مجتمع UCF اصفهان (شرکت سوخت رآکتورهای هسته‌ای) انجام گرفت. هدف این پژوهش، پیش‌بینی شرایط بهینه‌ی کارکرد به منظور کاهش میزان اورانیم خروجی به صورت برفک از سیستم کندانسور بود. این مهم با در نظر گرفتن شرایط تشکیل برفک در طول کندانسور برای بهبود پیش‌بینی مدل در خصوص متغیرهای با اهمیت از جمله خواص مخلوط گاز در حال چگالش، مقادیر  $UF_6$  چگالشی و برفک خروجی از کندانسور انجام شده است. در این مدل‌سازی، هر یک از دو کندانسور مورد نظر از نوع پوسته‌ی لوله به حجم کنترل‌هایی با طول معین در جهت جریان گاز ورودی تقسیم شدند و معادلات موازنه‌ی جرم، انرژی و گشتاور در این محدوده برای گاز داخل پوسته‌ی کندانسورها تدوین شد. سپس دمای سطح  $UF_6$  جامد چگالش یافته بر روی سطوح کندانسور، با روش حدس و خطا به دست آمد و بر این اساس پارامترهای انتقال جرم و حرارت در هر لحظه از زمان فرایند در طول کندانسور به دست آمد. مقایسه‌ی نتایج مدل با نتایج تجربی صنعتی ارائه شده در خصوص جرم چگالش یافته در کندانسور ۱ و ۲ و خواص گاز خروجی از کندانسور ۲، بیان‌کننده‌ی دقت عمل بسیار بالای این مدل است. میانگین خطای داده‌های به دست آمده در مدل‌سازی انجام شده نسبت به داده‌های صنعتی برای جرم چگالش یافته در کندانسور اول و دوم به ترتیب ۱/۳۹٪ و ۲/۲۴٪ است. در ادامه، تأثیر متغیرهای مؤثر در طول دو کندانسور با کاربرد مدل اثبات شده، بررسی شد. سرانجام با بررسی و تحلیل این متغیرها و تأثیر آن‌ها با استفاده از یک نرم‌افزار طراحی شده‌ی مدل‌سازی، شرایط عملیاتی بهینه در این نوع کندانسورها انتخاب شدند. در شرایط بهینه، دمای مایع خنک‌کننده‌ی ورودی (محلول آب-نمک) به کندانسور ۱ برابر با  $10^\circ C$  و سرعت بهینه‌ی گاز ورودی معادل  $0.09 \text{ m/s}$  به دست آمد.

**کلیدواژه‌ها:** اورانیم هگزاfluorاید، چگالش، کندانسور، مدل‌سازی، بهینه‌سازی

## Modeling and Optimization of Operating Conditions of Condensers in $UF_6$ Separation Unit

H. Share Mohammadi, S.M. Ghoreishi\*, F. Mohammadi

Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, Postcode: 8415683111, Isfahan - Iran

**Abstract:** In this study, modeling and optimization of two in-series  $UF_6$  shell and tubes separator condensers were performed to improve the prediction of the amount of the mist output, physical properties of condensing gases and condensed mass of  $UF_6$  by computing the mist formation conditions. The main objective of this research was to predict the optimal operating conditions in order to reduce the uranium in the outlet mist from the condenser system. These two shell and tube condensers were modeled via control volumes with finite length in axial direction of input gases. The equations of mass, energy and momentum balance were written for each condenser and then surface temperature of  $UF_6$  condensed layer on the condenser tube was determined by the trial and error method. The mass and heat transfer parameters were calculated at each time step during the process. Comparison of the modeling predictions with the Isfahan UCF industrial data in regard to important variables indicated a very good compatibility. The average error between the modeling and industrial data for the first and second condensers were calculated to be 1.39 and 2.24%, respectively. Finally, the analysis of the effective variables via the developed modeling computer software revealed that the optimal temperature of cooling brine water and the input gas velocity are  $10^\circ C$  and  $0.09 \text{ m/s}$ , respectively.

**Keywords:** Uranium-hexafluoride, Condensation, Condenser, Modeling, Optimization



## ۱. مقدمه

برای جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیم و انجام فرایند غنی سازی اورانیم به یک ترکیب گازی از عنصر اورانیم نیاز داریم. تنها ترکیب پایدار گازی شناخته شده از اورانیم، ترکیبی از آن به شکل اورانیم هگزا فلورید ( $UF_6$ ) است.  $UF_6$  از واکنش بین  $UF_4$  و گاز فلئوژن ( $F_2$ ) در رآکتورهای عمودی فلوراسیون حاصل می‌شود.  $UF_6$  خروجی از این رآکتور، ناخالصی‌هایی هم چون گازهای فلئوژن، اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن فلوراید به همراه دارد. یک روش جداسازی  $UF_6$  از این گازها، چگال کردن گاز خروجی از رآکتور فلوراسیون است. گاز  $UF_6$  به علت داشتن فشار بخار تعادلی متفاوت از این گازها، با کاهش دما چگالیده شده و به صورت لایه‌های بلوری بر روی سطوح کندانسور رسوب می‌کند و ناخالصی‌های گازی بدون تغییر از کندانسور خارج می‌شوند. به این روش می‌توان  $UF_6$  را از گازهای ناخالص جدا کرد و به  $UF_6$  جامد رسید که سپس در شرایط خاص می‌توان دوباره آن را به گاز تبدیل و در غنی سازی اورانیم استفاده کرد.

چگالش به عنوان یکی از روش‌های مهم خالص سازی در صنایع شیمیایی و هسته‌ای به کار می‌رود. همه‌ی کندانسورهای موجود در صنعت به سه دسته‌ی مهم کندانسورهای سطحی، کندانسورهای حجمی و کندانسورهای ترکیبی تقسیم می‌شوند [۱]. معمولاً بازدهی این کندانسورها بین ۸۰ تا ۹۵٪ هستند. در صنایع هسته‌ای موادی هم چون  $UF_6$ ،  $WF_6$ ،  $ReF_6$ ،  $TiF_4$  به وسیله‌ی فرایند چگالش، خالص سازی می‌شوند [۲]. مشکل اساسی در این فرایند خروج اورانیم از کندانسور به صورت برفک است. با وجود این که  $UF_6$  درون کندانسور چگالش می‌یابد، اما در اثر عواملی بر روی سطوح کندانسور ته نشین نمی‌شود و با گازهای دیگر به صورت دانه‌های ریز برفک گونه از کندانسور خارج می‌شود. خروج  $UF_6$  به صورت برفک، کاهش بازایی آن و مسائل زیست محیطی را به همراه دارد. بنابراین هدف عمده‌ی این پژوهش، پیش بینی شرایط مناسب کارکرد در راستای کاهش ضایعات اورانیم است.

عوامل بسیاری بر بازدهی این کندانسورها تأثیر گذار هستند. سافرانو و همکاران [۳] آزمایش‌هایی را برای بررسی تأثیر دمای سطح کندانسورهای سطحی بر بازدهی آن، برای چگالش تیتانیم تترافلوراید ( $TiF_4$ ) انجام داده‌اند. در این آزمایش‌ها نشان داده

شده است که با کاهش دمای سطح کندانسور، مقدار برفک خروجی از آن افزایش می‌یابد و به دنبال آن، بازده به طور محسوسی کاهش می‌یابد. در پژوهش اشاره شده، بهترین روش پیشنهادی برای افزایش بازدهی کندانسور عبارت است از تنظیم نرخ انتقال حرارت درون کندانسور به نحوی که تشکیل برفک داخل کندانسور به کمینه برسد و هم چنین رشد لایه‌های جامد داخل آن طوری کنترل شود که ته نشینی مواد، منجر به بیشترین مقدار بارگیری درون کندانسور شود.

در پژوهشی دیگری که در سال ۲۰۰۶ توسط اسمولکین و همکاران [۲] انجام شد، یک مدل ریاضی برای محاسبه‌ی دمای بهینه‌ی چگالش در خصوص فلوراید‌های فلزی از جمله اورانیم هگزا فلوراید تدوین شد. در این پژوهش، گاز حامل فلوراید‌های فلزی از داخل لوله‌هایی با ابعاد مشخص عبور کرده و با انتقال حرارت با مایع خنک کننده از طریق دیواره‌ی لوله، سرد شده و در نتیجه فلوراید‌های فلزی بر روی دیواره‌ی داخلی این لوله‌ها چگالش می‌یابند. هم چنین تعداد کندانسور مورد نیاز برای بازیابی ۹۹٫۹ درصدی اورانیم هگزا فلوراید محاسبه شده است و روش‌هایی برای محاسبه‌ی اندازه و جرم ذرات برفک تشکیل شده درون کندانسورهای سطحی، پیشنهاد شده است. برای کندانسورهای سطحی اورانیم هگزا فلوراید، مدلی توسط عباس عابد [۴] ارائه شده است. پس از اثبات مدل با داده‌های آزمایشگاهی، بهینه سازی فرایند چگالش در این نوع کندانسورها انجام شده است. از جمله پارامترهای در نظر گرفته شده توسط ایشان می‌توان به سرعت گاز ورودی، نرخ جریان گاز ورودی و زمان ماند گاز ورودی در کندانسور اشاره کرد. سپس تأثیر انتقال حرارت و خصوصیات هیدرودینامیکی سیستم بر روی فرایند چگالش نیز بررسی شده است. برای چگالش فتالیک آنهیدراید<sup>(۱)</sup> در کندانسورهای پوسته‌ی لوله که از نوع کندانسورهای ترکیبی هستند، مدلی توسط بلیک و کرویز کا [۵] تدوین شده است که هدف اصلی آن تعریف روابطی برای به دست آوردن مقاومت‌های انتقال حرارت و چگالی معادل مواد ته نشین شده به صورت تابعی از متغیرهای قابل اندازه گیری بوده است. اما در این پژوهش، از تشکیل برفک درون کندانسور و تأثیرات آن بر بازدهی کندانسور چشم پوشی شده است. مطالعات بر روی سیستم‌های مشابه (مانند مخلوط بخار آب- هوا تحت چگالش) نشان می‌دهد یکی از عوامل تأثیر گذار بر بازدهی کندانسورهای

**جدول ۱. مشخصات کندانسور ۱**

۰٫۰۵۷	قطر داخلی پره (m)
۰٫۲۴	قطر خارجی پره (m)
۱۲۱۸	تعداد کل پره‌ها
۱۰۴	سطح کل پره‌ها (m <sup>۲</sup> )
۰٫۰۵۷	قطر خارجی لوله (m)
۵۷	طول کل لوله‌ها (m)
۱۰٫۲	سطح کل لوله‌ها (m <sup>۲</sup> )
۳۵	تعداد حجم‌های کنترل

**جدول ۲. مشخصات کندانسور ۲**

۰٫۰۳۴	قطر داخلی پره (m)
۰٫۱۸	قطر خارجی پره (m)
۱۹۰۴	تعداد کل پره‌ها
۹۳٫۴	سطح کل پره‌ها (m <sup>۲</sup> )
۰٫۰۲۹	قطر خارجی لوله (m)
۳۸	طول کل لوله‌ها (m)
۳٫۴	سطح کل لوله‌ها (m <sup>۲</sup> )
۳۵	تعداد حجم‌های کنترل

**جدول ۳. شرایط عملیاتی در کندانسور ۱ و ۲ در حالت بهینه‌ی کارکردی**

شرایط عملیاتی		کندانسور ۱	کندانسور ۲
دمای محلول خنک کننده ورودی (K)		۲۸۳	۲۳۸
دمای محلول خنک کننده خروجی (K)		۲۸۴	۲۳۸٫۵
فشار (kPa)		۱۰۲٫۳۲۵	۱۰۰
دبی گاز ورودی (kg/s)		۰٫۰۱۹۱۹	۰٫۰۰۷۲۱
سرعت گاز ورودی (m/s)		۰٫۰۹	۰٫۰۵

در مدل تدوینی این پژوهش، کندانسور به تعداد معینی از حجم‌های کنترل (شکل ۱) در جهت جریان گاز ورودی تقسیم شده است، که هر یک از این حجم‌های کنترل شامل یک ردیف از لوله‌های موجود در بین دو تیغه هستند. خروجی هر حجم کنترل، ورودی حجم کنترل بعدی را تشکیل می‌دهد. به این ترتیب جریان گاز ورودی به سیستم، وارد اولین حجم کنترل شده و پس از عبور از حجم کنترل‌های بعدی، در آخرین حجم کنترل از سیستم خارج می‌شود. خواص گاز متناسب با شرایط دما و فشار هر حجم کنترل، تغییر می‌کند. برای پیش‌بینی رفتار چگالش گاز و ته‌نشینی مواد بر روی سطح کندانسور، دو قسمت جدا از هم برای کندانسور در نظر گرفته شد. قسمت اول به لوله‌های درون کندانسور و قسمت دوم به پره‌های روی لوله‌های کندانسور اختصاص داده شد.

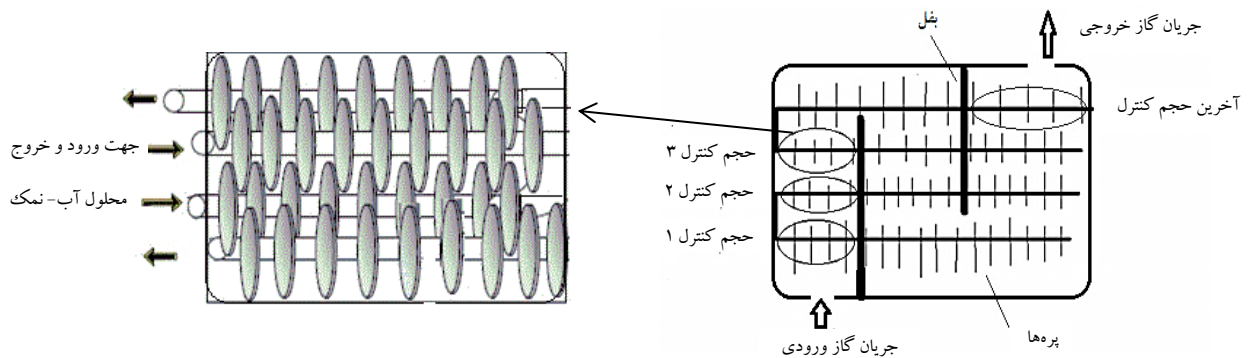
ترکیبی، تشکیل برفک درون آن‌ها است [۶، ۷، ۸، ۹]. بنابراین در مدل‌های ارائه شده بررسی کندانسورهای پوسته‌ی لوله‌ی اورانیم هگزافلوراید، نباید از تشکیل برفک چشم‌پوشی کرد.

برای سیستم اورانیم هگزافلوراید در شرایط چگالش در کندانسورهای پوسته‌ی لوله، بر خلاف کندانسورهای سطحی، پژوهش‌های بسیار محدودی انجام شده است و پژوهش‌های جامعی که بتواند تمام مؤلفه‌های انتقال جرم و حرارت و به ویژه تأثیرات تشکیل برفک را در طول کندانسور بررسی کند، وجود ندارد.

این پژوهش، با هدف مدل‌سازی و بهینه‌سازی دو کندانسور از نوع پوسته‌ی لوله‌ی واحد جداسازی UF<sub>۶</sub> با آرایش سری در مجتمع UCF اصفهان با روش حدس و خطا انجام شد. در این پژوهش، شرایط تشکیل برفک درون کندانسورهای پوسته‌ی لوله و تأثیرات آن در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از مدل تدوین شده، بهینه‌سازی شرایط عملیاتی این کندانسورها انجام شد.

**۲. مدل‌سازی ریاضی**

در صنعت، برای چگالش کردن گاز خروجی از رآکتور فلوراسیون، از کندانسورهای ویژه‌ای استفاده می‌شود. این کندانسورها در حقیقت مبدل‌های حرارتی از نوع پوسته‌ی لوله هستند. سیال خنک‌کننده در این کندانسورها محلول آب-نمک است که دمای آن براساس اهداف عملیاتی تنظیم می‌شود. گاز خروجی از رآکتور فلوراسیون وارد قسمت پوسته‌ی کندانسور شده و پس از چگالش و رسوب UF<sub>۶</sub>، با غلظت بسیار پایین از UF<sub>۶</sub> از کندانسور خارج می‌شود. در صنعت از دو کندانسور با ساختار کاملاً مشابه ولی با حجم‌های متفاوت به صورت سری برای این هدف استفاده می‌شود. گاز خروجی از رآکتور فلوراسیون، بعد از عبور از کندانسور اول و چگالش قسمت عمده‌ی UF<sub>۶</sub>، بلافاصله با غلظت کمی وارد کندانسور دوم می‌شود و در این کندانسور نیز UF<sub>۶</sub> باقی‌مانده، چگالش می‌یابد و سرانجام گاز با غلظت بسیار پایین از UF<sub>۶</sub> از کندانسور ۲ خارج می‌شود. در جدول‌های ۱ تا ۳، به برخی از مشخصات و شرایط عملیاتی این کندانسورها در حالت بهینه‌ی کارکردی اشاره شده است.



شکل ۱. نحوه تخصیص حجم کنترل‌ها درون کندانسور.

گازی،  $M_n$ ، با توجه به درصد‌های ترکیبی چهار گاز تشکیل دهنده مخلوط، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳]

$$M_n = \sum_{i=1}^4 x_i M_i \quad (1)$$

در این رابطه،  $x_i$  درصد مولی هر جزء و  $M_i$  خاصیت مولی برای جزء (i) هستند. با توجه به متغیر بودن درصد ترکیبی، دما و فشار مخلوط گاز درون هر حجم کنترل، در نتیجه خواص فیزیکی مخلوط گاز نیز در هر حجم کنترل تغییر می‌کند. در مدل تدوین شده، خواص فیزیکی گاز برای هر حجم کنترل و در نتیجه در طول کل کندانسور به صورت جداگانه محاسبه می‌شود. لازم به یادآوری است که برای به دست آوردن خواص فیزیکی مخلوط گازی، ابتدا خواص هر گاز در حالت خالص و به صورت تابعی از دما و فشار از مراجع استخراج شده، و سپس با استفاده از رابطه‌ی ۱ این خواص برای مخلوط گاز محاسبه شده است. به طور نمونه در جدول ۴ برای شرایط بهینه‌ی کارکرد کندانسور، خلاصه‌ای از خواص فیزیکی محاسبه شده توسط مدل در حجم کنترل اول برای کندانسور ۱، ارائه شده است.

**جدول ۴.** مقادیر خواص فیزیکی برای مخلوط گاز ورودی در شرایط

عملیاتی بهینه

مقدار	خاصیت فیزیکی
۷۷۶٫۷۳	گرمای ویژه در فشار ثابت (J/kg.K)
۱٫۹۴۷	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )
۱٫۴۵۱	گرمای نهان تصعید (J/kg)
۰٫۳۰۳	ضریب انتقال گرمای رسانشی (W/m.K)
۴۴٫۶۳	جرم مولکولی (g/mol)

## ۱.۲ فرض‌های مدل

مدل سازی ریاضی کندانسور مورد نظر براساس فرض‌هایی متناسب با شرایط عملیاتی واقعی واحد صنعتی انجام شده است.

مدل، هدف‌های زیر را پوشش می‌دهد:

- جریان‌های گرمی مخلوط گازی (مخلوط بخار-گاز) و جرم  $UF_6$  چگالش یافته درون کندانسور،
- ضرایب انتقال جرم و حرارت درون کندانسور،
- زمان سرد کردن مخلوط گازی از دمای اولیه تا دمای چگالش،
- سرعت و مقدار انتقال جرم  $UF_6$  از فاز گاز به جامد،
- میزان افزایش ضخامت لایه‌ی جامد چگالش یافته درون کندانسور،
- به دست آوردن مقادیر دما و غلظت گاز در هر نقطه از کندانسور به صورت تابعی از زمان،
- به دست آوردن خواص فیزیکی مخلوط گازی و جامد چگالش یافته در هر نقطه از کندانسور به صورت تابعی از زمان،
- به دست آوردن درصد اشباع بخار درون مخلوط گازی و سرانجام، جرم برفک تشکیل شده درون کندانسور.

### ۱.۱.۲ فرض‌های انتقال جرم

مخلوط گاز-بخار خروجی از رآکتور فلوراسیون و ورودی به کندانسور ۱، از چهار ترکیب با درصد جرمی  $UF_6$  (۴۰٫۳۹)،  $N_2$  (۵۱٫۲)،  $O_2$  (۴٫۷۴) و  $HF$  (۳٫۶۷) تشکیل شده است.

با استفاده از اصول ترمودینامیک مخلوط‌ها و در نظر گرفتن مخلوط گازی به عنوان گاز ایده‌آل، خاصیت مولی مخلوط



مجموعه‌ی این فرض‌ها در مدل‌سازی استفاده و درستی آن‌ها از طریق مقایسه‌ی نتایج تجربی با نتایج مدل بررسی شده است.

## ۲.۲ معادلات مدل

برای محاسبه‌ی تعداد حجم‌های کنترل اولیه، از کندانسوری که در آن چگالش صورت نگرفته و تنها دمای گاز در آن‌ها تا دمای شروع چگالش کاهش یافته است، استفاده می‌شود. در این شرایط از موازنه‌ی حرارتی این ناحیه و اختلاف دمای میانگین لگاریتمی<sup>(۲)</sup> (LMTD)، به شرح زیر استفاده شده است [۱۰]

$$Q = \dot{m}_g \cdot C_{p,g} (T_{g,in} - T_{g,sub}) = h_{tube} \cdot A_t \cdot \Delta T_{lm} \quad (۳)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (۴)$$

$$\Delta T_1 = T_{g,in} - T_w \quad (۵)$$

$$\Delta T_2 = T_{g,sub} - T_w \quad (۶)$$

$A_t$  مجموع مساحت مورد نیاز (سطح پره و لوله) است که در آن چگالش صورت نمی‌گیرد و  $T_{g,sub}$  دمای شروع چگالش برای گاز است که تابعی از دما، فشار و ترکیب درصد گاز ورودی می‌باشد. لازم به ذکر است که در رابطه‌ی ۳، مقدار  $h_{tube}$  از رابطه‌ی ۲۳، که در ادامه بیان خواهد شد، محاسبه می‌شود.

با به دست آوردن مقدار سطح مورد نظر از رابطه‌ی ۳، می‌توان تعداد حجم‌های کنترل مورد اشاره را از رابطه‌ی زیر به دست آورد

$$N_{CV} = \frac{A_t}{A_{CV}} \quad (۷)$$

در رابطه‌ی بالا  $N_{CV}$ ، تعداد حجم کنترلی که در آن چگالش صورت نمی‌گیرد و  $A_{CV}$ ، مجموع سطوح پره‌ها و لوله در هر حجم کنترل است.

در قسمتی از کندانسور که در آن فرایند چگالش اتفاق می‌افتد، معادلات به صورت زیر است:

برای هر حجم کنترل، معادلات موازنه‌ی جرم و انتقال

حرارت به این شرح نوشته می‌شوند [۱۱]

دیگر فرض‌های مدل به صورت زیر است:

- در طی فرایند، گازهای  $HF$ ،  $O_2$  و  $N_2$  موجود در مخلوط گازی، درون کندانسور چگالش نمی‌یابند و تنها  $UF_6$  درون کندانسور چگالش می‌یابد. بنابراین موازنه‌ی جرمی برای مخلوط گازی درون کندانسور به صورت زیر است

$$\sum \dot{m}_{i,out} - \sum \dot{m}_{i,in} = \dot{m}' \quad (۲)$$

- اندازه‌ی ذرات برفک به حدی کوچک هستند که نمی‌توانند به طور کامل درون کندانسور ته‌نشین شوند. بنابراین درصد زیادی از ذرات فوق از کندانسور خارج می‌شوند که در محاسبات جرم کل ماده‌ی چگالش یافته‌ی درون کندانسور در نظر گرفته شده‌اند.
- با توجه به چگالی بالای  $UF_6$ ، مواد چگالش یافته به صورت همگن بر روی لوله‌ها و پره‌های کندانسور ته‌نشین می‌شوند. بنابراین لایه‌های مواد ته‌نشین شده به صورت پوسته‌های استوانه‌ای بر روی لوله‌های کندانسور و صفحات دایره‌ای شکل بر روی پره‌ها تشکیل می‌شوند.
- کل زمان فرایند، به بی‌نهایت بازه‌ی کوچک زمانی تبدیل می‌شود. در بازه‌های زمانی کوچک تعریف شده، شرایط در هر حجم کنترل، پایا در نظر گرفته می‌شود.

## ۲.۱.۲ فرض‌های انتقال حرارت

- به علت ضخامت ناچیز دیواره‌ی لوله و ضریب انتقال حرارت بالای مایع خنک‌کننده‌ی درون آن، دمای مایع خنک‌کننده‌ی درون لوله با دمای سطح لوله یکسان است.
- اختلاف دمای مایع خنک‌کننده‌ی ورودی و خروجی ناچیز است و در نتیجه دمای سطح دیواره ( $T_w$ ) ثابت است.
- ابتدا گاز تا دمای چگالش سرد می‌شود، سپس چگالش در دمای ثابت صورت می‌گیرد.
- گرمای حاصل از چگالش، به صورت رسانش یک بعدی از طریق دیواره‌ها و مواد ته‌نشین شده به سیال خنک‌کننده انتقال می‌یابد.
- درون هر حجم کنترل، تشابه بین انتقال حرارت و انتقال جرم برقرار است.



هم چنین با جای گذاری،  $Q_{sen,tube}$  از رابطه ی ۸،  $Q_{lat,tube}$  از رابطه ی ۹ و  $Q_{cond,tube}$  از رابطه ی ۱۲ در رابطه ی ۱۴، دمای سطح لایه های تشکیل شده از رسوب  $UF_6$  بر روی لوله های کندانسور از رابطه ی زیر به دست می آید

$$T_{tube,s} = \frac{h_{h,tube} A_{fin} T_{in} + h_{m,tube} A_{tube} (w_{in} - w_{tube,s}) h_{sv} + \left( \frac{\gamma \pi k_s W T_{tube,s}}{\ln(R + y_{tube}) / R} \right)}{\left( \frac{\gamma \pi k_s W T_{tube,s}}{\ln(R + y_{tube}) / R} \right) + h_{h,tube} A_{tube}} \quad (16)$$

برای به دست آوردن دمای خروجی از هر حجم کنترل، موازنه ی جرم و حرارت برای هر کدام از حجم های کنترل جداگانه محاسبه شد

$$Q_{sen} = \dot{m}_g C_{p,g} (T_{in} - T_{out}) \quad (17)$$

$$Q_{lat} = \dot{m}_g (w_{in} - w_{out}) h_{sv} \quad (18)$$

از دو معادله ی بالا، دما و غلظت گاز خروجی محاسبه شد.

افزایش ضخامت لایه ی ته نشین شده بر روی لوله و پره ها، در هر گام زمانی، از روابط زیر تعیین می شود [۱۱]

$$y_{fin,s}^{t+\Delta t} = y_{fin,s}^t + \frac{m'_{fin}}{\rho_{fin,s}} \Delta t \quad (19)$$

$$y_{tube,s}^{t+\Delta t} = y_{tube,s}^t + \frac{m'_{tube}}{\rho_{tube,s}} \Delta t \quad (20)$$

از طرفی، مقدار خروجی برای هر حجم کنترل، به عنوان ورودی برای حجم کنترل بعدی در نظر گرفته شد

$$T_{in,1} = T_{in}, T_{in,2} = T_{out,1}, \dots, T_{in,n} = T_{out,n-1} \quad (21)$$

$$W_{in,1} = W_{in}, W_{in,2} = W_{out,1}, \dots, W_{in,n} = W_{out,n-1} \quad (22)$$

### ۳.۲ ضریب انتقال حرارت جابه جایی (h)

برای به دست آوردن مقدار ضریب انتقال حرارت جابه جایی بر روی لوله های کندانسور، از روابط ارائه شده توسط یانگ و همکاران [۱۳] استفاده شده است. یانگ و همکاران در سال ۲۰۰۶ بر اساس روش های تجربی، یک رابطه ی ریاضی برای

$$Q_{sen} = Q_{sen,fin} + Q_{sen,tube} = \eta_{fin} h_{h,fin} A_{fin} (T_{in} - T_{fin,s}) + h_{h,tube} A_{tube} (T_{in} - T_{tube,s}) \quad (8)$$

$$Q_{lat} = Q_{lat,fin} + Q_{lat,tube} = \eta_{fin} h_{m,fin} A_{fin} (w_{in} - w_{fin,s}) h_{sv} + h_{m,tube} A_{tube} (w_{in} - w_{tube,s}) h_{sv} \quad (9)$$

در این معادله،  $\eta_{fin}$  بازدهی پره است.

ضریب انتقال جرم درون حجم کنترل، از تشابه بین انتقال جرم و حرارت به دست می آید. بر این اساس، طبق قانون مانستگی کالبرن داریم [۱۲]

$$h_m = \frac{h_h}{C_{p,g} Le^{\gamma_r}} \quad (10)$$

میزان انتقال حرارت رسانشی درون لایه های چگالش شده از روابط زیر به دست آمد [۱۳]

$$Q_{cond,fin} = k_s A_{fin} \left( \frac{T_{fin,s} - T_{in}}{y_{fin,s}} \right) \quad (11)$$

$$Q_{cond,tube} = \gamma \pi k_s W \left( \frac{T_{tube,s} - T_w}{\ln(R + y_{tube}) / R} \right) \quad (12)$$

مقدار انتقال حرارت حاصل از گاز با انتقال حرارت رسانشی درون لایه ی چگالش شده برابر است. به این ترتیب داریم

$$Q_{cond,fin} = Q_{sen,fin} + Q_{lat,fin} \quad (13)$$

$$Q_{cond,tube} = Q_{sen,tube} + Q_{lat,tube} \quad (14)$$

با جای گذاری  $Q_{sen,fin}$  از رابطه ی ۸،  $Q_{lat,fin}$  از رابطه ی ۹ و  $Q_{cond,fin}$  از رابطه ی ۱۱ در رابطه ی ۱۳، دمای سطح لایه های تشکیل شده از رسوب  $UF_6$  بر روی پره از رابطه ی زیر به دست می آید

$$T_{fin,s} = \frac{\eta_{fin} h_{m,fin} A_{fin} T_{in} + \eta_{fin} h_{m,fin} A_{fin} (w_{in} - w_{fin,s}) h_{sv} + k_m A_{fin} \frac{T_{fin}}{y_{fin}}}{\frac{k_s A_{fin}}{y_{fin}} + \eta_{fin} h_{h,fin} A_{fin}} \quad (15)$$



## ۱.۴.۲ سطح فوق اشباع گاز در کندانسور

یکی از شرایط لازم برای تشکیل برفک درون کندانسور آن است که سطح فوق اشباع گاز درون کندانسور، بیش‌تر از مقدار بحرانی آن باشد. در این حالت هسته‌های برفک درون گاز تشکیل می‌شوند [۲]. سطح فوق اشباع برای گاز در حال چگالش به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۷]

$$S = \frac{P_A}{P_{AS(T)}} \quad (26)$$

$P_A$  فشار جزئی ماده در گاز و  $P_{AS(T)}$  فشار بخار ماده روی سطح در دمای معین است. سطح فوق اشباع بحرانی برای چگالش گاز از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱۸]

$$\log s_{cr} = \sqrt{\frac{1,44}{\log(K)} \cdot \frac{M}{\rho} \left(\frac{\sigma}{T}\right)^{1,5}} \quad (27)$$

$$K = \frac{\gamma}{\rho} \frac{2m\sigma}{\pi} (P/kT)^2 \quad (28)$$

که در این روابط،  $M$  جرم مولکولی ( $g/mol$ )،  $\sigma$  کشش سطحی ( $J/cm^2$ )،  $\rho$  چگالی ( $kg/m^3$ )،  $T$  دمای سیستم ( $K$ )،  $\gamma$  ضریب چگالش،  $m$  جرم مولکول بخار در معرض چگالش ( $kg$ )،  $P$  فشار ( $Pa$ ) و  $k$  ثابت بولتزمن ( $1,38 \times 10^{-23} J/K$ ) است. مقدار  $\gamma$  برای چگالش  $UF_6$  عددی بین صفر و یک است و برای سیستم حاوی اورانیم هگزافلوراید  $0,8$  در نظر گرفته شده است [۱۸].

برای به دست آوردن کشش سطحی از رابطه‌ی زیر استفاده شد [۱۸]

$$\sigma = \frac{\Delta H - RT}{v} \left(\frac{\Delta n}{n}\right)h \quad (29)$$

در این رابطه،  $\sigma$  کشش سطحی ( $J/cm^2$ )،  $\Delta H$  آنتالپی تبخیر ( $kJ/mol$ )،  $R$  ثابت جهانی گازها ( $8,314 J/mol.K$ )،  $\Delta n$  ضریب مولکولی (وابسته به ساختار سطح لایه‌ی تشکیل‌شونده)،  $h$  ضخامت یک لایه‌ی مولکولی از ماده چگالش یافته ( $m$ )،  $v$  حجم مولی ( $cm^3/mol$ ) و  $n$  عدد کنوردیناسیون است. پارامترهای مورد نیاز برای رابطه‌های ۲۷ تا ۲۹ در جدول ۵ نمایش داده شده است.

محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در مبدل‌هایی که در آن‌ها فرایند چگالش صورت می‌گیرد، پیشنهاد کردند. روابط یانگ برای فرایند چگالش مخلوط هوا و بخار آب درون یک مبدل حرارتی پوسته و لوله به دست آمده است. پژوهش‌های بسیاری برای چگالش مخلوط هوا و بخار آب درون یک مبدل حرارتی پوسته و لوله انجام شده است [۱۴، ۱۵]. به علت تشابه سیستم یانگ با سیستم این پژوهش (مخلوط  $UF_6$  و گازهای همراه آن همانند مخلوط بخار آب و هوا از یک بخار قابل چگالش و مخلوطی از گازهای غیرقابل چگالش تشکیل شده است)، از روابط یانگ برای محاسبه‌ی ضرایب انتقال حرارت استفاده شده است. مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی برای مخلوط گاز بر روی لوله‌ها و پره‌های کندانسور، از معادلات زیر محاسبه شده است

$$Nu_{tube} = \frac{h_{tube} D}{k} = 0,146 Re_D^{0,417} Pr^{0,847} \quad (23)$$

$$Nu_{fin} = \frac{h_{fin} L}{k} = 0,204 Re_L^{0,67} \quad (24)$$

هم‌چنین ضریب انتقال حرارت مایع خنک‌کننده درون لوله‌های کندانسور از معادله‌ی زیر به دست آمد [۱۰]

$$Nu_r = \frac{h_r d_i}{k} = 0,23 Re_d^{0,4} Pr^{0,4} \quad (25)$$

## ۴.۲ تشکیل برفک درون کندانسور

برفک به ذراتی گفته می‌شود که در دماهای پایین در گازهای حامل بخار قابل چگالش تشکیل شده و به صورت ذرات معلق در این گازها ظاهر می‌شوند. برفک‌ها بر روی سطوح کندانسور ته‌نشین نمی‌شوند و به همراه گاز از کندانسور خارج می‌شوند. هر چند این ذرات به صورت معلق در گاز هستند، ولی می‌توان با روش‌هایی آن‌ها را درون کندانسور ته‌نشین کرد. فرایند چگالش غیرهمگن یا تشکیل برفک زمانی اتفاق می‌افتد که دمای گاز، زیر نقطه‌ی سه‌گانه بوده و فشار جزئی ماده‌ی چگالش‌شونده بیش‌تر از فشار بخار آن در همان دما باشد. تشکیل برفک در طول عملیات چگالش پدیده‌ای نامطلوب است و موجب هدر رفت محصول می‌شود [۱۶].



چگالش یافته درون حجم کنترل در گام زمانی پذیرفته می‌شود و محاسبات در این دمای سطح لایه‌ی چگالش یافته انجام و در نظر گرفته می‌شود.

- محاسبات به حجم کنترل بعدی انتقال می‌یابد.
- به این ترتیب، دما، غلظت و سایر خواص فیزیکی در هر نقطه از کندانسور و در هر لحظه از زمان، محاسبه می‌شود. الگوریتم مدل‌سازی تدوین شده، در شکل ۲ نشان داده شده است.

#### ۱۶.۲ اثبات مدل

بعد از طراحی و تدوین مدل، نتایج حاصل از آن با داده‌های آزمایشگاهی شرکت سوره‌ی اصفهان مقایسه شده است. در شکل‌های ۳ و ۴، مقایسه‌ی مقادیر به دست آمده از مدل برای مقدار ته‌نشین‌شده‌ی اورانیم هگزافلوراید در انتهای فرایند، برای هشت مقدار از دمای مایع خنک‌کننده‌ی ورودی به کندانسور ۱ و دو مقدار برای کندانسور ۲ با داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. لازم به یادآوری است که دمای مایع خنک‌کننده ورودی به کندانسور ۲، عددی ثابت و برابر با  $30^{\circ}\text{C}$  ( $243\text{ K}$ ) است. به دلیل آن که دو کندانسور ۱ و ۲ به صورت سری به هم متصل هستند، با تغییر دمای مایع خنک‌کننده‌ی ورودی به کندانسور ۱، شرایط چگالش در کندانسور ۲، نیز تغییر می‌کند و به دنبال آن، مقدار ماده‌ی چگالش یافته در آن و خواص گاز خروجی از این کندانسور نیز تغییر می‌یابد. بنابراین در شکل ۴، مقدار چگالش یافته در کندانسور ۲ برحسب دمای مایع خنک‌کننده‌ی ورودی به کندانسور ۱ به دست آمده است.

هم‌چنین در جدول‌های ۶ و ۷، خواص فیزیکی و درصد ترکیب گازهای خروجی از کندانسور دوم و نیز تغییرات جرم  $\text{UF}_6$  چگالش یافته با تغییر دمای مایع خنک‌کننده در کندانسور اول و دوم با داده‌های شرکت سوره‌ی اصفهان مقایسه شد. مقایسه‌ی نتایج مدل با نتایج تجربی صنعتی ارائه شده از شرکت سوره‌ی اصفهان در خصوص جرم چگالش یافته در کندانسور ۱ و ۲ و خواص گاز خروجی از کندانسور ۲، بیان‌کننده‌ی دقت بسیار بالای این مدل است. میانگین خطای داده‌های به دست آمده از مدل‌سازی انجام شده نسبت به داده‌های صنعتی برای جرم چگالش یافته در کندانسور اول و دوم به ترتیب  $1.39\%$  و  $2.24\%$  است که اثبات مدل را به همراه دارد.

#### جدول ۵. مقادیر پارامترهای مورد نیاز برای روابط تشکیل برفک

پارامتر	یکا	مقدار
R (ثابت جهانی گازها)	J/(mol.K)	۸۳۱۴
K (ثابت بولتزمن)	J/K	$1.38 \times 10^{-23}$
M (جرم مولکولی)	g/mol	۳۵۰
m (جرم یک مولکول)	g	$5.814 \times 10^{-22}$
n (عدد کنوردانسیون اتم اورانیم)	-	۶
$\Delta n$ (ضریب مولکولی)	-	۱
h (ضخامت یک لایه‌ی مولکولی از $\text{UF}_6$ )	nm	۰.۱۹۹۶
$\gamma$ (ضریب چگالش)	-	۰.۸

برفک‌ها در هر مکانی از کندانسور که سطح فوق اشباع آن بیش‌تر از حالت بحرانی باشد، امکان شکل‌گیری دارند. غلظت جرمی برفک تشکیل شده در شرایط عملیاتی کندانسور از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۱۸]

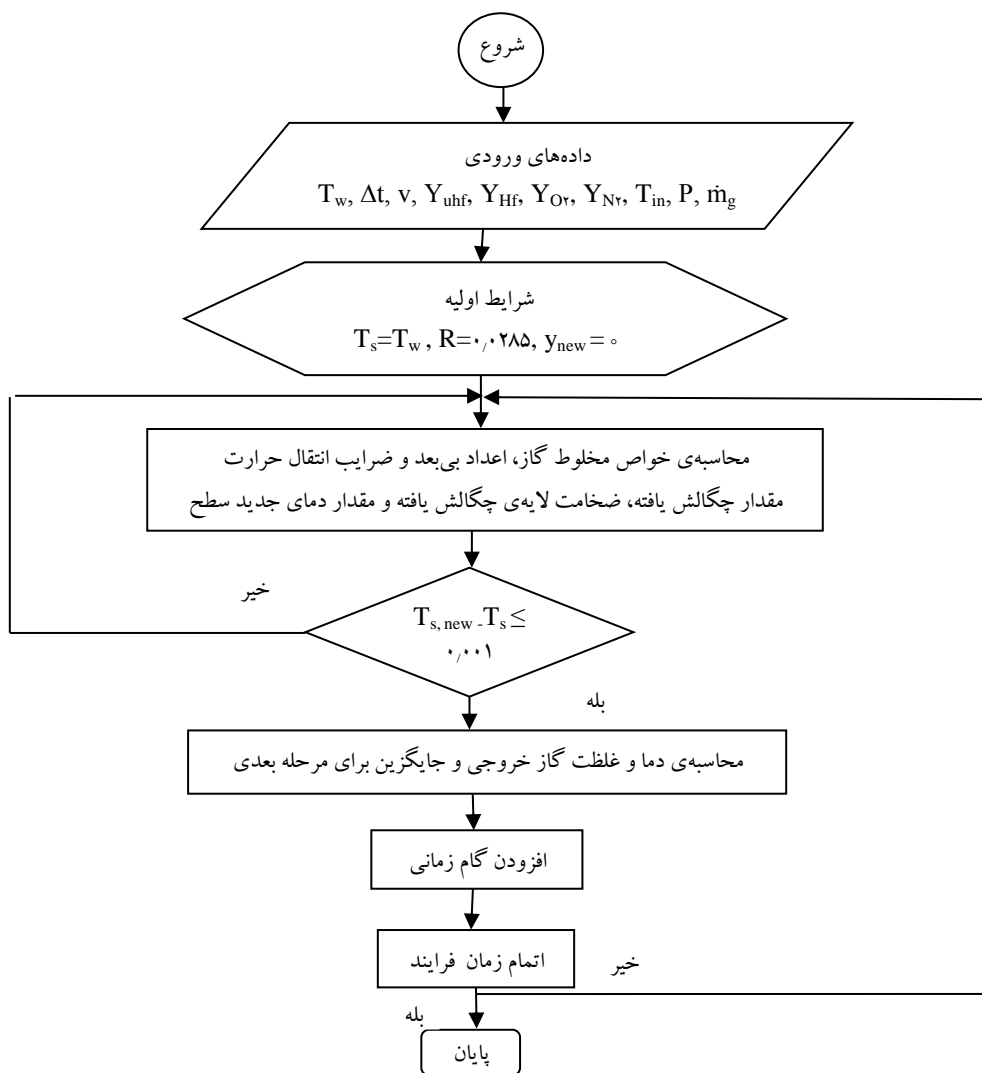
$$G = \frac{MP}{RT} (S-1) \quad (30)$$

در رابطه‌ی بالا،  $G$  غلظت جرمی برفک تشکیل شده ( $\text{g/cm}^3$ )،  $M$  جرم مولکولی ( $\text{g/mol}$ )،  $P$  فشار سیستم (Pa)،  $T$  دمای سیستم (K)،  $R$  ثابت جهانی گازها ( $\text{J/mol K}$ ) و  $S$  سطح اشباع گاز درون کندانسور است.

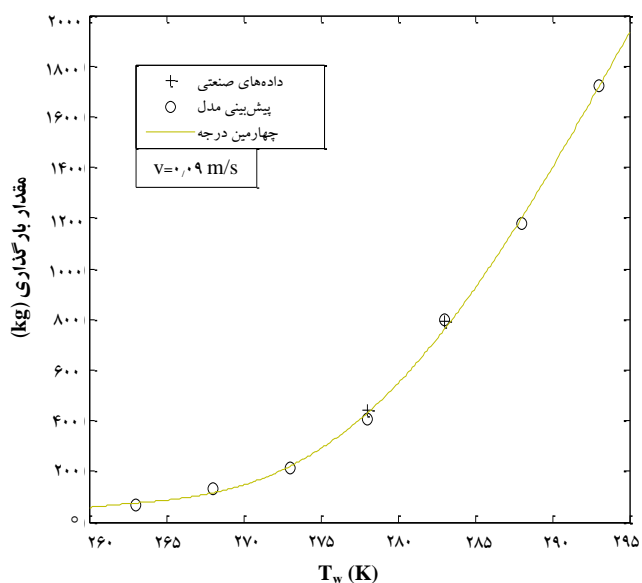
#### ۵.۲ روند محاسبات مدل

- کندانسور در جهت جریان گاز، به تعداد معینی حجم کنترل تقسیم شده است.
- قطر لوله، زمان فرایند، گام زمانی، شرایط گاز ورودی، دمای دیواره‌ی پره و لوله، به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند.
- دمای سطح لایه‌ی چگالش یافته حدس زده می‌شود.
- جرم رسوب، ضخامت رسوب، چگالی رسوب، ضریب انتقال حرارت و جرم برای لوله و پره و کلیه‌ی خواص فیزیکی در دمای ورودی و دمای سطح حدس زده شده به دست می‌آیند.
- دمای سطح از معادله‌های ۱۵ و ۱۶ محاسبه می‌شود.
- اگر اختلاف بین دمای حدس اولیه و دمای سطح به دست آمده از محاسبات کم‌تر از مقدار تعریف شده‌ی خطا باشد، دمای سطح حدس زده شده به عنوان دمای سطح لایه‌ی

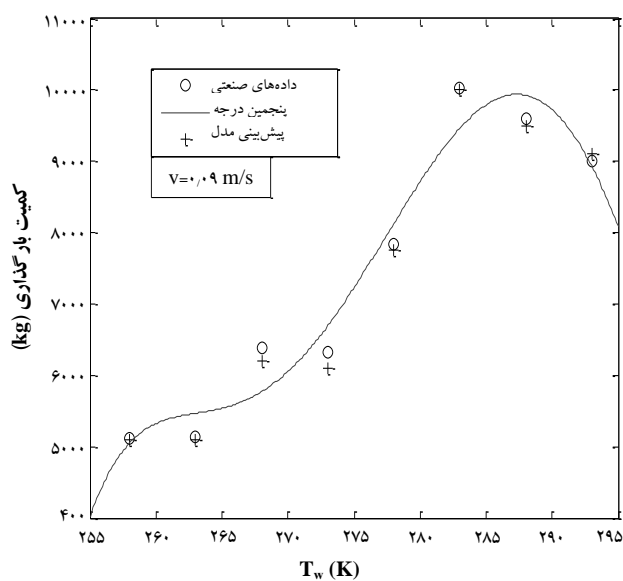




شکل ۲. الگوریتم مدل‌سازی تدوین شده.



شکل ۴. مقایسه‌ی نتایج صنعتی با پیش‌بینی مدل برای جرم چگالش یافته‌ی اورانیم هگزا فلوراید در کندانسور ۲.



شکل ۳. مقایسه‌ی نتایج صنعتی با پیش‌بینی مدل برای جرم چگالش یافته‌ی اورانیم هگزا فلوراید در کندانسور ۱.

**جدول ۶.** مقایسه‌ی بین داده‌های صنعتی و نتایج حاصل از مدل برای خواص فیزیکی و درصد ترکیب گازهای خروجی از کندانسور ۲

جرم مولکولی (kg/kmol)	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت (kJ/kg.°C)	ترکیب درصد گازهای خروجی از کندانسور ۲			جرم مولکولی (kg/kmol)	داده‌های صنعتی
		UF <sub>۶</sub>	N <sub>۲</sub>	O <sub>۲</sub>		
۲۸,۳۶	۱,۰۳۵	۰,۰۰۰۷	۰,۸۹۲۷	۰,۰۵۶۲	۰,۰۲۲	داده‌های صنعتی
۲۸,۵۰۸	۱,۰۳۷	۰,۰۰۰۷	۰,۸۹۱۱	۰,۰۶۲۶	۰,۰۶۳۸	پیش‌بینی مدل

**جدول ۷.** تغییرات جرم UF<sub>۶</sub> چگالش یافته با تغییر دمای مایع خنک کننده در کندانسور ۱ و ۲

جرم UF <sub>۶</sub> چگالش یافته (داده‌های صنعتی) (kg)	جرم UF <sub>۶</sub> چگالش یافته (پیش‌بینی مدل) (kg)	خطا (%)	دمای مایع خنک کننده به کندانسور ۲ (°C)	جرم UF <sub>۶</sub> چگالش یافته (پیش‌بینی مدل) (kg)	جرم UF <sub>۶</sub> چگالش یافته (داده‌های صنعتی) (kg)	خطا (%)	دمای مایع خنک کننده به کندانسور ۱ (°C)
۵۱۰۰	۵۱۱۷	۰,۳۳	-	۵۱۳۲	۵۱۰۰	۰,۶۲	-۱۵±۳
۶۲۰۰	۶۳۸۲	۲,۹۳	-	۶۳۲۱	۶۲۰۰	۰,۹۳	-۱۰±۳
۶۱۰۰	۶۳۲۱	۳,۶۲	-	۷۸۴۰,۹	۶۱۰۰	۲,۹۳	-۵±۳
۷۷۵۰	۷۸۴۰,۹	۱,۱۷	-۳۰±۵	۱۰۰۲۳	۷۷۵۰	۰,۲۳	۰±۳
۱۰۰۰۰	۱۰۰۲۳	۰,۲۳	-۳۰±۵	۹۶۰۸	۱۰۰۰۰	۱,۱۳	۵±۳
۹۵۰۰	۹۶۰۸	۱,۱۳	-	۵۹۹۸,۲	۹۵۰۰	۱,۱۳	۱۵±۳
۹۱۰۰	۵۹۹۸,۲	۱,۱۵۱	-	-	۹۱۰۰	۱,۱۵۱	۲۰±۳

### ۳. تحلیل متغیرهای مؤثر بر عملکرد کندانسور

متغیرهای مستقل و مؤثر در بازدهی سیستم کندانسور، دما و سرعت گاز ورودی هستند. لازم به یادآوری است که بهینه‌سازی شرایط عملیاتی کندانسور ۱ به طور مستقیم بر شرایط عملیاتی و بازدهی کندانسور ۲ تأثیر گذار است. به همین دلیل، در بررسی متغیرها و بهینه‌سازی، شرایط کارکرد کندانسور ۱ در نظر گرفته شد که منجر به افزایش بازدهی کندانسور ۱ و هم‌چنین کندانسور ۲ می‌شود. بنابراین دو متغیر عملیاتی مستقل و مؤثر بر بازدهی کندانسور ۱ در نظر گرفته شدند. به طور ویژه، تأثیر متغیرهای با اهمیت از جمله دمای مایع خنک کننده و ورودی و سرعت گاز ورودی بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، ضخامت لایه‌ی چگالش یافته UF<sub>۶</sub>، بازده، مقدار چگالش یافته UF<sub>۶</sub> و مقدار برفک تشکیل شده در طول کندانسورهای واحد جداسازی هگزا فلوراید اورانیم بررسی شدند. با استفاده از نرم‌افزار مدل‌سازی تأیید شده، سرانجام، بهینه‌سازی شرایط عملیاتی کندانسور برای تعیین بهترین عملکرد کندانسور انجام شد. در ادامه، تأثیر این متغیرها بر شرایط عملکرد کندانسور بررسی شده است.

مایع خنک کننده‌ی ورودی به کندانسور و گرفتن نتایج برای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، اجرا شده است. نتایج در شکل ۵ برحسب تعداد ردیف‌های لوله در کندانسور قابل مشاهده است. همان‌طور که از نمودار مشاهده می‌شود، با بالا رفتن سرعت گاز ورودی به کندانسور، مقدار ضریب انتقال حرارت در کل کندانسور افزایش می‌یابد. این نتایج با توجه به افزایش عدد رینولدز با افزایش سرعت گاز ورودی قابل پیش‌بینی بود. در قسمتی از کندانسور که در پنج ردیف اول لوله‌ها قرار دارد، کاهش چشمگیری در ضریب انتقال حرارت گاز بر سطوح لوله مشاهده می‌شود. لازم به یادآوری است که در ناحیه‌ی فوق، بیش‌ترین میزان چگالش اورانیم هگزا فلوراید نیز اتفاق می‌افتد. این کاهش شدید درصد ترکیب اورانیم هگزا فلوراید در گاز ورودی بر پارامترهای مؤثر، ضریب انتقال حرارت (عدد رینولدز، عدد لوئیس و عدد پراتل) تأثیر می‌گذارد و همین امر موجب کاهش ضریب انتقال حرارت در این ناحیه می‌شود.

### ۲.۳ اثر سرعت گاز ورودی بر ضخامت لایه‌ی چگالش یافته UF<sub>۶</sub>

#### روی لوله‌های کندانسور

در شکل ۶، اثر سرعت گاز ورودی بر شعاع (ضخامت) ماده‌ی چگالش یافته UF<sub>۶</sub> بر سطح لوله‌های کندانسور بررسی شده است. در شکل ۷ نیز تغییرات ترکیب درصد مولی اورانیم هگزا فلوراید در گاز در طول کندانسور برحسب تعداد ردیف‌های لوله در کندانسور بررسی شده است.

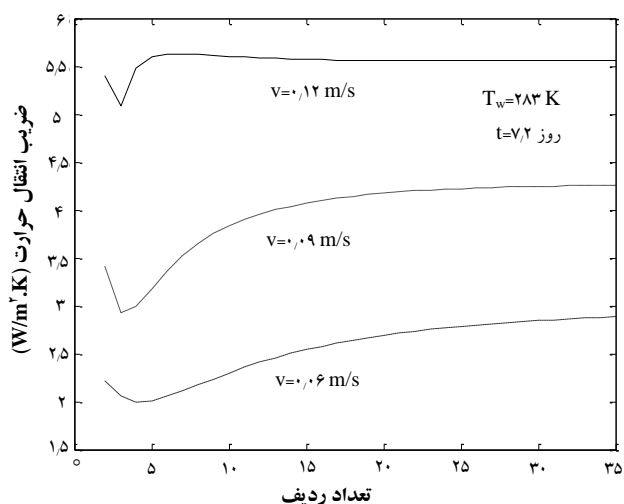
### ۱.۳ اثر سرعت گاز ورودی بر ضریب انتقال حرارت

برای آگاهی از تأثیر سرعت گاز ورودی بر روی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در طول کندانسور، برنامه‌ی کامپیوتری برای سرعت‌های ۰,۰۶، ۰,۰۹، ۰,۱۲ m/s و در دمای ۲۷۸ K برای

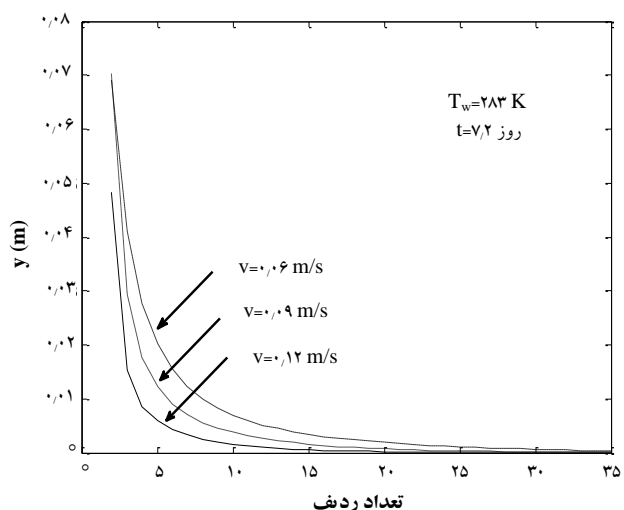
همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است، افزایش سرعت گاز سبب می‌شود که بیش‌ترین مقدار چگالش در ابتدای کندانسور صورت گیرد. بنابراین، عملاً در لوله‌های میانی و انتهایی کندانسور، مقدار بسیار ناچیزی چگالش انجام می‌شود. اما با کاهش سرعت گاز ورودی به کندانسور، لوله‌های میانی و انتهایی کندانسور نیز در چگالش شرکت می‌کنند و در این حالت احتمال گرفتگی کندانسور در زمان‌های اولیه و کم، بسیار کاهش می‌یابد. باید توجه داشت با توجه به طول زیاد کندانسور (۴/۱۷ m)، سرعت گاز ورودی نمی‌تواند از حدی کم‌تر باشد، زیرا در این صورت خروج گاز از کندانسور مشکل خواهد شد و این مسئله خود موجب بروز پدیده‌ی گرفتگی در کندانسور می‌شود. از شکل ۶ مشاهده می‌شود که ضخامت اورانیم هگزا فلوراید چگالش شده در ناحیه‌ی اولیه‌ی کندانسور شامل پنج ردیف لوله، با شیب تندی کاهش یافته و پس از آن، این تغییرات ناچیز بوده و در نواحی میانی و انتهایی کندانسور روند تقریباً ثابتی دارند. این تغییرات شدید در ضخامت مواد چگالش شده، تأییدکننده‌ی نتایج به دست آمده از مدلی است که در شکل ۷ ارائه شده است. به این صورت که ته‌نشینی عمده‌ی  $UF_6$  در پنج ردیف اول لوله‌های کندانسور اتفاق می‌افتد و این عامل باعث تغییرات زیاد درصد ترکیب گاز در این ناحیه شده است.

### ۳.۳ اثر سرعت گاز ورودی بر دمای سطح لایه‌ی چگالش یافته $UF_6$

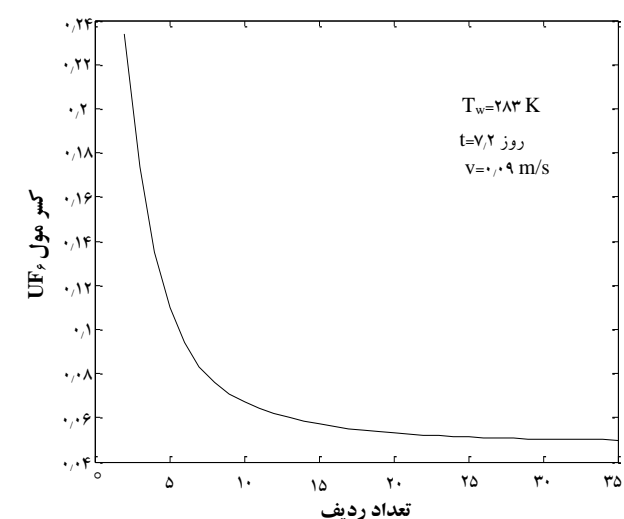
در شکل ۸، اثر سرعت گاز ورودی بر دمای سطح لایه‌ی چگالش یافته  $UF_6$  ( $T_s$ ) بررسی شده است. این داده‌ها برای دمای مایع خنک‌کننده‌ی ورودی  $278\text{ K}$  و در سه سرعت  $0.06$ ،  $0.09$  و  $0.12\text{ m/s}$  گاز ورودی، توسط نرم‌افزار مدل‌سازی محاسبه شده‌اند و برحسب تعداد ردیف‌های لوله، در شکل ۸ نشان داده شده است.



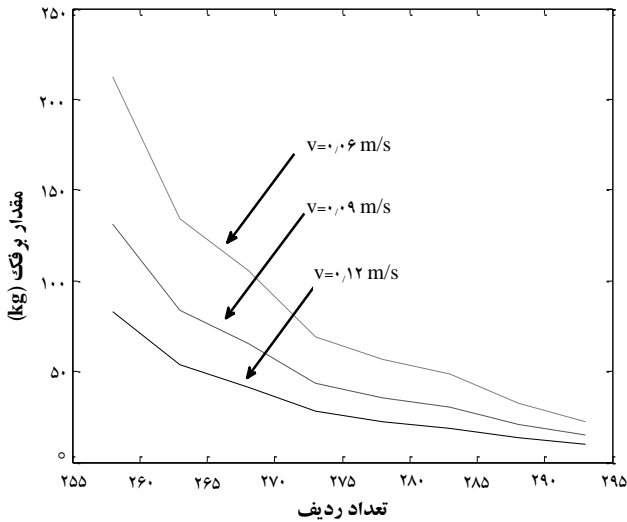
شکل ۵. اثر سرعت گاز ورودی بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی بر روی لوله‌های کندانسور ۱.



شکل ۶. اثر سرعت گاز ورودی بر ضخامت لایه‌ی چگالش یافته بر کندانسور ۱.



شکل ۷. تغییرات مؤلفه‌ی مولی  $UF_6$  در گاز در طول کندانسور ۱.

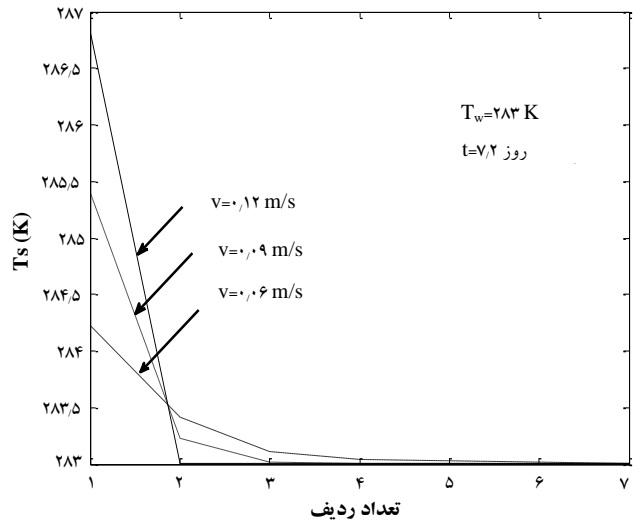


شکل ۹. بررسی تأثیر سرعت گاز ورودی بر مقدار برفک خروجی از کندانسور.

قسمت های ابتدایی کندانسور افزایش می یابد (شکل ۸) و شرایط برای تشکیل ذرات برفک درون کندانسور نامساعد می شود، به همین دلیل مقدار برفک خروجی از کندانسور به طور محسوسی کاهش می یابد.

#### ۵.۳ اثر سرعت گاز ورودی بر بازدهی کندانسور

در شکل ۱۰، اثر سرعت گاز ورودی بر بازدهی کندانسور در شرایط سه سرعت گاز ورودی ۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۱۲ m/s بررسی شده است. این نمودار نشان دهنده آن است که با افزایش سرعت گاز ورودی، مقدار بازدهی کندانسور افزایش می یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش سرعت گاز ورودی، مقدار ضریب انتقال حرارت درون کندانسور افزایش می یابد و گرمای بیش تری از گاز خارج می شود، در نتیجه نرخ چگالش افزایش یافته و اورانیم هگزا فلوراید بیش تری در کندانسور چگالش می یابد. هم چنین از نمودار مشاهده می شود با افزایش دمای مایع خنک کننده و ورودی، مقدار بازدهی کندانسور کاهش می یابد. دلیل این کاهش، افزایش دمای سطح لایه ی چگالش یافته است و همین امر سبب می شود مقدار  $UF_6$  کم تری در کل کندانسور چگالش یابد و در نتیجه مقدار  $UF_6$  بیش تری به صورت گاز از کندانسور خارج شود. سرعت گاز ورودی ۰/۱۲ و ۰/۰۹ m/s باعث اختلاف کمی در بازده می شود در حالی که سرعت گاز ورودی ۰/۰۶ m/s روند کاهشی بیش تری را در بازده به همراه دارد.

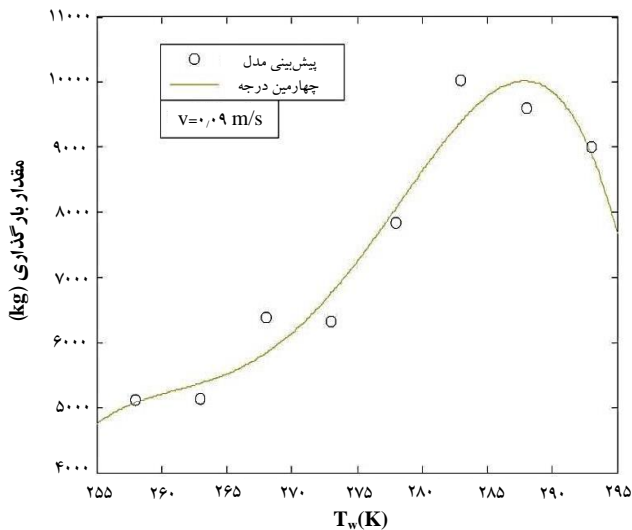


شکل ۸. اثر سرعت گاز ورودی بر دمای سطح لایه ی چگالش یافته  $UF_6$  در کندانسور.

افزایش سرعت گاز ورودی باعث افزایش عدد رینولدز و در نتیجه افزایش میزان انتقال حرارت گاز می شود. این افزایش میزان انتقال حرارت، شیب دمایی بیش تری را در لایه ی جامد چگالش یافته ایجاد می کند. افزایش شیب دما، دلیل عمده ی افزایش اختلاف دمای سطح ماده ی چگالش یافته با مایع خنک کننده ی ورودی است. در هر سه سرعت، روند کاهشی  $T_s$  در دو ردیف اولیه ی لوله ها با شیب بسیار تند و به دنبال آن شیب کم تری تا ردیف سه و در نهایت روند تقریباً ثابتی از ردیف سه به بعد ملاحظه می شود. این روند با توجه به ضخامت زیاد لایه ی  $UF_6$  چگالش شده در پنج ردیف اولیه ی لوله ها (شکل ۶) که ایجاد تغییرات بسیار زیاد درجه حرارت را به همراه دارد، منطقی و قابل قبول است. به دنبال آن، با کاهش ضخامت لایه ی  $UF_6$  پس از پنج ردیف اولیه، این نمایه ی درجه حرارت به میزان قابل توجهی کم شده و در نتیجه با روند تقریباً پایدار و ثابتی روبه رو می شود.

#### ۴.۳ اثر سرعت گاز ورودی بر مقدار برفک خروجی از کندانسور

شکل ۹، اثر سرعت گاز ورودی بر مقدار برفک تولید شده در کندانسور را نشان می دهد. این نمودار، برای دمای مایع خنک کننده ی ورودی ۲۷۸ K و در سه سرعت ۰/۰۶، ۰/۰۹ و ۰/۱۲ m/s برای گاز ورودی به دست آمده است. با توجه به نمودار، با افزایش سرعت گاز ورودی، مقدار برفک خروجی از کندانسور کاهش می یابد. دلیل مشاهدات فوق آن است که با افزایش سرعت گاز ورودی، دمای سطح لایه ی چگالش یافته در



شکل ۱۱. تأثیر دمای مایع خنک‌کننده‌ی ورودی بر مقدار کلی چگالش  $UF_6$  درون کندانسور.

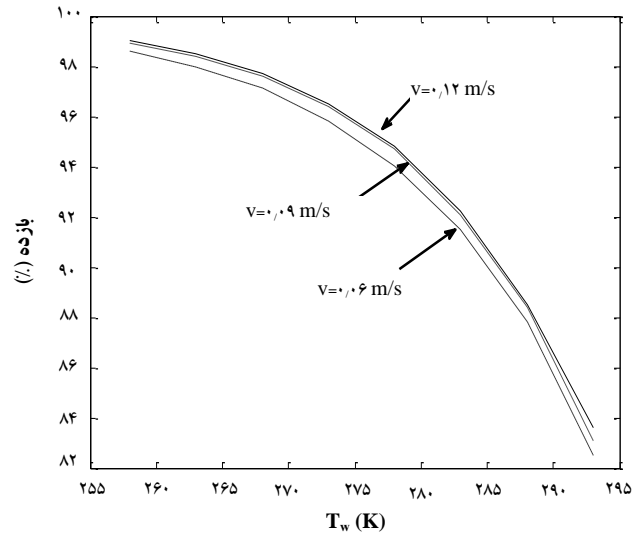
### ۷.۳ چگونگی توزیع برفک در طول کندانسور

#### ۱.۷.۳ درصد فوق اشباع گاز ورودی در طول کندانسور

شکل ۱۲ روند تغییرات درصد فوق اشباع گاز را برحسب تعداد ردیف‌های لوله در کندانسور نشان می‌دهد. همان‌طور که از این نمودار مشخص است، بالاترین مقدار برای درصد فوق اشباع در اوایل کندانسور اتفاق می‌افتد. در ناحیه‌ی شش ردیف اولیه‌ی لوله‌ها، روند کاهش می‌زان برفک تولیدی با شیب بسیار تندی مشاهده می‌شود که به دنبال آن پس از این ناحیه، تغییرات روند ملایم‌تر و سرانجام تقریباً مقدار ثابتی را پیدا می‌کند. هر چه مقدار فوق اشباع بودن از مقدار بحرانی آن (که در شرایط کندانسور تقریباً برابر ۱ است) بیش‌تر شود، احتمال تشکیل ذرات برفک درون کندانسور افزایش می‌یابد. بنابراین درصد بالای از برفک در قسمت‌های ابتدایی کندانسور تشکیل می‌شود و عملاً در قسمت‌های میانی و انتهایی کندانسور، درصد فوق اشباع به مقدار بحرانی خود نزدیک شده و احتمال تشکیل ذرات برفک در عمل به صفر می‌رسد.

#### ۲.۷.۳ غلظت برفک در طول کندانسور

در شکل ۱۳ می‌توان غلظت برفک را در طول کندانسور برحسب تعداد ردیف‌های لوله مشاهده کرد. همان‌طور که از این نمودار مشخص است، بیش‌ترین غلظت برفک در قسمت‌های ابتدایی کندانسور تشکیل می‌شود. نتایج به دست آمده در دو شکل ۱۲ و ۱۳ با یک‌دیگر سازگاری خوبی دارند.



شکل ۱۰. بررسی اثر سرعت گاز ورودی بر بازدهی کندانسور.

### ۶.۳ تأثیر دمای مایع خنک‌کننده‌ی ورودی بر مقدار کلی $UF_6$ چگالش یافته درون کندانسور

در شکل ۱۱ اثر دمای مایع خنک‌کننده‌ی ورودی بر روی مقدار کلی ماده‌ی ته‌نشین شده  $UF_6$  درون کندانسور بررسی شده است. این داده‌ها توسط مدل در هشت دمای مختلف برای مایع خنک‌کننده ورودی به کندانسور در سرعت  $0.09 \text{ m/s}$  برای گاز ورودی، پیش‌بینی شده است. شکل ۱۱ نشان‌دهنده‌ی دو روند متفاوت افزایشی و کاهش‌ی در اثر افزایش دمای مایع خنک‌کننده‌ی ورودی است. به این صورت که در محدوده‌ی درجه حرارت  $258 \text{ K}$  تا  $283 \text{ K}$ ، روند افزایش میزان  $UF_6$  چگالشی و به دنبال آن در حرارت‌های بالاتر تا  $293 \text{ K}$  روند کاهش‌ی مشاهده می‌شود. دلیل روند ملاحظه شده این است که در ابتدا با افزایش دمای مایع خنک‌کننده‌ی ورودی به کندانسور، مقدار برفک تولید شده کاهش می‌یابد که این عامل سبب افزایش جرم  $UF_6$  ته‌نشین شده در داخل کندانسور می‌شود. ولی در دماهای بالاتر، هر چند که مقدار برفک خروجی کاهش می‌یابد، اما به دلیل دمای بالای سطح لوله‌های کندانسور، مقدار چگالش درون کندانسور کاهش پیدا می‌کند. در حقیقت، برای حداکثر شدن مقدار جرم ته‌نشین شده  $UF_6$  در کندانسور، مقدار دمای مایع خنک‌کننده‌ی ورودی باید طوری تنظیم شود که (۱) مقدار برفک خروجی از کندانسور به حداقل برسد و (۲) شرایط برای چگالش مواد درون کندانسور فراهم باشد.

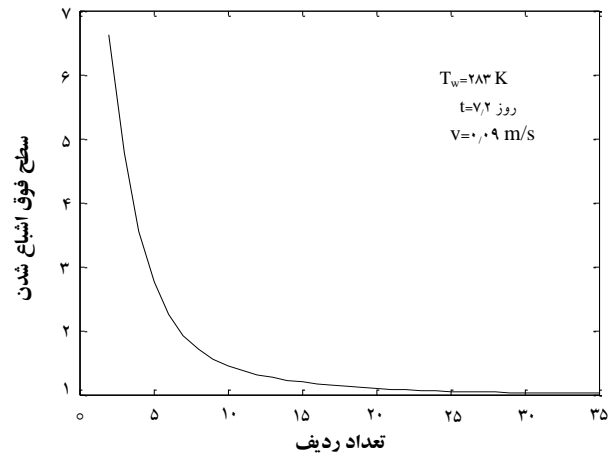


کم تر از این مقدار انتخاب شود مقدار برفک خروجی از کندانسور افزایش یافته و هم چنین به علت چگالش ناهمگن بر روی لوله های کندانسور و ته نشین شدن بیش از حد مواد در قسمت های ابتدایی، احتمال گرفتگی در کندانسور بیش تر می شود.

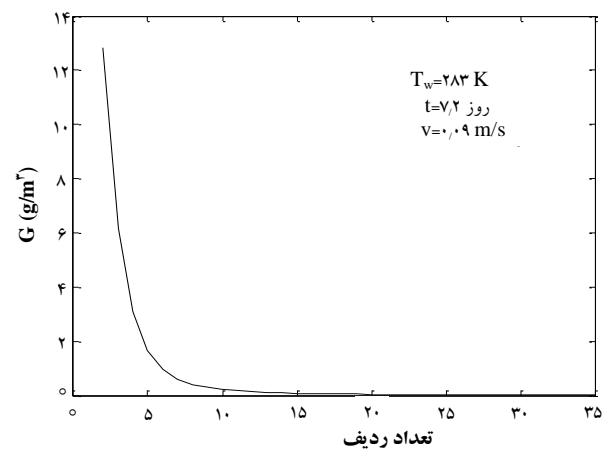
از تحلیل و بررسی نتایج و نمودارها مشخص می شود که سرعت بهینه برابر  $0.09 \text{ m/s}$  است. نمودارها نشان می دهند که هر چه سرعت، بیش تر از این مقدار انتخاب شود، هر چند برفک خروجی از کندانسور کاهش و مقدار بارگیری افزایش می یابد، ولی مواد به صورت ناهمگن درون کندانسور چگالش می یابند. در حالت ناهمگن، مواد فقط در لوله های ابتدایی کندانسور چگالش می یابند و لوله های میانی و انتهایی عملاً در چگالش شرکت نمی کنند. چگالش ناهمگن، هم بازدهی کندانسور را کاهش می دهد و هم موجب گرفتگی زود هنگام در زمان های پایین می شود. از طرفی در سرعت های پایین تر از مقدار بهینه، با توجه به وجود موانع بسیار در مسیر گاز درون کندانسور، عبور گاز به سختی از کندانسور انجام شده و ممکن است منجر به گرفتگی زود هنگام شود.

#### ۵. نتیجه گیری

در این پژوهش، مدل سازی و بهینه سازی دو کندانسور با آرایش سری واحد جداسازی اورانیم هگزافلوراید از ترکیب گاز خروجی رآکتور فلوراسیون مجتمع شرکت سوخت رآکتورهای هسته ای اصفهان انجام شد. هدف عمده ای این پژوهش، بهبود نتایج پیش بینی شده ای این مدل سازی جدید در مقایسه با مدل سازی های قبلی بود. نوآوری های مدل سازی این پژوهش شامل (۱) محاسبه ی ضریب انتقال حرارت با استفاده از تشابه انتقال حرارت واحد جداسازی مجتمع شرکت سوخت رآکتورهای هسته ای اصفهان با سیستم فرایند خالص سازی هوا از ترکیب هوا- بخار آب و (۲) محاسبه ی شرایط تشکیل برفک و تأثیر آن بر بازدهی کندانسور (۳) توانایی مدل در راستای پیش بینی خواص فیزیکی ترکیب گازها، درجه ی حرارت ترکیب گازها، بازدهی کندانسور و مقدار اورانیم هگزافلوراید چگالش یافته در هر زمان و هر مکان از کندانسورهای ۱ و ۲ است. تطابق بسیار مناسب نتایج به دست آمده از مدل با نتایج تجربی، نشان دهنده ی دقت



شکل ۱۲. تغییرات درصد فوق اشباع گاز بر حسب طول کندانسور.



شکل ۱۳. تغییرات غلظت برفک در طول کندانسور.

#### ۴. بهینه سازی شرایط عملیاتی

همان طور که پیش تر بیان شد، از بین متغیرهای مؤثر بر بازدهی کندانسور و مقدار کل ماده ی چگالش یافته، دمای مایع خنک کننده ی ورودی به کندانسور و سرعت گاز ورودی به کندانسور قابل تغییر هستند. از تحلیل و بررسی بر روی این دو متغیر این نتیجه حاصل می شود که دمای مایع خنک کننده ی ورودی به کندانسور باید طوری انتخاب شود که در آن دما، هم برفک خروجی در کم ترین مقدار ممکن باشد و هم بیش ترین مقدار چگالش اورانیم هگزافلوراید در کندانسور رخ دهد. با توجه به نمودارهای ارائه شده، دمای  $283 \text{ K}$ ، دمای بهینه برای مایع خنک کننده ی ورودی است. این دما، تنها دمایی است که در آن بیش ترین مقدار چگالش و در عین حال کم ترین مقدار برفک خروجی از کندانسور حاصل می شود. هم چنین در این دما، بازدهی کندانسور در حد مطلوب ۹۳٪ است. اگر دما

**نمادها**

A	سطح (م <sup>۲</sup> )
Cp	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg K)
D	ضریب نفوذ انتقال جرم (m <sup>۲</sup> /s)
R	شعاع لوله (m)
d <sub>i</sub>	قطر داخلی لوله (m)
h <sub>h</sub>	ضریب انتقال حرارت (W/m <sup>۲</sup> K)
h <sub>m</sub>	ضریب انتقال جرم (kg/m <sup>۲</sup> s)
h <sub>sv</sub>	گرمای نهان تصعید (J/kg K)
k	ضریب انتقال حرارت رسانشی (W/m K)
L	طول پره (m)
ṁ	دبی جرمی (kg/s)
m'	نرخ چگالش درون کندانسور (kg/s)
t	زمان فرایندی (s)
Δt	گام زمانی (s)
n	تعداد حجم کنترل
w	ترکیب درصد UF <sub>۶</sub>
y	ضخامت لایه‌ی UF <sub>۶</sub> چگالش یافته بر روی سطح (m)
T	دما (K)
W	طول حجم کنترل (m)
Q	نرخ انتقال حرارت (W)
Le	عدد لوئیس

**زیرنویس‌ها**

g	مخلوط گاز
cond	رسانشی
fin	پره
s	بر روی سطح لایه چگالش یافته از UF <sub>۶</sub>
r	مایع خنک کننده
lat	نهان
in	ورودی
out	خروجی
w	دیواره
sens	آشکار
Tube	لوله

**پی‌نوشت‌ها**

1. Phthalic anhydride
2. Logarithmic mean temperature difference

بسیار بالای این مدل است. میانگین خطای مدل برای جرم چگالش یافته UF<sub>۶</sub> کندانسور اول، ۱/۳۹٪ (بیشینه خطا: ۳/۶۲٪ و کمینه خطا: ۰/۲۳٪) و برای کندانسور دوم ۲/۲۴٪ (بیشینه خطا: ۷/۶٪ و کمینه خطا: ۰/۸۸٪) است. هم‌چنین در این پژوهش، تأثیر متغیرهای مؤثر در طول کندانسورهای واحد جداسازی اورانیم هگزافلوراید بررسی شد. سپس از مدل تأیید شده، برای به دست آوردن مقادیر بهینه‌ی متغیرهای مؤثر استفاده شد. سرعت بهینه‌ی گاز ورودی برابر ۰/۰۹ m/s و دمای بهینه مایع خنک کننده‌ی ورودی ۲۸۳ K است. با این شرایط بهینه، بازده‌ی کندانسور ۹۳٪ خواهد بود.

مدل ارائه شده در مقایسه با داده‌های صنعتی، می‌تواند متغیرهای با اهمیت از جمله (۱) بازده‌ی کندانسور (۲) ضریب انتقال حرارت (۳) خواص مخلوط گاز در حال چگالش (۴) مقادیر UF<sub>۶</sub> چگالشی و (۵) برفک خروجی از کندانسور را پیش‌بینی کند. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی تدوین شده در این پژوهش با داده‌های صنعتی، نشان‌دهنده‌ی دقت بسیار مناسب و در نتیجه خطای بسیار کم است که هدف اصلی این کار پژوهشی یعنی بهبود مدل‌سازی انجام شده، را به همراه دارد.

**قدردانی**

بدین وسیله از حمایت‌های مالی دانشگاه صنعتی اصفهان تشکر و قدردانی می‌شود.



- [1] H. Grin, V. Lein, Aerosols-dusts, smokes and fogs, Leningrad, Moscow: Khimia (1969).
- [2] P.A. Smolkin, A.S. Buynovskiy, V.V. Lazarchuk, A.A. Matveev, V.L. Sofronov, Mathematical model of desublimation process of volatile metal fluorides, Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, 310 (2006) 69-71.
- [3] V.L. Sofronov, A.S. Buinovskiy, K.F. Vasiliev, on sublimation purification of titanium tetra-fluoride, Moscow: Nauka (1984).
- [4] A.A.S. Abed, Mathematical Model for Definition of Thermal Conditions in Desublimation Process of Volatile Metal Fluorides, Int. Journal of Current Engineering and Technology, 3 (2006) 1396-1401.
- [5] J. Bilik, R. Krupiczka, Heat transfer in the desublimation of Phethalic Anhydride, Chemical Engineering Journal, 26 (1982) 169-180.
- [6] D. Seker, H. Karatas, N. Egriçan, Frost formation on fin-and-tube heat exchangers, Int. J. of Refrigeration, 27 (2003) 375-377.
- [7] K. Lenic, A. Trp, B. Frankovic, Unsteady heat and mass transfer during frost formation in a fin-and-tube heat exchanger, Int. J. of Refrigeration, 27 (2011) 367-374.
- [8] J. Cui, W.Z. Li, Y. Liu, Y.S. Zhao, A new model for predicting performance of fin-and-tube heat exchanger under frost condition, Int. J. Heat and Fluid Flow, 32 (2010) 249-260.
- [9] P.J. Mago, S.A. Sherif, Heat and mass transfer on a cylinder surface in cross flow under supersaturated frosting conditions, Int. J. refrigeration, 26 (2003) 889-899.
- [10] F.P. Incropera, D.P. De Witt, Introduction to heat transfer, fourth edition, Mcgraw-Hill (2000).
- [11] D.H. Lee, D.K. Yang, K.S. Lee, Frost formation on a cold cylinder surface in cross flow Int. J. of Refrigeration, 27 (2004) 367-374.
- [12] J.M. Coulson, J.F. Richardson, Chemical Engineering, Mcgraw- Hill (1999).
- [13] D.K. Yang, K.S. Lee, S. Song, Modeling for predicting frosting behavior of a fin-tube heat exchanger, Int. J. of Heat and Mass Transfer, 49 (2006) 1472-1479.
- [14] T. Gao, J. Gong, Modeling the airside dynamic behavior of a heat exchanger under frosting conditions, J. of Mechanical Science and Technology, 25 (2011) 2719-2728.
- [15] K. Lenic, A. Trp, B. Frankovic, Unsteady heat and mass transfer during frost formation in a fin-and-tube heat exchanger, Int. J. of Refrigeration, 27 (2011) 367-374.
- [16] A. Claire, S. Howard, Purification by Sublimation, New Jersey (2006).
- [17] A.G. Amelin, Theoretical basis of fog formation at vapor condensation, Moscow: Khimia (1972).
- [18] P.A. Smolkin, A.S. Buynovsky, V.L. Sofronov, Determining the optimal process conditions for volatile metal fluoride desublimation, Chemistry for Sustainable Development, 19 (2011) 417-421.